
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA

Departamento de Proyectos de Ingeniería



**Metodología para la generación de agendas de rotación de
puestos de trabajo desde un enfoque ergonómico mediante
algoritmos evolutivos.**

TESIS DOCTORAL

PRESENTADA POR:

D^a. Sabina Asensio-Cuesta

DIRIGIDA POR:

Dr. D. José Antonio Diego-Más

Dr. D. Jorge Alcaide-Marzal

VALENCIA, Abril 2009

AGRADECIMIENTOS

*Agradezco a José Antonio Diego Más su inestimable colaboración
sin la que la realización de esta tesis no hubiera sido posible.
Gracias también a Jorge Alcaide Marzal por su labor de codirección.
Y por último, quiero expresar mi más sincero agradecimiento al Departamento de
Proyectos de Ingeniería de la Universidad Politécnica de Valencia por la confianza
depositada en mí.*

La próxima Navidad estaré donde el corazón me dicte.

*A Toni, por ser el azote de mis pensamientos,
a Aitana, por inundar de alegría mi vida,
a mi Padre y a mi Madre por enviarme lejos a pesar de su corazón,
a Pedro y a Violeta por no hacer ruido,
y a todos ellos por quererme.*

RESUMEN

Los trastornos músculo-esqueléticos de origen laboral representan un importante problema al que se enfrentan las empresas y las organizaciones encargadas de velar por la salud de los trabajadores. Los factores de riesgo que pueden influir en la aparición de los trastornos músculo-esqueléticos son múltiples y variados, lo cual dificulta el desarrollo de mecanismos que permitan la prevención integral de los trabajadores frente a éste tipo de dolencias. La rotación de puestos de trabajo es una solución de índole administrativa cada vez más extendida como sistema de prevención de los trastornos músculo-esqueléticos. La rotación se presenta como un mecanismo de disminución del tiempo de exposición de los trabajadores a factores de riesgo susceptibles de causar lesiones músculo-esqueléticas. Sin embargo, aspectos como la inclusión en la rotación de puestos críticos que exigen al trabajador picos de esfuerzo, o la exposición combinada a diferentes factores de riesgo derivada de la alternancia entre puestos, podrían repercutir negativamente sobre la salud de los trabajadores. Así pues, un diseño inadecuado de la agenda de rotación puede, incluso, incrementar el riesgo de lesión para algunos de ellos. Por tanto, la generación de agendas de rotación capaces de prevenir los trastornos músculo-esqueléticos supone un problema complejo, debido al elevado número criterios y restricciones que, simultáneamente, es necesario considerar.

En el presente trabajo se ha desarrollado una metodología que dota al planificador de una herramienta sistemática de obtención de agendas de rotación para la prevención de los trastornos músculo-esqueléticos. Dicha metodología supone una guía para el planificador en la consideración de los aspectos fundamentales relacionados con la rotación, al tiempo que explota la capacidad de los Algoritmos Genéticos para resolver problemas de optimización combinatoria, entre los que se encuentra el problema de la generación de agendas de rotación bajo múltiples criterios y restricciones.

RESUM

Els trastorns múscul-esquelètics d'origen laboral representen un important problema a què s'enfronten les empreses i les organitzacions encarregades de vetlar per la salut dels treballadors. Els factors de risc que poden influir en l'aparició dels trastorns múscul-esquelètics són múltiples i variats, la qual cosa dificulta el desenvolupament de mecanismes que permeten la prevenció integral dels treballadors enfront d'este tipus de malalties. La rotació de llocs de treball és una solució d'índole administrativa cada vegada més estesa com a sistema de prevenció dels trastorns múscul-esquelètics. La rotació es presenta com un mecanisme de disminució del temps d'exposició dels treballadors a factors de risc susceptibles de causar lesions múscul-esquelètiques. No obstant, aspectes com la inclusió en la rotació de llocs crítics que exigixen al treballador pics d'esforç, o l'exposició combinada a diferents factors de risc derivada de l'alternança entre llocs, podrien repercutir negativament sobre la salut dels treballadors. Així doncs, un disseny inadequat de l'agenda de rotació pot, inclús, incrementar el risc de lesió per a alguns d'ells. Per tant, la generació d'agendes de rotació capaç de previndre els trastorns múscul-esquelètics suposa un problema complex, a causa de l'elevat número de criteris i restriccions que, simultàniament, és necessari considerar.

En el present treball s'ha desenvolupat una metodologia que dota al planificador d'una ferramenta sistemàtica d'obtenció d'agendes de rotació per a la prevenció dels trastorns múscul-esquelètics. La metodologia suposa una guia per al planificador en la consideració dels aspectes fonamentals relacionats amb la rotació, al mateix temps que explota la capacitat dels Algoritmes Genètics per a resoldre problemes d'optimització combinatòria, entre els que es troba el problema de la generació d'agendes de rotació amb múltiples criteris i restriccions.

ABSTRACT

Work-related musculoskeletal disorders are the most common work-related health problem for enterprise and safety and health care organizations. The development of new mechanism to prevent workers to Work-related musculoskeletal disorders is difficult as a result of their multi-factorial character. Job rotation is an administrative solution more and more extended to prevent Work-related musculoskeletal disorders. Job rotation allows reduce workers exposure time to potential Work-related musculoskeletal risks factors. Nevertheless, the inclusion in the rotation of critical jobs that demand high effort, or the exposition to different risk factors as a result of variation between jobs, could be negative for workers health. An incorrect job rotation schedule design, even, could increments the risk exposure for some of them. Therefore, job rotation schedule development to prevent Work-related musculoskeletal disorders is a complex problem with a high number of criteria and restrictions that, simultaneously, are necessary to consider.

In the present work a methodology has been developed to provide the planner with a systematic tool to obtain job rotation schedules in order to prevent Work-related musculoskeletal disorders. This methodology supposes a guide for the planner in the consideration of the fundamental aspects related to the rotation, and at the same time, exploits the capacity of the Genetic Algorithms to solve combinatorial optimization problems like the problem of job rotation scheduler generation under multiple criteria and restrictions.

ÍNDICE

CAPÍTULO 1

1. OBJETIVOS Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.1. Introducción	3
1.2. Objetivos de la investigación	4
1.3. Metodología y estructura de los contenidos	5

CAPÍTULO 2

2. LA ROTACIÓN DE PUESTO DE TRABAJO.....	9
2.1. Introducción	9
2.2. Definición.....	11
2.3. La rotación de puestos de trabajo como cambio organizativo.....	12
2.3.1 Gestión del cambio organizativo.....	13
2.3.1.1 Fases de la implantación de un modelo organizativo.....	14
2.3.1.2 Tipos de intervenciones organizacionales y su influencia sobre las condiciones laborales	17
2.4. Interacciones entre la organización del trabajo y la ergonomía.....	20
2.5. Principales enfoques de la rotación de puestos de trabajo.....	22
2.5.1 La rotación y el aprendizaje.....	23
2.5.2 La rotación y la productividad	25
2.5.3 La rotación y los trastornos músculo-esqueléticos (TME)	28
2.5.4 La rotación y los factores psicosociales.....	36
2.6. La rotación y la integración de trabajadores.....	38
2.6.1 Influencia de la edad en la rotación de puestos.....	39
2.6.2 Influencia del género en la rotación de puestos.....	40
2.7. Consideraciones para implementar un sistema de rotaciones	41
2.7.1 El número de puestos a rotar.....	41
2.7.2 La frecuencia de la rotación.....	44
2.7.3 El orden de los trabajos a rotar.....	46
2.8. Discusión sobre la rotación.....	47
2.9. Casos de aplicación de la rotación de puestos de trabajo.....	49
2.9.1 La rotación de puestos de trabajo en la industria del automóvil en Europa...49	

2.9.2 La rotación de puestos de trabajo en Estados Unidos en el sector manufacturero.....	51
2.10. Beneficios y limitaciones de la rotación	52

CAPÍTULO 3

3. FACTORES DE RIESGO RELACIONADOS CON LOS TRASTORNOS MÚSCULO-ESQUELÉTICOS.....	59
3.1. Introducción	59
3.2. La magnitud del problema de los TME en el marco socio-económico actual	61
3.3. Clasificación de los TME	65
3.4. Principales lesiones músculo-esqueléticas y su localización.....	66
3.4.1 TME en el cuello y hombros	66
3.4.2 TME en los brazos y el codo.....	66
3.4.3 TME en la mano y la muñeca	67
3.4.4 TME en la columna vertebral	67
3.4.5 TME en los miembros inferiores	68
3.5. TME considerados enfermedades profesionales.....	69
3.6. Factores de riesgo relacionados con los TME.....	72
3.6.1 Factores de riesgo asociados a las distintas partes del cuerpo.....	73
3.6.1.1 Factores de riesgo relacionados con TME en el cuello y cuello-hombros.....	73
3.6.1.2 Factores de riesgo relacionados con TME en los hombros	75
3.6.1.3 Factores de riesgo relacionados con TME en el codo	76
3.6.1.4 Factores de riesgo relacionados con TME en la mano y la muñeca.....	77
3.6.1.5 Factores de riesgo relacionados con TME en la espalda.....	79
3.7. Características individuales del trabajador que influyen en los TME.....	82
3.7.1 La influencia de la edad y la antigüedad laboral en los TME	82
3.7.2 La influencia del género en los TME.....	84
3.7.3 La influencia de determinadas medidas antropométricas en los TME.....	88
3.7.4 La influencia del tabaquismo en los TME	89
3.8. La influencia del frío en los TME	91
3.9. La influencia de los factores psicosociales en los TME	91

CAPÍTULO 4

4. MÉTODOS DE EVALUACIÓN ERGONÓMICA DE PUESTOS DE TRABAJO.....	99
4.1. Introducción	99

4.2. Métodos de evaluación ergonómica para el análisis postural.....	102
4.2.1 El método RULA (Rapid Upper Limb Assessment)	102
4.2.1.1 Aplicación del método	104
4.2.2 El método OWAS (Ovako Working Analysis System).....	118
4.2.2.1 Aplicación del método	118
4.3. Métodos para la evaluación del riesgo derivado de la manipulación manual de cargas.....	127
4.3.1 La ecuación Revisada de NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health).	127
4.3.1.1 Localización Estándar de Levantamiento.....	129
4.3.1.2 Limitaciones del método	129
4.3.1.3 Aplicación del método	130
4.3.2 Las tablas de Snook y Ciriello.....	139
4.3.2.1 Observaciones al método	142
4.4. Métodos de evaluación ergonómica para el análisis de la repetitividad	142
4.4.1 El método JSI (Job Strain Index)	143
4.4.1.1 La aplicación del método	144
4.4.2 El método Check List OCRA.....	149
4.4.2.1 Características del método Check List OCRA	151
4.4.2.2 Aplicación del método Check List OCRA.....	153
4.4.3 El método Sue Rodgers.....	169
4.4.3.1 Valoración del nivel de esfuerzo	171
4.4.3.2 Valoración de la duración del Esfuerzo.....	173
4.4.3.3 Valoración de la frecuencia del Esfuerzo	173
4.4.3.4 Obtención de la severidad asociada a cada parte del cuerpo.....	174
4.5. Métodos para la evaluación de factores psicosociales.....	175
4.6. Métodos para la evaluación de múltiples factores de riesgo	175
4.6.1 El método LEST.....	176

CAPÍTULO 5

5. METAHEURÍSTICAS PARA LA GENERACIÓN DE AGENDAS DE ROTACIÓN DE PUESTOS DE TRABAJO	183
5.1. Introducción	183
5.2. Métodos heurísticos	184
5.2.1.1 Aplicación de heurísticas para la obtención de agendas de rotación.....	186
5.3. Metaheurísticas: definición y clasificación	192

5.3.1 Recocido Simulado (Simulated Annealing).....	193
5.3.1.1 Definición general	193
5.3.1.2 La propuesta de Kirkpatrick, Gelatt y Vecchi	195
5.3.1.3 Estructura del algoritmo	196
5.3.1.4 Aplicación del recocido simulado a la obtención de agendas de rotación	203
5.3.2 Búsqueda Tabú (Tabu Search).....	207
5.3.2.1 Definición general	207
5.3.2.2 La lista tabú y los criterios de aspiración.....	210
5.3.2.3 Definición del entorno y creación de la lista de candidatos	214
5.3.2.4 Tipos de memoria; estrategias de intensificación y diversificación	214
5.3.3 Computación evolutiva	219
5.3.3.1 Introducción	219
5.3.3.2 Dualidad genotipo / fenotipo	221
5.3.3.3 Técnicas de computación evolutiva	223
5.3.4 Colonias de hormigas	229
5.3.4.1 Aplicación de los algoritmos de hormigas a la obtención de agendas de rotación	233

CAPÍTULO 6

6. ALGORITMOS GENÉTICOS Y SU APLICACIÓN A LA GENERACIÓN DE AGENDAS DE ROTACIÓN	239
6.1. Introducción	239
6.2. Terminología y analogías planteadas	241
6.3. Estructura básica de un algoritmo genético.....	243
6.3.1 Condiciones para una correcta implementación de los algoritmos genéticos	244
6.4. Base teórica de los algoritmos genéticos	245
6.4.1 Concepto de esquema.....	245
6.4.2 Teorema fundamental de los algoritmos genéticos. Teorema del esquema o teorema de Holland	246
6.4.3 El paralelismo implícito de los algoritmos genéticos.....	250
6.4.4 Limitaciones del algoritmo genético básico y de su base teórica.....	251
6.5. Codificación de las soluciones.....	253
6.6. Creación de la población inicial	255
6.7. La función de evaluación y la función de aptitud	256

6.7.1 Desplazamiento y escalado	257
6.7.1.1 El escalado lineal	257
6.7.1.2 El truncado σ	258
6.7.1.3 El escalado potencial o ley potencial del escalado	258
6.8. Los operadores genéticos	259
6.8.1 El proceso de selección y reemplazo	259
6.8.1.1 Tipos de procesos de selección	260
6.8.1.2 Procesos de reemplazo	263
6.8.1.3 Algoritmos generacionales y de estado estacionario	265
6.8.1.4 La edad de los individuos	266
6.8.2 Operadores genéticos; efecto de los operadores.	268
6.8.2.1 El operador cruce	270
6.8.2.2 El operador mutación	275
6.8.2.3 El operador inversión	276
6.9. Estrategias frente a los individuos no factibles	278
6.9.1 Descarte o penalización.....	279
6.9.1.1 Funciones de penalización adaptativas	280
6.9.2 Reparación	281
6.9.3 Codificación cerrada	282
6.10. Parametrización de los algoritmos genéticos	283
6.10.1.1 Meta-algoritmos genéticos para la determinación de parámetros de ejecución.....	284
6.10.2 Parametrización adaptativa	285
6.11. Hibridación de los algoritmos genéticos	287
6.11.1 Combinación de metaheurísticas en algoritmos híbridos.....	289
6.12. Algoritmos genéticos aplicados al problema de la rotación de puestos.....	289
6.12.1 La propuesta de Carnahan	290
6.12.1.1 Un algoritmo genético para el diseño de agendas de rotación que minimicen el riesgo por manipulación de cargas	291
6.12.1.2 Aplicación de los Algoritmos Genéticos al problema del diseño de tareas de levantamiento manual de cargas	299
6.12.2 La propuesta de Nantahvanij y Kullpattaranirun	300
6.12.2.1 Aplicación de un algoritmo genético para la generación de rotaciones que reduzcan la exposición diaria al ruido.	300

CAPÍTULO 7

7. METODOLOGÍA PROPUESTA	311
7.1. Introducción	311
7.2. Descripción general de la metodología propuesta.....	315
7.3. Fase 1: detección de la necesidad	318
7.4. Fase 2: obtención del apoyo de la dirección y de los trabajadores	321
7.4.1 Creación del equipo de seguimiento.....	322
7.5. Fase 3: selección de los puestos a rotar	323
7.5.1 Número de puestos a rotar	326
7.6. Fase 4: selección de los trabajadores a rotar	327
7.7. Fase 5: elección de los criterios de generación de las agenda de rotación.....	329
7.8. Fase 6: definición y valoración de indicadores o ítems	330
7.8.1 Métodos de evaluación para la medición de los factores de riesgo.....	331
7.9. Fase 7: definición y valoración de capacidades	333
7.10. Fase 8: recopilación de asignaciones vetadas y preferencias de los trabajadores.....	334
7.11. Fase 9: determinación del número y duración de las rotaciones y las pausas	335
7.12. Fase 10: cálculo de agendas de rotación mediante la aplicación de un AG...338	
7.12.1 Definición del problema	339
7.12.2 Descripción del AG	339
7.12.3 Codificación de las agendas de rotación	341
7.12.4 Formación de la población inicial de soluciones	343
7.12.5 Evaluación de la adaptación de los individuos de la población al medio ...344	
7.12.5.1 Fase 1: actualización del valor de los ítems de los trabajadores	344
7.12.5.2 Fase 2: evaluación de la aptitud o fitness de cada individuo	348
7.12.6 Aplicación de penalizaciones.....	349
7.12.7 El proceso de Selección de individuos para la siguiente generación.....	350
7.12.8 El proceso de Reemplazo de individuos entre generaciones	352
7.12.9 El proceso de Reproducción o Cruce.	353
7.12.10 El proceso de Mutación	354
7.12.11 Proceso de intensificación de la búsqueda.....	355
7.13. Fase 11: Implantación de la agenda de rotación y seguimiento	359
7.13.1 Definición de indicadores para el análisis de los resultados de la implantación.....	361

CAPÍTULO 8

8. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA	369
8.1. Introducción	369
8.2. Descripción del caso de estudio	369
8.2.1 Fase 1: detección de la necesidad	370
8.2.2 Fase 2: obtención del apoyo de la dirección y de los trabajadores.....	370
8.2.3 Fase 3: selección de los puestos a rotar.....	370
8.2.4 Fase 4: selección de los trabajadores a rotar	371
8.2.5 Fase 5: elección de los criterios de generación de las agenda de rotación .	371
8.2.6 Fase 6: definición y valoración de los indicadores o ítems	372
8.2.6.1 Valoración de los ítems de movimiento para los puestos	373
8.2.6.2 Valoración de los ítems de movimiento para los trabajadores	374
8.2.7 Fase 7: definición y valoración de capacidades.....	375
8.2.7.1 Valoración de los ítems correspondientes a las Capacidades Globales, Psíquicas y de Comunicación para los puestos.....	376
8.2.7.2 Valoración de los ítems correspondientes a las Capacidades Globales, Psíquicas y de Comunicación para los trabajadores	377
8.2.8 Fase 8: Recopilación de asignaciones vetadas y preferencias de los trabajadores.....	378
8.2.9 Análisis de las valoraciones de los puestos y trabajadores	380
8.2.10 Fase 9: determinación del número y duración de las rotaciones y las pausas	381
8.3. Fase 10: cálculo de agendas de rotación mediante la aplicación del AG	381
8.3.1 Parametrización del AG	382
8.3.2 Parámetros del AG dependientes de las especificaciones del problema o <i>inputs</i>	382
8.3.3 Parámetros del AG determinados experimentalmente	384
8.3.4 Descripción de los experimentos	385
8.3.5 Exposición y análisis de los resultados de los experimentos.....	388
8.3.6 Efecto del parámetro de uniformidad (u) sobre los resultados del AG.....	394
8.3.7 Efecto de la consideración de las preferencias de los trabajadores	397
8.3.8 Efecto de la variación del número, duración y distribución de las pausas sobre los resultado del AG	399
8.3.9 Análisis de los resultados proporcionados por el AG	405

CAPÍTULO 9

9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	417
9.1. Conclusiones	417

9.2. Trabajos futuros.....	419
----------------------------	-----

CAPÍTULO 10

10. RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS	423
10.1. Experimentos de parametrización (E ₁ a E ₁₃)	423
10.1.1 Parámetros del AG dependientes de las especificaciones del problema empleados en los experimentos E ₁ a E ₁₃	423
10.1.2 Asignaciones vetadas correspondientes a las limitaciones de los trabajadores empleadas en los experimentos E ₁ a E ₁₃	423
10.1.3 Experimento E ₁	424
10.1.4 Experimento E ₂	426
10.1.5 Experimento E ₃	428
10.1.6 Experimento E ₄	430
10.1.7 Experimento E ₅	432
10.1.8 Experimento E ₆	434
10.1.9 Experimento E ₇	436
10.1.10 Experimento E ₈	438
10.1.11 Experimento E ₉	440
10.1.12 Experimento E ₁₀	442
10.1.13 Experimento E ₁₁	444
10.1.14 Experimento E ₁₂	446
10.1.15 Análisis del efecto del parámetro de uniformidad u (E ₁₃).....	448
10.2. Análisis del efecto de la consideración de las preferencias de los trabajadores (E ₁₄).....	450
10.2.1 Parámetros del AG dependientes de las especificaciones del problema empleados en E ₁₄	450
10.2.2 Asignaciones vetadas (limitaciones más preferencias) en E ₁₄	451
10.3. Análisis del efecto de la duración y distribución de las pausas (E ₁₅ a E ₂₁).....	453
10.3.1 Parámetros del AG dependientes de las especificaciones del problema o inputs empleados en E ₁₅ a E ₂₂	453
10.3.2 Asignaciones vetadas (limitaciones más preferencias) empleadas en los experimentos E ₁₅ a E ₂₂	454
10.3.3 Parámetros de ejecución para los experimentos E ₁₅ a E ₂₁	454
10.3.4 Experimento E ₁₅	455
10.3.5 Experimento E ₁₆	456
10.3.6 Experimento E ₁₇	457
10.3.7 Experimento E ₁₈	459

10.3.8 Experimento E ₁₉	461
10.3.9 Experimento E ₂₀	463
10.3.10 Experimento E ₂₁	464
10.3.11 Análisis del efecto del aumento del parámetro de uniformidad (E ₂₂).....	466

CAPÍTULO 11

11. IMPLEMENTACIÓN INFORMÁTICA DEL AG PARA LA GENERACIÓN DE AGENDAS DE ROTACIÓN.....	471
11.1. Introducción.....	471
11.2. Gestión de estudios.....	472
11.3. Introducción de datos.....	473
11.3.1 Introducción de los ítems ergonómicos.....	474
11.3.2 Introducción de las secciones.....	475
11.3.3 Introducción de los puestos.....	475
11.3.4 Introducción de los trabajadores.....	476
11.4. Visualización y modificación de los datos introducidos.....	477
11.4.1 Visualización y modificación de las secciones.....	477
11.4.2 Visualización y modificación de los puestos.....	477
11.4.3 Visualización y modificación de los trabajadores.....	478
11.5. Introducción de horarios.....	479
11.6. Introducción de penalizaciones y opciones de ejecución.....	480
11.7. Generación de la agenda de rotación.....	481
11.8. Visualización de resultados.....	483
11.8.1 Visualización por Tabla de Asignación.....	484
11.8.2 Visualización gráfica de la solución.....	485
11.8.3 Visualización de la Función acumulativa por trabajador.....	487
11.9. Generación de informes.....	488

CAPÍTULO 12

12. BIBLIOGRAFÍA.....	493
-----------------------	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

Figura 2.1: Factores derivados de la organización del trabajo que influyen en los desórdenes músculo-esqueléticos de origen laboral (WRMDs, Work-related musculoskeletal disorders)(Adaptado de [Haims et al., 02]).....	20
Figura 2.2: Un modelo ilustrativo de las interacciones significativas entre la organización del trabajo y la ergonomía (flechas de 1 a 5).....	22
Figura 2.3: Diagrama lógico para el diseño de sistemas de rotaciones con el objetivo de prevenir los TME (Adaptado de [Aptel et al., 08]).....	35
Figura 2.4: Sistema de rotaciones en la línea B según el orden de rotación P11-P02 (Adaptado de [Aptel et al., 08])	42
Figura 2.5: Plan de rotaciones ergonómico (Adaptado de [Sánchez-Fajardo, 05]) ..	44
Figura 2.6: Estudio con electromiógrafo de tres estaciones de trabajo de ensamblado de indicadores.....	46
Figura 2.7: Número de trabajos diferentes en los que cada ensamblador debe ser competente para cada una de las plantas analizadas (Adaptado de [Freiboth et al., 97]).....	50

CAPÍTULO 3

Figura 3.1: Porcentajes de localización de los TME en las diferentes partes del cuerpo (Adaptado de [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 07])	62
Figura 3.2: Hernia discal (fuente [González-Maestre, 08])	68

CAPÍTULO 4

Figura 4.1: Esquema de reducción del riesgo mediante el rediseño de puestos y la rotación al actuar sobre dos de las dimensiones definidas por [Winkel et al., 92]: amplitud y duración.....	99
Figura 4.2: Medición de ángulo incorrecta frente a una medición correcta (en verdadera magnitud).....	103
Figura 4.3: División del cuerpo en el lado derecho y el lado izquierdo por el plano sagital.....	104
Figura 4.4: Grupos de evaluación en el método Rula.....	104
Figura 4.5: Posiciones del brazo.....	106
Figura 4.6: Eje de referencia para la medición del ángulo de los brazos.....	106
Figura 4.7: Posiciones que modifican la puntuación del brazo.....	107
Figura 4.8: Posiciones del antebrazo.....	107
Figura 4.9: Referencia para la medición del ángulo del antebrazo.....	108
Figura 4.10: Posiciones que modifican la puntuación del antebrazo.....	109
Figura 4.11: Posiciones de la muñeca.....	109
Figura 4.12: Modificación de la puntuación de la muñeca.....	110
Figura 4.13: Giro de la muñeca.....	110
Figura 4.14: Posiciones del cuello.....	111
Figura 4.15: Posiciones que modifican la puntuación del cuello.....	111
Figura 4.16: Posiciones del tronco.....	112
Figura 4.17: Posiciones que modifican la puntuación del tronco.....	112
Figura 4.18: Posición de las piernas.....	114
Figura 4.19: Flujo de obtención de puntuaciones en el método RULA.....	117

Figura 4.20: Esquema de codificación de las posturas observadas (Código de postura).....	120
Figura 4.21: Posición estándar de levantamiento.....	129
Figura 4.22: Medición del Ángulo de Asimetría.....	132
Figura 4.23: Árbol de Decisión para la determinación del tipo de agarre (Adaptado de [Waters et al., 94]).....	138
Figura 4.24: Ejemplos de tipo de agarre.....	138
Figura 4.25: Escala de color para el riesgo asociado al Índice Check List Ocrá.....	165

CAPÍTULO 5

Figura 5.1: Diagrama de flujo de un método heurístico para minimizar el número total de días perdidos por lesiones de espalda (adaptado de [Thammaphornphilas et al., 07]).....	191
Figura 5.2: Escape de un óptimo local mediante la aceptación de configuraciones de mayor energía en el "Simulated annealing".....	189
Figura 5.3: Simulated annealing aplicado a un problema de optimización (adaptado de [Santamarina, 95]).....	198
Figura 5.4: pseudocódigo del algoritmo de SA propuesto por [Seçkiner et al., 07a].....	200
Figura 5.5: Ciclos en la búsqueda tabú; la lista tabú impide que las situaciones a y b se alternen indefinidamente.....	202
Figura 5.6: Diagrama de flujo de búsqueda tabú; memoria a corto plazo. Adaptado de [Youssef et al., 01].....	202
Figura 5.7: Actualización de la lista tabú.....	203
Figura 5.8: Estrategia de intensificación.....	209
Figura 5.9: Estrategia de diversificación.....	210
Figura 5.10: Path Relinking en proceso de intensificación.....	211
Figura 5.11: Path Relinking en proceso de diversificación.....	211
Figura 5.12 Esquema general de un Algoritmo Evolutivo.....	214
Figura 5.13: Pleitropía (a) y poligenia (b).....	215
Figura 5.14: Relación entre el espacio de los genotipos y el de los fenotipos. Topografía de la función objetivo.....	216
Figura 5.15: a) Las hormigas en su búsqueda de alimento topan con un obstáculo. b) De manera aleatoria las hormigas deciden el camino a seguir; en su camino dejan un rastro de feromonas. c) las hormigas siguen el camino más corto debido al rastro de feromonas más intenso. (Adaptado de [Dorigo et al., 97]).....	225
Figura 5.16: pseudocódigo del algoritmo de colonia de hormigas propuesto por [Seçkiner et al., 07b].....	235

CAPÍTULO 6

Figura 2.1: Estructura celular.....	231
Figura 6.2: Analogías en los algoritmos genéticos, donde cada Pi (gen) corresponde a un puesto. Adaptado de [Diego-Mas, 06].....	242
Figura 6.3: Esquema general de un algoritmo genético.....	235
Figura 6.4: Posibles puntos de ruptura de un esquema. Adaptado de [Santamarina, 95].....	239
Figura 6.5: Los dieciséis esquemas representativos de una cadena de longitud cuatro.....	242
Figura 6.6: Selección por Ruleta.....	253
Figura 6.7: Probabilidades de selección con (a) y sin (b) Rank Selection.....	254
Figura 6.8: Proceso de selección-reemplazo en un SGA (adaptado de [Pérez, 04]).....	256
Figura 6.9: Esquema de la aplicación de una estrategia elitista.....	257

Figura 6.10: Esquema de un algoritmo genético con edades.....	260
Figura 6.11: Efectos intensificadores y diversificadores de los operadores cruce y mutación.....	262
Figura 6.12: Cruce monopunto.....	263
Figura 6.13: Ejemplo de esquema no heredable mediante cruce monopunto.....	263
Figura 6.14: Cruce bipunto.....	263
Figura 6.15: Generación de uno de los descendientes en un cruce uniforme.....	264
Figura 6.16: Actuación del operador inversión.....	269
Figura 6.17: Cadenas representativas de individuos no factibles.....	270
Figura 6.18: Resolución de infactibilidades mediante remapping fijo.....	273
Figura 6.19: Meta-algoritmo genético. Los individuos de la población son, algoritmos genéticos.....	277
Figura 6.20: Emulación del gradiente. El individuo original es sustituido por aquel que, obtenido variando el valor de un bit, proporcione un mayor descenso (ascenso) de la aptitud.....	281
Figura 6.21: Matriz de 32 caracteres para representar una agenda de rotación de puestos (fuente [Carnahan et al., 00]).....	292
Figura 6.22: Reproducción en la que dos soluciones generan una solución descendiente (X= posición de cruce seleccionada aleatoriamente entre los dos padres) (fuente [Carnahan et al., 00]).....	295
Figura 6.23: Modelo general de programación entera (fuente [Carnahan et al., 00]).....	296
La Figura 6.24: Mejora de la aptitud de las sub-poblaciones a los largo de las generaciones (fuente [Carnahan et al., 00]).....	297

CAPÍTULO 7

Figura 7.1: Esquema general de la metodología propuesta para la generación de agendas de rotación.....	318
Figura 7.2: Esquema para la selección de los puestos a rotar.....	324
Figura 7.3: Diagrama general de flujo del AG.....	341
Figura 7.4: Codificación de una solución para $nrot=4$ y $nwor=18$	342
Figura 7.5: Ejemplo de matriz no factible para $nrot=2$ y $nwor=2$	342
Figura 7.6: Codificación de la población de soluciones con n individuos.....	343
Figura 7.7: Pseudocódigo para la generación de la población inicial de soluciones factibles.....	344
Figura 7.8: Ejemplo de evolución del valor de los ítems para un trabajador durante 4 rotaciones y una pausa para comer obtenidas mediante la Ecuación 2.....	348
Figura 7.9: Analogía de la Selección por Ruleta.....	335
Figura 7.10: Proceso de reemplazo al vuelo o inmediato en el AG.....	353
Figura 7.12: Generación de dos individuos a partir del cruce de dos progenitores.....	354
Figura 7.14: Ampliación del operador mutación a una solución con $im=1$	355
Figura 7.15: Ampliación del operador mutación a una solución con $im=3$	355
Figura 7.16: Movimientos para la obtención de soluciones vecinas a partir de una solución actual.....	356
Figura 7.17: Procedimiento de intensificación local de la búsqueda.....	342
Figura 7.18: Diagrama general del flujo del AG con fase de búsqueda local.....	359
Figura 7.19: Ejemplo de formato de ficha elaborado por el departamento de ergonomía de Ford (España) [Sánchez-Fajardo, 05].....	361

CAPÍTULO 8

Figura 8.1: Variación de los niveles de riesgo de los ítems de movimiento de los puestos.....	371
Figura 8.2: Duración y distribución de las rotaciones y las pausas.....	381

Figura 8.3: Valor de la aptitud media, máxima y mínima alcanzada en los experimentos E ₁ al E ₁₂ y generación media de la mejor solución alcanzada.	389
Figura 8.4: valor de la mejor aptitud a lo largo de las generaciones en el experimento E ₁	390
Figura 8.5: valor medio de las mejores aptitudes a lo largo de las generaciones en el experimento E ₁	390
Figura 8.6: valor de la mejor aptitud a lo largo de las generaciones en el experimento E ₂	391
Figura 8.7: Variación de las mejores aptitudes al modificar los valores de los operadores genéticos.....	392
Figura 8.8: Costes de las asignaciones de los trabajadores a los puestos de las mejores soluciones obtenidas en E ₂ y E ₁₃	396
Figura 8.9: Costes de las asignaciones de los trabajadores de las mejores soluciones obtenidas en E ₂ , E ₁₃ y E ₁₄	398
Figura 8.10: Representación gráfica de la distribución y duración de las pausas en los experimentos E ₁₅ a E ₂₀	400
Figura 8.11: Representación gráfica de la variación de las aptitudes mínimas alcanzadas para diferentes distribución y duración de las pausas en los experimentos E ₁₅ a E ₂₀	403
Figura 8.12: Costes de las asignaciones de los trabajadores de las mejores soluciones obtenidas en E ₂ , E ₁₆ y E ₂₁	404
Figura 8.13: Evolución de la aptitud a lo largo de las generaciones en el experimento E ₁₄	406
Figura 8.14: Tiempos de ejecución de los experimentos E ₁ a E ₂₂	406
Figura 8.15: Evolución de los valores de los ítems del trabajador 12 a lo largo de las rotaciones en la solución obtenida en E ₁₄ en la ejecución 4.....	413
Figura 8.16: Evolución de los valores de los ítems del trabajador 1 a lo largo de las rotaciones en la solución obtenida en E ₁₄ en la ejecución 4.....	413

CAPÍTULO 11

Figura 11.1: Interfaz principal de la aplicación informática MORE.....	472
Figura 11.2: Ventana para la gestión de datos.....	474
Figura 11.3: Interface de introducción de ítems ergonómicos.....	474
Figura 11.4: Formulario de introducción de las Secciones.....	475
Figura 11.5: Interface de introducción de puestos.....	476
Figura 11.6: Interface de introducción de trabajadores.....	476
Figura 11.7: Formulario de consulta de las secciones.....	477
Figura 11.8: Formulario de consulta de los puestos y acceso a los ítems ergonómicos del puesto.....	478
Figura 11.9: Formulario de consulta de los trabajadores.....	479
Figura 11.10: Formulario de introducción del número y duración de las rotaciones y pausas.....	480
Figura 11.11: Formulario de introducción de penalizaciones y opciones de ejecución.....	481
Figura 11.12: Formulario para el cálculo de la Agenda de rotación.....	483
Figura 11.13: Ventana de selección de la opción de visualización.....	484
Figura 11.14: Ventana de la solución en forma de matriz.....	484
Figura 11.15: Opciones de optimización de la solución obtenida.....	485
Figura 11.16: Pantalla de visualización gráfica de la solución.....	486
Figura 11.17: Modificación manual de la solución en la pantalla de visualización gráfica.....	487
Figura 11.18: Pantalla de visualización de la Función acumulativa por trabajador.....	488
Figura 11.19: Ventana de selección de informes.....	488
Figura 11.20: Informe de Valoración de la asignación.....	489

Figura 11.21: Informe de Asignación (por puesto).....	489
---	-----

ÍNDICE DE TABLAS

CAPÍTULO 2

Tabla 2.1: Tipos y ejemplos de intervenciones organizacionales del trabajo (fuente [Haims et al., 02]).	18
Tabla 2.2: Porcentajes de utilización de diversas clases de formación no formal en 1993 y 1999, en empresas con inversión en formación (fuente [Vanhoven et al., 01]).	24
Tabla 2.3: Clasificación de los factores psicosociales (fuente [Gurrea-Gracia et al., 03]).	37
Tabla 2.4: Ejemplo de agenda de rotación para las tareas de levantamiento A, B, C y D organizada por percentiles que representan las capacidades de levantamiento (fuente [Carnahan et al., 00]).	41
Tabla 2.5: El efecto de la rotación en las exigencias de trabajo según el número de trabajadores implicados (fuente [Frazer, 04]).	43
Tabla 2.6: Tabla resumen de los beneficios de la rotación y sus referencias bibliográficas (Parte I).	53
Tabla 2.7: Tabla resumen de los beneficios de la rotación y sus referencias bibliográficas (Parte II).	54
Tabla 2.8: Tabla resumen de las limitaciones de la rotación y sus referencias bibliográficas.	55

CAPÍTULO 3

Tabla 3.1: Porcentaje de trabajadores que informa sobre diferentes síntomas en Europa (fuente [Eurofound, 05]).	62
Tabla 3.2: Accidentes de trabajo y enfermedades profesionales (fuente [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 05]).	63
Tabla 3.3: Listado de enfermedades profesionales aprobado en el REAL DECRETO 1299/2006, Parte I (fuente [Ministerio de Trabajos y Asuntos Sociales., 06]).	69
Tabla 3.4: Continuación del Listado de enfermedades profesionales aprobado en el REAL DECRETO 1299/2006, Parte II (fuente [Ministerio de Trabajos y Asuntos Sociales., 06]).	70
Tabla 3.5: Continuación del Listado de enfermedades profesionales aprobado en el REAL DECRETO 1299/2006 ,Parte III (fuente [Ministerio de Trabajos y Asuntos Sociales., 06]).	71
Tabla 3.6 Factores que potencialmente contribuyen al desarrollo de TME ([Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 07]).	72
Tabla 3.7: Riesgos relacionados con los TME ordenados por los expertos de mayor a menor relevancia (Adaptado de [European Agency for Safety and Health at Work, 05]).	73
Tabla 3.8: Factores de riesgo físico más importantes y porcentaje de trabajadores expuestos (fuente[Díez-de-Ulzurrun et al., 07]).	73
Tabla 3.9: Grado de evidencia de la relación entre los TME en el cuello y la zona del cuello-hombros y los factores de riesgo: repetición, fuerza, postura y vibración (adaptado de [Bernard, 97]).	75
Tabla 3.10: Grado de evidencia de la relación entre los TME en los hombros y los factores de riesgo: repetición, fuerza, postura y vibración (adaptado de [Bernard, 97]).	76

Tabla 3.11: Grado de evidencia de la relación entre los TME en el codo (epicondilitis) y los factores de riesgo: repetición, fuerza, postura y combinación de factores (adaptado de [Bernard, 97]).....	77
Tabla 3.12: Grado de evidencia de la relación del STC y los factores de riesgo: repetición, fuerza, postura, vibraciones y combinación de factores (adaptado de [Bernard, 97]).....	78
Tabla 3.13: Grado de evidencia de la relación de la tendinitis y los factores de riesgo: repetición, fuerza, postura y combinación de factores (adaptado de [Bernard, 97])..	79
Tabla 3.14: Grado de evidencia de la relación de los TME en la espalda y factores de riesgos como: el levantamiento o los movimientos energéticos, las posturas forzadas, el trabajo físico pesado, las vibraciones en todo el cuerpo y las posturas estáticas combinación de factores (adaptado de [Bernard, 97]).....	81
Tabla 3.15: Diferencias de género en TME (fuente [Vega-Martínez, 06])	84
Tabla 3.16: Tabla resumen de los factores psicosociales que pueden afectar a las diferentes partes del cuerpo (Adaptado de [Devereux et al., 04]).....	93

CAPÍTULO 4

Tabla 4.1: Puntuación del brazo (fuente [McAtamney et al., 93]).....	106
Tabla 4.2: Modificaciones sobre la puntuación del brazo (fuente [McAtamney et al., 93])	107
Tabla 4.3: Puntuación del antebrazo (fuente [McAtamney et al., 93]).....	107
Tabla 4.4: Modificación de la puntuación del antebrazo (fuente [McAtamney et al., 93]).....	109
Tabla 4.5: Puntuación de la muñeca (fuente [McAtamney et al., 93]).....	109
Tabla 4.6: Puntuación del giro de la muñeca (fuente [McAtamney et al., 93]).....	110
Tabla 4.7: Puntuación del giro de la muñeca (fuente [McAtamney et al., 93]).....	110
Tabla 4.8: Puntuación del cuello (fuente [McAtamney et al., 93]).....	111
Tabla 4.9: Modificación de la puntuación del cuello (fuente [McAtamney et al., 93]).....	111
Tabla 4.10: Puntuación del tronco (fuente [McAtamney et al., 93]).....	112
Tabla 4.11: Modificación de la puntuación del tronco (fuente [McAtamney et al., 93]).....	112
Tabla 4.12: Puntuación de las piernas (fuente [McAtamney et al., 93]).....	114
Tabla 4.13: Puntuación global para el grupo A (fuente [McAtamney et al., 93]).....	115
Tabla 4.14: Puntuación global para el grupo B (fuente [McAtamney et al., 93]).....	115
Tabla 4.15: Puntuación para la actividad muscular y las fuerzas ejercida (fuente [McAtamney et al., 93])s.....	116
Tabla 4.16: Puntuación final (fuente [McAtamney et al., 93]).....	116
Tabla 4.17: Niveles de actuación según la puntuación final obtenida (fuente [McAtamney et al., 93]).....	118
Tabla 4.18: Codificación de las posiciones de la espalda (Adaptado de fuente [Karhu et al., 77]).....	121
Tabla 4.19. Codificación de las posiciones de los brazos (Adaptado de fuente [Karhu et al., 77]).....	122
Tabla 4.20: Codificación de las posiciones de las piernas (Adaptado de fuente [Karhu et al., 77]).....	123
Tabla 4.21: Codificación de las cargas y fuerzas soportadas (Adaptado de fuente [Karhu et al., 77]).....	123
Tabla 4.22: Ejemplo de codificación de fases.....	123
Tabla 4.23: Tabla de Categorías de Riesgo y Acciones correctivas (Adaptado de fuente [Karhu et al., 77]).....	125
Tabla 4.24: Tabla de clasificación de las Categorías de Riesgo de los "Códigos de postura" (Adaptado de fuente [Karhu et al., 77]).....	125

Tabla 4.25: Tabla de clasificación de las Categorías de Riesgo de las posiciones del cuerpo según su frecuencia relativa (Adaptado de fuente [Karhu et al., 77])..	126
Tabla 4.26: Cálculo del Factor de Frecuencia	137
Tabla 4.27: Cálculo de la duración de la tarea	137
Tabla 4.28: Cálculo del factor de agarre.....	138
Tabla 4.29: Datos necesarios para la consulta de las tablas de elevación y descarga de [Snook et al., 91].....	140
Tabla 4.30: Datos necesarios para la consulta de las tablas de empuje y arrastre de [Snook et al., 91].....	141
Tabla 4.31: Datos necesarios para la consulta de la tabla de transporte de [Snook et al., 91].....	141
Tabla 4.32: Casos de corrección de los pesos tabulados en [Snook et al., 91].....	141
Tabla 4.33: Tabla de valoración de la intensidad del esfuerzo (adaptado de [Moore et al., 95])	145
Tabla 4.34: Tabla de valoración del porcentaje de duración del esfuerzo (fuente [Moore et al., 95])	146
Tabla 4.35: Tabla de valoración de los esfuerzos por minuto (fuente [Moore et al., 95])	147
Tabla 4.36: Tabla de valoración de la posición de la mano (fuente [Moore et al., 95])	147
Tabla 4.37: Tabla de valoración de la velocidad del trabajo (fuente [Moore et al., 95])	147
Tabla 4.38: Tabla de valoración de la duración de la tarea por día (fuente [Moore et al., 95])	148
Tabla 4.39: Tabla de valoración del multiplicador Intensidad del esfuerzo(fuente [Moore et al., 95])	148
Tabla 4.40: Tabla de valoración del multiplicador Intensidad del esfuerzo (fuente [Moore et al., 95])	148
Tabla 4.41: Tabla de valoración del multiplicador Esfuerzo por minuto (fuente [Moore et al., 95])	148
Tabla 4.42: Tabla de valoración del multiplicador Postura de muñeca (fuente [Moore et al., 95])	148
Tabla 4.43: Tabla de valoración del multiplicador Velocidad de trabajo (fuente [Moore et al., 95])	149
Tabla 4.44: Tabla de valoración del multiplicador Duración por día (fuente [Moore et al., 95])	149
Tabla 4.45: Tabla para la evaluación de la duración neta de la tarea repetitiva y del ciclo (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)])..	155
Tabla 4.46: Tabla de puntuación del factor de recuperación (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).....	157
Tabla 4.47: Tabla de puntuación del factor de frecuencias para acciones técnicas dinámicas (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).....	158
Tabla 4.48: Tabla de puntuación del factor de frecuencias para acciones técnicas estáticas (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).....	158
Tabla 4.49: Ejemplos de acciones técnicas (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).....	159
Tabla 4.50: Escala de Borg CR-10 (fuente [Borg, 98])	159
Tabla 4.51: Puntuación del factor de fuerza con fuerza moderada (3-4 puntos en la escala de Borg) (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).....	160

Tabla 4.52: Puntuación del factor de fuerza con fuerza casi máxima (8 puntos en la escala de Borg) (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).	160
Tabla 4.53: Puntuación del factor de fuerza con fuerza intensa (8 puntos en la escala de Borg) (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).	160
Tabla 4.54: Puntuación del factor de postura para el HOMBRO (fuente [Colombini et al., 02]).	161
Tabla 4.55: Puntuación del factor de postura para el CODO (fuente [Colombini et al., 02]).	162
Tabla 4.56: Puntuación del factor de postura para la MUÑECA (fuente [Colombini et al., 02]).	162
Tabla 4.57: Tipos de AGARRE (fuente [Colombini et al., 02]).	162
Tabla 4.58: Puntuación del factor de postura para el AGARRE (fuente [Colombini et al., 02]).	162
Tabla 4.59: Puntuación de los movimientos estereotipados (fuente [Colombini et al., 02]).	162
Tabla 4.60: Puntuación de los factores adicionales (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).	163
Tabla 4.61: Puntuación del ritmo de trabajo (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).	163
Tabla 4.62: Puntuación para el multiplicador de duración neta del movimiento repetitivo (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).	164
Tabla 4.63: Tabla de clasificación del Índice Check List OCRA (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).	165
Tabla 4.64: Formulario para la aplicación del método Sue Rodgers.	171
Tabla 4.65: Tabla de asignación de prioridad en función de los valores de esfuerzo-duración-frecuencia.	171
Tabla 4.66: Descripción de niveles de esfuerzo para cada grupo muscular.	172
Tabla 4.67: Descripción de niveles de esfuerzo para los grupos mayores de músculos.	173
Tabla 4.68: Valoración de la duración del esfuerzo.	173
Tabla 4.69: Valoración de la frecuencia del esfuerzo.	174
Tabla 4.70: Ejemplo de aplicación de método Sue Rodgers para la evaluación de un puesto de trabajo.	174
Tabla 4.71: Factores de riesgo analizados por los métodos generalista RENAULT, FAGOR, ANACT y EWA (fuentes [Mondelo et al., 01; Dalmau-Pons et al., 08]).	176
Tabla 4.72: Dimensiones y variables consideradas en la implementación del método.	177
Tabla 4.73: Sistema de puntuación del método LEST.	177
Tabla 4.74: Datos requeridos por el método LEST para la evaluación de la dimensión Carga Física.	178
Tabla 4.75: Datos requeridos por el método LEST para la evaluación de la dimensión Entorno físico.	178
Tabla 4.76: Datos requeridos por el método LEST para la evaluación de la dimensión Carga Mental.	179
Tabla 4.77: Datos requeridos por el método LEST para la evaluación de la dimensión Aspectos Psicosociales.	180
Tabla 4.78: Datos requeridos por el método LEST para la evaluación de la dimensión Tiempos de trabajo.	180

CAPÍTULO 5

Tabla 5.1: Ejemplo de rotación de puestos para 4 trabajadores y 4 tareas (fuente [Tharmaphornphilas et al., 07]).....	188
Tabla 5.2: Ejemplo de soluciones vecinas para el periodo 8:00-9:00 tareas (fuente [Tharmaphornphilas et al., 07]).....	189
Tabla 5.3: Ejemplo de solución del algoritmo de recocido"o simulado de [Seçkiner et al., 07a].....	205
Tabla 5.4: Una clasificación de los criterios de aspiración. Adaptado de [Glover et al., 03].	213

CAPÍTULO 6

Tabla 6.1: Descripción de sub-tareas de una tarea A (fuente [Carnahan et al., 00]).	292
Tabla 6.2: Género y capacidad de los empleados en la célula de fabricación (fuente [Carnahan et al., 00]).	293
Tabla 6.3: Valores máximos del índice JSI obtenidos por los métodos de Programación entera y con el algoritmo genético.....	297
Tabla 6.4: Ejemplo de agenda de rotación con alto grado de aptitud generaciones (fuente [Carnahan et al., 00]).	298
Tabla 6.5: Problemas de asignación sin restricciones (fuente [Kullpattaranirun et al., 05]).	304
Tabla 6.6 Algoritmo genético convencional: Asignaciones diarias para 5 trabajadores, 5 estaciones y 8 periodos (problema 5-5-8) (fuente [Kullpattaranirun et al., 05]).	304
Tabla 6.7 Algoritmo genético heurístico: Asignaciones diarias para 5 trabajadores, 5 estaciones y 8 periodos (problema 5-5-8) (fuente [Kullpattaranirun et al., 05]).	304
Tabla 6.8: Indicadores de rendimiento para un problema sin restricciones balanceado para 5 trabajadores y 5 estaciones (C= AG convencional, H= AG heurístico) (fuente [Kullpattaranirun et al., 05]).	305
Tabla 6.9: Ejemplo de asignación para un problema balanceado con restricciones 10-10-4 generada con el AG convencional (fuente [Kullpattaranirun et al., 05]).	305
Tabla 6.10: Ejemplo de asignación para un problema balanceado con restricciones 10-10-4 generada con el AG heurístico (fuente [Kullpattaranirun et al., 05]).	307
Tabla 6.11: Indicadores de rendimiento para problemas con restricciones (C= AG convencional, H= AG heurístico) (adaptado de [Kullpattaranirun et al., 05]).	307

CAPÍTULO 7

Tabla 7.1: Clasificación de movimientos según la zona del cuerpo [Diego-Mas et al., 09].	332
Tabla 7.2: Valoración del riesgo del factor repetitividad en función de la frecuencia de movimientos por minuto [Diego-Mas et al., 09].....	333
Tabla 7.3: Ejemplo de valoración de las capacidades globales.	334
Tabla 7.4: Ejemplo de asignaciones vetadas para 3 trabajadores y 3 puestos.	334

CAPÍTULO 8

Tabla 8.1: ítems de movimiento para cuantificar el cumplimiento del criterio de diseño 1.....	373
Tabla 8.2: Puntuación asignada a los movimientos requeridos en un puesto según su frecuencia.....	373
Tabla 8.3: Valoración de los ítems de movimientos para los 18 puestos seleccionados para la rotación.	374
Tabla 8.4: Puntuación de los ítems de movimiento según la capacidad del trabajador de realizar el movimiento.....	374

Tabla 8.5: Valoración de los ítems de movimientos para los 18 trabajadores seleccionados para la rotación.	375
Tabla 8.6: Ítems de capacidades correspondientes al grupo Capacidades Globales.	376
Tabla 8.7: Ítems de capacidades correspondientes a las Capacidades Psíquicas.	376
Tabla 8.8: Ítems de capacidades del grupo Capacidades de Comunicación.	376
Tabla 8.9: Tabla de puntuación de los ítems correspondientes a las Capacidades Globales, Psíquicas y de Comunicación de los puestos.	377
Tabla 8.10: Valoración de los ítems de Capacidades para los 18 puestos.	377
Tabla 8.11: Tabla de puntuación de los ítems correspondientes a las Capacidades de los trabajadores.	378
Tabla 8.12: Valoración de los ítems de capacidades para los 18 trabajadores.	378
Tabla 8.13: Tabla de puntuación de las asignaciones no deseadas.	379
Tabla 8.14: Asignaciones a puestos no deseadas por los 18 trabajadores.	379
Tabla 8.15: Asignaciones vetadas.	380
Tabla 8.16: Parámetros del AG derivados de las especificaciones del problema.	383
Tabla 8.17: Asignaciones vetadas correspondientes a las limitaciones de los trabajadores empleadas en la parametrización del AG.	383
Tabla 8.18: Valores de experimentación de los parámetros del AG.	384
Tabla 8.19: Parámetros empleados en los experimentos de parametrización E ₁ a E ₆	387
Tabla 8.20: Parámetros empleados en los experimentos de parametrización E ₇ a E ₁₂	387
Tabla 8.21: Resumen de los resultados de los experimentos E ₁ al E ₆	388
Tabla 8.22: Resumen de los resultados de los experimentos E ₇ al E ₁₂	388
Tabla 8.23: Valores de los parámetros resultantes de la fase parametrización.	393
Tabla 8.24: Resumen de los resultados del experimento E ₁₃ y E ₂	394
Tabla 8.25: Mejor agenda de rotación obtenida en la ejecución 1 del experimento E ₂	395
Tabla 8.26: Mejor agenda de rotación obtenida en la ejecución 7 del experimento E ₁₃	396
Tabla 8.27: Resumen de los resultados del experimento E ₁₄ y E ₂	398
Tabla 8.28: Mejor agenda de rotación obtenida en la ejecución 4 del experimento E ₁₄	399
Tabla 8.29: Mejor agenda de rotación obtenida en la ejecución 10 del experimento E ₁₆	402
Tabla 8.30: Resumen de los resultados de los experimentos E ₁₅ al E ₂₁	403
Tabla 8.31: Mejor agenda de rotación obtenida en la ejecución 4 del experimento E ₂₂	405
Tabla 8.32: Evolución del valor de los ítems de los trabajadores 1 a 5 para cada rotación en la solución obtenida en E ₁₄ en la ejecución 4.	409
Tabla 8.33: Evolución del valor de los ítems de los trabajadores 6 a 9 para cada rotación en la solución obtenida en E ₁₄ en la ejecución 4.	410
Tabla 8.34: Evolución del valor de los ítems de los trabajadores 10 a 14 para cada rotación en la solución obtenida en E ₁₄ en la ejecución 4.	411
Tabla 8.35: Evolución del valor de los ítems de los trabajadores 14 a 18 para cada rotación en la solución obtenida en E ₁₄ en la ejecución 4.	412

CAPÍTULO 11

Tabla 11.1: Valores de los parámetros por defecto definidos en MORE.	473
---	-----

1

Objetivos y alcance de la investigación

1. OBJETIVOS Y ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

En la actualidad los trastornos músculo-esqueléticos (TME) de origen laboral suponen un importante problema de salud que afecta a un elevado número de trabajadores. Los problemas músculo-esqueléticos no sólo repercuten en la calidad de vida de los trabajadores, sino que, además, suponen un importante coste social y económico. La rotación de puestos de trabajo ha sido propuesta como mecanismo de prevención de los TME por diferentes investigadores [Jonsson, 88; Hazzard et al., 92; Grant et al., 97; Paul, 99; Kuijter et al., 99; Rissen et al., 02; Vézina, 04] y organismos oficiales como la Administración estadounidense encargada de la seguridad y la salud ocupacional [Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 09]. Sin embargo, a pesar de los beneficios de la rotación para la salud física y psicológica de los trabajadores, su aplicación no resulta sencilla debido al elevado número de criterios que es necesario considerar para realizar una correcta asignación de los trabajadores a los puestos, al tiempo que se cumplan las restricciones impuestas por las condiciones reales de trabajo en las organizaciones. [Putz-Anderson, 88] subraya la importancia de un buen diseño del plan de rotaciones que evite un efecto adverso de dicha técnica.

El problema de la generación de agendas de rotación pertenece al grupo de problemas de optimización combinatoria denominado “Problemas de horarios y secuenciación”. Aunque existen técnicas como la programación entera aplicables a la resolución de éste tipo de problemas [Carnahan et al., 00; Tharmmaphornphilas et al., 04], el uso de heurísticas y metaheurísticas [Glover, 86a] proporciona soluciones aceptables sin prolongar excesivamente el tiempo de cálculo. Algunos autores han desarrollado metodologías para la obtención de agendas de rotación mediante procedimientos heurísticos o metaheurísticos [Carnahan et al., 00; Nanthavanij et al., 01; Kullpattaranirun et al., 05; Yaoyuenyong et al., 06; Tharmmaphornphilas et al., 07; Seçkiner et al., 07b]. Entre las propuestas nombradas destaca, por ser precursora en la aplicación de éste tipo de técnicas al problema de la rotación, la de [Carnahan et al., 00], que desarrolla un Algoritmo Genético (AG) para la generación de agendas de rotación que prevengan a los trabajadores de posibles lesiones de espalda derivadas del manejo de cargas. No obstante, una limitación a subrayar de las metodologías basadas en metaheurísticas para la generación de agendas de rotación analizadas en el presente trabajo, es que se centran en la prevención de determinados factores de riesgo, como el manejo de cargas o la exposición excesiva al ruido, sin embargo, tal y como se deriva del exhaustivo estudio realizado por [Bernard, 97], existen múltiples factores de riesgo asociados con los TME que deberían considerarse simultáneamente a la hora de diseñar una agenda de rotación destinada a su prevención.

En la actualidad, existen numerosos métodos de evaluación ergonómica

utilizados de forma habitual por los ergónomos para identificar y valorar factores de riesgo relacionados con los TME en los puestos de trabajo. El resultado de la aplicación de dichos métodos puede resultar de gran utilidad en el proceso de diseño de las agendas de rotación, tanto para la reducción de la amplitud del riesgo preliminar de los puestos, como a la hora de determinar el orden y duración de las asignaciones de los puestos (y sus niveles de riesgo) a los trabajadores.

Frente a la rigidez de las metodologías analizadas en el presente trabajo, caracterizadas por la generación de agendas de rotación centradas en la prevención de un determinado factor de riesgo, no siempre relacionado con los TME, la presente investigación propone una metodología que permite al planificador generar y evaluar agendas de rotación que consideren, simultáneamente, múltiples factores de riesgo relacionados con los TME. Se pretende además dotarla de la flexibilidad suficiente para que el planificador decida qué factor o factores de riesgo desea considerar para el diseño de la agenda de rotación y el modo de cuantificarlos. En base a dichas especificaciones se podrá obtener una correcta asignación de los trabajadores a los puestos, al tiempo que se cumplen las restricciones que aseguran la viabilidad práctica de los resultados obtenidos: restricciones derivadas de la organización del trabajo, del sistema productivo empleado y de las limitaciones físicas y/o psíquicas de los trabajadores. La metodología que se presenta proporciona un método sistemático, estructurado en fases, para la generación de agendas de rotación destinadas a la prevención de TME. Además, incorpora una herramienta informática para la resolución del problema planteado que implementa el algoritmo genético propuesto como método de cálculo de las agendas.

1.2. Objetivos de la investigación

El objetivo primordial de la investigación es desarrollar una metodología que permita obtener agendas de rotación encaminadas a prevenir los trastornos músculo-esqueléticos de una manera sistemática y eficiente. Para lograrlo, se deben alcanzar previamente los siguientes objetivos particulares:

- Estudiar el estado del arte sobre la rotación de puestos de trabajo, analizando su repercusión sobre las organizaciones, sus diferentes enfoques y planteamientos, las consideraciones necesarias para su implementación, las características de los casos de aplicación y, finalmente, recopilando los beneficios y limitaciones concluidas por las investigaciones referentes a dicha técnica.
- Revisar las investigaciones relativas a los factores de riesgo relacionados con los TME.
- Recopilar los principales métodos de evaluación ergonómica que permiten identificar y valorar factores de riesgo relacionados con los TME.
- Estudiar el funcionamiento y el estado del arte de las técnicas metaheurísticas, analizando su aplicación al problema de la generación de

agendas de rotación.

- Realizar un profundo análisis de la teoría en la que se asientan los algoritmos genéticos, como forma de llevar a cabo su correcta aplicación al problema de la generación de agendas de rotación.
- Proponer una metodología, estructurada en fases, que guíe al planificador a la hora de diseñar agendas de rotación para la prevención de los TME, de manera que éste considere aspectos fundamentales recogidos en la bibliografía en relación a dicho objetivo.
- Desarrollar un AG, como parte de la metodología propuesta, capaz de generar agendas de rotación que optimicen, simultáneamente, múltiples criterios asociados con los TME, diversifiquen las tareas a realizar durante la jornada, consideren las discapacidades permanentes o temporales de los trabajadores y sus preferencias, y cumplan con las restricciones de asignación impuestas por el planificador.
- Implementar en una aplicación informática el AG desarrollado para automatizar el proceso de resolución del problema de la generación de agendas de rotación.
- Llevar a cabo una correcta parametrización del algoritmo desarrollado.
- Validar la metodología propuesta.

1.3. Metodología y estructura de los contenidos

El presente trabajo de investigación se ha desarrollado siguiendo el siguiente esquema. En primer lugar se ha realizado un análisis detallado del problema de la rotación de puestos de trabajo. A continuación, se han estudiado los factores de riesgo asociados a los TME y los métodos de evaluación disponibles para su identificación y valoración. Finalmente, se ha efectuado una revisión exhaustiva de los métodos metaheurísticos de resolución del problema existentes en la bibliografía, con un análisis más profundo de la aplicación de los algoritmos genéticos al problema de la rotación de puestos. Como resultado de dichos pasos, se ha desarrollado una metodología para la generación de agendas de rotación con la que, posteriormente, se ha experimentado resolviendo un problema propuesto, llegando a demostrarse la validez de dicha metodología para la obtención de agendas de rotación sujetas a las especificaciones y restricciones del problema planteado.

Posteriormente, se han extraído las conclusiones pertinentes y, por último, mediante el presente documento, se procede a la comunicación de los resultados. Además de en ésta memoria, los frutos de la investigación quedan plasmados en una aplicación informática que implementa la metodología propuesta, y que dota al planificador de una herramienta sencilla y útil para la generación de agendas de rotación encaminadas a prevenir los TME.

La presente tesis doctoral divide su contenido en doce capítulos. El primer y presente capítulo, **Objetivos y alcance de la investigación**, recoge los objetivos

del trabajo desarrollado y la estructura de los contenidos de la memoria. En el capítulo 2 se aborda **la rotación de puestos de trabajo**, y en él se analiza su repercusión como cambio organizacional, se estudian sus diferentes enfoques, se identifican los parámetros necesarios para su implementación, y se recopilan los beneficios y limitaciones concluidos por las investigaciones que abordan el problema. Tras el análisis de la rotación de puestos de trabajo llevada a cabo en el capítulo 2, en el capítulo 3 se estudian los trastornos músculo-esqueléticos, ya que del capítulo anterior se extrae como enfoque principal de la rotación de puestos de trabajo su aplicación a la prevención de este tipo de trastornos. El capítulo 3, **Riesgos relacionados con los trastornos músculo-esqueléticos**, se centra en la revisión de los factores de riesgo asociados con los TME. En el capítulo 4, **Métodos de evaluación ergonómica**, se recopilan investigaciones que han dado lugar a métodos que permiten la identificación y cuantificación de dichos factores de riesgo. En el capítulo 5, **Metaheurísticas para la generación de agendas de rotación de puestos de trabajo**, se analizan los principios y bases de los procedimientos de búsqueda de soluciones denominados metaheurísticas, y los casos de aplicación al problema de la generación de agendas de rotación. El capítulo 6, **Algoritmos genéticos y su aplicación a la generación de agendas de rotación**, se centra en una de las metaheurísticas revisadas en el capítulo anterior, en concreto en los algoritmos genéticos. Dicha metaheurística es la seleccionada por la metodología propuesta como herramienta de búsqueda y optimización, dado su mayor base teórica y su aplicación con anterioridad al problema planteado. En el capítulo se realiza un análisis de los fundamentos teóricos de los algoritmos genéticos, para, posteriormente, revisar las diferentes aproximaciones al problema planteado aplicando dicha técnica de optimización.

A partir de las conclusiones extraídas en los capítulos precedentes, el capítulo 7, **Metodología propuesta**, presenta un procedimiento sistemático de obtención de agendas de rotación encaminadas a prevenir los TME. En el capítulo 8, **Validación de la metodología propuesta**, se plantea un caso de estudio para validar la capacidad del AG para obtener agendas de rotación que cumplan con las restricciones de dicho problema. En el capítulo 9, **Conclusiones y trabajos futuros**, se exponen ciertas conclusiones extraídas de la investigación llevada a cabo, y se esbozan líneas de investigación futuras enfocadas a continuar con el esfuerzo realizado en la presente tesis para desarrollar técnicas que permitan preservar la salud músculo-esquelética de los trabajadores. En el capítulo 10, se incluyen, como anexos, los resultados detallados de los experimentos realizados para la validación de la metodología. En el capítulo 11, también como anexo, describe el software MORE que implementa el algoritmo genético propuesto. Y por último, el capítulo 12, recopila las referencias bibliográficas consultadas para la realización del presente trabajo.

2

La rotación de puestos de trabajo

2. LA ROTACIÓN DE PUESTO DE TRABAJO.

2.1. Introducción

La rotación de puestos¹ es una forma de organización del trabajo cada vez más extendida entre las empresas manufactureras y de servicios [Osterman, 94; Cosgel et al., 99]. Los beneficios obtenidos por el establecimiento de los sistemas de rotación afectan tanto a la empresa como a los trabajadores, siendo bajos los costes de implantación en comparación con otras posibles medidas de mejora de las condiciones laborales [Kogi et al., 03; Davis et al., 05].

Desde el punto de vista organizativo, la rotación del trabajador implica la formación adecuada del operario para desempeñar tareas diferentes, lo que permite a la empresa aumentar la capacidad de los trabajadores para ocupar puestos distintos, minimizando el impacto de una elevada tasa de absentismo, y favoreciendo una mayor flexibilidad ante posibles variaciones en la demanda. Se consigue, además, que la empresa adquiera un mayor conocimiento sobre las capacidades de sus empleados dado que puede observar su rendimiento en diversos puestos [Ortega, 01; Eriksson et al., 06]. Por otra parte, la implantación de sistemas de rotación de puestos de trabajo parece influir positivamente en la satisfacción de los trabajadores [Huang, 99; Triggs et al., 00; Rissen et al., 02]. La rotación implica variar el contenido de la tarea a realizar así como las habilidades y conocimientos necesarios para llevarla a cabo. Esto conlleva la disminución de la monotonía y el aburrimiento, la reducción del absentismo, el aumento de la calidad del producto fabricado, la disminución del estrés del trabajo y una mejora (a largo plazo) de la productividad [Miller et al., 74]. Además, la variación de tareas permite disminuir la fatiga y el riesgo de aparición de lesiones músculo-esqueléticas y desórdenes traumáticos acumulativos (DTAs) [Jonsson, 88; Hazzard et al., 92; Grant et al., 97; Paul, 99; Kuijer et al., 99; Rissen et al., 02], siempre y cuando la alternancia de actividades suponga un cambio efectivo de los grupos musculares implicados. Sin embargo, algunos estudios sobre la aplicación de la rotación de puestos de trabajo como medida preventiva de las lesiones músculo-esqueléticas han obtenido resultados adversos [Frazer et al., 03; Kuijer et al., 05]. Según [Davis et al., 05] es necesario investigar sobre la efectividad de las rotaciones antes de abogar por su utilización y prescripción universal, si bien su adopción es una realidad en un gran número de organizaciones.

En la actualidad, a pesar de las mejoras alcanzadas, las lesiones músculo-esqueléticas siguen siendo un problema importante incluso en los países más desarrollados [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), 08].

¹ El término *puesto* se utiliza como sinónimo de *estación de trabajo*. [Gaudart, 00] define el término *estación de trabajo* como el conjunto de tareas y medios asignados a un operador. Diferentes trabajadores en una misma *estación de trabajo* deben ser capaces de realizar las mismas tareas con los mismos medios.

Las lesiones músculo-esqueléticas pueden aparecer a pesar de tratarse de lugares de trabajo con buenos diseños de los puestos y herramientas [Arndt, 83]. Esta paradoja, mejores condiciones ergonómicas² y elevada tasa de lesiones, puede deberse, en entornos productivos, a que los ergónomos, por lo general, intervienen únicamente en una pequeña fracción del problema y se concentran en un factor del riesgo de forma individual (carga, ruido, etc.), o en el diseño del puesto de trabajo o de las herramientas, pero dejan de lado la base del problema, el diseño de la producción [Winkel et al., 96]. Los ergónomos no han tenido, tradicionalmente, posibilidad de actuar sobre el sistema productivo quedando su diseño en manos de los ingenieros de producción o gestores. Nuevos enfoques organizativos, como la rotación de puestos de trabajo, tratan de adecuar las exigencias impuestas por el sistema productivo al trabajador desde una perspectiva ergonómica.

Según [Winkel et al., 92] la *exposición biomecánica*³ del trabajador depende de la amplitud del riesgo al que se expone, de la frecuencia del riesgo y de su duración. Las intervenciones ergonómicas se centran principalmente en la disminución de la amplitud del riesgo mediante la mejora de las estaciones de trabajo o de las herramientas. Sin embargo, a menudo, no se interviene en la disminución de la frecuencia o de la duración de la tarea, factores que contribuyen significativamente al riesgo [Winkel et al., 92]. Por su parte, los gestores de la empresa o los ingenieros de producción pueden influir significativamente en las tres dimensiones del riesgo mencionadas (amplitud, frecuencia y duración [Winkel et al., 96]) a la hora de diseñar su estrategia de racionalización del trabajo. Es más, el objetivo final es claramente diferente para los ergónomos y para los gestores o ingenieros de producción, los primeros persiguen la salud y el confort de los trabajadores, mientras que los segundos buscan la productividad, la cantidad y la eficiencia. La rotación de puestos de trabajo permite a los ergónomos actuar sobre la duración de la exposición y de este modo disminuir la *exposición biomecánica*, sin alterar el diseño del sistema productivo fruto de la estrategia de racionalización del trabajo de la empresa.

La disminución de los niveles de riesgo tras la implantación de un sistema de rotaciones no debe utilizarse como base para realizar modificaciones en la organización del trabajo o en el sistema productivo, bajo nuevos criterios meramente productivos y no ergonómicos. El peligro de este tipo de reorganizaciones apoyadas en mejoras ergonómicas es conocido como *trampa ergonómica* ("*Ergonomic pitfall*")

² Se consideran *buenas condiciones ergonómicas de un puesto de trabajo* a aquellas en las que los requerimientos del puesto están adaptados a las limitaciones físicas y psíquicas del trabajador y por tanto preservan su salud.

Se define *Ergonomía* como pertenecientes o relativas a la ergonomía.

Se define *Ergonomía* como la ciencia multidisciplinar aplicada cuyo objeto es el trabajo humano y su objetivo es la reforma concreta de las situaciones de trabajo inadaptadas para el hombre [Cazamian, 87].

³ El concepto de *exposición biomecánica* hace referencia al hecho de exponer al trabajador a situaciones de riesgo biomecánico, es decir, que puedan dañar los órganos o la estructura (ósea y/o muscular) del trabajador, por ejemplo, con la aplicación de fuerza excesiva.

El término *biomecánica* se define como la ciencia que estudia la aplicación de las leyes de la mecánica a las estructuras y los órganos de los seres vivos [Real Academia de la Lengua Española].

[Winkel et al., 96], y pueden derivar en la aparición de nuevos riesgos ergonómicos. La solución de un problema puede conllevar la creación de otros si criterios meramente organizativos o productivos se imponen a las mejoras ergonómicas alcanzadas.

Por otra parte, la rotación no debe plantearse como una alternativa al rediseño de aquellos puestos de trabajo que presenten factores de riesgo. La aplicación de métodos de evaluación ergonómica permitirá guiar al ergónomo sobre las modificaciones previas necesarias en dichos puestos (ver Capítulo 4). La rotación no hace desaparecer el riesgo si no que lo 'distribuye' entre varios trabajadores. Por ello, antes de introducir un puesto de este tipo en el sistema de rotaciones debe procurarse su correcto acondicionamiento.

2.2. Definición

En primer lugar se realizará una aproximación al concepto de *rotación de puestos* mediante las definiciones propuestas por diferentes autores, para, posteriormente, proponer una definición propia.

Definición 1: *“Consiste en el cambio de un operario entre dos o más puestos de trabajo del mismo nivel y contenido tecnológico y/o funcional”* [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), 08].

Definición 2: *“Proceso periódico de movimiento de trabajadores entre diferentes trabajos o tareas para minimizar actividades monótonas y la sobrecarga de determinados tendones o músculos”* [Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 09].

La Administración de Seguridad y Salud Ocupacional (OSHA), perteneciente al Departamento de Trabajo de Estados Unidos [Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 09], completa la definición anterior, con las siguientes recomendaciones sobre la rotación de puestos de trabajo: *“los trabajos entre los que se rota deben usar diferentes grupos de tendones-músculos permitiendo la recuperación y el descanso. Las tareas deben ser categorizadas en base a parámetros como la alta/baja repetición, alta/baja aplicación de fuerza, mantenimiento de posturas forzadas durante periodos prolongados, y el área del cuerpo afectada. Los trabajos en rotación deben usar diferentes grupos de músculos-tendones o alternarse entre los extremos de parámetros tales como fuerza alta o baja. De esta forma se proporciona la oportunidad de descansar y recuperarse del trabajo realizado”*.

Definición 3: *“La rotación de puestos es una transferencia de empleados entre puestos en la organización”* [Campion M.A., 94].

Definición 4: *“La rotación de puestos es el movimiento de trabajadores entre diferentes puestos. Esto requiere que los trabajadores se trasladen a diferentes puestos o estaciones de trabajo en periodos fijos o irregulares de tiempo”* [Wells, 04b].

Definición 5: “La rotación de puestos puede definirse como una transferencia sistemática de empleados entre trabajos, tareas, asignaciones o proyectos dentro de una organización para alcanzar diferentes objetivos.” [Rodrick et al., 06].

Definición 6: “Trasferencia de empleados entre un número diferente de posiciones y tareas que requiere diversas habilidades y responsabilidades” [Huang, 99].

En la presente tesis se propone la siguiente definición para el concepto de *rotación de puestos*:

“La rotación de puestos es una forma de organización del trabajo basada en el intercambio sistemático de los trabajadores entre puestos, y cuyo objetivo último es mejorar las condiciones ergonómicas en las que desarrollan su labor los trabajadores.”

Es importante señalar que en la literatura, el término “*rotación de puestos*” (*job rotation*) hace referencia tanto al intercambio de trabajadores entre distintos puestos de trabajo tras cortos periodos de tiempo (horas, minutos), como a intercambios entre puestos tras periodos más largos (días, semanas, meses). Así, en los estudios enfocados en la aplicación de la rotación para la prevención de los TME, la rotación comprende periodos cortos, mientras que en otros estudios centrados, por ejemplo, en la relación de la rotación con la formación [Eriksson et al., 06] y la productividad [Cosgel et al., 99], se consideran periodos largos de trabajo entre los intercambios.

A partir de la definición de *rotación de puestos* se propone la siguiente definición para el concepto de *agenda de rotación de puestos*⁴:

“Planificación temporal de los intercambios sistemáticos de puestos entre trabajadores”.

El concepto de *agenda de rotación de puestos* introduce la dimensión temporal en el concepto de *rotación de puestos*. Puede considerarse como el instrumento necesario para su implantación. La consulta de la *agenda de rotaciones* por parte de los supervisores y trabajadores permitirá aplicar de forma ordenada y sistemática las rotaciones o intercambios.

2.3. La rotación de puestos de trabajo como cambio organizativo

La implantación de un sistema de rotaciones supone un cambio en la organización del trabajo de las empresas. El esfuerzo necesario por parte de las empresas para llevar a cabo dicho cambio organizativo se espera sea recompensado por los beneficios derivados de la aplicación de rotaciones, tales como el aumento de la motivación de los empleados, la disminución de las lesiones músculo-esqueléticas, una mayor flexibilidad de la plantilla, el aumento de la productividad, la mejora de la calidad de los productos, etc. Sin embargo, según afirma [Davis et al., 05], aunque la implantación de un sistema de rotaciones es una

⁴ En lo sucesivo se emplearán los términos sistema de rotaciones y plan de rotaciones como sinónimos de agenda de rotación.

*intervención ergonómica*⁵ de bajo coste y de rápida explotación, la empresa deberá hacer frente a diferentes obstáculos, bien de carácter económico, como el coste necesario para formar a los empleados en los diferentes puestos, bien de tipo organizativo, como los acuerdos necesidad con los sindicatos, la resistencia de los empleados al cambio, la existencia de diferentes escalas salariales, la integración de trabajadores con distintas capacidades o la selección de los puestos a rotar, en ocasiones complicada sobre todo si es escasa su diversidad. Otros elementos fundamentales para la implantación de rotaciones y que afectan a la organización del trabajo, son: la selección de los empleados que se incluirán en el programa de rotaciones, la duración de las rotaciones o el momento de los intercambios de los trabajadores entre los puestos (por ejemplo durante los descansos). Por su parte [MacLeod et al.] señala como posibles problemas derivados de la implantación de un sistema de rotaciones: la resistencia de los trabajadores con antigüedad para aprender nuevos tipos de trabajos, la negativa de los operarios de las máquinas a ceder su puesto a otros trabajadores, problemas prácticos derivados del traslado físico desde un puesto de trabajo a otro, la formación y el entrenamiento de los trabajadores para que ocupen nuevos puestos, la dificultad de determinar los trabajos adecuados a incluir en la rotación o la utilización inadecuada de las rotaciones por los gestores con objetivos meramente productivos u organizativos.

Así pues, a la hora de introducir un sistema de rotaciones, será importante que se realice paulatinamente, con el objetivo de identificar y resolver los posibles problemas derivados de su implantación definitiva [Eriksson et al., 06]. La reorganización del trabajo necesaria para implantar un sistema de rotación debería realizarse siguiendo unas pautas que garanticen su correcta implantación y por tanto se alcancen los objetivos impulsores de su adopción, tanto los destinados al aumento de la productividad y la eficacia, como los orientados hacia la mejora de las condiciones laborales y de salud de los trabajadores. Por ello, se considera oportuno describir las fases o pasos identificados por [Oncins de Frutos M. et al., 08] como necesarios para llevar a cabo un cambio organizativo.

2.3.1 Gestión del cambio organizativo

En primer lugar es necesario resaltar que no existe un único modelo para gestionar los cambios organizativos [Oncins de Frutos M. et al., 08]. Obviamente cada organización tendrá unas características propias que influirán en el proceso de cambio. Por tanto, un aspecto fundamental para el éxito del cambio organizativo será que los encargados de su realización posean un total conocimiento de la organización objetivo, de manera que puedan adaptar el modelo de cambio a sus particularidades.

Desde una perspectiva ergonómica, los cambios en la organización necesarios

⁵ La *intervención ergonómica* consiste en identificar factores de riesgo y molestias, y en proponer soluciones positivas que se muevan en el ámbito posibilista de las potencialidades efectivas de los usuarios, y de la viabilidad económica que enmarca cualquier proyecto [Mondelo et al., 01].

para la implantación de un sistema de rotaciones no deberían limitarse a los derivados del diseño de la agenda de rotación y de su explotación. El proceso de cambio en la organización debería incluir la necesidad de mejora ergonómica de los puestos incluidos en la rotación, paso previo indicado por algunos autores [Vézina, 04] como indispensable a la hora de realizar una correcta implantación de rotaciones.

2.3.1.1 Fases de la implantación de un modelo organizativo

El presente punto abordará de forma esquemática las principales fases de un proceso de cambio organizativo según [Oncins de Frutos M. et al., 08]: el proceso previo a la implantación, la implantación y el desarrollo posterior.

Como ya se ha indicado cada cambio debe adaptarse a las peculiaridades de la organización, así pues las fases y pasos que se exponen no están exentos de modificaciones y mejoras, y deben interpretarse como una guía general de actuación.

2.3.1.1.1 El proceso previo a la implantación

Esta fase incluye la planificación del proceso de implantación del cambio organizativo y puede estructurarse en los siguientes pasos:

- *Convencimiento de la dirección y creencia en el cambio:*

Un requisito básico para la implantación de un cambio organizativo es la implicación de la dirección de la organización, ésta debe mostrarse convencida y motivada por el cambio que se propone.

La implicación de la dirección es necesaria ya que la iniciativa del nuevo modelo de organizativo no tiene porqué haber sido promovido por ella. Otros órganos de la organización pueden haber liderado la iniciativa, como por ejemplo, el departamento de recursos humanos, los representantes de los trabajadores, los responsables de la salud laboral o incluso servicios de consultoría externos.

Así pues, con independencia del origen de la iniciativa del cambio, la dirección debe comprenderlo y apoyarlo. El apoyo de la dirección permitirá dotar al proceso de cambio, en ocasiones largo, de los recursos humanos y logísticos necesarios para su realización. De ésta forma el cambio será viable. El soporte estratégico y moral al cambio por parte de la dirección será fundamental, sobre todo, en procesos largos en los cuales los resultados del esfuerzo económico y humano no son inmediatos.

- *Equipo de seguimiento:*

La constitución de un equipo de seguimiento permitirá apoyar y controlar el proceso de cambio. Además, todas las partes implicadas deberían estar representadas: la dirección, los trabajadores, los representantes de los trabajadores, los técnicos, consultores externos, etc.

El equipo deberá establecer las vías para la toma de decisiones consensuadas,

transmitir la información relativa al proyecto entre los diferentes ámbitos de la organización, facilitar la comunicación entre los diferentes niveles y resolver conflictos. Todas ellas acciones fundamentales para que el proceso de cambio sea exitoso.

- *Diagnóstico.*

El equipo de seguimiento debe, en primer lugar, estudiar la situación inicial de la organización, con el fin de recopilar toda la información necesaria para la posterior toma de decisiones relativas a los objetivos del cambio y su planificación.

- *Establecer objetivos claros y realistas.*

Los objetivos deberán definir con claridad las mejoras que se espera alcanzar, tanto para los trabajadores como para la productividad. Si bien aparentemente ambos objetivos pueden parecer incompatibles, la introducción de un sistema de rotaciones puede derivar en mejoras tanto para el trabajador [Triggs et al., 00] como para la productividad [Miller et al., 74].

- *Planificación.*

Para planificar la implantación de un nuevo modelo organizativo se deben considerar aspectos como:

- El momento del cambio: se debe evitar que el proceso de cambio se vea alterado por fenómenos o cambios paralelos (elecciones sindicales, reestructuraciones, etc.).
- Los recursos necesarios, tanto desde el punto de vista económico como humano (servicios externos, personal con dedicación exclusiva, etc.)
- El establecimiento de plazos realistas que todas las personas implicadas en el proceso de cambio deben conocer (cronogramas).

2.3.1.1.2 La implantación del cambio organizativo

Durante la fase de implantación del cambio organizativo, el equipo de seguimiento se convierte en el gestor de los cambios en la organización. El equipo asumirá funciones como la motivación de los trabajadores y los directivos, la solución de problemas surgidos durante el cambio y de garantizar los compromisos adquiridos, en especial los relacionados con la salud y seguridad de los trabajadores.

Es posible que durante esta fase se produzcan situaciones de rechazo o resistencia al cambio. Por ello, será fundamental contar con la participación de todos los integrantes de la organización. La participación directa en la toma de decisiones de los trabajadores y/o sus representantes podrá evitar reacciones adversas y facilitar el proceso. Según [Ellis, 99; Vézina, 04] para que la implantación de un sistema de rotaciones cumpla con uno de los objetivos perseguidos, la disminución de las lesiones músculo-esqueléticas, es necesaria la participación de los trabajadores tanto para su formación en nuevas habilidades como en el diseño de

las rotaciones. Por el contrario, una escasa disposición de los trabajadores podría generarles síntomas de estrés contrarios a los objetivos iniciales de mejora de su salud [Thomas et al., 94]

El sistema de participación debe ser eficiente y para ello es fundamental una buena comunicación. La comunicación es básica para que en cada fase de la implantación se conozca la situación real de la organización y del proceso de cambio. De esta forma se reduce la intranquilidad de los implicados. La comunicación eficaz permitirá detectar necesidades y si fuera necesario modificar los objetivos adaptándolos a las nuevas circunstancias.

Otro aspecto a considerar es la posible resistencia al cambio en los mandos ante la implantación de nuevos modelos organizativos en los que se potencia la participación, autonomía y autocontrol. En estos casos será necesario formar a los mandos acostumbrados a estructuras jerárquicas de estilo autoritario, para que sean capaces de escuchar opiniones, delegar y aceptar soluciones. Por ejemplo, en el caso de la implantación de un sistema de rotaciones en una organización con manufactura, el ingeniero de producción o supervisor, por lo general encargado de la asignación de tareas y puestos, deberá “formarse” para aceptar las nuevas asignaciones planificadas en la agenda de rotación diseñada por un ergónomo, médico, técnico, gabinete de prevención, etc.

Un elemento fundamental para el proceso de cambio es la formación. Será preciso formar a los trabajadores según los cambios funcionales producidos (procedimientos, proceso productivo, tecnologías, responsabilidades, planificación del trabajo diario, etc.). La formación debe interpretarse no sólo como adquisición de nuevos conocimientos sino como herramienta facilitadora del cambio.

[Vézina, 04] subraya la formación de los trabajadores seleccionados para rotar como elemento clave para la implantación de un sistema de rotaciones, cuya importancia es en ocasiones infravalorada. La formación de los trabajadores debe considerarse no sólo como la necesidad de aprender los pasos para desarrollar una determinada tarea, de acuerdo con los requerimientos productivos, sino como un proceso de desarrollo de estrategias por parte de los trabajadores para proteger su salud. Por otra parte [Jorgensen et al., 05] recomienda considerar temas de formación relacionados con la calidad de los productos antes de poner en funcionamiento un sistema de rotaciones sin incidencias y efectivo.

Por último, se deberá evaluar la correspondencia entre el esfuerzo realizado y los objetivos cumplidos. Para ello la definición de parámetros claros y precisos de análisis son fundamentales. Este mecanismo permitirá conocer la marcha del proceso de cambio y corregir problemas (falta de coordinación, excesiva carga de trabajo, exigencias sin cualificación o formación adecuada, etc.).

2.3.1.1.3 El desarrollo posterior

En esta última fase del proceso será necesario tanto evaluar los resultados globales del cambio implantado como garantizar su perdurabilidad.

Para la evaluación final se deberán definir unos indicadores que reflejen la situación de los objetivos marcados inicialmente. Así pues, para objetivos de tipo económico o productivo se definirán indicadores referidos a los beneficios, productividad, calidad o satisfacción del cliente. Respecto a los objetivos relacionados con los trabajadores, se evaluarán aspectos tales como la satisfacción de los trabajadores, el contenido del trabajo, la relación cualificación/exigencia, la comunicación, la disminución de las lesiones músculo-esqueléticas, etc.

En cuanto al mantenimiento de los logros alcanzados será necesario designar recursos humanos y económicos para evitar problemas como el absentismo en las reuniones de seguimiento o formativas, las rotaciones de puestos no respetadas, etc.

2.3.1.2 Tipos de intervenciones organizacionales y su influencia sobre las condiciones laborales

La organización del trabajo, definida por [Hagberg et al., 95] como *“la forma en que el trabajo es estructurado, supervisado y procesado”*, ha dado lugar a la aparición de diferentes estrategias organizativas entre las que se encuentra la *rotación de puestos de trabajo*. La Tabla 2.1 muestra la clasificación de estrategias organizativas propuesta por [Haims et al., 02].

Tipos de intervenciones de organización del trabajo.	Ejemplos
Gestión del tiempo	Horarios alternativos de descanso.
	Flexibilidad horaria.
	Auto-horario.
	Horarios alternativos.
	Trabajo semanal comprimido.
	Trabajo compartido.
	Teletrabajo.
Incrementar la variedad	Rotación de puestos de trabajo.
	Ampliación del trabajo.
	Entrenamiento funcional cruzado.
Incrementar el contenido del trabajo y la responsabilidad	Enriquecimiento del trabajo.
	Carga vertical de trabajo.
	Control sobre el lugar de trabajo.
	Grupos de trabajo Semi-autónomos.
Crear equipos de trabajo	Equipos de proyecto.
	Ergonomía participativa.
	Círculos de calidad.
	Grupos autónomos de trabajo.
	Equipos autogestionados.
	Programas de sugerencias.
	Organización horizontal o plana.
Diseño organizacional	Descentralización.
	Diseño de sistemas electrónicos de monitorización.
	Gestión de calidad total.
	Organizaciones saludables.

Gestión	Aumento de la comunicación, retroalimentación, intercambios de información.
	Formación de supervisión
	Programas justo a tiempo (<i>Just- in- time</i>)
<i>Tabla 2.1: Tipos y ejemplos de intervenciones organizacionales del trabajo (fuente [Haims et al., 02]).</i>	

Con respecto a la *gestión del tiempo*, se han desarrollado estrategias organizativas encaminadas a ofrecer a los trabajadores varios tipos de horarios alternativos de descanso, con el objetivo de reducir su exposición a riesgos ergonómicos. Además, para reducir los problemas de salud y baja calidad laboral asociados con el trabajo por turnos, se han desarrollado tácticas como la flexibilidad horaria, el trabajo semanal comprimido, y otras alternativas de secuenciación del trabajo. Más recientemente, la incorporación de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación en el ámbito laboral ha dado lugar a propuestas como el teletrabajo o el trabajo compartido.

Otro método reconocido para la reducción de la exposición a riesgos ergonómicos es el incremento de la *variedad de tareas*: los trabajadores son rotados entre tareas con diferentes requerimientos físicos. Sin embargo, desde el punto de vista psicológico la rotación de puestos o la ampliación del trabajo (unificación de trabajos equivalentes), tienen un efecto limitado puesto que la tarea básica no se enriquece y por lo general no incorpora nuevas dimensiones, interés o aspiraciones al trabajo [Haims et al., 02]. Las intervenciones en la organización dirigidas a aumentar el contenido del trabajo y la responsabilidad del trabajador o a modificar la estructura básica del trabajo, como por ejemplo, el trabajo en equipo o el diseño organizacional (ver Tabla 2.1), son potencialmente más efectivas desde el punto de vista psicológico. Mientras que la rotación de puestos y la ampliación del trabajo son estrategias horizontales, las estrategias de enriquecimiento del trabajo dirigidas a incrementar el control sobre el trabajo y el trabajo en grupo, son estrategias verticales, en las cuales se dota a los empleados de mayor responsabilidad laboral.

Por otra parte, las intervenciones organizacionales también pueden provocar en los trabajadores sentimientos de incertidumbre laboral, de aumento de carga de trabajo o de disminución del control del trabajo, todos ellos asociados a factores psicológicos de estrés [Hagberg et al., 95]. Es por tanto crucial desarrollar procesos adecuados para la planificación, implementación y monitorización de los cambios (ver 2.3.1). Una de los grandes objetivos para el éxito de las intervenciones organizacionales es superar la resistencia al cambio de los individuos y los grupos dentro de la organización [Haims et al., 02], por ejemplo, en el caso de las rotaciones, la resistencia a abandonar la asignación permanente de un puesto ventajoso. Enfoques efectivos para superar la resistencia al cambio incluyen la participación/intervención y el conocimiento/comunicación [Hagberg et al., 95].

Es por tanto importante reconocer que las diferentes intervenciones organizacionales expuestas tienen la potencialidad de mejorar la calidad de vida y la salud en el trabajo, pero muchas de ellas presentan también efectos negativos para

los trabajadores (por ejemplo el aumento de la carga de trabajo y la presión). Reconocer los posibles efectos negativos y prevenirlos o reducirlos debe formar parte de cualquier intervención organizacional [Haims et al., 02].



Figura 2.1: Factores derivados de la organización del trabajo que influyen en los desórdenes músculo-esqueléticos de origen laboral (WRMDs, Work-related musculoskeletal disorders) (Adaptado de [Haims et al., 02]).

2.4. Interacciones entre la organización del trabajo y la ergonomía

La rotación de puestos es una forma de organización del trabajo cuyos objetivos, cada vez más, se encaminan hacia la mejora de las condiciones laborales y de salud de los trabajadores, o lo que es equivalente, hacia la mejora de las condiciones ergonómicas de éstos, frente a otras motivaciones como el aumento de la productividad, la calidad o la eficiencia. La unión entre organización del trabajo y ergonomía raramente ha estado presente en las organizaciones, pero por el contrario sí se han observado interacciones significativas entre ambos tipos de actuaciones.

[Winkel et al., 96] ilustra las posibles interacciones entre las intervenciones ergonómicas (actuaciones basadas en criterios ergonómicos) y las intervenciones organizativas (actuaciones basadas en criterios productivos, de calidad y eficiencia) a través del ejemplo de las actuaciones llevadas a cabo en el colectivo de dentistas en Suecia. El autor cita un estudio realizado en los años 80 en Suecia que reveló que, pese a las importantes mejoras ergonómicas introducidas desde los años 60 en el trabajo de los dentistas, estos desarrollaban un gran número de lesiones músculo-esqueléticas. Algunas de dichas mejoras consistieron en: sustituir su postura de trabajo de pie, retorcida y hacia adelante por una posición sentada y confortable; el cambio de la posición del paciente para mejorar la posición de trabajo del dentista; la colocación de las herramientas de trabajo en posiciones ergonómicas, etc. La principal explicación encontrada para la paradoja, mejores condiciones laborales y aumento de las lesiones, fue que las intervenciones ergonómicas coincidieron con una reorganización del trabajo de los dentistas. Los ergonomistas influyeron en la disminución de la exposición al riesgo de los dentistas a través de la mejora de las estaciones de trabajo y del diseño ergonómico de las herramientas, mientras que los expertos en racionalización del trabajo, por su parte, cambiaron la organización del trabajo de los dentistas, basándose en que su salario era elevado y no debían realizar tareas de las que podían ocuparse otros trabajadores, menos cualificados y por tanto de menor salario. Además, introdujeron un sistema de pago por pieza, aumentando de esta forma indirectamente el ritmo de trabajo. Así pues, la tarea principal del dentista pasó a ser más repetitiva, al trabajar sobre la boca del paciente

durante toda su jornada, y raramente verse interrumpida dicha actividad con otras tareas, por ejemplo administrativas. Aunque los ergónomos esperaban la reducción de las lesiones, especialmente en el tronco, los hombros y el cuello, las nuevas condiciones de trabajo provocaron que la duración de la exposición en la postura sentada aumentara y por tanto sus repercusiones músculo-esqueléticas. Además, aumentó la tensión en los hombros y cuello de los dentistas como consecuencia del sistema de pago por pieza y las lesiones asociadas con dichos miembros.

A partir del ejemplo expuesto, es posible concluir, que la estrategia organizacional de una empresa puede influir en los resultados de las intervenciones ergonómicas. La Figura 2.2 muestra el modelo de las interacciones entre la organización del trabajo y la ergonomía propuesto por [Winkel et al., 96]. Según el autor la *organización del trabajo* puede influir no solo en la calidad, la productividad y la eficiencia de la organización, sino también en la *exposición biomecánica y psicosocial* de los trabajadores. A su vez dichas exposiciones pueden influir sobre la salud músculo-esquelética que, por su parte, puede afectar a la calidad, la productividad y la eficiencia de la organización.

Según [Winkel et al., 96] el éxito de las intervenciones ergonómicas no puede lograrse por los ergónomos sin la cooperación estrecha de los gestores, encargados de la organización del trabajo. Dicha afirmación se basa en la experiencia común entre los ergónomos que piensan que las intervenciones ergonómicas, por lo general, implican interferencias con temas organizacionales y técnicos relacionados con el sistema productivo, por lo que se requiere la cooperación de los gestores. Históricamente los objetivos últimos de gestores y los ergónomos han entrado en conflicto, y esto ha minimizado la cooperación entre ellos. La rotación de puestos es capaz de englobar beneficios perseguidos por ambos, como la mejora de la salud músculo-esquelética de los trabajadores y el aumento de la productividad y la calidad de los productos [Miller et al., 74], lo cual puede influir positivamente en su entendimiento.

Por otra parte, en organizaciones con manufactura, las intervenciones ergonómicas que no influyen en el sistema productivo significativamente, como por ejemplo nuevas sillas, mesas y herramientas, entrenamiento físico, selección de los individuos, etc. Pueden no solventar el problema subyacente. En las intervenciones basadas en la rotación de puestos de trabajo, si bien no modifican el sistema productivo de forma explícita, la reorganización temporal (duración) de las tareas asignadas a los trabajadores puede interpretarse como una modificación implícita del sistema productivo.

Por último, el modelo de interrelaciones entre la organización del trabajo y la ergonomía de [Winkel et al., 96] podría explicar algunos de los beneficios atribuidos a la rotación de puestos, en concreto los relativos al aumento de la productividad y de la calidad de los productos [Miller et al., 74]. Dado que según algunos autores la rotación de puestos puede repercutir positivamente sobre la salud músculo-esquelética (ver 2.5.3) y según el modelo de [Winkel et al., 96] existe interrelación entre dicha salud músculo-esquelética y la productividad, la calidad y la eficiencia de las organizaciones, parece que dicho modelo apoyaría la afirmación de [Miller et al.,

74] sobre que la rotación de puestos puede mejorar (a largo plazo) la productividad y la calidad en la empresa (ver 2.5.2.).



Figura 2.2: Un modelo ilustrativo de las interacciones significativas entre la organización del trabajo y la ergonomía (flechas de 1 a 5).

Elipse: áreas principales de preocupación de la gestión. Cajas: áreas principales de preocupación de la ergonomía. Flechas: principales caminos desde la organización del trabajo a posibles efectos sobre la productividad total. Flechas discontinuas: interacciones entre la exposición y la productividad y la exposición biomecánica y la Psicosocial. (Adaptado de [Winkel et al., 96]).

2.5. Principales enfoques de la rotación de puestos de trabajo

La rotación de puestos de trabajo ha sido analizada desde diferentes perspectivas. Se ha estudiado su repercusión sobre el aprendizaje de los trabajadores, así como su capacidad para proporcionar información a las empresas acerca de las capacidades de sus empleados [Eriksson et al., 06]. Otros autores la han investigado desde el punto de vista de la productividad y los beneficios económicos derivados de su implantación [Miller et al., 74; Van Velzer et al., 92; Cosgel et al., 99; Kogi et al., 03; Nembhard et al., 07]. En la actualidad, destacan los estudios centrados en la aplicación de la rotación entre trabajos como mecanismo de prevención de las lesiones músculo-esqueléticas [Paul, 99; Triggs et al., 00; Rissen et al., 02; Frazer et al., 03; Vézina, 04; Frazer, 04; Wells, 04b; Kuijer et al., 05]. Si bien resultan también importantes las conclusiones relativas a su influencia sobre los factores psicosociales [Christmansson et al., 99; Triggs et al., 00; Rissen et al., 02; Oullet et al., 03; St-Vincent et al., 03; Vézina, 04; Eriksson et al., 06; Aptel et al., 08].

En el presente punto se aborda la rotación de puestos de trabajo desde las cinco perspectivas citadas: aprendizaje, productividad, trastornos músculo-esqueléticos y

factores psicosociales. Es común en la bibliografía que los estudios sobre rotaciones de puestos de trabajo la analicen desde varias de dichas perspectivas.

2.5.1 La rotación y el aprendizaje

[Eriksson et al., 06] plantea tres teorías sobre los motivos que impulsan a las empresas a adoptar un sistema de rotación de puesto de trabajo. La primera es la "*Teoría del aprendizaje de los empleados*", dicha teoría afirma que los empleados que rotan acumulan mayor conocimiento al estar expuestos a un amplio rango de experiencias. La siguiente teoría es la "*Teoría del aprendizaje del empresario*", las empresas a su vez aprenden más sobre sus propios empleados si pueden observar cómo realizan tareas diferentes. Para finalizar, la "*Teoría de la motivación de los empleados*", sostiene que la rotación de puestos motiva a los empleados y evita el aburrimiento provocado por la repetición interminable de las mismas tareas.

- *Teoría del aprendizaje de los empleados.*

La *Teoría del aprendizaje de los empleados* argumenta que la rotación de puestos de trabajo es un método efectivo para desarrollar las habilidades de los empleados. Por ejemplo, la rotación *Inter-funcional* ayuda a preparar empleados noveles para llegar a ocupar destacados puestos de gestión. Como los empleados se mueven entre varios trabajos, necesitan obtener un conocimiento profundo de más aspectos del negocio, y la rotación de puestos se lo permite. En niveles jerárquicos inferiores, la rotación *Infra-funcional* puede ser muy beneficiosa por diferentes razones: la empresa se beneficia al poder recolocar empleados entre diferentes tareas y de este modo cumplir con los requerimientos de la producción. Sin embargo, la recolocación es costosa si los empleados no han adquirido la experiencia necesaria en los diferentes puestos.

- *Teoría del aprendizaje de los empresarios.*

Esta teoría sostiene que la rotación proporciona al empresario información sobre las habilidades de los empleados. En concreto, la rotación permite a los empresarios identificar qué parte del rendimiento de los empleados se debe a sus habilidades generales, qué parte se debe a los factores específicos del puesto (por ejemplo, el trabajo puede ser particularmente difícil y el rendimiento disminuir por dicha razón), y qué parte se debe a la habilidad específica de cada empleado al ocupar un puesto. Dicha información puede utilizarse como soporte de posibles decisiones de promoción.

- *Teoría de la motivación de los empleados.*

Para finalizar con las teorías planteadas por [Eriksson et al., 06], la *Teoría de la motivación de los empleados* argumenta que la rotación ayuda a que los trabajos sean más interesantes. Este argumento fue mencionado anteriormente por [Cosgel et al., 99] en su análisis sobre costes y beneficios de las rotaciones.

En base a las teorías expuestas, [Eriksson et al., 06] analiza información recopilada de empresas danesas. Los resultados parecen apoyar las teorías sobre el aprendizaje de los empleados y empresarios. Uno de los resultados, por ejemplo,

pone de manifiesto la relación entre las empresas que invierten más en formación y las que están más dispuestas a rotar a los trabajadores. Sin embargo, el autor también apunta argumentos en contra, como por ejemplo, la inexistencia de relación entre la rotación de puestos y la heterogeneidad de los empleados, contraria a la hipótesis del aprendizaje que afirma que la transferencia de información asociada a la rotación es más ventajosa cuando los empleados tienen conocimientos heterogéneos. Por último [Eriksson et al., 06] encuentra soporte limitado para la teoría de la motivación de los empleados.

En [Vanhoven et al., 01] se realiza un análisis de las diferentes estrategias de aprendizaje utilizadas por empresas belgas para formar a sus empleados. La investigación sugiere que dichas empresas investigan formas de aprendizaje formales e informales independientemente del sector al que pertenecen o del número de empleados que tengan. Las medianas empresas destacan como las que más investigan en nuevos métodos de formación de los trabajadores. Además, el estudio señala que el tamaño de la empresa es uno de los factores clave que determinan si la formación es considerada parte de la estrategia empresarial. Las empresas con pocos empleados suelen emplear estrategias de formación no formales como, por ejemplo, la formación de los empleados a través del entrenamiento en el propio trabajo, de la rotación entre diferentes trabajos y el intercambio de conocimiento con otros empleados. Mientras, las empresas de medio tamaño (200-499 empleados) utilizan más los cursos de formación continua para formar a sus empleados. Las empresas grandes (500->1000 empleados) utilizan métodos mixtos de formación, si bien realizan la actividad formativa de forma más estructurada y prevista creando planes de formación con presupuestos y evaluaciones. La Tabla 2.2 muestra el porcentaje de utilización de estrategias no formales por las empresas belgas objeto del estudio.

Estrategias formativas	1993	1999
Formación en el trabajo	66,5%	71%
Rotación de puestos de trabajos	/	40,5%
Ciclos de Aprendizaje/Calidad	39,6%	36,5%
Auto-aprendizaje	26,5%	33%
Instrucción en conferencias, encuentros de trabajo, etc.	61,1%	71%

Tabla 2.2: Porcentajes de utilización de diversas clases de formación no formal en 1993 y 1999, en empresas con inversión en formación (fuente [Vanhoven et al., 01]).

Destaca en la Tabla 2.2 que mientras que en 1993 ninguna de las empresas encuestadas utilizaba la rotación entre diferentes puestos de trabajo como método de formación, en 1999 el 40,5% de ellas lo aplicaban como estrategia formativa, lo cual pone de manifiesto la importancia creciente de dicha técnica.

La multifuncionalidad de los empleados ha sido reconocida como herramienta para mejorar la flexibilidad y el rendimiento de los sistemas productivos, siendo la

multifuncionalidad una de las características de los empleados incluidos en sistemas de rotaciones. El estudio realizado por [Nembhard et al., 07] muestra las relaciones entre el nivel de multifuncionalidad necesario en el trabajador, las características del sistema productivo y las decisiones operativas. El estudio concluye que en algunos casos, menor multifuncionalidad y menores intervalos de rotación, proporcionan mejoras en el rendimiento del sistema productivo. Además, las características del proceso, como por ejemplo el grado de tareas similares, tienen un impacto importante sobre la capacidad de los trabajadores para aprender y olvidar los conocimientos necesarios en los distintos puestos. Dichas circunstancias pueden influir sobre las decisiones relativas a los niveles de multifuncionalidad a exigir a los trabajadores. Si los trabajadores olvidan las tareas pueden producirse retrasos o errores que afecten al rendimiento del sistema.

Otros autores como [Huang, 99; Ortega, 01; Arya et al., 04; Arya et al., 06] han propuesto estudios sobre la rotación de puestos de trabajo enfocados hacia el aprendizaje.

2.5.2 La rotación y la productividad

La especialización y la división del trabajo incrementan la productividad de los trabajadores permitiéndoles concentrarse en una tarea simple y concreta. Debido a que una gran división del trabajo genera una alta productividad, por lo general, las empresas han incentivado el aumento del grado de especialización en sus modelos organizativos del trabajo [Cosgel et al., 98].

Sin embargo, no todas las empresas parecen promover altos grados de especialización. Por ejemplo, muchas empresas japonesas, entre ellas Toyota, son conocidas por la práctica de la rotación de puestos, en la cual no se asigna a un trabajador un único y específico puesto sino a un conjunto de puestos entre los que rota con cierta frecuencia. Esta práctica claramente limita el grado de especialización, sugiriendo, según [Cosgel et al., 98], la posibilidad de que la rotación de puestos produce beneficios que compensan a las empresas de la posible pérdida de productividad debida a la disminución de la especialización. De hecho, la rotación de puestos se identifica como una práctica beneficiosa que ha contribuido en gran medida al éxito de las empresas japonesas. Por ejemplo, [Ouchi, 81] indica las carreras no-especializadas como una de las características fundamentales de las empresas japonesas. Es también evidente que algunas compañías americanas han experimentado con la rotación de puestos como una forma innovadora de transformación del lugar de trabajo [Osterman, 94]. En el estudio llevado a cabo por [Jorgensen et al., 05] en empresas manufactureras de Estados Unidos, el 42% de las compañías analizadas afirman utilizar la rotación de puestos. También en Europa se ha introducido la rotación de puestos de trabajo. El estudio realizado por [Freiboth et al., 97] analiza las características de varias empresas de ensamblaje del sector del automóvil y revela que todos los departamentos de ensamblado analizados, en situación de introducción o de desarrollo de nuevas estructuras de trabajo, observaban la necesidad de introducir la rotación de puestos de trabajo.

Existen otras prácticas, además de la rotación de puestos, que también limitan el

grado de especialización de los trabajadores. En la producción artesanal tradicional, por ejemplo, cada artesano realiza todas las tareas necesarias para producir el producto final. Entre el extremo de falta total de especialización y la completa especialización, es posible encontrar una gran variedad de modos de organizar la producción, como por ejemplo la ampliación o enriquecimiento del trabajo, que asigna a un trabajador a un rango de tareas que cubren una amplia porción del proceso total de producción. La rotación entre puestos difiere de estas prácticas en que cada trabajador está realmente especializado en una única tarea en un determinado momento, pero periódicamente rota entre tareas distintas. Contrariamente a la completa especialización, el trabajador no está especializado en la misma tarea todo el tiempo, y frente a la producción artesanal y la ampliación del trabajo, el trabajador no es asignado a varias tareas al mismo tiempo.

Los argumentos a favor de la división del trabajo, y por tanto de la especialización, son varios [Winkel et al., 96]:

- Un alto grado de especialización permite al trabajador aprender la tarea en un periodo corto de tiempo.
- Un ciclo de trabajo⁶ corto permite un rápido y casi automático rendimiento con pequeñas o casi innecesarias directrices mentales.
- Personas menos capacitadas pueden emplearse para realizar operaciones repetitivas con ciclos cortos, con salario más bajos.
- Se precisa menos supervisión, una vez que el operador ha aprendido la tarea, y con la estandarización de materiales y partes procedentes de operaciones precedentes, la posibilidad de que el trabajo del operario se interrumpa es pequeña.

Sin embargo, a pesar de los beneficios expuestos sobre la división del trabajo, la especialización en tareas simples con ciclos de trabajo cortos puede provocar en los trabajadores aburrimiento, absentismo, disminución de la calidad del producto, así como la aparición de lesiones músculos-esqueléticas debidas a movimientos repetitivos.

La rotación entre puestos de trabajo, aunque estos impliquen tareas con ciclos de trabajo cortos y repetitivos, puede permitir a los trabajadores variar el contenido de la tarea a realizar, las habilidades y conocimientos necesarios para llevarla a cabo, así como el cambio de actividad muscular implicada. Se consigue de esta manera aunar los beneficios de la división del trabajo, entre los que destaca el aumento de la productividad [Cosgel et al., 98], con los aportados por la introducción de un sistema de rotaciones, tales como el aprendizaje [Eriksson et al., 06], la disminución de la monotonía, la fatiga y el riesgo de aparición de lesiones músculo-esqueléticas y desórdenes traumáticos acumulativos (DTAs) [Jonsson, 88; Hazzard et al., 92; Grant et al., 97; Paul, 99; Rissen et al., 02].

⁶Un ciclo de trabajo se define como el periodo de tiempo necesario para realizar una operación básica.

[Cosgel et al., 98] analiza la rotación entre trabajos como alternativa a la completa especialización. Cabe señalar que dicho autor analiza la rotación en entornos de trabajo en los que los trabajadores rotan a intervalos largos de tiempo, semanas e incluso meses, en contraposición a la rotación en entornos productivos en los cuales las rotaciones se realizan cada poco tiempo. El autor argumenta que la rotación de puestos de trabajo debe producir determinados beneficios que suplan a las empresas de la pérdida de productividad como consecuencia de la disminución de la especialización. Para apoyar dicho argumento [Cosgel et al., 98] compara: los costes de la rotación frente a la especialización, la satisfacción de los empleados con rotación o con especialización, los salarios de los trabajadores con rotación o especialización, los posibles beneficios productivos de la rotación frente a la especialización, y por último, la capacidad de introducir innovación de la rotación frente a la especialización. Tras el análisis comparativo entre rotación y especialización, el autor concluye que las empresas que aplican rotaciones, por lo general, se caracterizan por ofrecer a sus empleados ventajas que se suman a las ofrecidas por la rotación, como por ejemplo el trabajo fijo o la participación en la toma de decisiones. Estos complementos de la rotación de puestos tienen como objetivo proveer a los trabajadores de ventajas adicionales y a las empresas de ventajas diferentes a la productividad, como por ejemplo, el aumento de la satisfacción de sus empleados. En segundo lugar [Cosgel et al., 98] observa que las empresas que aplican rotaciones son más innovadoras. Dicha innovación se produce debido a que los trabajadores rotan entre tareas distintas, lo cual les permite trasladar ideas de mejora de las herramientas o de los métodos desde unas tareas a otras.

Según señala [Cosgel et al., 98] no todas las ventajas de la rotación son aplicables a todos los tipos de empresas, ni todos los trabajadores perciben de igual modo los beneficios derivados de su inclusión en un sistema de rotaciones, y por tanto no todos están dispuestos a aceptar variaciones en sus condiciones laborales, como por ejemplo, el cambio de puesto o cambios en su salario. Por tanto, la rotación entre trabajos requerirá equilibrar las ventajas para los trabajadores y para las empresas.

El modelo propuesto por [Winkel et al., 96] puede utilizarse como base para conseguir cierto equilibrio entre la productividad y la salud de los trabajadores. [Winkel et al., 96] afirma que el grado de *exposición biomecánica* y *psicosocial* de los trabajadores influye en la productividad. Niveles de exposición aceptables pueden contribuir al aumento de la productividad a la vez que se logra un nivel alto de salud músculo esquelética (en la Figura 2.2 flechas 3, 4 y 5). Por otra parte, excesivas demandas productivas pueden causar inaceptables riesgos biomecánicos y psicosociales, y por tanto poner en peligro la salud músculo-esquelética. La rotación de puestos de trabajo permite reducir la *exposición biomecánica* [Jonsson, 88; Hazzard et al., 92; Grant et al., 97; Paul, 99; Kuijer et al., 99; Rissen et al., 02] y favorece aspectos psicosociales (reducción de la monotonía, aprendizaje, etc.), por lo tanto, en base a la afirmación de [Winkel et al., 96], la rotación puede contribuir a la mejora de la productividad (el modelo mostrado en la Figura 2.2 ilustra dicha relación).

[Carnahan et al., 00] mantiene que en el entorno de las empresas manufactureras o de servicios, la programación de los trabajos es un componente esencial para la rentabilidad de la empresa. La programación de tareas, tiempo y secuencia de las operaciones debe mantener el equilibrio entre la demanda productiva (por ejemplo la entrega de la producción en cierto tiempo y lugar) y la seguridad concerniente al personal involucrado en la producción. Cuando no se tiene en cuenta los requerimientos de seguridad, el beneficio de la producción puede verse sustancialmente disminuido debido al incremento de los costes por lesiones de los trabajadores [Snook, 78b]. [Carnahan et al., 00] propone el desarrollo de agendas para determinadas operaciones hombre-máquina que incluyan la variación sistemática por hora de la exposición al riesgo del trabajador. Esta variación pretende asegurar que la demanda de trabajo no excede las capacidades de los trabajadores. A dichas agendas de operaciones que buscan garantizar la seguridad de los trabajadores [Carnahan et al., 00] las identifica como "*job rotation*" o rotación de puestos .

No obstante existen opiniones contrarias a los beneficios productivos de la rotación. En el estudio realizado por [Jorgensen et al., 05] sobre la rotación de puestos en Estados Unidos en el sector manufacturero (ver 2.9.2), se subraya como limitación de dicha actuación la disminución de la calidad de los productos. También [Cheraskin et al., 96] afirma que la rotación puede incrementar la carga de trabajo y disminuir la productividad para los empleados que rotan y para los que no lo hacen, e incrementar los costes debidos a errores en los que los empleados incurren con frecuencia mientras aprenden un nuevo trabajo. Según [Jorgensen et al., 05] se debería prevenir los posibles efectos negativos de la rotación sobre la calidad de los productos impartiendo formación sobre calidad a los trabajadores antes de poner en funcionamiento un sistema de rotaciones.

Por último, [Ortega, 01] señala que la rotación de puestos permite a las empresas conocer en qué puestos sus empleados resultan más productivos. [Miller et al., 74] afirma que la rotación de puestos incrementa la productividad, [Nembhard et al., 07] que la multifuncionalidad de los trabajadores es una herramienta de mejora de la flexibilidad y el rendimiento de los sistemas productivos y [Van Velzer et al., 92] que la rotación es una estrategia de intervención ergonómica con bajos costes de implementación. Finalmente, [MacLeod et al.] sostiene que la rotación de puestos permite aumentar la producción.

2.5.3 La rotación y los trastornos músculo-esqueléticos (TME)

La rotación de puestos de trabajo se ha propuesto como método organizativo para la prevención de los TME derivados de la actividad laboral [Federal Register, 00; Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 09] y se han realizado numerosos estudios que han investigado su aplicación y repercusión sobre dichos trastornos [Jonsson, 88; Hazzard et al., 92; Grant et al., 97; Paul, 99; Carnahan et al., 99; Kuijer et al., 99; Triggs et al., 00; Carnahan et al., 00; Rissen et al., 02; Frazer et al., 03; Tharmmaphornphila et al., 03; Kogi et al., 03; Tharmmaphornphilas et al., 04; Vézina, 04; Kuijer et al., 05; Jorgensen et al., 05; Mathiassen, 06;

Tharmmaphornphilas et al., 07; Aptel et al., 08].

La utilización de la rotación de puestos como estrategia de intervención ha sido recomendada por agencias responsables de la seguridad y salud de los trabajadores. La administración estadounidense encargada de la seguridad y la salud ocupacional (Occupational Safety and Health Administration (OSHA)) ha incluido en su *Programa de Ergonomía* la aplicación de determinados controles administrativos, entre los que se encuentra la rotación de puestos, con el propósito de reducir el riesgo de TME en el trabajo [Federal Register, 00]. El *Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional* de Estado Unidos (NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health) ha publicado una serie de informes de evaluación de riesgos relacionados con los TME en el trabajo, en los cuales se sugiere la utilización de la rotación de puestos como estrategia potencial para su reducción, a la vez que recomienda que los trabajos a rotar impliquen el uso de diferentes grupos de músculos y tendones [National Institute for Occupational Safety and Health, 90a; National Institute for Occupational Safety and Health, 90b; National Institute for Occupational Safety and Health, 91; National Institute for Occupational Safety and Health, 92; National Institute for Occupational Safety and Health, 95; National Institute for Occupational Safety and Health, 96a].

Según señala [Kogi et al., 03], ante la prioridad de las empresas de obtener grandes beneficios, surge la necesidad de desarrollar alternativas al coste en equipamiento y rediseño de los puestos para prevenir los TME. Una estrategia posible puede ser la rotación de puestos debido a su bajo coste potencial de implementación. Sin embargo, la efectividad de dicha estrategia radica, obviamente, en su correcta aplicación. Según [Jorgensen et al., 05] la premisa de la rotación de puestos es que el trabajador rote de un trabajo a otro en un determinado periodo de tiempo, con el objetivo de minimizar la carga biomecánica acumulada en una parte determinada del cuerpo. La efectividad de la rotación de puestos depende, en parte, de cómo se balancee la carga biomecánica entre las diferentes partes del cuerpo. Si un trabajador rota de un trabajo que exige excesivo estrés en la parte baja de la espalda a otro que también lo exige, el esquema o agenda de rotación puede resultar ineficiente como mecanismo de control del riesgo de lesiones [Frazer et al., 03]. Por otra parte, una agenda óptima de rotaciones puede minimizar el estrés en cada una de las regiones del cuerpo si se asegura que la agenda de rotación alterna las demandas físicas de las diferentes partes del cuerpo [Jorgensen et al., 05].

Desde la perspectiva de los TME [Jorgensen et al., 05] subraya la falta de investigaciones epidemiológicas sobre la identificación de los trabajos a rotar, de la efectividad de esta estrategia dirigida a los factores de riesgo de TME en el trabajo, así como de sus inconvenientes. Es posible afirmar que la mayoría de las investigaciones sobre la relación entre los TME y la rotación se centran en la aplicación de las rotaciones a un caso concreto de estudio y por tanto, resulta complejo generalizar los beneficios de la aplicación de la rotación de puestos de trabajo como mecanismo de control de los TME. [Aptel et al., 08] señala que la información científica disponible no puede ser aplicada directamente en las fábricas. [Vézina, 04] basándose en la complejidad del problema de los TME de carácter

multifactorial [Sauter et al., 96] afirma que el conocimiento actual sobre si la rotación de puestos permite prevenir los TME resulta insuficiente para obtener conclusiones globales. Es por tanto complicado comparar los efectos de la rotación sobre la salud entre estudios diferentes. Sin embargo, los resultados proporcionados por las diferentes investigaciones permiten tratar mejor dicha complejidad e identificar diferentes aspectos que deben tenerse en consideración a la hora de tomar decisiones sobre la aplicación de un sistema de rotaciones. Por lo tanto, incluso conociendo que no parece posible generalizar los logros de los métodos de rotación, [Vézina, 04] señala la importancia de desarrollar herramientas que permitan reunir, en cada una de las situaciones de trabajo, la información necesaria para la toma de decisiones con respecto a la organización de las rotaciones (ver 2.7).

2.5.3.1.1 La importancia de la reducción del riesgo previa a la rotación

La inclusión en la rotación de puestos con elevadas exigencias biomecánicas (picos de demanda biomecánicas para el trabajador) tal y como afirma [Frazer et al., 03] expone al trabajador a una situación de riesgo elevado que, aunque puntual o de corta duración, puede ser suficiente para que se produzca una lesión músculo-esquelética. El riesgo de ciertos trabajos o puestos no está ligado exclusivamente al tiempo de exposición (controlado con el periodo de rotación) sino también al nivel del riesgo. [Vézina, 04] afirma que cuando una rotación se implementa sin reducir el nivel de riesgo de los puestos puede ocurrir que la rotación retrase el comienzo de la lesión, o que dado que el trabajador que ocupaba permanentemente la estación de alto riesgo se alterna con otros trabajadores al rotar, se exponga finalmente a más trabajadores al riesgo de desarrollar TME, aunque el puesto sea ocupado sólo una parte del tiempo. Por tanto, la reducción del riesgo de los trabajos debe ser tratada como fase preparatoria para la implementación de un sistema de rotaciones [Oullet et al., 03]. El estudio de [Oullet et al., 03] pone de manifiesto la importancia de la reducción del riesgo alto de determinados trabajos, puesto que la rotación por si sola no puede suponer una acción preventiva y en contraposición puede provocar el incremento de la exposición al riesgo de más trabajadores [MacLeod et al.].

En la actualidad existen numerosos métodos de evaluación ergonómica de los puestos de trabajo utilizados por los ergónomos para identificar y cuantificar riesgos. Su aplicación permitirá llevar a cabo las medidas correctivas de disminución del riesgo necesarias para una correcta implantación de un sistema de rotaciones (ver Capítulo 4). Además, dichas evaluaciones permitirán obtener información sobre los puestos, útil a la hora de diseñar agendas de rotación que realmente introduzcan diversidad en los puestos ocupados por los trabajadores.

2.5.3.1.2 La variación y la diversidad de la tarea

En el contexto de la *exposición biomecánica*, [Mathiassen, 06] define el concepto de *variación* como “el cambio de exposición al riesgo a lo largo del tiempo”. Según dicha definición el concepto de *variación* hace referencia a cuanto y cómo de rápido cambia la exposición al riesgo (biomecánico). El término *estático*, en relación a trabajos caracterizados por posturas cuya actividad muscular cambia despacio a lo

largo del tiempo, puede ser considerado un caso particular de *variación*, al igual que el término *repetitivo*, utilizado para trabajos en los que se realiza una tarea similar una y otra vez. El término *variación* no considera similitudes o discrepancias entre diferentes entidades de exposición al riesgo, como las existentes, por ejemplo, entre las tareas, los puestos, las ocupaciones o los días o ciclos de trabajo. El término *diversidad* es sugerido con el objetivo de permitir dicha diferenciación. Por ejemplo, dos tareas pueden ser diversas respecto al valor medio de la exposición al riesgo biomecánico o respecto a la frecuencia de los movimientos requeridos.

La comunidad científica [Bongers et al., 93; Kilbom, 94] así como organismos oficiales [National Institute for Occupational Safety and Health, 90a; Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 09] coinciden en que la *variación* en la *exposición biomecánica* es beneficiosa para la salud músculo-esquelética y que incrementa la satisfacción en el trabajo [Rissen et al., 02]. Las intervenciones que promueven dicha *variación* son recomendadas e incluso implementadas [Fallentin et al., 01; Davis et al., 05] especialmente en trabajos caracterizados por el mantenimiento de posturas estáticas o en trabajos que conllevan operaciones repetitivas. Las iniciativas sugeridas promueven una mayor diversidad de las tareas en el trabajo mediante la ampliación del trabajo, la rotación de puestos, o con el incremento de los descansos permitidos.

[Mathiassen, 06] recoge algunos de los métodos utilizados para evaluar la *variedad* biomecánica, es decir, cómo de rápido y con qué frecuencia cambia la exposición al riesgo biomecánico. Por ejemplo [Colombini, 98] propone el conteo de movimientos durante determinado periodo de tiempo. [Kilbom et al., 87] propone observar el número de veces por hora que las extremidades cambian su posición entre ciertos sectores angulares. Otros enfoques requieren equipos avanzados para la recopilación de información y su procesamiento, como la estimación de la frecuencia de la actividad muscular por debajo [Veiersted et al., 90] o por encima [Mork et al., 05] de ciertos umbrales. [Mathiassen, 06] subraya que el aspecto relativo a cuánto cambia una exposición a lo largo del tiempo ha recibido menos atención en términos de cuantificación que la rapidez con la que cambia. Una expresión particularmente sencilla de cuánto cambia la exposición al riesgo es el rango total de exposición, por ejemplo, medido a través de la diferencia entre el percentil 5 y el percentil 95 de la distribución de la exposición al riesgo acumulada (APDF) [Jonsson, 88]. Según [Mathiassen, 06] un enfoque relacionado es determinar la varianza (o la desviación estándar) de la distribución de la exposición al riesgo total. La ventaja de dicha métrica es que se puede estimar la variabilidad total relativa al sujeto y al trabajo para una combinación de tareas a partir de la información de cada tarea.

[Kilbom, 94] sostiene que el incremento de la *variación* física y mental puede ser beneficiosa para la salud. [Jonsson, 88] por su parte, plantea la rotación como medida de reducción del nivel total de exposición al riesgo. Otros estudios han documentado el resultado de intervenciones que han enfatizado la *variación* de tareas entre los trabajadores. En un estudio realizado por [Hinnen et al., 92] sobre los trabajadores de un supermercado, la rotación entre el puesto de cajera (sentada) a tareas con mayor movilidad tuvo como resultado la reducción de las lesiones

músculo-esqueléticas. [Rissen et al., 02] también realizó un estudio en un supermercado, donde se introdujo rotación de las cajeras a otros departamentos de la tienda. En dicho estudio se obtuvieron resultados positivos de la rotación en relación a determinados aspectos, como la satisfacción, pero no se observaron efectos sobre los desórdenes músculo-esqueléticos. Posteriormente, el mismo autor, realiza un análisis sobre el efecto de la repetitividad y la monotonía entre las mujeres, también en el ámbito de un supermercado, y obtiene como resultado que la introducción de la rotación entre el trabajo de cajera y trabajos de departamento supone un gran aumento de la variación de las posturas y de los movimientos del cuerpo. La reorganización del trabajo se asocia con efectos positivos sobre la salud, indicados por un descenso significativo de la presión diastólica de la sangre, así como en un decremento de la actividad del músculo trapecio. Además, se observa una pequeña reducción en el dolor de cuello y hombros, si bien la prevalencia del dolor (70%) entre las trabajadoras no disminuye. Dicho resultado parece indicar, según el autor, que la rotación tiene un efecto moderado sobre el dolor crónico de cuello y hombros, y que dicha intervención estratégica posiblemente sea más efectiva como medida preventiva para contrarrestar los TME en los supermercados, o en entornos de trabajo similares, que como medida de recuperación. En este caso también se observaron resultados positivos sobre la satisfacción de las trabajadoras incluidas en la rotación.

En un proceso de racionalización de la industria de procesado de pescado [Ólafsdottir et al., 98], se aumentó la especialización de los trabajadores en tareas de ciclo corto o en operaciones de empaquetado. Después del cambio aumentaron los desórdenes en las extremidades superiores. Dicho incremento fue atribuido a la disminución de la variación en los trabajos, sin embargo la variación fue evaluada sólo por el juicio de expertos [Mathiassen, 06].

[Christmansson et al., 99] introdujo un sistema de producción basado en equipos para el ensamblado de coches. Aunque los trabajadores tenían más oportunidad de cambiar entre tareas de ensamblaje y administrativas que en la situación anterior, se obtuvieron pequeños cambios en los trabajadores respecto a su percepción sobre el entorno psicosocial, mientras que la salud músculo-esquelética no mejoró. Según el autor del estudio, una posible explicación para dichos resultados fue la falta de formación de los trabajadores ante la reorganización, y como consecuencia la percepción de la nueva organización como estresante. Nuevamente la variación introducida se basó en el juicio de expertos [Mathiassen, 06].

Según [Mathiassen, 06] las evidencias empíricas sobre la efectividad de las intervenciones basadas en la variación de la *exposición biomecánica* y su efecto beneficioso sobre la salud músculo-esquelética son limitadas. El autor puntualiza que, obviamente, dicha afirmación no se opone a que la variación pueda ser beneficiosa. La falta de evidencias enfatiza la necesidad de realizar estudios explícitos centrados en la variación de la exposición al riesgo y sus resultados en diferentes ocupaciones.

2.5.3.1.3 La rotación como método de rehabilitación de TME

Además de los estudios centrados en la prevención de los TME, existen otras investigaciones que analizan la posibilidad de utilizar la rotación entre tareas como herramienta de rehabilitación de los trabajadores con lesiones músculo-esqueléticas [Richard et al., 03]. Dado que la rotación permite alterar las restricciones del sistema productivo (duración), puede también facilitar el retorno progresivo de los trabajadores mediante la asignación a puestos adaptados a sus capacidades. Sin embargo, este tipo de actuaciones no están exentas de problemas. En el estudio realizado por [Falardeau et al., 03a] en empresas con un sistema de rotaciones en funcionamiento, la retirada temporal de la agenda de rotaciones de un puesto "ligero", con el objetivo de asignarlo a un trabajador en proceso de reinserción, fue una medida considerada negativamente por los trabajadores implicados en la rotación, que rechazaron los privilegios temporales del trabajador lesionado, y prefirieron que el trabajador se incorporase a la rotación cuando fuese capaz de ocupar todos los puestos implicados. En el caso concreto estudiado por [Falardeau et al., 02] el trabajador fue incapaz de regresar de forma progresiva a su trabajo. En [Falardeau, 01] se propone como solución al problema planteado colocar al trabajador en rehabilitación como trabajador extra en la línea de producción. De esta forma el trabajador lesionado puede ir realizando acciones para las que está capacitado y progresivamente ir incrementando su contribución al trabajo de la línea. Por otra parte, dicho trabajador extra supone para el resto de trabajadores un aumento de su margen de maniobra al descargarse de ciertas acciones. Sin embargo, este tipo de acciones es sólo posible si el espacio en la línea es suficiente para que se sitúe el trabajador extra. En la empresa donde se realizó el estudio, la misma persona era responsable de la organización de las rotaciones, de las asignaciones temporales y de las actividades preventivas (enfermera de seguridad y salud), lo cual facilitaba la integración de la salud y la seguridad en la producción [Vézina, 04].

[Aptel et al., 08] al analizar el sistema de rotaciones aplicado en una línea de ensamblaje de hornos en el que se reservaban determinados puestos para trabajadores con restricciones médicas, concluyó que dicha circunstancia provocaba que el sistema de rotaciones fuera rígido y limitara los beneficios esperados para todos los empleados, puesto que estos trabajan en estaciones de trabajo más duras. Consecuentemente, dicha situación puede crear sentimientos de exclusión para los trabajadores localizados en estaciones de trabajo reservadas. Como solución [Aptel et al., 08] señala que es absolutamente necesario que los trabajadores estén implicados en la organización del sistema de rotaciones.

2.5.3.1.4 La propuesta de Aptel para implementar un sistema de rotaciones que prevenga los TME

[Aptel et al., 08] pone de relieve que dado que la rotación de puestos es un mecanismo con frecuencia recomendado para la reducción de los TME (ver 2.5.3), es necesario proponer medidas que permitan definir de forma rigurosa las condiciones para su efectividad. Para ello propone unas condiciones que deben

cumplirse para asegurar dicha efectividad (ver Figura 2.3). Las condiciones se organizan en cuatro grupos denominados: contexto, conocimiento, implementación y efectividad.

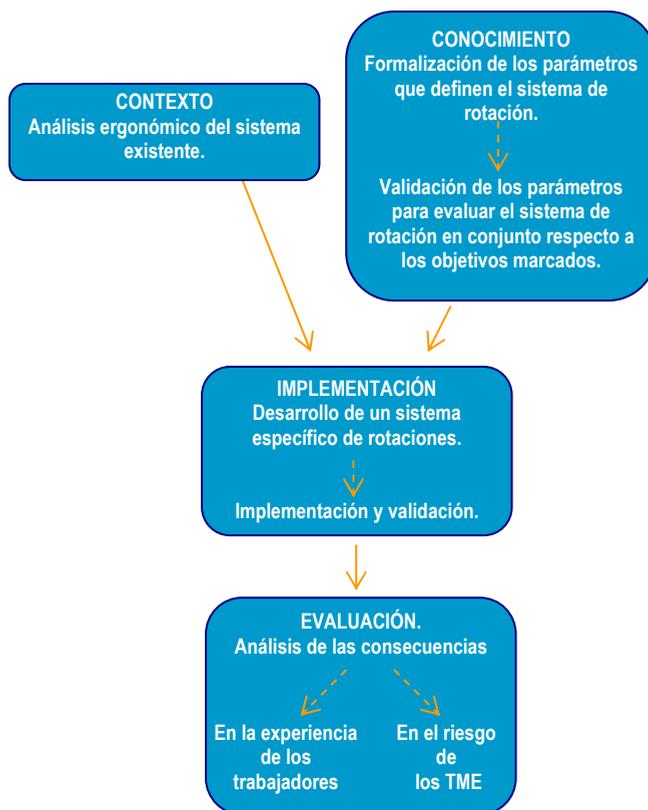


Figura 2.3: Diagrama lógico para el diseño de sistemas de rotaciones con el objetivo de prevenir los TME (Adaptado de [Aptel et al., 08]).

Antes de implementar un sistema de rotaciones, es necesario analizar la situación existente. Un análisis preliminar permitirá determinar los factores de riesgo relacionados con los TME, así como entender las modalidades de producción y la gestión de los recursos de la organización. A este respecto la utilización de entrevistas permite recopilar información sobre los factores psicosociales así como de las condiciones que determinan el trabajo de los operarios. Por otra parte, es necesario realizar un análisis ergonómico preliminar de los riesgos biomecánicos de las estaciones de trabajo existentes (en el estudio realizado en [Aptel et al., 08] dicho análisis se realiza mediante la herramienta OREGÉ⁷). Sin embargo, aunque el análisis ergonómico previo es necesario, no es suficiente para diseñar un sistema de rotaciones eficiente. Por ejemplo, algunos investigadores sugieren la importancia de la participación de los empleados en el diseño de las rotaciones [Ellis, 99; Oullet et al., 03; Vézina, 04].

Si bien la mayoría de las investigaciones coinciden sobre la importancia de

⁷ OREGÉ (Outil de Repérage et d'Evaluation des Gestes): herramienta para la evaluación y la identificación de los movimientos.

reducir la exigencia biomecánica así como de favorecer la diversidad de los movimientos durante la rotación, el conocimiento necesario para lograr dicho objetivo es escaso. En el caso concreto estudiado por [Aptel et al., 08], se pone de manifiesto la dificultad para comparar las estaciones de trabajo desde un punto de vista biomecánico. Dicha circunstancia es esgrimida como causa del resultado obtenido, que indica una relativa ineficiencia de la rotación de puestos en relación a los TME. Como consecuencia, el autor señala la necesidad de investigar la dimensión física del problema de la rotación, considerando factores fisiológicos y biomecánicos, con el objetivo de categorizar y ordenar las estaciones de trabajo a rotar tal y como recomiendan [Henderson, 92] y [Van Velzer et al., 92]. También indica la necesidad de investigar sobre la frecuencia de rotación y el número óptimo de puestos a integrar en el sistema de rotaciones (dichos aspectos son analizados en el apartado 2.7).

Por otra parte, para la evaluación de la eficiencia de las rotaciones como mecanismo de prevención de los TME es necesario que las empresas establezcan objetivos e indicadores que deben ser monitorizados continuamente. La complejidad del problema justifica que la evaluación y los indicadores no se limiten a los TME. Así pues, los indicadores deben ser numerosos y considerar diferentes elementos del contexto, así como sus posibles interacciones. En el estudio que realiza [Aptel et al., 08] se analiza la rotación mediante indicadores tales como: el estrés de los trabajadores, los factores psicosociales (carga de trabajo, presión del trabajo, participación, monotonía o satisfacción), la valoración de la experiencia, el número de las lesiones músculo-esqueléticas, las partes del cuerpo lesionadas, el número de localizaciones de dolor en los trabajadores, la relación de los TME con el género, la edad, el nivel de multifuncionalidad, etc.

Otro factor que debe considerarse en el diseño de agendas de rotación es el estado de salud real de los trabajadores. Dicho factor no debe ser ignorado si la presencia de TME entre los trabajadores es elevada y persistente en el tiempo, aunque dicha consideración complique claramente la construcción de agendas de rotación. Por ejemplo, en el estudio realizado por [Aptel et al., 08], se analiza el estado de salud de los trabajadores registrando sus capacidades globales, psíquicas y de comunicación, así como su capacidad para realizar cada movimiento. Posteriormente las valoraciones obtenidas son utilizadas para el diseño de la agenda de rotación.

2.5.4 La rotación y los factores psicosociales

El concepto de factores psicosociales hace referencia a aquellas condiciones que se encuentran presentes en una situación laboral y que están directamente relacionadas con la organización, el contenido del trabajo, y la realización de la tarea, y que tienen capacidad para afectar tanto al bienestar o a la salud (física, psíquica o social) del trabajador como al desarrollo del trabajo. Así pues, unas condiciones psicosociales desfavorables están en el origen de la aparición tanto de determinadas conductas y actitudes inadecuadas en el desarrollo del trabajo, como de determinadas consecuencias perjudiciales para la salud y para el bienestar del

trabajador [Martín-Daza et al., 08].

El *Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT)* identifica los siguientes factores psicosociales:

Factores relacionados con la tarea
Ritmo de trabajo.
Monotonía y repetitividad.
Iniciativa y autonomía.
Nivel de cualificación.
Nivel de responsabilidad.
Factores relacionados con la organización del tiempo de trabajo
Pausas de trabajo.
Horario flexible.
Trabajo a turnos y nocturno.
Factores relacionados con la estructura de la organización
Comunicación en el trabajo.
Participación en la toma de decisiones.
Estilo de mando.
Definición de competencias.
Características propias de la empresa.
Otros factores.

Tabla 2.3: Clasificación de los factores psicosociales (fuente [Gurrea-Gracia et al., 03]).

En el ámbito de la rotación de puestos, [Aptel et al., 08] observa la influencia positiva de la rotación sobre factores psicosociales, a la vez que concluye una relativa ineficiencia del sistema de rotaciones en relación a la prevención de los TME. No obstante, el autor señala la falta de variación de la intensidad de las demandas biomecánicas entre los puestos implicados como posible causa de dicho resultado. [Rissen et al., 02] sostiene que la rotación entre puestos tiene un impacto positivo sobre la percepción subjetiva de los trabajadores y [Triggs et al., 00] señala la reducción del estrés y del absentismo como beneficios de la rotación.

Un estudio comparativo de empleados polivalentes (con múltiples habilidades) [Thomas et al., 94] reveló que este tipo de trabajadores experimentaba una sensación de satisfacción por el trabajo ligada al desarrollo de las habilidades, a la carencia de la monotonía y a una sensación de mayor responsabilidad. También se observó que los empleados voluntarios que participaban en el plan de rotación mostraban menos patologías de tipo digestivo, alteraciones del sueño, o depresión, que aquellos que participaban por obligación.

Para que la rotación tenga un efecto positivo en la reducción de los TME se requiere de la buena voluntad y participación de los trabajadores tanto para su formación en nuevas habilidades como en la configuración del sistema de rotaciones [Ellis, 99; Vézina, 04]. Introducir dicho mecanismo organizativo en base a una escasa disposición de los trabajadores podría motivar la aparición de síntomas de estrés en contradicción con los objetivos perseguidos [Thomas et al., 94]. Así pues, los factores psicosociales están relacionados con la rotación no sólo desde el punto de vista de los beneficios aportados sino también en relación a los prerrequisitos deseables para su implantación.

De acuerdo con los estudios realizados por [Oullet et al., 03; St-Vincent et al., 03] en el sector del automóvil, al igual que es importante describir las limitaciones físicas de los trabajos y deben ser consideradas cuando se implementa una rotación en un lugar de trabajo, los aspectos mentales y psicosociales también son importantes. Estos aspectos pueden incluso centrar las dificultades señaladas por los trabajadores y ser un obstáculo para la implementación de la rotación [Vézina, 04].

En el estudio realizado en una planta de ensamblaje de automóviles [St-Vincent et al., 03] el 59% de los trabajadores señaló como ventaja aportada por la rotación la mejora de la salud y el 54% respondió la reducción de la monotonía. Es destacable que la reducción de la monotonía fue considerada casi tan relevante como la mejora de la salud. En otro estudio realizado por [Oullet et al., 03], el 58% de los trabajadores de una planta de ensamblado de asientos, señalaron como ventaja de la rotación la ruptura con la monotonía. Ambos estudios ponen de relieve la contribución positiva de la rotación a la reducción de la monotonía laboral y en consecuencia a la mejora de las condiciones psicosociales del trabajador.

En [St-Vincent et al., 03] el 30% de los empleados señalaron su preocupación por el desarrollo de nuevas competencias derivadas de la implantación del sistema de rotaciones. Este dato señala el temor de los trabajadores a que el tiempo de formación para los nuevos puestos a ocupar no sea suficiente, y por tanto requiera por su parte una mayor atención [Vézina, 04]. A este respecto [Christmansson et al., 99] observó que en tareas manuales repetitivas de ensamblaje, una reorganización del trabajo provocó un incremento del número de lesiones posturales, debido, principalmente, a que los trabajadores no fueron formados suficientemente para realizar una amplia variedad de tareas.

En la investigación realizada por [Oullet et al., 03], un 21% de los trabajadores indicaron su temor ante las nuevas características del puesto, y un 19% al empobrecimiento de las relaciones con sus compañeros. Desde el punto de vista psicosocial es necesario enfatizar la importancia de las relaciones de grupo de trabajo entre los miembros de la rotación. Una organización que pretenda implantar una rotación debe ser consciente del valor de la camaradería entre el equipo [Vézina, 04]. Tal y como se observa en el estudio realizado por [Oullet et al., 03], los factores psicosociales pueden ser la base para que los trabajadores deseen, o no, tomar parte en un programa de rotaciones.

2.6. La rotación y la integración de trabajadores

La implementación de un programa de rotaciones supone la integración de trabajadores con características, por lo general, heterogéneas. Durante el diseño de agendas de rotación es recomendable considerar factores como la edad y la antigüedad de los trabajadores, la existencia de trabajadores de ambos géneros, o la posible incorporación de trabajadores en periodo de rehabilitación (ver 2.5.3.1.3). Dichos factores pueden acarrear dificultades tanto durante el periodo de elaboración de la agenda de rotación como, posteriormente, durante su puesta en marcha. Así, en este punto se pretende aproximar los principales problemas derivados de la edad

y la diferencia de géneros, identificados como elementos potencialmente conflictivos.

2.6.1 Influencia de la edad en la rotación de puestos

Un problema que aparece con frecuencia en las rotaciones es la resistencia de los trabajadores con cierta antigüedad a cambiar su estación de trabajo por otras [Vézina, 04]. Sin embargo, dicha resistencia al cambio, tal y como apunta [Gaudart, 00], no es una cuestión únicamente relacionada con la edad, sino más bien con la habilidad desarrollada en el puesto. Los trabajadores, con el tiempo, desarrollan modos de operar que les permiten adaptarse a las restricciones o requerimientos del puesto. Esta capacidad no es necesariamente transferible a otra estación de trabajo, si realmente supone un cambio efectivo en la tarea, y un corto periodo de entrenamiento resulta insuficiente para desarrollar dicha habilidad. En un estudio realizado en una planta de ensamblado del sector de automoción en el que se propuso un plan de rotaciones voluntarias, fueron los trabajadores más jóvenes, con edades entre 40 y 44 años los que se ofrecieron voluntariamente para realizar rotaciones. En concreto un 19% de los trabajadores en dicho grupo de edad. Sin embargo, sólo un 10 % de los trabajadores de otros grupos de edad se ofrecieron voluntarios. Cabe señalar que el grupo de trabajadores con más voluntarios (40-44 años) era el de menor antigüedad y trabajaban en departamentos considerados de mayor exigencia física [St-Vincent et al., 03; Vézina, 04], y por tanto, estaban más dispuestos a cambiar sus puestos de trabajo con la esperanza de realizar trabajos menos duros.

El estudio realizado por [Gaudart, 00] en una fábrica de automóviles, plantea que la polivalencia o la capacidad de un trabajador para rotar entre diferentes trabajos disminuye con edad. Los trabajadores de mayor edad desarrollan estrategias para preservar su salud y prevenir lesiones mientras cumplen con los requerimientos productivos. La posibilidad de llevar a cabo estas estrategias depende de las características del puesto y por tanto no es posible aplicarlas al rotar. El estudio trata de clarificar porqué algunos trabajadores son excluidos de ciertas estaciones de trabajo y por tanto su polivalencia o capacidad de rotación de trabajo se reduce. La disminución de la polivalencia de los trabajadores puede deberse a la estrategia del propio jefe de producción o bien a ellos mismos. [Gaudart, 00] apunta como motivos de la pérdida de polivalencia: la incertidumbre del trabajador ante las dificultades del nuevo trabajo y si podrá trasladar sus habilidades o estrategias al nuevo puesto, y los problemas de aprendizaje en el periodo de formación. Ante dichas dificultades, los trabajadores de más edad tratan de protegerse en un determinado entorno de trabajo conocido (estación) ante posibles “molestias” o cambios.

[Gaudart et al., 95] señala que la introducción de cambios técnicos y la motivación individual pueden ayudar a resolver las dificultades derivadas de la edad. Este estudio afirma que es necesario llevar a cabo acciones que preserven la salud de los trabajadores de más edad mientras se desarrollan sus habilidades. Entre las estrategias que se recomiendan está la de animar a los trabajadores a utilizar su experiencia para adaptar o mejorar las estaciones de trabajo.

2.6.2 Influencia del género en la rotación de puestos

Dadas las diferencias antropométricas entre hombre y mujeres, es conveniente diseñar los puestos de trabajo para que puedan ser ocupados indistintamente por trabajadores de ambos sexos. La configuración de las estaciones de trabajo para hombres/mujeres puede ser beneficiosa para ambos géneros [Vézina, 04].

Aun cuando los hombres y las mujeres ocupan el mismo tipo de trabajo con las mismas responsabilidades y requisitos de la tarea, pueden existir diferencias provocadas por las interacciones entre el diseño de las estaciones de trabajo y las características antropométricas individuales [Stevenson et al., 91; Stetson et al., 92; Punnett et al., 99]

Por tanto, a la hora de implantar un sistema de rotaciones, se deberá tener presente las características y limitaciones de los trabajadores y trabajadoras. Un diseño de rotaciones ajeno a la posibilidad de que los puestos sean ocupados por mujeres y hombres puede originar graves problemas a las trabajadoras al exponerlas a límites de esfuerzo inaceptables.

Tal y como se indicó en el punto introductorio, la rotación no hace desaparecer el riesgo si no que lo 'distribuye' entre varios trabajadores. Por lo tanto, es fundamental que antes de implantar un sistema de rotaciones se procure el correcto acondicionamiento de todos los puestos involucrados (ver 2.5.3.1.1). Por ello, al evaluar las características de un puesto se recomienda hacerlo considerando los límites de riesgo para ambos sexos. Por ejemplo, para puestos con manejo manual de cargas el [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 97] indica que el peso máximo, de forma general, no debería sobrepasar, en condiciones ideales de levantamiento, los 25 Kg. No obstante, si la población expuesta son mujeres, trabajadores jóvenes o mayores, o si se quiere proteger a la mayoría de la población, no se deberían manejar cargas superiores a 15 Kg. (ver capítulo 4 Métodos de evaluación ergonómica). Las Tablas revisadas de Snook y Ciriello [Snook et al., 91], ampliamente utilizadas para el análisis y diseño de puestos con manipulación manual de cargas que implican levantamientos, descargas, arrastres, empujes o transportes, también establecen límites de pesos máximos aceptables diferenciados por género, como resultado de un amplio estudio experimental (ver capítulo 4).

En las empresas estudiadas por [Abrahamsson, 02] las tareas estaban divididas por géneros y etiquetadas como de mujeres o de hombres. Los intentos de integración de diferentes funciones, divisiones, profesiones, ocupaciones y tareas, originaron una situación donde hombres y mujeres debían trabajar en los mismos equipos de trabajo y compartir tareas iguales. Sin embargo, aparecieron problemas a la hora de que hombres y mujeres participaran en las mismas rotaciones bajo los mismos términos (salario y nivel de jerárquico), ya que los hombres rechazaban ocupar tareas o puestos etiquetados como de mujeres.

En el estudio realizado por [St-Vincent et al., 03] en una planta de ensamblado de automóviles, la implementación de la rotación de puestos de trabajo en equipos promovida por los administradores de la planta, provocó grandes reacciones por

parte de los sindicatos. Estos temían los problemas derivados de la integración de las mujeres en dichos equipos de rotación, preocupados por la posibilidad de que un miembro del equipo de rotación no pudiera ocupar todas las estaciones de trabajo y, como consecuencia, pudiera perjudicar el resto de asignaciones y cargas de trabajo.

[Carnahan et al., 00] señala que a la hora de establecer una agenda de rotaciones que implique manipulación de cargas, uno de los obstáculos que puede presentarse es la existencia de una población de trabajadores diversa. Así, la misma secuencia de tareas que puede ser realizada con relativa seguridad por un individuo, puede suponer un riesgo sustancial de lesión de espalda para otro. [Carnahan et al., 00] propone un método para la generación de agendas de rotación seguras que considera el género de los empleados y su capacidad diferenciada de levantamiento.

Periodo de tiempo	Percentil 50 Hombres	Percentil 90 Mujeres	Percentil 25 Hombres	Percentil 50 Mujeres
08:00-09:00	Tarea D	Tarea A	Tarea C	Tarea B
09:00-10:00	Tarea C	Tarea A	Tarea B	Tarea D
10:00-11:00	Tarea C	Tarea B	Tarea D	Tarea A
11:00-12:00	Tarea A	Tarea D	Tarea C	Tarea B
13:00-14:00	Tarea D	Tarea C	Tarea A	Tarea B
14:00-15:00	Tarea A	Tarea D	Tarea C	Tarea B
15:00-16:00	Tarea A	Tarea C	Tarea D	Tarea B
16:00-17:00	Tarea C	Tarea D	Tarea B	Tarea A

Tabla 2.4: Ejemplo de agenda de rotación para las tareas de levantamiento A, B, C y D organizada por percentiles que representan las capacidades de levantamiento (fuente [Carnahan et al., 00]).

Por todo ello es importante considerar la polivalencia de géneros en los puestos de trabajo a rotar, favoreciendo de este modo la integración de la mujer en el sistema de rotaciones.

2.7. Consideraciones para implementar un sistema de rotaciones

La mayoría de las investigaciones sobre la implementación de rotaciones se centran en casos concretos de estudio, en base a los cuales se obtienen resultados cuya extrapolación al resto de situaciones no resulta por lo general sencilla. Sin embargo, dichos estudios señalan aspectos relevantes que suponen una guía útil a la hora de elaborar agendas de rotación. Según [Thammaphornphilas et al., 04], el desarrollo de un plan de rotaciones requiere determinar el conjunto de trabajos a incluir en la rotación, la secuencia de la rotación y el intervalo de la rotación. [Vézina, 04] identifica como parámetros comunes a toda rotación: el número de puestos a rotar, la frecuencia de la rotación y el orden en que los trabajos rotan. A continuación se realizará una aproximación a dichos parámetros básicos para la elaboración de agendas de rotación.

2.7.1 El número de puestos a rotar

A la hora de implementar un sistema de rotación, determinar el número de

estaciones implicadas resulta fundamental. La bibliografía disponible sobre la rotación de puestos no establece valores concretos para este parámetro. En cada caso de estudio y en base a las circunstancias específicas en investigación, los autores establecen un número u otro de puestos a rotar. Por ejemplo, rotación entre 2 puestos [Frazer, 04] o entre 15 [Vézina et al., 95].

Según afirma [Vézina, 04] el límite de puestos a incluir en una rotación vendrá dado por la complejidad del trabajo realizado en cada estación, la destreza que se debe adquirir y los aspectos marginales de la rotación, así como la predisposición de los trabajadores a ocupar determinados puestos. Además, sostiene que el número de puestos influye en la inversión necesaria en formación. Si el número de estaciones es elevado y la rotación se alarga durante un dilatado periodo de tiempo, será necesario un período grande de adaptación para readquirir la destreza requerida en cada estación de trabajo. En relación a las destrezas necesarias y la complejidad de los puestos es destacable el estudio realizado por [Thomas et al., 94] sobre la polivalencia del trabajador y la exigencia cognitiva. Otro factor que puede afectar al número de puestos finalmente incluidos en la rotación, son las diferencias salariales entre trabajos, reconocido como un obstáculo frecuente en la selección de puestos para las agendas de rotación [Stoffman et al., 99].

A continuación se describirán ejemplos de configuraciones de rotaciones que incluyen distintos valores para el parámetro *número de puestos*:

En el estudio realizado por [Aptel et al., 08] las líneas de producción estudiadas se organizan, cada una, en dos sistemas de rotación formados por un sistema principal de puestos de ensamblaje que incluye 11 puestos y otro sistema adyacente formado por 3 puestos, quedando 2 puestos de la línea reservados para trabajadores con restricciones médicas, el puesto de paletizado queda excluido de la rotación.

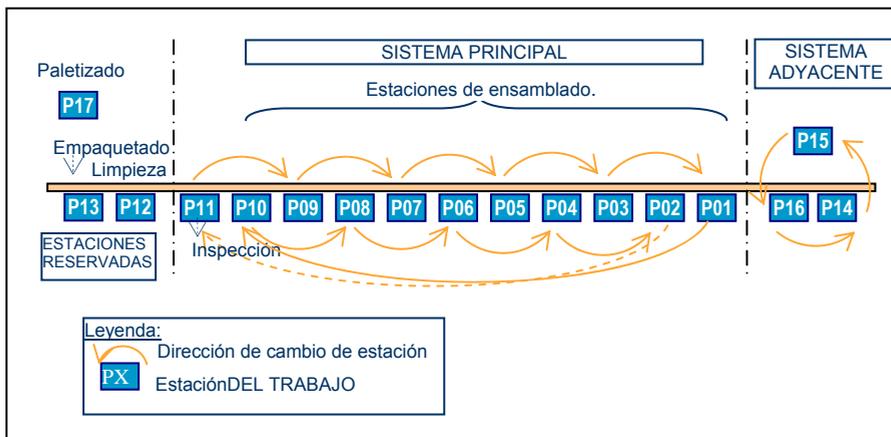


Figura 2.4: Sistema de rotaciones en la línea B según el orden de rotación P11-P02 (Adaptado de [Aptel et al., 08]).

Por ejemplo [Frazer, 04], para el estudio de la influencia de las rotaciones en las dolencias de la parte baja de la espalda, establece 2 grupos de rotaciones en base a una clasificación inicial de los puestos mediante un índice que denomina LBPRI (*Low Back Pain Reporting Index*), relacionado con la probabilidad de que el puesto esté asociado a registros de lesiones en la parte baja de la espalda. Posteriormente, en cada grupo de rotación crea 4 agendas de rotación con 2, 3, 4, y 5 trabajadores implicados. Tras el análisis de los resultados es posible observar que en la mayoría de los casos la diferencia entre la exigencia del trabajo con rotación y sin rotación aumenta con el número de trabajadores/puestos implicados (ver Tabla 2.5).

Tipo de trabajo	Nº de trabajadores	Exigencia de trabajo sin rotación	Exigencia de trabajo con rotación	Diferencia
Fácil	2	1,07	1,28	0,21
	3	1,32	1,76	0,44
	4	1,57	2,54	0,97
	5	1,82	3,18	1,36
Real	2	1,07	1,28	0,21
	3	1,62	1,91	0,29
	4	2,17	2,54	0,37
	5	2,71	3,18	0,47

Tabla 2.5: El efecto de la rotación en las exigencias de trabajo según el número de trabajadores implicados (fuente [Frazer, 04]).

En un estudio realizado por [Vézina et al., 95] en una planta de corte en Turquía, no fue posible disminuir el número de puestos a rotar, que se estableció en 15 estaciones, debido a que en ambos lados de la línea había puestos que bien los hombres o bien las mujeres, no deseaban ocupar. Las mujeres rechazaban puestos que supusieran aplicar una fuerza elevada y los hombres evitaban las estaciones con elevada demanda estática.

En un estudio realizado en la planta de montaje de Ford España [Sánchez-Fajardo, 05] consistente en la implantación de un sistema de rotaciones ergonómico para prevenir los TME, se definieron rotaciones de manera que los trabajadores alternasen la ocupación de puestos clasificados de alta severidad con otros de severidad media y baja, con el objetivo de reducir paulatinamente la carga física del trabajador. Como resultado los trabajadores se organizaron en grupos de trabajo que rotaban entre 2, 3 o 4 puestos.

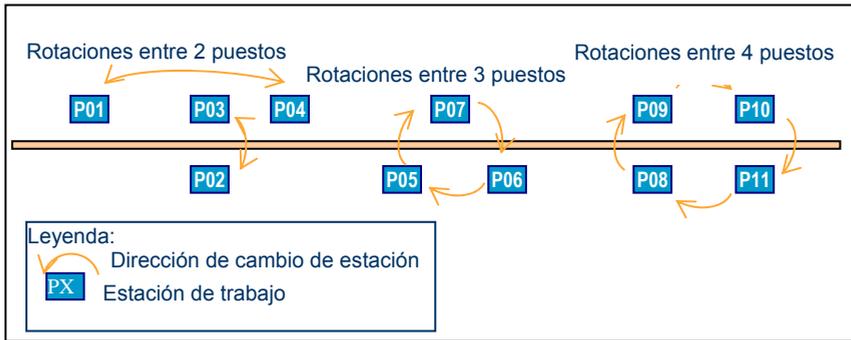


Figura 2.5: Plan de rotaciones ergonómico (Adaptado de [Sánchez-Fajardo, 05]).

[Vézina, 04] señala que en los mataderos y en las plantas de procesamiento de carne de ave se utiliza un elevado número de estaciones en rotación, alrededor de 12 estaciones son involucradas en el sistema de rotaciones.

Dada la complejidad del problema y la gran variedad de factores que pueden influir a la hora de determinar el número de estaciones a rotar, resulta complejo extrapolar los valores de los estudios existentes. Sin embargo, pueden orientar sobre los aspectos a considerar a la hora de determinar el número de estaciones a rotar, tales como: la variación de la exposición al riesgo, la formación necesaria, la disposición de los trabajadores, las limitaciones físicas de los intercambios, las preferencias de los trabajadores, los salarios asociados a los puestos, etc.

2.7.2 La frecuencia de la rotación

Según [Tharmmaphornphilas et al., 04] la *longitud del intervalo de rotación* puede definirse como “el periodo de tiempo durante el cual un trabajador realiza una tarea antes de ser rotado a otra”. Por lo general, se han utilizado procedimientos sencillos para rotar a los trabajadores, como por ejemplo, rotaciones a intervalos aleatorios o durante los periodos de descanso. Frente a dichos métodos poco exhaustivos [Tharmmaphornphilas et al., 04] propone un método cuantitativo para determinar la duración de los intervalos de las rotaciones. Dicho método es aplicado por el autor en un entorno con levantamientos manuales de cargas y en otro caracterizado por el ruido, en concreto, de producción de madera en un aserradero. Tras aplicar el método, [Tharmmaphornphilas et al., 04] concluye que los intervalos de aproximadamente 2 horas parecen ser los más adecuados. Además, un periodo de 2 horas, representa un intervalo de rotación de puestos muy práctico desde el punto de vista de su implementación real. El resultado es refrendado por un estudio realizado por el mismo autor sobre los intervalos de rotación que se aplican en la realidad. En dicho estudio se indica que los intervalos de rotación reales varían según el tipo de trabajos implicados, y que las rotaciones a intervalos de 2 horas son utilizadas con frecuencia. Si bien la investigación de [Tharmmaphornphilas et al., 04] se centra en el levantamiento de cargas y en el ruido, el autor indica que es posible la adaptación del método a otros casos con diferentes criterios. A pesar de los resultados obtenidos, [Tharmmaphornphilas et al., 04] puntualiza que es necesario

evaluar más casos antes de poder concluir de forma general que los intervalos de 2 horas son una buena elección.

Según [Vézina, 04] la frecuencia de la rotación es un parámetro que debe establecerse considerando la gestión del intercambio de una estación a otra y repercute sobre la recuperación muscular y el mantenimiento o no de la especialización. Es posible encontrar rotaciones semanales, diarias o cada media hora. En los trabajos altamente repetitivos, por lo general se realizan rotaciones con elevada frecuencia, por ejemplo en los descansos (cada 2 horas aproximadamente), o a intervalos de una hora, o incluso cada media hora o 15 minutos.

En muchas organizaciones el intercambio entre estaciones se realiza en los descansos. Por ejemplo, en la línea estudiada por [Aptel et al., 08] los trabajadores permanecen en cada puesto durante aproximadamente 2 horas y cambian de estación durante los descansos, lo cual elimina la necesidad de reservar tiempo para la transferencia de puestos entre los trabajadores. En el estudio realizado por [Jorgensen et al., 05], en el sector del automóvil en Estados Unidos, se observa que el periodo medio de rotación es de 2 horas, periodo que normalmente coincide con los descansos. Según [Jorgensen et al., 05] dicho resultado estaría relacionado con el hecho de que sea la opinión de los supervisores la que más se considere a la hora de diseñar la rotación. Esta opinión pesaría más que el análisis ergonómico, y por tanto la decisión de cuando rotar puede estar basada más en la conveniencia (rotar después del descanso) que en la duración de la exposición a factores de riesgo.

Si es posible rotar en ciertos lugares de trabajo a intervalo de 15 minutos es porque las estaciones de trabajo están próximas y los trabajadores van recorriendo la línea de producción. Sin embargo, este intercambio rápido puede presentar problemas para los trabajadores situados al final de la línea que deben trasladarse hasta la estación inicial (ver Figura 2.4). En estos casos, deben llevarse a cabo estrategias para facilitar a los trabajadores el intercambio, permitiendo su adaptación a la nueva demanda muscular, coordinación de movimientos, ritmo de trabajo, etc.

En situaciones donde la rotación ocurre cada hora y los trabajadores están sujetos al ritmo de la cadena de producción o de una máquina, y la distancia entre estaciones requiere un largo recorrido, los trabajadores deben encontrar formas de no retrasarse. Los primeros ciclos después de una rotación pueden resultar muy costosos para el trabajador que debe recuperar el retraso.

Desde el punto de vista de los TME la frecuencia de rotación y el orden de los trabajos a rotar debería permitir introducir diversidad en la *exposición biomecánica*, especialmente para trabajos caracterizados por el mantenimiento de posturas estáticas, como el trabajo de oficina con ordenadores, o por la repetitividad de las operaciones, como el trabajo de ciclo corto de ensamblado industrial [Mathiassen, 06]. Según [Vézina, 04], la frecuencia de rotación debería estar basada en las capacidades de los trabajadores para ocupar los puestos sin desarrollar fatiga física o mental y sin sobrecargar ciertas partes de su cuerpo. Sin embargo, es complejo establecer el periodo de permanencia en un puesto sin acumular fatiga. La utilización de instrumentos como el electromiógrafo permite evaluar de forma directa

el estado del trabajador. El tiempo de permanencia en una estación dependerá tanto de su exigencia de trabajo como de las características del trabajador.

Otro factor que puede influir en la frecuencia de rotación es la existencia de puestos no deseados o por el contrario requeridos por la mayoría de los trabajadores. El reparto equitativo de dichos puestos puede condicionar la frecuencia de rotación. Por último, [Vézina, 04] señala que periodos de intercambio demasiado dilatados pueden repercutir en la pérdida de las habilidades requeridas en los puestos no ocupados y por tanto suponer un problema para los trabajadores cuando son de nuevo asignados a dichos puestos.



Figura 2.6: Estudio con electromiógrafo de tres estaciones de trabajo de ensamblado de indicadores.

De izquierda a derecha: ensamblado de indicadores (a), ensamblado de tacómetros (b), ensamblado final (c). (Fuente [Möller et al., 04])

2.7.3 El orden de los trabajos a rotar

[Tharmmaphornphilas et al., 04] describe diferentes métodos aplicados al problema de la secuenciación de los puestos en una rotación. Por ejemplo, un método sencillo para secuenciar los puestos es rotar aleatoriamente a los trabajadores entre ellos. Otro método consiste en seguir la secuencia de la tarea de forma que los trabajadores se desplazan desde la primera estación de la línea de producción a la segunda y así sucesivamente hasta que llegan a la última estación y entonces vuelven a la primera. Otra posibilidad es rotar a los trabajadores en base a una política de intercambio determinada. Por ejemplo, [Henderson, 92] adopta el criterio de no asignar consecutivamente a un trabajador a dos tareas estresantes. [Carnahan et al., 99; Carnahan et al., 00] desarrolla un algoritmo genético (ver Capítulo 6, punto 6.12.1) que trata de encontrar el orden de asignación de puestos de tal forma que se minimice el riesgo potencial de sufrir lesiones de espalda. Dicho riesgo es evaluado mediante el método *JSI (Job Severity Index)* [Liles et al., 84]. [Tharmmaphornphila et al., 03] propone un modelo matemático para crear agendas de rotación que minimicen la exposición al ruido en el entorno de trabajo y de esta forma se reduzcan las lesiones de pérdida de audición de los trabajadores. En este caso, el orden de los trabajos a rotar dependerá de los niveles de ruido registrados en los puestos. El mismo autor [Tharmmaphornphilas et al., 07] también propone una metodología para generar agendas de rotación que reduzcan las lesiones lumbares. Nuevamente el orden de los trabajos a rotar se establece en base al índice *JSI (Job Severity Index)* (ver capítulo 5, punto 5.1.1.1.1). Por su parte [Triggs et al., 00] sugiere como métodos válidos para clasificar los puestos para su

secuenciación en agendas de rotación, el método *JSI (Job Strain Index)* [Moore et al., 95] o la ecuación revisada de *NIOSH* [Waters et al., 93] (ver Capítulo 4, punto 4.3.1). Según el estudio de [Jorgensen et al., 05], aunque son escasas las guías publicadas sobre cómo utilizar métodos válidos para diseñar agendas de rotación, dicho problema no es considerado una limitación importante, debido a que el diseño de las agendas de rotación, por lo general, se basa en las decisiones de supervisores o ingenieros de producción.

Con frecuencia el orden de las rotaciones está relacionado con el orden de los puestos a lo largo de la línea de producción (ver Figura 2.4), con el objetivo de reducir el tiempo necesario para los intercambios. Sin embargo, si en los puestos adyacentes se realiza la misma tarea o similar, quedará limitada la posibilidad de introducir variación de la actividad del trabajador mediante la rotación [Falardeau et al., 03b], variación recomendada para la prevención de los TME mediante dicha técnica (ver 2.5.3.1.2).

2.8. Discusión sobre la rotación

Si bien la rotación de puestos ha sido valorada positivamente por algunos autores bajo diferentes perspectivas: el **aprendizaje** [Eriksson et al., 06], la **productividad** [Miller et al., 74; Van Velzer et al., 92; Cosgel et al., 98], **los TME** [Jonsson, 88; Hazzard et al., 92; Grant et al., 97; Paul, 99; Carnahan et al., 99; Kuijer et al., 99; Triggs et al., 00; Carnahan et al., 00; Rissen et al., 02; Tharmaphornphila et al., 03; Kogi et al., 03; Tharmaphornphilas et al., 04; Jorgensen et al., 05; Mathiassen, 06; Tharmaphornphilas et al., 07] **y los factores psicosociales** [Ellis, 99; Triggs et al., 00; Rissen et al., 02; Oullet et al., 03; St-Vincent et al., 03; Vézina, 04; Aptel et al., 08]. Existen estudios que ponen de manifiesto sus limitaciones.

Desde el punto de vista organizativo [Vézina, 04] señala problemas de la rotación de puestos como: la resistencia de los trabajadores más antiguos a aprender nuevos trabajos, la percepción de propiedad de las estaciones de trabajo por el trabajador, problemas físicos para pasar de un puesto a otro, dificultad en la selección de los puestos a rotar o el miedo a los errores de los trabajadores.

Es posible encontrar estudios que obtienen buenos resultados con la aplicación de las rotaciones para disminuir los TME [Kuijer et al., 99] y otros, incluso del mismo autor, en los que se concluye un aumento del riesgo [Kuijer et al., 05]. La investigación realizada por [Kuijer et al., 05] sobre los efectos la rotación de puestos en el ámbito de la recogida de basuras, concluye que la introducción de la rotación coincide con una reducción marginal del tiempo de recuperación de los trabajadores, a la vez que se asocia con un incremento de las lesiones en la parte baja de la espalda. El estudio revela, contrariamente a las expectativas, que los dos grupos de trabajadores incluidos en planes de rotación, muestran un mayor riesgo de lesión en la parte baja de la espalda que los que no rotan. [Kuijer et al., 05] explica dicho efecto de la rotación sobre los TME en base a dos argumentos. En primer lugar argumenta que probablemente la rotación de puestos no tiene efecto sobre los picos de carga mecánica existentes durante las tareas de recogida y conducción, debido a

que sólo actúa sobre la carga mecánica acumulada. Así pues, cuando los picos de carga son considerados la causa principal de lesión de espalda, por encima de la acumulación de carga, la efectividad de la rotación puede ser menor de lo esperado. Dicha circunstancia es también analizada sistemáticamente por [Frazer et al., 03], que coincide en la limitación de la rotación ante la presencia de picos de esfuerzo. El segundo argumento de [Kuijjer et al., 05], hace referencia al efecto de las vibraciones y de la postura estática sobre las lesiones de espalda, ambas circunstancias localizadas en el puesto de conductor del camión de recogida. Respecto a las vibraciones, existen evidencias fuertes de su efecto sobre el incremento de riesgo de lesión de espalda [Burdorf et al., 96; Bernard, 97], evidencias menos claras en su relación con las posturas estáticas [Burdorf et al., 96]. Sin embargo [Kuijjer et al., 05], a pesar de los resultados adversos obtenidos, afirma que concluir la relación entre la rotación y el incremento del riesgo de lesiones en la parte baja de la espalda es prematuro. La naturaleza episódica de las lesiones músculo-esqueléticas, los periodos cortos de seguimiento, así como el efecto de la selección de trabajadores no sanos, constituyen elementos que dificultan la evaluación de la efectividad de la rotación en la vida real. Para concluir, según [Kuijjer et al., 05], la efectividad de la rotación debe ser estudiada entre empleados relativamente jóvenes y recientes, así como en trabajos cuidadosamente seleccionados.

El análisis llevado a cabo por [Frazer et al., 03] sobre el efecto de la rotación en las lesiones lumbares revela un incremento del riesgo mayor en los trabajadores que rotan a un puesto exigente que la reducción experimentada por aquellos que lo abandonan (en la simulación realizada por el autor se rota únicamente entre dos puestos). Tan pronto como un trabajador que ocupa un puesto ligero rota a un puesto exigente se produce un aumento de la probabilidad de dolor lumbar debido a la exposición inmediata a picos de carga (o sobreesfuerzos). El autor afirma que para solventar dicho problema no es suficiente con la eliminación de las tareas pesadas de los puestos. Esto es necesario pero no suficiente. El riesgo puede ser elevado como consecuencia de la repetición prolongada de tareas que requieren picos de fuerza bajos. Tanto la amplitud como la frecuencia de los esfuerzos deben considerarse a la hora de tratar de reducir el riesgo. Por ejemplo, reducir esfuerzos altos que se repiten o se prolongan tiene un efecto beneficioso sobre ambos tipos de factores de riesgo (amplitud y frecuencia). [Frazer et al., 03] subraya la importancia del resultado obtenido dada la popularidad de la rotación como mecanismo de reducción del riesgo. Si bien, indica la necesidad de seguir investigando sobre los efectos de la rotación en la salud.

En el estudio realizado por [Aptel et al., 08], los resultados obtenidos ponen de manifiesto la ineficiencia del sistema de rotaciones propuesto como mecanismo de reducción de los TME, si bien se indica que el motivo de dicha desviación respecto a los beneficios esperados, puede deberse a la dificultad de comparación biomecánica entre las estaciones de trabajo involucradas en la rotación, así como a la rigidez y limitación del sistema de rotaciones provocado por la reserva de determinados puestos considerados "ligeros" para trabajadores bajo supervisión médica.

Aunque existen algunos estudios cuyos resultados podrían desaconsejar el

empleo de la rotación de puestos de trabajo como mecanismo de prevención de los TME, en la mayor parte de ellos, los investigadores atribuyen dichos resultados negativos a circunstancias específicas del caso analizado, como la existencia de picos de carga, la falta de variación biomecánica o la rigidez del sistema. En ningún caso se concluye categóricamente la ineficiencia de las rotaciones, señalándose la necesidad de profundizar en su investigación.

2.9. Casos de aplicación de la rotación de puestos de trabajo

En el presente punto se analiza la rotación de puestos de trabajo en dos sectores de gran relevancia económica: la industria del automóvil europea y el sector manufacturero de Estados Unidos.

El sector del automóvil destaca por su preocupación por la salud de los trabajadores. Dicha preocupación ha motivado la adopción de medidas de mejora ergonómica entre las que se encuentra, cada vez más, la rotación de puestos de trabajo. Los bajos índices de lesiones observados en el sector reflejan los buenos resultados de las prácticas ergonómicas llevadas a cabo [Freiboth et al., 97]. Desde el punto de vista productivo, [Cosgel et al., 98] subraya la contribución de la aplicación de la rotación de puestos de trabajo al éxito de una de las empresas del sector automovilístico japonés más destacadas, Toyota.

En el sector manufacturero de Estados Unidos un elevado porcentaje de empresas (42%) aplican la rotación de puestos de trabajo como mecanismo de mejora ergonómica, siendo la tendencia a implantar rotaciones creciente [Jorgensen et al., 05]. Además, en la mayoría de los casos la rotación de puestos de trabajo se considera una medida de mejora ergonómica de carácter permanente, con la que se pretende, principalmente, reducir el coste de las lesiones relacionadas con el trabajo al tiempo que se aumenta la flexibilidad laboral de los trabajadores, su satisfacción, o la calidad de los productos.

2.9.1 La rotación de puestos de trabajo en la industria del automóvil en Europa

La industria del automóvil, como sector clave en las modernas economías, trata de ser competitiva, a la vez que trata de preservar la salud de sus empleados. Estos objetivos han dado lugar al desarrollo de nuevas estructuras de trabajo como: el trabajo en equipo, la ampliación del contenido de los trabajos o la rotación de puestos de trabajo. Con frecuencia, dichas estructuras han sustituido a la necesidad de realizar cambios en la organización y la tecnología de los sistemas de producción. Existen dos razones principales para dicha sustitución: el deseo de las organizaciones de que los cambios sean lo más rápidos posible y que los cambios en las estructuras de trabajo resulten, en general, más baratos que los cambios en tecnología.

El estudio llevado a cabo por [Freiboth et al., 97] en los departamentos de ensamblado de 10 plantas del sector del automóvil en Europa, revela una tendencia creciente en la implantación de la rotación de puestos de trabajo. Todos los departamentos analizados en situación de introducción o de desarrollo de nuevas

estructuras de trabajo consideran la necesidad de implantar un sistema de rotación de puestos.

[Freiboth et al., 97] señala que en la práctica, existen diferencias entre los departamentos en cuanto a la posibilidad de implantación de un sistema de rotaciones. Por ejemplo, existen diferencias en los niveles de cualificación de los miembros de los equipos de ensamblado y en la motivación de los empleados para trabajar en diferentes puestos. También se aprecian diferencias en la polivalencia de los empleados. En algunos casos los responsables de la gestión son partidarios de que todos los trabajadores conozcan más de un trabajo, con el objetivo de garantizar la máxima flexibilidad, mientras que en otros casos consideran que no todos los trabajadores deben ser polivalentes. Así pues, el número de trabajos en que los empleados deben ser competentes varía entre departamentos. Dicha diferencia depende tanto de la complejidad de los trabajos como de las preferencias individuales del responsable de la gestión o de sus superiores.

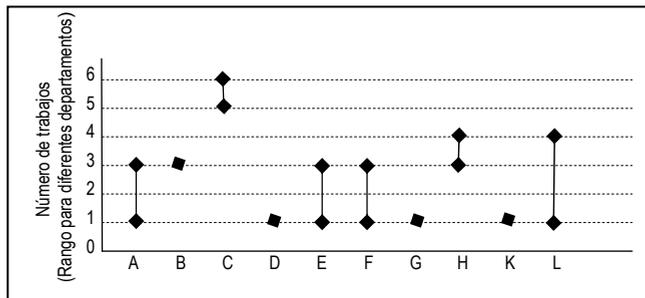


Figura 2.7: Número de trabajos diferentes en los que cada ensamblador debe ser competente para cada una de las plantas analizadas (Adaptado de [Freiboth et al., 97]).

Resulta significativo que en la mayoría de las plantas de ensamblado existen trabajadores polivalentes (ver Figura 2.3), lo cual puede facilitar la implantación de un sistema de rotaciones reduciéndose el periodo de formación necesario. Por otra parte, la existencia de trabajadores especializados que deben ocupar determinados puestos puede provocar rigidez en el sistema de rotaciones, limitando su eficiencia al reducirse la diversidad entre los puestos a rotar.

En general, entre las tareas de ensamblado rara vez se integran otras tareas de tipo logístico o de control de calidad de los productos. En los casos en los que sí se incorporan dichas tareas, se distinguen dos tipos de integración diferentes: una en la que se incluye a trabajadores que realizan el manejo de material en el equipo de ensamblado, sin incluirlos en el sistema de rotaciones, y un segundo tipo de integración en el que se añaden dichas tareas a la agenda de rotación para ser rotadas entre los trabajadores. Las tareas de gestión de calidad, normalmente, son realizadas por trabajadores especializados y por tanto son excluidas de la rotación.

Tras el análisis de las características de las plantas de ensamblado [Freiboth et al., 97] concluye que las estructuras laborales existentes en los diversos

departamentos son aptas para la introducción de mejoras en la organización del trabajo como: la rotación de puestos de trabajo, la ampliación del trabajo, el enriquecimiento del trabajo o el trabajo en equipo con aumento de la autonomía de los trabajadores. Si bien, dichas mejoras están limitadas con frecuencia por las condiciones técnicas del sistema de ensamblado.

2.9.2 La rotación de puestos de trabajo en Estados Unidos en el sector manufacturero

La investigación llevada a cabo por [Jorgensen et al., 05] sobre las características de la rotación de puestos en el sector manufacturero de Estados Unidos, analiza aspectos como la prevalencia de la rotación de puestos, los métodos utilizados para identificar los trabajos a rotar, o los beneficios y limitaciones de la rotación de puestos. A continuación se describe la información más relevante aportada por dicho estudio.

El 42% de las empresas estudiadas afirman utilizar la rotación de puestos de trabajo. Dicho porcentaje es mayor que el resultado obtenido anteriormente por [Gittleman et al., 98], que indica un porcentaje de utilización de las rotaciones del 24,2% en compañías (excluyendo a las del sector agrario) con 50 ó más empleados. [Dempsey, 02], por su parte, obtiene que la rotación se aplica en un 23% de los trabajos que implican levantamiento de cargas en el sector industrial y de servicios de los Estados Unidos. El porcentaje de utilización de la rotación aportado por [Jorgensen et al., 05] pone de relieve la importancia creciente de la técnica de rotación de puestos de trabajo.

La rotación de puestos de trabajo es un método de organización del trabajo relativamente reciente. El tiempo medio de utilización de la rotación es de 5 años. El 83% de las compañías han aplicado la rotación durante más de 2 años. Dichos datos revelan el carácter permanente de la intervención, en contradicción con las recomendaciones realizadas por organismos oficiales como NIOSH (*National Institute for Occupational Safety and Health*) y OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*), que establecen que la rotación de puestos debe ser una estrategia temporal.

Respecto a los objetivos perseguidos por las empresas que aplican la rotación, el estudio revela que el objetivo principal es la reducción de las incidencias y el coste de las lesiones relacionadas con el trabajo, seguido del incremento de las habilidades de los trabajadores, y en tercer lugar, se considera la mejora de aspectos como el estrés mental, la calidad de los productos y la satisfacción de los trabajadores.

A la hora de diseñar las agendas de rotación se consideran los siguientes factores: en primer lugar, la reducción de la exposición al riesgo de los trabajadores, y en segundo el impacto que la rotación puede tener en la producción. La inclusión de empleados con restricciones médicas en la agenda de rotación es el factor menos considerado.

El método utilizado para diseñar la agenda de rotación se fundamentaba en primer lugar en las decisiones del supervisor, seguido de los análisis ergonómicos. Considerar la información proporcionada por los empleados es el siguiente elemento más valorado durante el diseño de las rotaciones.

La duración media entre rotaciones es de 2 horas, lo cual coincidía con el tiempo entre descansos. [Jorgensen et al., 05] relaciona dicho resultado con el diseño de las agendas de rotación bajo criterios de supervisión (por ejemplo el ahorro de tiempo) y no ergonómicos (por ejemplo la reducción de la duración de la exposición al riesgo).

En cuanto a los beneficios derivado de la utilización de la rotación, destaca el desarrollo de las habilidades de los trabajadores, seguido del decremento de los accidentes y los síntomas de lesiones relacionadas con el trabajo, y el incremento de la moral y la satisfacción de los empleados. Aunque los objetivos perseguidos con la rotación están relacionados principalmente con la seguridad y la salud de los empleados, el incremento de las habilidades de los trabajadores es mejor valorada que sus efectos sobre la seguridad y la salud de los trabajadores.

Respecto a las limitaciones y obstáculos para la implementación de la rotación destaca: la inclusión de empleados con limitaciones médicas, la falta de trabajos para incluir en la rotación y el decremento de la calidad del producto. Otros obstáculos apuntados son: la escasa diversidad de los trabajos, los trabajos con diferentes escalas salariales y la baja moral y satisfacción de los trabajadores. Además, se observa una clara relación entre la percepción de escasez de trabajos para incluir en la rotación y la presencia de individuos con restricciones médicas.

Otra limitación importante percibida para la implementación de la rotación de puestos es la oposición de sindicatos. Esta oposición es debida a la percepción de los siguientes obstáculos: la inclusión de empleados con restricciones médicas y la inclusión de trabajos con diferentes escalas salariales. Otros autores también han señalado la resistencia de los sindicatos a la rotación ante la existencia de diferencias salariales entre los trabajos incluidos la rotación [Hazzard et al., 92; Triggs et al., 00; Vézina, 04].

2.10. Beneficios y limitaciones de la rotación

A la rotación de puestos se le han atribuido numerosos beneficios y limitaciones. La Tabla 2.7 recopila y amplía los beneficios señalados durante el presente capítulo. Las limitaciones observadas son resumidas en la Tabla 2.8.

REFERENCIAS	BENEFICIOS DE LA ROTACIÓN
[Cosgel et al., 98]	Mecanismo de introducción de innovación.
[Federal Register, 00; National Institute for Occupational Safety and Health, 90a; National Institute for Occupational Safety and Health, 90b; National Institute for Occupational Safety and Health, 91; National Institute for Occupational Safety and Health, 92; National Institute for Occupational Safety and Health, 95; National Institute for Occupational Safety and Health, 96]	Estrategia administrativa para la reducción del riesgo de TME en el trabajo.
[Huang, 99].	Influye positivamente en la satisfacción de los trabajadores y en su formación.
[Jonsson, 88; Hazzard et al., 92; Hinnen et al., 92; Grant et al., 97; Paul, 99]	Disminuye la fatiga y el riesgo de aparición de lesiones músculo-esqueléticas y desórdenes traumáticos acumulativos (DTAs).
[Jorgensen et al., 05]	Permite el desarrollo de las habilidades de los trabajadores, la disminución de los accidentes y los síntomas de lesiones relacionadas con el trabajo, y el aumento de la moral y la satisfacción de los empleados. Es una alternativa al coste en equipamiento y rediseño de los puestos para prevenir los TME.
[Kogi et al., 03; Davis, 05]	Supone bajos costes de implantación en comparación con otras posibles medidas de mejora de las condiciones de trabajo.
[Kogi et al., 03]	Útil para evitar los movimientos repetitivos y prevenir la sobrecarga muscular.
[Kuijjer et al., 99]	Disminuye la carga percibida (definida en función de la fatiga percibida y del esfuerzo percibido). Disminuye la carga energética (definida en función del ritmo cardiaco). Disminuye el nivel de la carga postural (definida como el tiempo durante el cual la flexión del tronco estaba > 45° y la elevación de uno o dos de los brazos superiores es > 60°.)

Tabla 2.6: Tabla resumen de los beneficios de la rotación y sus referencias bibliográficas (Parte I).

REFERENCIAS	BENEFICIOS DE LA ROTACIÓN
[MacLeod et al., 93]	Reduce el aburrimiento y el estrés. Incrementa la innovación. Incrementa la libertad temporal de las actividades. Reduce los desórdenes traumáticos acumulativos. (DTAs) Incrementa la producción. Reduce el absentismo. Reduce la rotación (abandono).de personal
[Miller et al., 74]	Incrementa la productividad.
[Eriksson et al., 06]	Permite a la empresa adquirir un mayor conocimiento sobre las capacidades de sus empleados al observar su rendimiento en diversos puestos.
[Oullet et al., 03]	Permite la ruptura con la monotonía.
[Rissen et al., 02]	Tiene un efecto positivo sobre la actividad muscular en el cuello y los hombros. Tiene un impacto positivo sobre la percepción subjetiva de los trabajadores. Aumenta el orgullo y el aprecio al trabajo percibido por los trabajadores.
[Rodrick et al., 06]	Potencia la socialización y motiva a los empleados.
[St-Vincent et al., 03]	Mejora la salud y reduce la monotonía de los trabajadores.
[Triggs et al., 00]	Beneficia la formación, aumenta la motivación y la innovación, reduce el estrés y la monotonía, disminuye el absentismo, reduce el abandono de los trabajos, incrementa la respuesta ante cambios, incrementa la producción y reduce los desórdenes traumáticos acumulativos.
[Van Velzer et al., 92]	Es una estrategia de intervención ergonómica económica.
[Vézina, 04]	Mecanismo de prevención de los TME e influencia positiva sobre los factores psicosociales.
[Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 09]	Permite la alternancia de grupos de músculos-tendones y favorece la recuperación y el descanso del trabajo realizado.

Tabla 2.7: Tabla resumen de los beneficios de la rotación y sus referencias bibliográficas (Parte II).

REFERENCIAS	LIMITACIONES DE LA ROTACIÓN
[Vézina et al., 95; Abrahamsson, 02]	Problemas a la hora de que hombres y mujeres participen en las rotaciones bajo los mismos términos (salario, nivel de jerarquía).
[Aptel et al., 08]	La inclusión en la rotación de trabajadores con restricciones médicas provoca la rigidez del sistema de rotaciones y limita sus posibles beneficios. Relativa ineficiencia del sistema de rotaciones en relación a la prevención de los TME
[Carnahan et al., 00]	Problemas relacionados con la existencia de una población de trabajadores diversa con capacidades distintas.
[Cheraskin et al., 96]	Puede incrementar la carga de trabajo y disminuir la productividad de los empleados que rotan. Puede incrementar los costes debido a los errores en que los empleados incurren cuando aprenden un nuevo trabajo.
[Frazer et al., 03]	La inclusión en la rotación de puestos con elevadas exigencias biomecánicas expone al trabajador a una situación de riesgo elevado que aunque puntual o de corta duración puede ocasionar lesiones.
[Hazzard et al., 92; Triggs et al., 00]	Resistencia de los sindicatos respecto a las diferencias salariales entre los trabajadores incluidos en la misma agenda de rotación
[Jorgensen et al., 05]	Disminución de la calidad de los productos. Problemas derivados de la inclusión de empleados con limitaciones médicas que provocan rigidez en la rotación. Escasez de trabajos para incluir en la rotación. Escasa diversidad de los trabajos. Problemas derivados de las diferentes escalas salariales de los trabajadores.
[Kuijer et al., 05]	Aumento del riesgo de lesiones músculo-esqueléticas.
[MacLeod et al., 93]	Resistencia de los trabajadores con antigüedad para aprender nuevos tipos de trabajos. Negativa de los operarios de las máquinas a ceder su puesto a otros trabajadores. Problemas prácticos derivados del traslado físico desde un puesto de trabajo a otro. Requiere formación y entrenamiento de los trabajadores para que ocupen nuevos puestos. Dificultad para determinar los trabajos adecuados a incluir en la rotación. Utilización inadecuada de las rotaciones por los gestores.
[St-Vincent et al., 03]	Aumento de la preocupación de los trabajadores por el desarrollo de nuevas competencias derivadas de la implantación del sistema de rotaciones.
[Triggs et al., 00; Frazer et al., 03]	Incremento del riesgo para los trabajadores si los trabajos no son seleccionados adecuadamente.
[Vézina, 04]	Resistencia de los trabajadores con cierta antigüedad a cambiar su estación de trabajo por otras. Resistencia de los trabajadores más antiguos a aprender nuevos trabajos. La percepción de propiedad de las estaciones de trabajo por el trabajador. Problemas físicos para pasar de un puesto a otro. Dificultad en la selección de los puestos a rotar. El miedo a los errores de los trabajadores

Tabla 2.8: Tabla resumen de las limitaciones de la rotación y sus referencias bibliográficas.

3

**Factores de riesgo relacionados con los
trastornos músculo-esqueléticos**

3. FACTORES DE RIESGO RELACIONADOS CON LOS TRASTORNOS MÚSCULO-ESQUELÉTICOS

3.1. Introducción

Los TME de origen laboral⁸ son, según la [Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 07], alteraciones que sufren estructuras corporales como los músculos, articulaciones, tendones, ligamentos, nervios, huesos y el sistema circulatorio, causadas o agravadas fundamentalmente por el trabajo y los efectos del entorno en el que éste se desarrolla. Los TME afectan principalmente a la espalda (especialmente en la zona lumbar) [Bernard, 97; Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 05; Díez-de-Ulzurrun et al., 07] y al cuello [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 03; Ferrari et al., 03], aunque también pueden afectar a los hombros [Herberts et al., 81; Baron et al., 91; Ohlsson et al., 94; Ohlsson et al., 95], a las extremidades superiores [Pilgian et al., 00; Haahr et al., 03; Shir et al., 06] y a las extremidades inferiores [Tsuritani et al., 02].

En la actualidad los TME de origen laboral constituyen una de las principales causas de enfermedad relacionadas con el trabajo. En Europa el 24% de los trabajadores afirma sufrir dolor de espalda y el 22,8% se queja de dolores musculares [Eurofound, 05]. La repercusión de los problemas músculo-esqueléticos no sólo afecta a la calidad de vida de los trabajadores (disminuyendo sus ingresos debido a las bajas laborales, aumentando sus gastos en fármacos, precisando consultas médicas, etc.), sino que además, suponen un importante coste social: prestaciones económicas por incapacidad temporal o permanente, gastos hospitalarios, consultas médicas, prestación farmacéutica, etc., y económico. En Europa, en 1999, el coste anual de los TME oscilaba entre el 0,5% y el 2% del Producto Interior Bruto (PIB) [Díez-de-Ulzurrun et al., 07], manteniéndose actualmente dicho coste en el 1,6% del PIB [Podniece et al., 08]. En algunos países de la Unión Europea el 40% de los costes económicos que tienen las enfermedades y los accidentes de trabajo se deben a los TME. Como consecuencia, tanto las empresas que ven afectada su productividad, como organismos oficiales encargados de velar por la salud y la seguridad de los trabajadores, prestan especial atención a este tipo de dolencias. La atención prestada por los organismos oficiales se refleja, entre otras iniciativas, en la continua publicación de informes sobre los TME y en el desarrollo de campañas y políticas destinadas a su prevención [Bernard, 97; Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 00a; Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 00b; Agencia Europea

⁸ La organización Mundial de la Salud define trastorno de origen laboral como aquel que se produce por una serie de factores, entre los cuales el entorno laboral y la realización del trabajo contribuyen significativamente, aunque no siempre en la misma medida, a desencadenar la enfermedad [Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 07].

para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 00c; Flaspöler et al., 05; European Agency for Safety and Health at Work, 05; Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 07; Díez-de-Ulzurrun et al., 07].

Algunos TME poseen síntomas bien definidos, como por ejemplo: la *tendinitis* de muñeca (inflamación de los tendones de la muñeca), el *síndrome del túnel carpiano* (irritación del nervio mediano responsable del cerrador del dedo índice y una mitad del dedo anular), la *epicondilitis* (irritación del tendón en los músculos del antebrazo), o la *hernia discal* (desplazamiento de un fragmento de un disco intervertebral que al comprimir el nervio adyacente es dolorosa). Sin embargo, otros TME presentan síntomas y signos poco definidos, como por ejemplo, las *mialgias* (dolor y deterioro funcional de los músculos). A este tipo de dolencias músculo-esqueléticas se les denomina, *TME de origen laboral no específicos*. Existen otras agrupaciones de trastornos de tipo músculo-esquelético que han dado lugar a términos como *LMR* (Lesiones por Movimientos Repetitivos), *TMOLCES* que son TME de origen laboral que afectan al cuello y las extremidades superiores, o *DTAs* (Dolencias Traumáticas Acumulativas), que son lesiones provocadas por esfuerzos o movimientos continuados que afectan a las partes blandas de las articulaciones [Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 00a].

Existen numerosos factores de riesgo que pueden ser causa de TME, la [Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 07] los agrupa en factores físicos y biomecánicos, factores organizativos y psicosociales, y factores individuales y personales. Entre los **factores físicos y biomecánicos** se encuentran: la manipulación manual de cargas (levantamientos, transportes, empujes) [Chaffin, 79; Punnett et al., 91; Holmström, 92; Marras et al., 95; Bernard, 97; Xiao et al., 04; Hangai et al., 08], la aplicación de fuerzas [Luopajarvi et al., 79; Wells et al., 83; Veiersted et al., 94; Liss et al., 95; Bernard, 97], la realización de movimientos repetitivos [Ohlsson et al., 89; Kamwendo et al., 91; Andersen et al., 93; Ohlsson et al., 94; Liss et al., 95; Schibye et al., 95; Bergqvist et al., 95b; Yu et al., 96; Bernard, 97], la adopción de posturas forzadas [Luopajarvi et al., 79; Amano et al., 88; Byström et al., 95; Bernard, 97], el mantenimiento de posturas estáticas [Bernard, 97; Chee et al., 04; Devereux et al., 04], las vibraciones [Cannon et al., 81; Silverstein et al., 87; Chatterjee, 92; Bovenzi et al., 95; Tanaka et al., 97; Bovenzi et al., 04; Maghsoudipour.M. et al., 08] y los entornos fríos [Hagberg et al., 95; Piedrahíta et al., 04]. Entre los **factores de riesgo organizativos y psicosociales** se encuentran: los trabajos con alta exigencia psicológica [Bernard, 97; Wang et al., 05b; Simon et al., 08], la falta de control sobre las tareas [Bernard, 97; Simon et al., 08], la escasa autonomía [Bernard, 97; Wang et al., 05a], el bajo nivel de satisfacción de los trabajadores [Wang et al., 05a], los trabajos monótonos y repetitivos [Luopajarvi et al., 79; Doelen et al., 90; Kilbom, 94; Gaudart et al., 95; Ohlsson et al., 95; Bernard, 97; Colombini, 98; Christmansson et al., 99; Latko et al., 99; Colombini et al., 02; Bonfiglioli et al., 06; Rissen, 06; Bonfiglioli et al., 07] y el escaso soporte social [Linton et al., 89; Bernard, 97; Devereux et al., 04]. Para finalizar, existen **factores de riesgo individuales**, o asociados a las características propias del trabajador, también asociados con los TME, como: su historial médico [Dempsey et al., 97], la edad [Riihimäki et al., 89; Ohlsson et al., 94; Tanaka et al.,

95; Bernard, 97; Tortosa et al., 04; Landau et al., 08], el género [Bernard, 97; Zwart et al., 00; Treaster et al., 04; Vega-Martínez, 06], la obesidad [Hrubec et al., 75; Werner et al., 94; Kortt et al., 02; Woolf et al., 06; Shiri et al., 08] o el tabaquismo [Goldberg et al., 00; Lei et al., 2005; Vieira et al., 08; Wai et al., 08].

Algunos estudios destinados a identificar y cuantificar factores de riesgo asociados con los TME han dado lugar a métodos de evaluación ergonómica, actualmente utilizados por los ergónomos como herramientas para el rediseño de puestos de trabajo que prevengan los TME. Destacan los estudios sobre la manipulación manual de cargas de [Liles et al., 84; Snook et al., 91; Waters et al., 93], sobre el mantenimiento de posturas forzadas de [Karhu et al., 77; McAtamney et al., 93; Hignett et al., 00] y sobre los movimientos repetitivos de [Moore et al., 95; Colombini, 98; Colombini et al., 02]. Según afirma la [Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 00c] muchos TME pueden prevenirse mediante intervenciones ergonómicas que modifiquen el trabajo y los lugares de trabajo a partir de la evaluación de los factores de riesgos (ver Capítulo 4 métodos de evaluación ergonómica). Sin embargo, para que la adaptación de los puestos y de las condiciones de trabajo resulte efectiva, será básico conocer qué riesgos influyen realmente en el desarrollo de los diferentes TME, objetivo éste de un gran número de investigaciones.

3.2. La magnitud del problema de los TME en el marco socio-económico actual

En la actualidad los TME relacionados con el trabajo son considerados el problema de salud más común en Europa [Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 07]. Según la IV Encuesta Europea sobre Condiciones de Trabajo [Eurofound, 05], el 24,7% de los trabajadores de la Unión Europea afirman sufrir dolor de espalda y el 22,8% se queja de dolores musculares. En los nuevos estados miembros (Rumania y Bulgaria) estos porcentajes son aún mayores, con un 39 % y un 36 %, respectivamente [Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 07].

Síntomas	% Reportado
Dolor de espalda	24.7
Dolor muscular	22.8
Fatiga	22.6
Estrés	22.3
Dolor de cabeza	15.5
Irritabilidad	10.5
Lesiones	9.7
Problemas de sueño	8.7
Ansiedad	7.8
Problemas de vista	7.8
Problemas de oído	7.2
Problemas de piel	6.6
Dificultades respiratorias	4.8
Alergias	4.0
Enfermedades coronarias	2.4
Otros	1.6

Tabla 3.1: Porcentaje de trabajadores que informa sobre diferentes síntomas en Europa (fuente [Eurofound, 05])

En España, según datos de la VI Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo (VI ENCT) realizada en 2007 [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 07] el 74,2% de los trabajadores señala sentir algún TME. Entre las molestias más frecuentes, figuran las localizadas en la zona baja de la espalda (40,1%), la nuca/cuello (27%) y la zona alta de la espalda (26,6%).



Figura 3.1: Porcentajes de localización de los TME en las diferentes partes del cuerpo (Adaptado de [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 07])

El mismo estudio indica que el sector agrario y la construcción son los más afectados por los TME sobre todo en la zona lumbar (54,4% y 46,3% respectivamente). Siendo también el sector agrario el que presenta mayor número de TME en la zona de la nuca/cuello (31,8%). Dicha información confirma la correlación existente entre la demanda física y los TME [Eurofound, 05], al observarse que los sectores con mayor exigencia física resultan los más afectados por los TME.

Las trabajadoras padecen con mayor frecuencia molestias o dolores músculo-esqueléticos que los trabajadores (76,3% en las mujeres, frente al 71,9% en los hombres). Siendo en la diferencia más significativa la correspondiente a la zona de la nuca/cuello (hombres 24%, mujeres 32,2%). En ambos sexos, las molestias más frecuentes se localizan en la parte baja de la espalda (hombres 40,9%, mujeres 40,6%) siendo en este caso los hombres los que registran un mayor porcentaje, si bien la diferencia respecto a las mujeres es muy escasa [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 07]. Dichos datos ponen de manifiesto las diferencias entre géneros en relación a los TME (ver 3.7.2).

El 2,7% de los trabajadores afirma estar diagnosticado o en tramites de diagnóstico de una enfermedad profesional⁹, entre las que destacan significativamente el grupo de enfermedades de los huesos, músculos o articulaciones (ver Tabla 3.2).

Datos en %	Industria	Construcción	Servicios	TOTAL
Han sufrido algún accidentes de trabajo (dos últimos años)	9,2	18,4	8,4	9,7
Han sido diagnosticados o están en trámite de reconocimiento de alguna enfermedad profesional	2,9	4,7	2,4	2,7
Tipo de Enfermedad Profesional				
Enfermedades de la piel	0,2		0,3	0,3
Enfermedades pulmonares		0,4	0,1	0,1
Enfermedades infecciosas		0,4		0,0
Sordera	0,7			0,1
Enfermedades o intoxicaciones por metales		0,4		0,0
Enfermedades o intoxicaciones por otras sustancias químicas	0,2		0,1	0,1
Enfermedades de los huesos, músculos o articulaciones	1,6	1,7	1,4	1,5

Tabla 3.2: Accidentes de trabajo y enfermedades profesionales (fuente [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 05]).

El estudio realizado por [Díez-de-Ulzurrun et al., 07] en la provincia de Navarra (España), coincide con los realizados por el [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), 05; Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 07] en señalar como molestias músculo-esqueléticas más frecuentes, con un mayor porcentaje de trabajadores afectados, las dolencias en la zona lumbar (39%), en la nuca/cuello (30%) y en la zona dorsal (26%). El mismo estudio pone de relieve la trascendencia económica de los TME, señalando que el 10% del total de las bajas laborales tramitadas por los médicos de atención primaria se debieron a TME, con un incremento entre 2002 y 2005 del 31% en los TME de extremidades superiores y un 4% de las lumbalgias. En 2002 se perdieron en la provincia de Navarra (España) 114.734 jornadas de trabajo relacionadas con los TME, de la cuales 73.730 se debieron a accidentes por sobreesfuerzos y el 41.004 a enfermedades profesionales músculo-esqueléticas, con una duración media de las

⁹ Se considera enfermedad profesional aquella que es consecuencia específica de un determinado trabajo [Real Academia de la Lengua Española].

bajas de 19,5 y 24,8 días, respectivamente. En el mismo periodo los TME supusieron el 33% del total de las jornadas perdidas por causas de origen profesional. En el año 2006, según el mismo estudio, los TME supusieron el 39% de todos los accidentes laborales y enfermedades profesionales. El 31% del total de accidentes de trabajo con baja notificados se debieron a sobreesfuerzos. El 93% del total de las enfermedades profesionales con baja notificadas fueron músculo-esqueléticas.

En Europa, en 1999, el coste anual de los TME oscilaba entre el 0,5% y el 2% del Producto Interior Bruto (PIB) [Díez-de-Ulzurrun et al., 07], manteniéndose actualmente dicho coste en el 1,6% del PIB. En algunos países de la Unión Europea el 40% de los costes económicos que tienen las enfermedades y los accidentes de trabajo se deben a los TME.

Según la [Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 00a], en Alemania los TME representan el 30% de las jornadas de trabajo perdidas por enfermedad, con un coste de 12.271 millones de euros. En los Países Bajos, los TME representan el 46% de todas las bajas laborales, siendo el coste estimado para las bajas laborales de menos de un año de duración, de 916 millones de euros durante 1995. En Gran Bretaña, el coste médico de los TME de origen laboral se estima entre 105,13 millones de euros y 317,89 millones de euros. Las lesiones dorso-lumbares suponen entre 53,8 millones de euros y 158,94 millones de euros. Respecto a los TME que afectan a las extremidades superiores, suponen un gasto de entre 21,27 y 68,83 millones de euros. El coste para las empresas debido a TME en los miembros superiores (TMOLCES) son de 6.776 euros por trabajador lesionado, y cada trabajador de baja permanente por TME derivados de su actividad profesional, pierde una media de 65.814 euros hasta la edad de la jubilación. En Finlandia, los TME de origen laboral supusieron alrededor del 2% del gasto público en servicios sanitarios durante 1996 (excluida la atención dental, transporte e inversiones).

En Estados Unidos, el [National Institute for Occupational Safety and Health, 96b] estimó en 13 billones (americanos) de dólares el coste derivado de los TME en el trabajo. Por su parte la [Federación Americana del Trabajo-Congreso de Organizaciones Industriales (AFL-CIO), 97] valoró dicho coste en 20 billones (americanos) de dólares. [Bernard, 97] afirma que independientemente de los métodos empleados para realizar ambas estimaciones, el problema es grande en términos económicos y de salud. Además, cuando a los gastos médicos y al coste de las indemnizaciones se les suman otros gastos como: la pérdida de salarios, las pérdidas en producción, el coste de incorporar y entrenar a trabajadores que reemplacen a los trabajadores lesionados, los costes de rehabilitación de los trabajadores afectados por TME, etc., el coste total para las economías nacionales es considerable. Por ejemplo, en Europa, los TME de las extremidades superiores cuestan más de 1.356 millones de euros al año en indemnizaciones a los trabajadores, y los TME dorso-lumbares suponen alrededor de 7.105 millones de euros en concepto de indemnizaciones [Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 00a].

El análisis de la información expuesta sobre la prevalencia de las lesiones músculo-esqueléticas y su repercusión económica, pone de manifiesto la relevancia socio-económica de este problema y justifica la necesidad de desarrollar metodologías que permitan su prevención.

3.3. Clasificación de los TME

Son muchas y diversas las dolencias que se engloban dentro de los TME. [González-Maestre, 08] propone dos posibles clasificaciones de los TME. La primera clasificación considera el elemento dañado, mientras que la segunda propuesta agrupa las lesiones músculo-esqueléticas según la zona del cuerpo donde se localizan.

Atendiendo al elemento dañado las patologías músculo-esqueléticas se dividen en:

- *Patologías articulares*: afectan a las articulaciones (mano, muñeca, codo, rodilla...), generalmente son consecuencia del mantenimiento de posturas forzadas, aunque influye también la excesiva utilización de la articulación. Los síntomas iniciales y a la vez más comunes son las *artralgias* o dolores de las articulaciones. Entre las patologías que pertenecen a este grupo de TME se encuentran la *artrosis*¹⁰ y la *artritis*¹¹.
- *Patologías periarticulares*: son conocidas como *reumatismos*¹² de partes blandas. Pertenecen a este grupo de patologías las *lesiones del tendón*¹³, la *tenosinovitis*¹⁴, las lesiones de los ligamentos, la *bursitis*¹⁵, el *ganglio*¹⁶, las *mialgias*¹⁷, las contracturas y el desgarro muscular.
- *Patologías óseas*: lesiones que afectan a los huesos.

¹⁰ *Artrosis*: degeneración del cartílago articular causada por el desgaste o desgarro de los cartílagos en las articulaciones y la consiguiente reacción en los huesos [González-Maestre, 08].

¹¹ *Artritis*: inflamación de la articulación que provoca dolor, inflamación y restricciones en el movimiento de la articulación, así como escozor e irritación en la piel [González-Maestre, 08].

¹² *Reumatismo*: Enfermedad que se manifiesta generalmente por inflamación de las articulaciones de las extremidades [Real academia de la lengua Española].

¹³ *Lesiones del tendón*: alteraciones del tejido conjuntivo situado en el extremo de un músculo, a través del cual éste se inserta en el hueso [González-Maestre, 08].

¹⁴ *Tenosinovitis*: inflamación del tejido conjuntivo que envaina el tendón debido a una irritación producida por una intensa actividad [González-Maestre, 08].

¹⁵ La *Bursitis* es la inflamación de las bolsas serosas (cavidad del tejido conectivo en forma de saco [González-Maestre, 08]) o sinoviales, situadas sobre las prominencias óseas en las zonas de apoyo y de roce, destinadas a facilitar el movimiento de tendones y músculos adyacentes [Salas-Siado, 08].

¹⁶ *Ganglio*: engrosamiento de forma, tamaño y estructura variables, en el trayecto de un vaso linfático o de un nervio (se localiza en el dorso de la mano, los tobillos o detrás de la rodilla), no producen dolor pero dificultan el movimiento [González-Maestre, 08].

¹⁷ *Mialgias*: Dolor muscular localizado asociado a esfuerzos musculares intensos y prolongados.

Si en lugar del tipo de elemento dañado (articulación, partes blandas o huesos) se considera la zona del cuerpo donde se localiza la dolencia músculo-esquelética, se obtiene la siguiente agrupación [González-Maestre, 08]: miembros superiores, zona del cuello y hombros; mano y muñeca; brazo y codo; columna y miembros inferiores.

3.4. Principales lesiones músculo-esqueléticas y su localización

Existe gran variedad de lesiones músculo-esqueléticas, algunas bien definidas como por ejemplo el *síndrome del túnel carpiano*, y otras denominadas *no específicas*, cuyas causas y fuentes de dolor son desconocidas [Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 00a]. En el presente punto se incluye la definición, según [González-Maestre, 08], de algunas de las lesiones músculo-esqueléticas más frecuentes entre los trabajadores. Por otra parte, dichas definiciones permitirán clarificar términos ampliamente empleados en la bibliografía sobre TME.

3.4.1 TME en el cuello y hombros

Síndrome de tensión cervical: provoca rigidez en el cuello y molestias en el trabajo y en reposo.

Síndrome cervical: proceso degenerativo de la columna que implica un estrechamiento del disco, causando daños en las vértebras cervicales y en los discos intervertebrales. Además, produce la irritación de las terminaciones nerviosas.

Torticolis: estado de dolor agudo y rigidez del cuello que puede ser provocado por un giro brusco del cuello. Mantiene al cuello inclinado e impide el giro de la cabeza.

Hombro congelado: incapacidad de la articulación del hombro, causada por inflamación o herida, que se caracteriza por una limitación de la abducción y rotación del brazo. La causa principal es el desgaste de la cápsula de los ligamentos debido a una inmovilización prolongada del hombro.

3.4.2 TME en los brazos y el codo

Epicondilitis o codo de tenista: es una inflamación del periostio¹⁸ y los tendones en las proyecciones del hueso (*condilo*¹⁹) del brazo, en la parte posterior del codo.

Epitrocleitis o codo de golfista: es la inflamación de los tendones que flexionan y pronan la mano en su origen, a nivel del relieve que existe en la cara interna del codo llamado *epitroclea*.

¹⁸ *Periostio*: membrana fibrosa adherida a los huesos, que sirve para su nutrición y renovación [Real Academia de la Lengua Española].

¹⁹ *Cóndilo*: eminencia redondeada en la extremidad de un hueso que forma articulación encajando en el hueco correspondiente de otro hueso [Real Academia de la Lengua Española].

Síndrome del pronador redondo: aparece cuando se comprime el nervio mediano en su paso a través de los dos vientres musculares del pronador redondo del antebrazo.

Síndrome del túnel radial: aparece al atraparse periféricamente el nervio radial, originando por movimientos rotatorios repetidos del brazo.

Tenosinovitis del extensor: originados por movimientos rotatorios repetidos del brazo.

Bursitis del codo: se produce generalmente en el trabajo de oficinista cuando se apoyan mucho los codos.

3.4.3 TME en la mano y la muñeca

Síndrome de DeQuervain: es un caso especial de *tenosinovitis* que aparece en los tendones abductor corto y extensor largo del pulgar, que comparten una vaina común. Los síntomas son dolor localizado en el dorso de la muñeca junto a la base del pulgar, el dolor aumenta cuando tratamos de guardar el pulgar bajo el resto de dedos flexionados, es decir, de cerrar el puño.

Síndrome del túnel carpiano: se produce por la compresión del nervio mediano a su paso por el túnel del carpo [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo]. El *túnel carpiano* es un canal o espacio situado en la muñeca por el cual pasan los tendones flexores de los dedos y el nervio mediano [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo]

Síndrome del canal de Guyon: se produce al comprimirse el nervio cubital cuando pasa a través del túnel de Guyon en la mano.

Dedo en maza (martillo o garra): estado en el cual el primer hueso o falange de un dedo de la mano está flexionado hacia la palma, impidiendo su alineamiento con el resto de dedos. Está provocado por el desgarramiento del primer tendón del dedo a causa de un movimiento excesivamente violento de la articulación. Se asocia a trabajos donde las manos soportan fuertes golpes.

Contractura de Dupuytren: afección de las manos en la que los dedos están flexionados permanentemente en forma de garra. Los tendones de los dedos se adhieren a la capa fibrosa, la cual, con su posterior contracción, provoca el estiramiento de los tendones y la flexión y encurvamiento de los dedos.

Síndrome del escribiente: trastorno neurológico que produce temblor y movimientos incontrolados que pueden alterar las funciones de la mano que requieren alta precisión y control, notándose especialmente en la escritura.

3.4.4 TME en la columna vertebral

Hernia discal: desplazamiento del disco intervertebral, total o en parte, fuera del límite natural o espacio entre ambos cuerpos vertebrales.

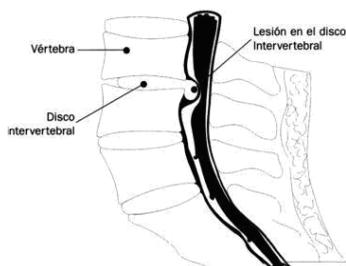


Figura 3.2: Hernia discal (fuente [González-Maestre, 08])

Fractura vertebral: arrancamientos por fatiga de las apófisis espinosas.

Dorsalgia: puede localizarse a nivel de cualquier segmento dorsal. Se manifiesta por dolor que a veces se irradia en sentido anterior, con manifestaciones que simulan patologías torácicas orgánicas.

Lumbalgia aguda: se caracterizan por dolor más o menos intenso en las regiones lumbares o lumbosacras, que a veces irradia hacia la nalga y la cara posterior del muslo por uno o por ambos lados. Se presentan de forma aguda generalmente debido a un sobreesfuerzo.

Lumbalgia crónica: hay casos en los que el dolor en la zona lumbar aparece gradualmente, no alcanza el grado e intensidad de la forma aguda, pero persiste prácticamente de forma continua.

Lumbago agudo: dolor originado por la distensión del ligamento común posterior a nivel lumbar. Existe dolor en toda la zona lumbar con impotencia funcional dolorosa y contractura antiálgica.

Lumbo-ciatalgias: la hernia de disco se produce entre la cuarta y la quinta vértebra lumbar o bien entre la quinta y el sacro. El dolor está causado por una presión en el nervio ciático. Se inicia en la región lumbosacra y se irradia a lo largo de la cara posterior o externa del muslo y de la pantorrilla hasta el pie y los dedos.

Cifosis: curvatura anormal con prominencia dorsal de la columna vertebral.

3.4.5 TME en los miembros inferiores

Rodilla de fregona: lesión de uno o ambos discos del cartílago del menisco de las rodillas.

Tendinitis del tendón de Aquiles: la carga excesiva del tendón puede producir inflamaciones y procesos degenerativos del tendón y de los tejidos circundantes.

3.5. TME considerados enfermedades profesionales

Un importante indicador de la importancia de los TME en el entorno laboral es el gran número de lesiones músculo-esqueléticas incluidas en la lista de enfermedades profesionales aprobada en España en el Real Decreto 1299/2006. Dicha lista actualiza a la publicada en el Real Decreto 1995/1978, y trata de recoger los resultados de las investigaciones científicas sobre enfermedades relacionadas con el trabajo alcanzados desde 1978.

Enfermedades profesionales causadas por agentes físicos con la relación de las principales actividades capaces de producirlas.
Enfermedades osteoarticulares o angioneuróticas provocadas por las vibraciones mecánicas:
Afectación vascular.
Afectación osteoarticular.
Trabajos en los que se produzcan: vibraciones transmitidas a la mano y al brazo por gran número de máquinas o por objetos mantenidos sobre una superficie vibrante (gama de frecuencia de 25 a 250 Hz), como son aquellos en los que se manejan maquinarias que transmitan vibraciones, como martillos neumáticos, punzones, taladros, taladros a percusión, perforadoras, pulidoras, esmeriles, sierras mecánicas, desbrozadoras.
Utilización de remachadoras y pistolas de sellado.
Trabajos que exponen al apoyo del talón de la mano de forma reiterativa, percutiendo sobre un plano fijo y rígido así como los choques transmitidos a la eminencia hipotenar por una herramienta percutante.

Tabla 3.3: Listado de enfermedades profesionales aprobado en el REAL DECRETO 1299/2006, Parte I (fuente [Ministerio de Trabajos y Asuntos Sociales., 06]).

Enfermedades profesionales causadas por agentes físicos con la relación de las principales actividades capaces de producirlas.
Enfermedades provocadas por posturas forzadas y movimientos repetitivos en el trabajo; enfermedades de las bolsas serosas debida a la presión, celulitis subcutáneas:
Bursitis crónica de las sinoviales ó de los tejidos subcutáneos de las zonas de apoyo de las rodillas.
Trabajos que requieran habitualmente de una posición de rodillas mantenidas como son trabajos en minas, en la construcción, servicio doméstico, colocadores de parquet y baldosas, jardineros, talladores y pulidores de piedras, trabajadores agrícolas y similares.
Bursitis glútea, retrocalcánea, y de la apófisis espinosa de C7 y subacromiodeltoideas.
Trabajos en la minería y aquellos que requieran presión mantenida en las zonas anatómicas referidas.
Bursitis de la fascia anterior del muslo.
Zapateros y trabajos que requieran presión mantenida en cara anterior del muslo.
Bursitis maleolar externa.
Sastrería y trabajos que requieran presión mantenida en región maleolar externa.
Bursitis preesternal.
Carpintero y trabajos que requieran presión mantenida en región preesternal.
Higroma crónico del codo.
Trabajos que requieren de un apoyo prolongado sobre la cara posterior del codo.
Enfermedades provocadas por posturas forzadas y movimientos repetitivos en el trabajo; enfermedades por fatiga e inflamación de la vainas tendinosas, de tejidos peritendinosos e inserciones musculares y tendinosas:
Hombro: patología tendinosa crónica de maguito de los rotadores.
Trabajos que se realicen con los codos en posición elevada o que tensen los tendones o bolsa subacromial, asociándose a acciones de levantar y alcanzar; uso continuado del brazo en abducción o flexión, como son pintores, escayolistas, montadores de estructuras.
Codo y antebrazo: epicondilitis y epitrocleitis.
Trabajos que requieran movimientos de impacto o sacudidas, supinación o pronación repetidas del brazo contra resistencia, así como movimientos de flexoextensión forzada de la muñeca, como pueden ser: carniceros, pescaderos, curtidores, deportistas, mecánicos, chapistas, caldereros, albañiles.
Muñeca y mano: tendinitis²⁰ del abductor largo y extensor corto del pulgar (T. De Quervain), tenosinovitis estenosante digital (dedo en resorte), tenosinovitis del extensor largo del primer dedo.
Trabajos que exijan aprehensión fuerte con giros o desviaciones cubitales y radiales repetidas de la mano así como movimientos repetidos o mantenidos de extensión de la muñeca.

Tabla 3.4: Continuación del Listado de enfermedades profesionales aprobado en el REAL DECRETO 1299/2006, Parte II (fuente [Ministerio de Trabajos y Asuntos Sociales., 06]).

²⁰ La *tendinitis* es la inflamación del tendón por flexo-extensiones repetidas. El tendón funciona a la par que el músculo, y cuando hay un esfuerzo muscular importante y repetido se produce una sobre-utilización del tendón. Se produce una serie de micro-traumatismos en el tendón que generan una inflamación e hinchazón, haciéndolo más vulnerable a la sobrecarga [Llaneza-Alvarez, 05].

Enfermedades profesionales causadas por agentes físicos con la relación de las principales actividades capaces de producirlas.
Enfermedades provocadas por posturas forzadas y movimientos repetitivos en el trabajo:
Arrancamiento por fatiga de las apófisis espinosa.
Trabajos de apaleo o de manipulación de cargas pesadas.
Enfermedades provocadas por posturas forzadas y movimientos repetitivos en el trabajo: parálisis de los nervios debidos a la presión:
Síndrome del canal epitrocleo-olecraniano por compresión del nervio cubital en el codo.
Trabajos en los que se produzca un apoyo prolongado y repetido de forma directa o indirecta sobre las correderas anatómicas que provocan lesiones nerviosas por compresión. Movimientos extremos de hiperflexión y de hiperextensión. Trabajos que requieran apoyo prolongado en el codo.
Síndrome del túnel carpiano por compresión del nervio mediano en la muñeca.
Trabajos en los que se produzca un apoyo prolongado y repetido de forma directa o indirecta sobre las correderas anatómicas que provocan lesiones nerviosas por compresión. Movimientos extremos de hiperflexión y de hiperextensión. Trabajos que requieran movimientos repetidos o mantenidos de hiperflexión e hiperextensión de la muñeca, de aprehensión de la mano como lavaderos, cortadores de tejidos y material plástico y similares, trabajos de montaje (electrónica, mecánica), industria textil, mataderos (carniceros, matarifes), hostelería (camareros, cocineros), soldadores, carpinteros, pulidores, pintores.
Síndrome del canal de Guyon por compresión del nervio cubital en la muñeca.
Trabajos en los que se produzca un apoyo prolongado y repetido de forma directa o indirecta sobre las correderas anatómicas que provocan lesiones nerviosas por compresión. Movimientos extremos de hiperflexión y de hiperextensión. Trabajos que entrañen compresión prolongada en la muñeca o de una presión mantenida o repetida sobre el talón de la mano, como ordeño de vacas, grabado, talla y pulido de vidrio, burilado, trabajo de zapatería, leñadores, herreros, peleteros, lanzadores de martillo, disco y jabalina.
Síndrome de compresión del ciático popliteo externo por compresión del mismo a nivel del cuello del peroné.
Trabajos en los que se produzca un apoyo prolongado y repetido de forma directa o indirecta sobre las correderas anatómicas que provocan lesiones nerviosas por compresión. Movimientos extremos de hiperflexión y de hiperextensión. Trabajos que requieran posición prolongada en cuclillas, como empedradores, soladores, colocadores de parquet, jardineros y similares.
Parálisis de los nervios del serrato mayor, angular, romboides, circunflejo.
Trabajos en los que se produzca un apoyo prolongado y repetido de forma directa o indirecta sobre las correderas anatómicas que provocan lesiones nerviosas por compresión. Movimientos extremos de hiperflexión y de hiperextensión. Trabajos que requieran carga repetida sobre la espalda de objetos pesados y rígidos, como mozos de mudanzas, empleados de carga y descarga y similares.
Parálisis del nervio radial por compresión del mismo.
Trabajos en los que se produzca un apoyo prolongado y repetido de forma directa o indirecta sobre las correderas anatómicas que provocan lesiones nerviosas por compresión. Movimientos extremos de hiperflexión y de hiperextensión. Trabajos que entrañen contracción repetida del músculo supinador largo, como conductores de automóviles, presión crónica por uso de tijera.
Enfermedades provocadas por posturas forzadas y movimientos repetitivos en el trabajo:
Lesiones del menisco por mecanismos de arrancamiento y compresión asociadas, dando lugar a fisuras o roturas completas.
Trabajos que requieran posturas en hiperflexión de la rodilla en posición mantenida en cuclillas de manera prolongada como son: Trabajos en minas subterráneas, electricistas, soladores, instaladores de suelos de madera, fontaneros.

Tabla 3.5: Continuación del Listado de enfermedades profesionales aprobado en el REAL DECRETO 1299/2006 ,Parte III (fuente [Ministerio de Trabajos y Asuntos Sociales., 06]).

3.6. Factores de riesgo relacionados con los TME

Los TME pueden originarse a partir de múltiples factores [Zurada et al., 97] subraya la dificultad que dicha circunstancia supone para los ergónomos a la hora de aislar los factores de riesgo que contribuyen a los TME.

La [Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 07] identifica los siguiente factores de riesgo relacionados con los TME:

Factores físicos:
Aplicación de fuerza, como por ejemplo, el levantamiento, el transporte, la tracción, el empuje y el uso de herramientas.
Movimientos repetitivos.
Posturas forzadas y estáticas, como ocurre cuando se mantienen las manos por encima del nivel de los hombros o se permanece de forma prolongada en posición de pie o sentado.
Presión directa sobre herramientas y superficies.
Vibraciones.
Entornos fríos o excesivamente calurosos.
Iluminación insuficiente que, entre otras cosas, puede causar un accidente.
Niveles de ruido elevados que pueden causar tensiones en el cuerpo.
Factores organizativos y psicosociales:
Trabajo con un alto nivel de exigencia, falta de control sobre las tareas efectuadas y escasa autonomía.
Bajo nivel de satisfacción en el trabajo.
Trabajo repetitivo y monótono a un ritmo elevado.
Falta de apoyo por parte de los compañeros, supervisores y directivos.
Factores individuales:
Historial médico.
Capacidad física.
Edad.
Obesidad.
Tabaquismo.

Tabla 3.6 Factores que potencialmente contribuyen al desarrollo de TME ([Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 07])

En un estudio basado en el juicio de expertos europeos sobre los riesgos emergentes asociados a los TME [European Agency for Safety and Health at Work, 05], la mayoría de las opiniones coincidieron en destacar la falta de actividad física como el riesgo más emergente. Las razones esgrimidas, fueron el creciente trabajo frente a pantallas de visualización de datos, así como el incremento del tiempo que los trabajadores permanecen sentados debido a la automatización de los sistemas. Los riesgos multifactoriales (causados por una combinación de factores) fueron identificados como importantes para el futuro. De hecho, el siguiente riesgo emergente señalado fue la combinación de los factores de exposición a riesgos músculo-esqueléticos y los factores de riesgo psicosociales. Es más, los expertos indicaron que factores como la inseguridad laboral y el temor al futuro, causados por un mercado laboral inestable, acentúan el efecto de los factores de riesgo físicos derivados, por ejemplo, de diseños de puestos ergonómicamente inadecuados. El mantenimiento de posturas estáticas y los movimientos repetitivos, si bien el consenso fue menor, fueron los siguientes riesgos señalados.

Riesgos asociados a los TME: ordenados por expertos de mayor a menor relevancia:
Falta de actividad física
Combinación de la exposición a factores de riesgo asociados con TME y factores de riesgo psicosociales
Posturas estáticas
Movimientos repetitivos
Posturas forzadas
Diseños ergonómicos inadecuados relacionados con el manejo manual de cargas
Diseños ergonómicos inadecuados relacionados con pantallas de visualización de datos (no de oficina)
Trabajo durante muchas horas que provocan una exposición más larga a riesgos asociados a TME.
Diseño ergonómico inadecuado en interfaces hombre-máquina.
Trabajadores más viejos incapaces de hacer frente a las demandas físicas
Aumento del ritmo de trabajo
Mayor demanda de trabajo físico en las nuevas industrias (ocio, parques, conciertos...)
Trabajo con pantallas de visualización de datos

Tabla 3.7: Riesgos relacionados con los TME ordenados por los expertos de mayor a menor relevancia (Adaptado de [European Agency for Safety and Health at Work, 05])

Según [Díez-de-Ulzurrun et al., 07] los riesgos físicos a los que más se exponen los trabajadores son las posturas forzadas y los movimientos repetitivos, seguidos de la manipulación de cargas y la realización de fuerzas importantes (ver Tabla 3.8).

Factores físicos	% Reportado
Posturas forzadas	38%
Movimientos repetitivos	37%
Manipulación de cargas	15%
Fuerzas importantes	15%

Tabla 3.8: Factores de riesgo físico más importantes y porcentaje de trabajadores expuestos (fuente[Díez-de-Ulzurrun et al., 07]).

3.6.1 Factores de riesgo asociados a las distintas partes del cuerpo

El detallado informe realizado por [Bernard, 97] y publicado por el Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional de Estado Unidos (National Institute for Occupational Safety and Health, NIOSH), contiene una amplia recopilación de estudios epidemiológicos centrados en el análisis de factores de riesgo asociados con los TME. El informe determina el grado de evidencia científica sobre el desarrollo de TME en distintas partes del cuerpo (cuello, cuello/hombros, hombros, codo, mano/muñeca y espalda), y la exposición a determinados factores de riesgo como los movimientos repetitivos, la aplicación de fuerzas, las posturas forzadas, las vibraciones o la combinación de varios de dichos factores.

El presente punto se basa en los resultados obtenidos por [Bernard, 97]. Dichos resultados son ampliados con otras referencias bibliográficas, que en su mayoría, obtienen resultados que consolidan las conclusiones obtenidas por dicho autor.

3.6.1.1 Factores de riesgo relacionados con TME en el cuello y cuello-hombros

Existe una fuerte relación entre los TME en el cuello [Wells et al., 83; Linton et

al., 89; Kamwendo et al., 91; Bernard et al., 93; Veiersted et al., 93; Hales et al., 94; Sakakibara et al., 95; Welch et al., 95; Yu et al., 96] y en la zona del cuello-hombros [Milerad et al., 90; Holmström, 92; Viikari-Juntura, 95; Chandrasakaran et al., 03] y la adopción de posturas forzadas o estáticas. También resulta evidente la relación causal entre altos niveles de repetitividad en el trabajo (ciclos de trabajo de menos de 30 segundos) y los TME en el cuello [Ohlsson et al., 89; Kamwendo et al., 91; Andersen et al., 93; Ohlsson et al., 94; Liss et al., 95; Schibye et al., 95; Bergqvist et al., 95b; Yu et al., 96; Rissen, 06] y en el cuello-hombros [Milerad et al., 90; Andersen et al., 93; Ohlsson et al., 94; Ohlsson et al., 95; Bergqvist et al., 95a; Rissen, 06]. La aplicación de fuerza también parece influir significativamente en el desarrollo de dolencias músculo-esqueléticas en el cuello (por ejemplo puede provocar *mialgia de trapecio*) [Luopajarvi et al., 79; Wells et al., 83; Veiersted et al., 94; Liss et al., 95] y en el cuello-hombros [Kilbom et al., 86; Jonsson, 88; Andersen et al., 93].

[Ohlsson et al., 94] en su estudio sobre los desórdenes del cuello y de las extremidades superiores de las mujeres en la industria del procesado de pescado, afirma que el elevado tiempo dedicado a tareas con una alta repetitividad está claramente asociado con desórdenes músculo-esqueléticos en el cuello y en los hombros.

[Hansson et al., 00] analiza el impacto de la exposición física en los desórdenes músculo-esqueléticos en el cuello y en las extremidades superiores en las mujeres dedicadas a trabajos repetitivos, y observa una mayor prevalencia de los TME en el cuello, hombro y muñeca/mano en las mujeres dedicadas a este tipo de trabajos que en el resto. Además se observa que la elevada frecuencia de la repetitividad se asocia con una alta prevalencia de los desórdenes músculo-esqueléticos (56%), en comparación con frecuencias bajas (26%).

[Devereux et al., 04] resume las causas de los TME en el cuello en: el levantamiento de 6 a 15 Kg. más de 10 veces por hora o levantamientos de hasta 16 Kg., en total, siempre o a menudo con la espalda en posiciones forzadas, trabajar con la cabeza/cuello doblada o torcida excesivamente, trabajar con herramientas o máquinas que produzcan vibraciones, permanecer sentado utilizando un ordenador durante más de la mitad del tiempo de trabajo y estar sentado durante 30 minutos o más sin un descanso mientras se realiza el trabajo.

[Hartman et al., 05] en su análisis sobre los factores de riesgo físicos en la agricultura holandesa y su relación con las bajas por enfermedad debida a TME, concluye que las dolencias lumbares están relacionadas con las vibraciones en todo el cuerpo y la torsión del tronco, mientras que la repetitividad o las posturas estáticas están relacionadas con la lesiones en la el cuello, hombros y extremidades superiores.

Por otra parte, los estudios sobre la relación entre las vibraciones y los TME en el cuello o cuello-hombros, no proporcionan información suficiente que evidencie dicha relación [Bernard, 97].

Factor de riesgo	Fuerte evidencia	Evidencia	Evidencia insuficiente
Repetición (trabajo cíclico que conllevan movimientos repetitivos del cuello o movimientos repetidos de los brazos y hombros que generan carga en el cuello)			
Fuerza (trabajos que implican aplicación de fuerza)			
Posturas (trabajos que implican adoptar posturas forzadas o estáticas)			
Vibración (trabajos que exponen al trabajador a vibraciones)			

Tabla 3.9: Grado de evidencia de la relación entre los TME en el cuello y la zona del cuello-hombros y los factores de riesgo: repetición, fuerza, postura y vibración (adaptado de [Bernard, 97]).

3.6.1.2 Factores de riesgo relacionados con TME en los hombros

Las dolencias músculo-esqueléticas localizadas en los hombros se asocian a la adopción de *posturas forzadas* y *estáticas*. Dicha relación es mayor cuando se combinan estas posturas con factores físicos como, por ejemplo, el manejo de herramientas sobre la cabeza. Así, por ejemplo, existen numerosos estudios que relacionan la adopción de posturas forzadas con la *tendinitis de hombro* [Herberts et al., 81; Baron et al., 91; Ohlsson et al., 94; Ohlsson et al., 95]. Otros estudios relacionan las posturas forzadas con la existencias de dolencias músculo-esqueléticas de los hombros *no específicas* [Milerad et al., 90; Hoekstra et al., 94; Schibye et al., 95] o con desordenes combinados en cuello y hombros [Kilbom et al., 87; Jonsson, 88; Ohlsson et al., 95; Hartman et al., 05; Landau et al., 08]. También existen estudios que asocian las *posturas estáticas* a los TME en los hombros [Chee et al., 04].

Otro factor asociado a los TME en los hombros es la repetición de movimientos que impliquen a las articulaciones de los hombros. Los estudios realizados por [Ohlsson et al., 94; Ohlsson et al., 95] relacionan la repetición de movimientos con la *tendinitis de hombro*, si bien los resultados obtenidos se atribuyeron a la combinación de los movimientos repetitivos y las posturas forzadas. Otros estudios asocian la repetición con dolencias músculo-esqueléticas de los hombros no específicas [Ohlsson et al., 89; Sakakibara et al., 95] o bien combinadas con dolencias localizadas en el cuello [Kilbom et al., 87; Kilbom, 94].

[Devereux et al., 04] señala como posibles factores de riesgo físicos para los hombros: trabajar con la cabeza/cuello doblados o torcidos excesivamente; levantar entre 6 y 15 Kg. durante más de 10 veces por hora, o levantar 16 Kg., en total, siempre o con frecuencia con la espalda en posiciones forzadas; realizar movimientos de giro repetitivos; movimientos repetitivos de los brazos; estar sentado durante 30 minutos o más sin descanso.

[Bernard, 97] señala falta de evidencia epidemiológica respecto a la influencia de

la aplicación de fuerza o de exposición a vibraciones y los TME en los hombros. Sin embargo, sí relaciona la aplicación de fuerza con dolencias en la zona de cuello-hombros (ver 3.6.1.1.).

Factor de riesgo	Fuerte evidencia	Evidencia	Evidencia insuficiente
Repetición (trabajos que implican flexión cíclica, extensión, abducción o rotación de las articulaciones de los hombros)			
Fuerza (trabajos que implican aplicación de fuerza)			
Posturas (trabajos que implican adoptar posturas forzadas o estáticas)			
Vibración (trabajos que exponen al trabajador a vibraciones)			

Tabla 3.10: Grado de evidencia de la relación entre los TME en los hombros y los factores de riesgo: repetición, fuerza, postura y vibración (adaptado de [Bernard, 97]).

3.6.1.3 Factores de riesgo relacionados con TME en el codo

Existe evidencia de la influencia de la exposición a la combinación de riesgos (por ejemplo, de fuerza y repetición, o de fuerza y postura) y la *epicondilitis* o codo de tenista (ver 3.4), especialmente si los niveles de riesgo de los factores son altos. Sin embargo, [Bernard, 97] sostiene que no existen evidencias suficientes para afirmar que sólo la realización de movimientos repetitivos o la adopción de *posturas forzadas* o *estáticas* puedan ser causa del desarrollo de *epicondilitis*. Estudios posteriores también ponen de manifiesto la inconsistencia de la relación entre la realización de movimientos repetitivos de los brazos (sin aplicación de fuerzas) y la *epicondilitis* [Pilgian et al., 00; Haahr et al., 03]. Por otra parte, la aplicación de fuerza, por sí sola, si es considerada por diversos estudios como posible causa de dicha dolencia [Kurppa et al., 91; Bernard, 97; Haahr et al., 03]. El reciente estudio realizado en [Shir et al., 06] sobre la prevalencia de la *epicondilitis* y sus determinantes, también concluye que la interacción entre la aplicación de fuerza y la repetitividad de movimientos está estrechamente relacionada con dicha dolencia.

[Devereux et al., 04] identifica como factores de riesgo físicos relacionados con los TME en el codo y el antebrazo: las vibraciones de herramientas o máquinas que provocan vibraciones en la mano, movimientos repetitivos del brazo, y realizar el trabajo en una posición desviada o doblada de la muñeca.

Factor de riesgo	Fuerte evidencia	Evidencia	Evidencia insuficiente
Repetición (trabajo cíclico que conllevan movimientos repetitivos de los brazos)			
Fuerza (trabajos que implican aplicación de fuerza)			
Posturas (trabajos que implican adoptar posturas forzadas o estáticas)			
Combinación (combinación de varios factores como fuerza-repetición, o fuerza-postura)			

Tabla 3.11: Grado de evidencia de la relación entre los TME en el codo (epicondilitis) y los factores de riesgo: repetición, fuerza, postura y combinación de factores (adaptado de [Bernard, 97]).

3.6.1.4 Factores de riesgo relacionados con TME en la mano y la muñeca

Respecto al *síndrome del túnel carpiano (STC)* (ver 3.4) existe evidencia de su asociación con la realización de movimientos repetitivos [Silverstein et al., 87; Chiang et al., 90; Osorio et al., 94; Liss et al., 95; Latko et al., 99; Bonfiglioli et al., 07]. También existe relación entre la aplicación de fuerza y el STC [Punnett et al., 85; Silverstein et al., 87; Osorio et al., 94; Moore et al., 94; Maghsoudipour.M. et al., 08].

En el estudio realizado por [Roquelaure et al., 97], factores como la aplicación de fuerza (superior a 1 Kg.) en operaciones elementales cortas (10 s.), la falta de cambio en las tareas o la escasez de pausas (menos de 15% del tiempo diario de trabajo), así como la falta de rotación entre trabajos, fueron asociados con la aparición de STC. Por otro lado, ninguna postura fue asociada a dicha dolencia.

Según sostiene [Bernard, 97], no existen suficiente información epidemiológica para concluir la relación del STC y la adopción de posturas forzadas, por sí solas. La falta de estudios epidemiológicos que analicen de forma aislada el factor de riesgo “*postura forzada*” en relación al STC, puede deberse a la variabilidad de las posturas adoptadas según el trabajador y el puesto, que se traduce en dificultad a la hora de estandarizarlas, o a que normalmente se analiza en combinación con otros factores de riesgo, como la aplicación de fuerza [Silverstein et al., 87; Moore et al., 94]. En el estudio realizado por [Chaffin, 79], se observó que los trabajadores diagnosticados con el STC habían adoptado posturas con la muñeca desviada con mayor frecuencia que los demás trabajadores, sin embargo, no fue posible saber si la desviación se producía en respuesta a síntomas del STC o por el contrario la adopción de dichas posturas ocasionaron las lesiones.

La combinación de factores de riesgo como la aplicación de fuerza y la repetición de movimientos o la adopción de determinadas posturas, sí parece estar estrechamente relacionada con el STC [Silverstein et al., 87; Moore et al., 94]. El estudio realizado por [Tanaka et al., 97] concluye la relación entre el STC y la adopción de posiciones de la mano doblada o, retorcida y la aplicación de fuerza (en

este caso la postura forzada si aparece como factor de riesgo, pero no de forma aislada).

La información epidemiológica recopilada por [Bernard, 97] indica que los ratios más altos de *STC* se producen en ocupaciones que requieren de un intenso esfuerzo manual, como por ejemplo: el empaquetado de carne, el procesado de carne de ave o el ensamblado de automóviles.

Por último, parece clara la asociación entre la exposición del trabajador a vibraciones y el desarrollo del *STC* [Cannon et al., 81; Silverstein et al., 87; Chatterjee, 92; Bovenzi et al., 95; Tanaka et al., 97; Bovenzi et al., 04; Maghsoudipour.M. et al., 08].

Factor de riesgo	Fuerte evidencia	Evidencia	Evidencia insuficiente
Repetición (trabajo cíclico que conllevan movimientos repetitivos de la mano/muñeca)			
Fuerza (trabajos que implican aplicación de fuerza)			
Posturas (trabajos que implican adoptar posturas forzadas de la mano/muñeca)			
Combinación (combinación de varios factores como fuerza-repetición, o fuerza-postura)			
Vibraciones (mano de herramientas que provocan vibraciones en la mano/muñeca)			

Tabla 3.12: Grado de evidencia de la relación del *STC* y los factores de riesgo: repetición, fuerza, postura, vibraciones y combinación de factores (adaptado de [Bernard, 97]).

La *tendinitis* en la mano o muñeca está relacionada con la realización de movimientos repetitivos [Amano et al., 88; Byström et al., 95; Latko et al., 99], con la aplicación de fuerza [McCormack et al., 90; Kurppa et al., 91; Byström et al., 95], así como con la adopción de *posturas forzadas* [Luopajarvi et al., 79; Amano et al., 88; Byström et al., 95], tanto si dichos factores aparecen de forma aislada como combinada. Dicha posible combinación de factores aumenta el riesgo de desarrollar *tendinitis* en la mano o muñeca.

Factor de riesgo	Fuerte evidencia	Evidencia	Evidencia insuficiente
Repetición (trabajo cíclico que conllevan movimientos repetitivos de la mano/muñeca)			
Fuerza (trabajos que implican aplicación de fuerza)			
Posturas (trabajos que implican adoptar posturas forzadas de la mano/muñeca)			
Combinación (combinación de varios factores como fuerza-repetición, o fuerza-postura)			

Tabla 3.13: Grado de evidencia de la relación de la tendinitis y los factores de riesgo: repetición, fuerza, postura y combinación de factores (adaptado de [Bernard, 97]).

Finalmente, el *síndrome de la vibración mano-brazo* está relacionado con la utilización de herramientas que transmiten vibraciones a la mano-brazo del trabajador [Nilsson et al., 89; Burdorf et al., 91; Letz et al., 92; McKenna et al., 93; Bovenzi et al., 95; Bovenzi et al., 04].

En el estudio realizado por [Bovenzi et al., 04] sobre trabajadores dedicados a la silvicultura se observa que la utilización de sierras con sistemas antivibración contribuye a reducir el número de lesiones músculo-esqueléticas en los trabajadores.

En la investigación realizada por [Burdorf et al., 91] sobre las consecuencias de las vibraciones en las articulaciones y huesos de las manos de trabajadores encargados del remachado de aviones, se concluyó la relación entre las vibraciones provocadas por la remachadora y la presencia de entumecimiento de los dedos, y la rigidez del codo y/o de los brazos. Además se encontró una relación significativa entre la duración de la exposición a la vibración y dichas dolencias. Puesto que según el estudio de [Burdorf et al., 91] el efecto de las vibraciones es función del tiempo de exposición, es posible afirmar que un plan de rotaciones que permitiera al trabajador alternar trabajos con implicación de vibraciones con otros sin exposición a dicho factor de riesgo, favorecería la prevención de los TME causados por las vibraciones al reducirse el tiempo total de exposición.

Por último, [Devereux et al., 04] identifica los siguientes factores de riesgo físicos asociados con los TME en la mano y la muñeca: las vibraciones de herramientas y máquinas que hacen vibrar la mano, los movimientos de torsión durante la mayor parte del día, los movimientos repetitivos del brazo, utilizar un teclado más de 4 horas diarias, y realizar el trabajo en una posición desviada o doblada de la muñeca.

3.6.1.5 Factores de riesgo relacionados con TME en la espalda

Los factores de riesgo más estudiados por la literatura en relación a los TME que afectan a la espalda son: el trabajo físico pesado, los levantamientos de carga, los movimientos enérgicos, las posturas forzadas (espalda doblada o retorcida), la exposición a vibraciones en todo el cuerpo y las posturas estáticas [Bernard, 97].

Se considera *trabajo físico pesado* aquel que exige al trabajador un gran consumo de energía [Bernard, 97]. Desde el punto de vista biomecánico el *trabajo físico pesado* es aquel que provoca grandes fuerzas de compresión en la espina dorsal [Marras et al., 95], como por ejemplo, la manipulación manual de cargas (levantamientos, empujes, transportes, arrastres). Existe evidencia sobre la relación entre los TME en la espalda, sobre todo en la parte lumbar, y la realización de *trabajo físico pesado* [Åstrand, 87; Bergenudd et al., 88; Videman et al., 90; Clemmer et al., 91; Hartvigsen et al., 02; Trinkoff et al., 03; Smith et al., 06a; Hildebrandt, 08] o la adopción de posturas forzadas [Punnett et al., 91; Holmström, 92; Marras et al., 95; Bovenzi et al., 02].

Numerosos estudios han analizado los efectos de los levantamientos de carga sobre los trabajadores y han obtenido resultados que confirman la estrecha relación entre dicho factor de riesgo y las lesiones músculo-esqueléticas de espalda [Snook, 78a; Chaffin, 79; Liles et al., 84; Punnett et al., 91; Holmström, 92; Waters et al., 93; Marras et al., 95; Xiao et al., 04; Wang et al., 05b; Hangai et al., 08]. Además, algunos de dichos estudios han dado lugar a métodos orientados hacia su evaluación y prevención (ver Capítulo 4).

[Hangai et al., 08] afirma que la degeneración de los discos intervertebrales lumbares está directamente relacionada con las ocupaciones que conllevan levantamientos de cargas.

En la investigación realizada por [Xiao et al., 04] se observa que los dolores lumbares prevalecen en los trabajadores que realizan trabajos de manipulación manual de cargas (63.8%) frente a los que no manejan cargas (37.3%). Además, el mismo estudio, confirma que la repetitividad de los levantamientos tiene un efecto nocivo significativo sobre el dolor lumbar, si bien por lo general dicho factor de riesgo se asocia principalmente a TME en las extremidades superiores (ver 3.6.1.4) y son escasos los estudios que la relacionan con los TME de espalda. Por ejemplo, [Bernard, 97] no incluye la repetitividad como factor de riesgo independiente en relación a los TME en la espalda.

[Wang et al., 05b] en su estudio sobre los riesgos asociados con el trabajo de confección de prendas con máquinas de coser, también observa que el trabajo monótono y repetitivo está especialmente relacionado con el dolor de espalda y de caderas. Pese a la escasez de estudios que relacionan el dolor de espalda y la repetitividad, cabe señalar que muchos de los estudios que han dado lugar a métodos para la evaluación ergonómica de puestos de trabajo que conllevan levantamientos de carga, sí han incluido la frecuencia de los levantamientos como factor de riesgo, y ello se refleja en la disminución del peso máximo recomendado a medida que aumenta la frecuencia de los levantamientos [Liles et al., 84; Snook et al., 91; Waters et al., 93; Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 97] (ver Capítulo 4).

En el estudio realizado por [Punnett et al., 91] sobre la relación entre el dolor de espalda y los riesgos a los que se exponían los trabajadores en una planta de ensamblado de automóviles, se observó que el tiempo que los trabajadores pasaban en posiciones forzadas (con el tronco muy flexionado o doblado) estaba directamente relacionado con el desarrollo de lesiones de espalda. Sin embargo, no fue posible determinar cuáles de las posturas forzadas observadas contribuían más al riesgo, debido a que todas estaban altamente correlacionadas. El mismo estudio también concluyó la relación entre el levantamiento de cargas y los TME en la espalda. Dicho estudio resulta relevante, puesto que pone de manifiesto la relación entre la duración de la tarea y el desarrollo de TME en la espalda. Un sistema de rotación entre puestos diversos permitiría a los trabajadores reducir el tiempo de exposición a posturas forzadas, siempre y cuando no todos los puestos seleccionados para la rotación implicasen la adopción de posturas de este tipo, y por tanto contribuiría a la prevención de las lesiones músculo-esqueléticas de espalda.

El factor de riesgo *vibraciones en todo el cuerpo* se refiere a las oscilaciones de energía mecánica que son trasferidas a todo el cuerpo del trabajador, normalmente a través de sistemas de soporte, como asientos, o plataformas [Bernard, 97]. Una actividad típica que expone a este tipo de factor es la conducción de vehículos (automóviles, tractores, autobuses, vehículos para operaciones industriales, etc.). Existe una estrecha relación entre la exposición a vibraciones en todo el cuerpo de los trabajadores y el desarrollo de dolencias músculo esqueléticas en la espalda [Johanning, 91; Bovenzi, 96; Pope et al., 99; Lis et al., 07; Tiemessen et al., 08]. Tanto la revisión de estudios epidemiológicos sobre la exposición a vibraciones en todo el cuerpo realizada por [Bernard, 97] como la presentada por [Bovenzi et al., 99], concluyen la asociación entre los TME en la espalda y la exposición a vibraciones en el cuerpo.

Respecto a la asociación entre la adopción de posturas estáticas y los TME en la espalda, no parecen existir evidencias suficientes que la confirmen [Bernard, 97; Hartvigsen et al., 02; Lis et al., 07]. [Hartvigsen et al., 02] afirma que desarrollar trabajos sedentarios puede tener un efecto protector o neutro frente a las lesiones lumbares, mientras que los trabajos físicos pesados constituyen un factor de riesgo significativo. [Lis et al., 07] realiza una exhaustiva revisión de la literatura sobre la asociación entre trabajos en los que los trabajadores permanecen sentados más de la mitad de su tiempo de trabajo y la presencia de dolencias lumbares. El estudio concluye que permanecer sentado no constituye por sí sólo un factor de riesgo, pero que dicha posición sí supone riesgo en combinación con otros factores como la exposición a vibraciones transmitidas a todo el cuerpo o a la adopción de posturas forzadas (por ejemplo giros durante la conducción de vehículos). Dicha conclusión coincide con la expuesta por [Bernard, 97] que considera que no existen evidencias suficientes que confirmen el riesgo de padecer TME en la espalda ante la adopción únicamente de posturas estáticas.

Para concluir, [Devereux et al., 04] identifica como factores físicos de riesgo asociados a los TME en la zona lumbar: levantar cargas de entre 6 y 15 Kg. más de 10 veces por hora o levantar 16 Kg., en total, y siempre o con frecuencia con la espalda en posiciones forzadas, y empujar o tirar de objetos combinado con tareas que requieran levantamientos.

Factor de riesgo	Fuerte evidencia	Evidencia	Evidencia insuficiente
Levantamiento/movimientos enérgicos (empuje de cargas, arrastre de cargas, transporte de cargas, etc.)			
Posturas forzadas			
Trabajo físico pesado			
Vibraciones en todo el cuerpo			
Posturas estáticas			

Tabla 3.14: Grado de evidencia de la relación de los TME en la espalda y factores de riesgos como: el levantamiento o los movimientos enérgicos, las posturas forzadas, el trabajo físico pesado, las vibraciones en todo el cuerpo y las posturas estáticas combinación de factores (adaptado de [Bernard, 97]).

3.7. Características individuales del trabajador que influyen en los TME

Además de los factores de riesgo asociados a los TME analizados hasta el momento: movimientos repetitivos, posturas forzadas y estáticas, vibraciones y manipulación manual de cargas. Parecen existir evidencias significativas de la correlación entre la presencia de TME y otros factores individuales como: la edad de los trabajadores, su género, el tabaquismo, o las medidas antropométricas.

Cabe recordar que tanto la edad como el género son factores que también influyen a la hora de diseñar las rotaciones de puestos de trabajo (ver capítulo 2).

3.7.1 La influencia de la edad y la antigüedad laboral en los TME

La existencia de TME parece aumentar a medida que aumentan los años de trabajo. Según [Bernard, 97] existe una importante correlación entre la edad de los trabajadores y los años de trabajo, por lo que resulta complicado determinar si el factor de riesgo es únicamente la edad o bien la antigüedad laboral, o ambos. Por su parte [Buckwalter et al., 93] sostiene que los TME constituyen el problema de salud más importante entre los trabajadores de mediana y avanzada edad.

Recientemente [Landau et al., 08] ha llevado a cabo un estudio en el que se analiza la relación entre la edad de los trabajadores y los TME. La investigación se realiza en líneas de ensamblaje de automóviles, caracterizadas por la existencia de trabajos repetitivos con ciclos de trabajo cortos. La primera conclusión que obtiene es que la edad parece influir en la asignación de los diferentes trabajos localizados en la línea de ensamblado. Existe una clara tendencia a que los trabajos más favorables (según la evaluación de expertos) sean asignados a trabajadores de más edad (de más de 45 años), mientras que a los trabajadores más jóvenes se les asignan puestos más desfavorables. Consecuentemente la edad y el riesgo inducido por el puesto no son variables independientes. El estudio concluye que los síntomas de dolor lumbar aparecen con mayor frecuencia en trabajadores mayores (de más de 50 años), incluso en casos en que los trabajos asignados son relativamente poco exigentes, lo cual parece indicar efectos acumulativos del riesgo a largo plazo. Además, cuando las condiciones de trabajo son desfavorables (según la evaluación de los expertos), los síntomas ocurren con mayor frecuencia en los trabajadores mayores (más de 41 años).

En el estudio realizado por [Tanaka et al., 95] sobre el *síndrome del túnel carpiano* en los trabajadores de Estados Unidos, se concluyó que el riesgo de padecer *STC* aumentaba con la edad de los trabajadores.

[Riihimäki et al., 89] estudió la frecuencia de las dolencias como la *ciática*²¹, el

²¹ *Ciática*: Neuralgia del nervio ciático [Real Academia de la lengua Española].

Neuralgia: dolor continuo a lo largo de un nervio y de sus ramificaciones, por lo común sin fenómenos inflamatorios [Real Academia de la lengua Española].

lumbago y dolores no específicos en la zona baja de la espalda, entre trabajadores de diferentes ocupaciones (estibadores, operadores de excavadora, carpinteros y oficinistas municipales), y observó que la *ciática* era más común entre los trabajadores que se ocupaban del funcionamiento de máquinas (estibadores y trabajo con excavadoras), incluso más frecuente que entre los carpinteros. Las diferencias entre ocupaciones fueron considerablemente menores en relación al *lumbago* y a dolencias no específicas en la zona baja de la espalda. Además de las diferencias encontradas entre ocupaciones, el análisis de los resultados puso de relieve el efecto significativo de la edad sobre la ocurrencia de *ciática*.

Por su parte [Tortosa et al., 04] considera que el riesgo de molestias músculo esqueléticas en las zonas del cuello y de la espalda aumenta con la edad, especialmente entre los trabajadores que realizan tareas con demandas físicas elevadas, sin embargo, no observa esta tendencia para las molestias en los miembros superiores y en los inferiores.

En un estudio realizado por [Ohlsson et al., 94] en el sector del procesado de pescado, se observó que los trabajadoras de más edad eran las que más señalaban como causa del abandono del trabajo las lesiones músculo-esqueléticas. También en [Ohlsson et al., 89] se concluyó la relación entre la edad de los trabajadores y la causa de abandono del trabajo, en concreto el 26% de los trabajadores que causaban baja permanente indicaban el dolor como causa de ésta.

En el estudio epidemiológico realizado por [Devereux et al., 04], que analizó 8.000 sujetos durante aproximadamente 14 meses, se concluye la relación significativa entre la edad avanzada de los trabajadores y las lesiones en el codo, antebrazo y los hombros, mientras que en el caso de las mujeres dicho factor de edad se relacionó con dolores en los hombros.

[Ming et al., 04] analiza el dolor de cuello y hombros provocados por el trabajo frente a ordenadores y señala la edad como uno de los factores de riesgo individuales relacionados con dichas dolencias. Según [Mishra et al., 03] los cambios en los tejidos, como la sarcopenia (degeneración de la masa muscular), que se desarrollan con la edad, pueden provocar dolor en el cuello. Por su parte [Ming et al., 04] argumenta que a medida que pasa el tiempo los discos intervertebrales empiezan a degenerarse, los discos se contraen y dejan menos espacio entre las vértebras. Dicho cambios pueden originar no sólo dolor, sino también la disminución del grado de movilidad del cuello. La degeneración de los discos por la edad es inevitable, pero una buena postura y los músculos del cuello pueden reducir el riesgo y el grado de compresión del nervio [Ming et al., 04].

Sin embargo, aunque son muchos los estudios que relacionan la edad con los TME, no todas las investigaciones obtienen resultados positivos de dicha asociación, como por ejemplo [Wisseman et al., 76; Berg et al., 88; Tortosa et al., 04]. Según afirma [Tortosa et al., 04] el hecho de que en ocasiones, para algunos TME se

Nervio ciático: es el nervio más grueso del cuerpo, terminación del plexo sacro, que se distribuye en los músculos posteriores del muslo, en los de la pierna y en la piel de esta y del pie [Real Academia de la lengua Española].

observe una estabilización y, en ocasiones, una disminución de las lesiones músculo-esqueléticas en el grupo de mayor edad, podría deberse a que los trabajadores que no son capaces de hacer frente a las demandas físicas de su actividad laboral, debido a problemas músculo-esqueléticos, dejan de pertenecer al grupo estudiado, abandonando el puesto (baja laboral o discapacidad) o cambiando a un trabajo con menor demanda física. Dicho argumento es compartido por [Bernard, 97], que considera que si los trabajadores con problemas de salud abandonan o cambian sus puestos por otros de menor riesgo, la población trabajadora que se analizará en los posteriores estudios incluirá sólo a los trabajadores que no han sido afectados negativamente por su trabajo. Otra posible respuesta a estos resultados, es que los trabajadores del grupo de mayor edad cambian sus métodos y su técnica de trabajo para poder hacer frente a las demandas físicas pesadas del trabajo (empleando técnicas de trabajo más eficientes y seguras) [Tortosa et al., 04]. [Vézina, 04] señala la capacidad de los trabajadores con mayor antigüedad (que generalmente suelen coincidir con los de más edad) para desarrollar mecanismos de protección frente a los TME. Por último, los resultados negativos sobre la asociación de la edad con los TME, puede deberse a la disminución de la carga física del trabajo en los trabajadores mayores, al asignar las tareas con demandas físicas pesadas a los más jóvenes [Tortosa et al., 04; Landau et al., 08].

3.7.2 La influencia del género en los TME

Aunque los TME afectan a trabajadores de todos los sectores y de ambos sexos, las mujeres parecen presentar un mayor riesgo de padecerlos [Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 00a], sobre todo en el cuello y los miembros superiores [Zwart et al., 00; Treaster et al., 04]. [Vega-Martínez,06] afirma que las mujeres presentan el problema de los TME con mayor frecuencia que los hombres y de forma distinta (ver Tabla 3.15).

	HOMBRES	MUJERES
Zona afectada	Menor dispersión. Más en zona lumbar.	Más dispersión. Más en hombros, cuello, miembros superiores.
Momento en que se produce	A menos edad.	A más edad.
Tipo de trastorno	Más lesiones por sobreesfuerzo.	Más lesiones por movimientos repetitivos. Amplia variedad de dolor y molestias.
Reconocimiento legal	Más accidentes de trabajo.	Más enfermedades profesionales.
Sector	Construcción. Metal (incluyendo industria del automóvil). Cárnicas.	Textil. Comercio. Sanidad y Servicios Sociales. Limpieza. Manufacturas.

Tabla 3.15: Diferencias de género en TME (fuente [Vega-Martínez, 06])

Dicha desigualdad entre géneros suele atribuirse a diferencias biológicas, mentales y sociológicas [Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 00a]. Así, por ejemplo, [Vega-Martínez,06] atribuye las posibles diferencias

entre géneros a factores como: las diferencias biológicas que obligan a las mujeres frecuentemente a adoptar posturas forzadas y realizar sobreesfuerzos, debido a la falta de adaptación ergonómica de los puestos y equipos; a la combinación de la vida familiar y laboral, especialmente en las trabajadoras con personas dependientes a su cargo, que favorece la acumulación de la fatiga; o a la división de tareas por sexos (formal o informal) en el entorno laboral que provoca la exposición a riesgos diferentes entre mujeres y hombres.

En la extensa revisión bibliográfica realizada por [Treaster et al., 04] sobre las diferencias de género en la prevalencia de TME en los miembros superiores, tras analizar 56 artículos, al respecto se concluyó que existe una fuerte evidencia de que las mujeres presentaban una mayor incidencia de los TME en los miembros superiores que los hombres. Por ejemplo, las mujeres experimentan mayor número de casos de *síndrome de túnel carpiano* que los hombres. Según [Treaster et al., 04], dicha diferencia puede deberse a que hombres y mujeres se exponen a factores de riesgo distintos. Las mujeres generalmente realizan trabajos que son más repetitivos y monótonos que los hombres, lo cual puede incrementar su riesgo a desarrollar TME sobre todo en los miembros superiores. Existe también ciertas evidencias de que existen variables psicosociales y psicológicas que son relevantes en las diferencias entre hombres y mujeres. Los factores biológicos y culturales también parecen tener un papel importante en dicha diferencia [Treaster et al., 04].

Si bien el trabajo de las mujeres suele ser percibido como menos exigente, debido a que generalmente no supone la aplicación de fuerza, con frecuencia se caracteriza por una elevada carga estática en la región del cuello y los hombros, por ritmos de trabajo rápidos, por requerir precisión y por el uso repetitivo de músculos pequeños [Punnett et al., 00], todos ellos factores de riesgo asociados a los TME. El [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 03] obtiene, en la V encuesta sobre condiciones de trabajo (España), que las molestias músculo-esqueléticas de cuello son significativamente más frecuentes en las mujeres (54,5%) que en los hombres (31,6%).

Aunque hombres y mujeres tengan la misma responsabilidad, las mujeres pueden exponerse a mayor riesgo debido a que los puestos de trabajo no se adaptan a sus dimensiones antropométricas. Muchos puestos son diseñados en base a las medidas antropométricas de los hombres, lo cual supone una desventaja para las mujeres, por regla general, más pequeñas y débiles. Para compensar dicha inadaptación del puesto a las mujeres, éstas pueden desarrollar técnicas de trabajo diferentes a las de los hombres, y que por tanto las expongan a diferentes riesgos [Treaster et al., 04]. Dicha diferencia en los métodos de trabajo también puede observarse en tareas que requieran la aplicación de fuerza [Punnett et al., 00].

Otra explicación para las diferencias observadas entre géneros está relacionada con los factores psicosociales [Leino et al., 95]. Según afirma [Treaster et al., 04] las mujeres son más sensibles al estrés que los hombres, por ejemplo, ante situaciones de presión relacionadas con fechas de entrega o ante conflictos en el trabajo. Como consecuencias, la contribución de los factores psicosociales a los TME (ver 3.9) puede ser más importante en las mujeres que en los hombres, especialmente en el

hombro y en el cuello [Hales et al., 94; Bernard et al., 94]. El incremento del estrés mental o psicológico puede aumentar la tensión muscular y limitar la relajación en el transcurso de la jornada laboral [Treaster et al., 04]. Algunos estudios han demostrado que la tensión muscular aumenta con las demandas mentales de la tarea [Westgaard, 87; Waersted et al., 91] y otros indican una relación directa entre la percepción de tensión y la existencia de dolores en el cuello y los hombros [Vasseljen et al., 95].

Algunos factores de estrés psicosocial pueden ser más importantes en las mujeres que en los hombres, como por ejemplo, la solidaridad, la dependencia de múltiples supervisores, los conflictos entre las obligaciones familiares y laborales, o la falta de soporte en las áreas dominadas por los hombres [Eckenrode et al., 89; Headapole, 93; Goldenhar et al., 96]. Además, según [Kelsh et al., 96], las mujeres suelen sentir que deben trabajar más duro para probarse a sí mismas en las industrias dominadas por los hombres.

Las mujeres informan sobre sus dolores o incomodidades con mayor frecuencia que los hombres [Treaster et al., 04]. [Punnett et al., 00] señala que las mujeres suelen estar más predispuestas que los hombres a informar sobre sus síntomas, a entrevistarse con los supervisores para indicarles sus problemas de salud, o a someterse a seguimientos médicos, en condiciones idénticas de dolor. El reporte de las mujeres de mayor número de síntomas que los hombres puede reflejar diferencias en la sensibilidad ante el dolor o la incomodidad [Treaster et al., 04]. Es ampliamente conocido que las mujeres tienen un umbral del dolor más bajo que los hombres, que provocaría que sintieran dolor a intensidades menores [Berkley, 97; Fillingim et al., 98]. Dichas circunstancias podrían explicar la mayor prevalencia de los TME en las mujeres.

Desde la perspectiva cultural existen algunos aspectos que pueden influir en la mayor prevalencia de los TME en las mujeres que en los hombres. Por ejemplo, [Treaster et al., 04] afirma que en algunas culturas está mejor visto que las mujeres informen sobre sus dolencias que el que lo hagan los hombre. Otro factor que puede influir es que las mujeres son, generalmente, las responsables del trabajo del hogar, el cuidado de los niños y de los ancianos. En Estados Unidos, se ha estimado que el 75% del trabajo del hogar lo realizan las mujeres, que también se ocupan en un 80% del cuidado de los niños, tareas que se suman a sus responsabilidades laborales [Alexanderson et al., 96]. Esto puede conllevar una doble exposición a factores físicos y psicológicos de estrés. Cuando la exposición al riesgo se produce en el trabajo y en el hogar, el tiempo de recuperación se reduce. Un ejemplo de la influencia del cuidado de los niños en los TME se encuentra en el estudio realizado por [Bergqvist et al., 95b] sobre la influencia de las pantallas de visualización de datos en los TME. Dicho estudio concluye que las mujeres con hijos jóvenes son más propensas a TME que los hombres o que otras mujeres.

Existen ciertos factores biológicos que están directamente relacionados con las diferencias entre géneros en los TME. Por ejemplo, el riesgo de padecer el *síndrome del túnel carpiano* aumenta durante el embarazo [Voitk et al., 83]. Ello puede deberse a los cambios en la respuesta inflamatoria durante el embarazo [Treaster et

al., 04]. Las hormonas sexuales pueden ocupar un papel regulador de la función conectiva de los tejidos. Tanto los tendones como los ligamentos poseen receptores de estrógenos y probablemente responden a cambios en los niveles hormonales [Hart et al., 98]. Las fluctuaciones hormonales que ocurren durante el ciclo menstrual o durante el embarazo pueden contribuir a diferencias en la regulación de los tejidos conectivos [Treaster et al., 04].

Diferentes estudios han demostrado que las mujeres son más propensas a desarrollar el *síndrome del túnel carpiano* que los hombres. En el lugar de trabajo el riesgo para las mujeres es de entre 10 y 20 % más alto que para los hombres [Phalen, 72; Maseym, 78; Dieck et al., 85], dicho porcentaje aumenta hasta el 300% en estudios sobre población no sólo trabajadora [Stevens et al., 88; Werner et al., 94]. Inicialmente se pensó que el canal carpiano de las mujeres era menor que el de los hombres y que, por ello, las exponía a mayor compresión del nervio mediano [Gelmers, 81; Bleecker et al., 85]. Sin embargo, investigaciones posteriores sobre las dimensiones de canal carpiano no han demostrado ninguna relación entre *STC* y las dimensiones del canal [Winn et al., 90].

Otro factor individual que podría explicar las diferencias en los TME entre géneros es la tolerancia a la carga biomecánica. Por ejemplo, [Jager et al., 91] concluyó que las mujeres tenían entre 25 y 30% menos fuerza que los hombres. Por su parte [Lindman et al., 90; Lindman et al., 91] descubrieron que las fibras²² en el músculo *trapezio* difieren entre géneros. Las mujeres tienen más fibras Tipo I (también llamadas rojas o de contracción lenta) que los hombres. Dicha circunstancia podría explicar las diferencias en los desordenes musculares.

También las diferencias sensoriales entre géneros pueden influir en los TME [Treaster et al., 04]. Según [Velle, 87] las mujeres son más sensibles a los olores, tacto y al gusto que los hombres. El umbral de dolor más bajo que presentan las mujeres puede deberse precisamente a la mayor sensibilidad del sistema nervioso de las mujeres a estímulos externos. En el lugar de trabajo dicha mayor sensibilidad sensorial puede influir en el estrés psicológico de las mujeres, por ejemplo, en lugares de trabajo con ruido, éste puede afectar más a las mujeres aumentando su estrés psicológico, y como consecuencia afectando a la tensión muscular y a los niveles de dolor o incomodidad [Treaster et al., 04].

Sin embargo, no todos los estudios sostiene la prevalencia de los TME en las mujeres. Tras la revisión bibliográfica realizada por [Hooftman et al., 04] éste concluye una fuerte evidencia de que los hombres presentaban un riesgo mayor de lesiones de espalda por levantamiento de cargas que las mujeres. Dicha afirmación coincide con el resultado de la V Encuesta sobre condiciones de trabajo publicada por el [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 03], que indica que los hombres presentan un porcentaje mayor de dolencias en la parte baja de la espalda que las mujeres, si bien el resultado es el contrario en dolencias de la parte alta de la espalda. Según [Hooftman et al., 04] los hombres presentaban mayor

²² *Fibra muscular*: cada una de las células contráctiles que constituyen los músculos [Real Academia de la lengua Española].

riesgo de lesiones en la zona cuello-hombros que las mujeres, debido a la utilización de herramientas que transmiten vibraciones a los brazos.

3.7.3 La influencia de determinadas medidas antropométricas en los TME

El peso, la altura y el índice de masa corporal (IMC, ratio entre el peso y el cuadrado de la altura) han sido identificadas por diferentes estudios como riesgos potenciales de los TME, especialmente para el *síndrome del túnel carpiano* (STC) y la *hernia de disco lumbar* [Bernard, 97].

En relación al *síndrome del túnel carpiano*, en principio se pensó que el tamaño reducido del canal carpiano aumentaba el riesgo de padecer dicha dolencia, sin embargo investigaciones posteriores han rechazado dicha hipótesis [Winn et al., 90]. Aunque, sí parece existir una relación fuerte entre la obesidad y el desarrollo del STC [Werner et al., 94].

Respecto a la *hernia de disco* [Hrubec et al., 75] encontró relación entre dicha dolencia y el peso y la altura. Algunos estudios han observado que la media de altura de las personas aquejadas de dolor de espalda es mayor que los que no padecen dicha dolencia [Merriam et al., 80; Biering-Sørensen, 83]. [Landau et al., 08] en su estudio sobre los TME en trabajos de ensamblado en la industria del automóvil, centrado en la relación entre la edad y las dolencias músculo-esqueléticas, observa que los síntomas que afectan a la cabeza, el cuello, la región de los hombros, la zona lumbar y las extremidades superiores están relacionados con la altura del cuerpo y el índice de masa corporal.

La revisión sistemática de 65 estudios epidemiológicos sobre la relación entre el dolor lumbar y la obesidad realizada por [Leboeuf-Yde, 00], concluyó que sólo el 32% de los estudios analizados obtenían una asociación positiva entre el dolor lumbar y la obesidad. [Mirtz et al., 05] en su revisión bibliográfica tampoco obtiene una clara evidencia de la relación entre la obesidad y el dolor en la parte baja de la espalda. En el estudio realizado por [Xu et al., 08] sobre las diferencias en el levantamiento de cargas entre individuos obesos (IMC>30) y de peso normal (IMC<25), se concluye que, contrariamente a los resultados esperados, los individuos del grupo con mayor IMC realizaban movimientos más dinámicos durante los levantamientos que los del grupo de menor IMC. Según el autor, los resultados obtenidos cuestionan la utilidad del IMC como medida de la obesidad y puede explicar el porqué de la limitada evidencia de la relación entre el IMC y la incidencia del dolor en la parte baja de la espalda observado en la literatura.

Por su parte [Shiri et al., 08], en su estudio sobre la relación de la obesidad con los dolores lumbares en individuos jóvenes (entre 24 y 39 años), sí encuentra relación entre la longitud de la circunferencia de la cintura y el dolor lumbar en las mujeres. Así el estudio concluye que la obesidad abdominal puede incrementar el riesgo de padecer lesiones lumbares.

[Kortt et al., 02] encuentra relación significativa entre la probabilidad de padecer

TME y el nivel de obesidad. Otras variables socio-económicas como la edad, el sexo, el origen, el nivel de ingresos, el estatus del empleo así como la localización geográfica, también muestran relación significativa. Según el autor los resultados obtenidos pueden ser utilizados por los médicos y educadores para identificar riesgos y diseñar estrategias dirigidas a los pacientes expuestos.

[Webb et al., 03] afirma que la obesidad es un importante indicador para el pronóstico del dolor de espalda y de su severidad. Por su parte, [Woolf et al., 06] sostiene que el riesgo de padecer *osteoartritis* en la rodilla aumenta aproximadamente en un 15% por cada Kg./m² de incremento en el índice de masa corporal (para IMC >27). La obesidad también aumenta el riesgo de padecer *osteoartritis* en la cadera, sin embargo, dicha relación no es tan fuerte como en el caso de la rodilla. [Tsuritani et al., 02] indica que la obesidad provoca dolor músculo-esquelético en las piernas y dificulta los movimientos diarios en la mujeres de mediana edad japonesas.

[Mishra et al., 03] observa que la relación entre el sobrepeso y los TME en el cuello y los hombro es confusa, por lo que algunos investigadores suscriben dicha relación [Tsuritani et al., 02; Luime et al., 04] mientras otros no encuentran dicha asociación [Webb et al., 03].

3.7.4 La influencia del tabaquismo en los TME

En el estudio realizado por [Vieira et al., 08] sobre el dolor lumbar entre enfermeras y soldados, se concluye que el tabaquismo, la falta de actividad física y el sobrepeso son factores personales relacionados con las dolencias lumbares. Por lo tanto, según [Vieira et al., 08], los programas de prevención de las lesiones lumbares deberían centrarse no sólo en reducir la sobrecargas o en mejorar la organización del trabajo y los factores psicosociales, sino que también debería incluir programas para dejar de fumar, campañas de actividad física regular y promover una alimentación sana.

La asociación entre el tabaquismo y el dolor lumbar no es clara, existen estudios que concluyen una asociación positiva, mientras otros indican resultados que rechazan dicha asociación [Dempsey et al., 97]. Dicho autor en su estudio sobre la influencia de las variables personales en el dolor en la parte baja de la espalda de origen laboral, sugiere que la edad, el género, el historial de lesiones, el esfuerzo relativo, el tabaquismo y las variables psicosociales deberían ser estudiadas en el futuro como posibles factores de riesgo asociados a las dolencias en la zona lumbar. Mientras que considera improbables los efectos significativos de otros factores como la altura, el peso, las patologías, los factores genéticos, el consumo máximo de oxígeno, y el esfuerzo absoluto.

Por su parte [Leboeuf-Yde et al., 95], en su investigación sobre la relación entre el tabaquismo y el dolor de espalda, tras analizar 13 estudios, obtiene que en 8 de los 13 estudios se observa una asociación inicial positiva, si bien, en 5 de los estudios dicha asociación se pierde tras realizar un análisis multi-variante posterior.

[Wai et al., 08] parte de la hipótesis de que abandonar el hábito de fumar es

beneficioso para mejorar el dolor crónico en la parte baja de la espalda. Al dejar de fumar disminuyen los efectos potencialmente dañinos del tabaquismo sobre la espina dorsal, como los microtraumas producidos por la tos crónica, que puede provocar *hernia discal*, o la reducción del flujo sanguíneo a los disco y cuerpos vertebrales, que contribuyen a su degeneración temprana y provoca la disminución de la densidad mineral de los huesos. Sin embargo, tras un análisis detallado no encuentra evidencias suficientes para afirmar que dejar de fumar suponga una intervención efectiva de mejora del dolor crónico lumbar. Si bien, subraya que dicha conclusión debe ser considerada con precaución debido al reducido número de pruebas realizadas.

En la revisión bibliográfica realizada por [Goldberg et al., 00], en la que se analizaron 38 estudios que investigaban la asociación entre las lesiones no específicas de espalda y el tabaquismo, se obtuvo una asociación positiva de dicho factor en 18 de 26 estudios para los hombres, y en 18 de 20 estudios para las mujeres. En el caso de la *ciática* y la *hernia de disco* se observó asociación positiva en 4 de 8 estudios para los hombres y en 1 de 5 estudios para las mujeres. Respecto a la relación entre haber fumado en el pasado y dolores de espalda no específicos, se obtuvo relación en 5 de 9 estudios para los hombres y en 5 de 6 estudios para las mujeres. Tras dichos resultados [Goldberg et al., 00] concluye que la información disponible es consistente con la hipótesis de que el tabaquismo está asociado con la incidencia y la prevalencia de dolores de espalda no específicos, sin embargo, afirma que el número de estudios disponibles en la actualidad son demasiado escasos para concluir dicha relación para otras dolencias específicas como la *ciática* o la *hernia de disco*.

[Bernard, 97] por su parte, también aborda la influencia del tabaquismo en los TME, si bien no concluye definitivamente dicha relación, sí aporta gran cantidad de estudios que relacionan el *dolor lumbar*, la *ciática*, la *hernia de disco intervertebral*, el dolor de cuello o el dolor de cuello-hombros con dicho factor de riesgo.

Aunque la mayoría de los estudios se centran en la influencia del tabaquismo en el dolor de espalda, existen también estudios que analizan su efecto sobre otras partes del cuerpo. Por ejemplo [Holmström, 92] analiza la asociación entre el dolor en el cuello-hombros y el tabaquismo y concluye que es más habitual dicha dolencia entre trabajadores que fuman que entre los que nunca han fumado. Si bien un análisis posterior que consideraba la edad, factores individuales y de la ocupación de los individuos puso de relieve la influencia significativa únicamente en los individuos que nunca habían fumado. Por su parte [Gore et al., 06], en su estudio sobre el tabaquismo y la degeneración de la espina cervical, no obtiene evidencia que sugiera que el tabaquismo es un factor causante de la degeneración de la espina cervical. La influencia del tabaquismo sobre los dolores de cuello y hombros no está clara si bien se encuentra bajo discusión [Ming et al., 04].

Por último, [Palmer et al., 03] estudió la relación entre el hábito de fumar y el dolor de espalda, cuello y extremidades inferiores, y obtuvo que tanto los fumadores como los exfumadores presentaban mayor riesgo de dolencias en todas las partes del cuerpo analizadas que el resto de individuos.

3.8. La influencia del frío en los TME

[Hagberg et al., 95] considera que el frío puede actuar de dos formas sobre los riesgos asociados a los TME, bien directamente, con su efecto sobre los tejidos corporales, o de manera indirecta, causando problemas derivados de la utilización de equipos de protección destinados a proteger del frío a los trabajadores. Por ejemplo, llevar guantes aumenta los requerimientos de carga muscular para realizar una tarea. Además, la humedad ambiental y el contacto con el agua fría o con los productos mojados se consideran factores de riesgo potenciales [Piedrahíta et al., 04].

El estudio epidemiológico realizado por [Piedrahíta et al., 04] en una gran compañía de procesamiento de carne sobre la relación entre el frío y los TME, concluyó que la prevalencia de los TME era mayor en los trabajadores más expuestos al frío, especialmente en la zona lumbar, cuello y hombros. Otros estudios consideran el frío un factor de riesgo asociado a los TME. Por ejemplo [Chen et al., 91], realizó un estudio en almacenes de frío en China, y comparó a trabajadores expuestos a frío con un grupo de control no expuesto. El resultado mostró una alta relación entre el frío y el dolor de espalda y de rodilla. Más recientemente [Dovrat et al., 07] realizó un estudio epidemiológico sobre la prevalencia de los TME, en particular en la zona lumbar, entre los trabajadores de almacenes de alimentos refrigerados en Israel. Según dicho autor, los resultados obtenidos consolidan la hipótesis que sostiene que los trabajadores que trabajan en ambientes fríos están más expuestos al riesgo de padecer lesiones músculo-esqueléticas, especialmente en la parte baja de la espalda.

3.9. La influencia de los factores psicosociales en los TME

Los *factores de riesgo psicosociales* son características de las condiciones de trabajo y, sobre todo, de su organización, que afectan a la salud de las personas a través de mecanismos psicológicos y fisiológicos a los que también se denomina *estrés*²³ [Moncada-Lluís et al.].

Según afirma [Menzel, 07], los TME tienen un origen multifactorial que incluye no sólo aspectos físicos sino también factores de riesgo psicosocial.

El término *psicosocial* engloba a una gran cantidad de factores que [Bernard, 97] agrupa en tres dominios: factores asociados con el trabajo y el entorno de trabajo, factores asociados con el entorno externo al trabajo y características personales del individuo. A los factores pertenecientes al dominio del trabajo en ocasiones se le denomina *factores organizacionales del trabajo*.

[Bernard, 97] subraya que la asociación entre los TME y los factores

²³ El *estrés en el trabajo* es un conjunto de reacciones emocionales, cognitivas, fisiológicas y del comportamiento a ciertos aspectos adversos o nocivos del contenido, la organización o el entorno de trabajo. Es un estado que se caracteriza por altos niveles de excitación y de angustia, con la frecuente sensación de no poder hacer frente a la situación [Comisión Europea, 00].

psicosociales es compleja dada la gran variedad de situaciones posibles, sobre todo en relación a los factores personales. Los principales argumentos que tratan de explicar la asociación entre los factores psicosociales y los TME son, en primer lugar, que las exigencias psicosociales pueden producir un aumento de la tensión muscular y exacerbar el esfuerzo biomecánico de la tarea. En segundo lugar, las exigencias psicosociales pueden afectar a la conciencia y al informe sobre los síntomas músculo-esqueléticos y/o a la percepción de sus causas. En tercer lugar, los episodios de dolor provocados por factores físicos pueden causar disfunciones crónicas en el sistema nervioso, tanto fisiológicas como psicológicas, que perpetúen procesos crónicos de dolor. Por último, [Bernard, 97] indica que en algunas situaciones de trabajo, los cambios en las exigencias psicosociales pueden estar asociadas a cambios en las exigencias físicas y al estrés biomecánico. Los TME pueden ser consecuencia de las exigencias físicas o de las psicosociales o del efecto modificador de la relación entre ambas.

Según numerosos autores unas condiciones psicosociales mediocres pueden traducirse en la aparición de TME [Bongers et al., 93; Leino et al., 95; Carayon et al., 99; Bongers, 01; Devereux et al., 02; Smith et al., 04; Devereux et al., 04; Flaspöler et al., 05; European Agency for Safety and Health at Work, 05; Smith et al., 06b].

[Devereux et al., 04] realiza un amplio estudio sobre 8.000 trabajadores, de 20 organizaciones, en 11 sectores industriales del Reino Unido, para determinar la influencia de los factores psicosociales y el estrés en el desarrollo de TME. El estudio concluye relación entre diferentes factores psicosociales y dolencias músculo-esqueléticas en la zona lumbar, el cuello, los hombros, el codo/antebrazo y la mano/muñeca.

Zona expuesta a lesiones músculo-esqueléticas	Factores psicosociales del trabajo
Zona lumbar	Esfuerzo extrínseco ²⁴ . Esfuerzo intrínseco ²⁵ . Conflicto de roles ²⁶ . Amenaza del daño o de lesión física.
Cuello	Esfuerzo intrínseco. Ambigüedad del futuro del trabajo. Abuso verbal y/o confrontaciones con los clientes y el público en general ²⁷ .
Hombros	Escaso soporte social. Escasa recompensa.

²⁴ El *esfuerzo extrínseco* hace referencia a exigencias del trabajo como la presión constante de tiempos, interrupciones y distracciones en el trabajo, responsabilidad en el trabajo, presión para trabajar horas extras e incremento de las exigencias del trabajo [Devereux et al., 04].

²⁵ El *esfuerzo intrínseco* hace referencia a un patrón de individuo caracterizado por ser abrumado por las presiones de tiempo, la incapacidad para relajarse y desconectar después del trabajo, y el sacrificio excesivo por el trabajo [Devereux et al., 04].

²⁶ El *conflicto de roles* hace referencia a la necesidad de hacer cosas diferentes, ocuparse de peticiones incompatibles, entrar en conflicto con valores personales y sufrir asignaciones de tareas sin recursos adecuados [Devereux et al., 04].

²⁷ El abuso o las confrontaciones verbales con los clientes o el público en general también implica conflicto, pero con relaciones externas a la organización [Devereux et al., 04].

	Incertidumbre sobre el futuro del trabajo. Amenaza de daño o de lesión física.
Codo/antebrazo	Escasa capacidad de decisión. Escaso soporte social. Escasa recompensa. Conflicto de roles. Incertidumbre sobre el futuro del trabajo. Amenaza de daño o de lesión física.
Mano/Muñeca	Esfuerzo intrínseco. Conflicto de roles. Incertidumbre sobre el futuro del trabajo.

Tabla 3.16: Tabla resumen de los factores psicosociales que pueden afectar a las diferentes partes del cuerpo (Adaptado de [Devereux et al., 04])

En los estudios realizados por [Smith et al., 04; Smith et al., 06b] sobre los TME en China, se concluye una gran correlación entre los factores psicosociales y los TME, confirmando la evidencia creciente que asocia los factores psicosociales y mentales con los problemas músculo-esqueléticos. En el análisis realizado por [Bongers et al., 93; Bongers, 01], en base a diversos estudios epidemiológicos, sobre la relación entre los problemas músculo-esqueléticos en los miembros superiores y los factores psicosociales, se observa que la gran mayoría de los estudios señalan la relación de al menos un factor psicosocial con los síntomas o signos de lesiones en las extremidades superiores. Un elevado estrés parece asociado, consistentemente, con todos los problemas de las extremidades superiores. [Bernard, 97] también encuentra relación entre las lesiones músculo-esqueléticas en los miembros superiores y factores psicosociales como la intensidad del trabajo, la monotonía del trabajo o los niveles bajos de soporte social. La falta de control sobre el trabajo y la insatisfacción laboral también aparecen como factores que influyen significativamente en los TME de las extremidades superiores.

[Walker-Bone et al., 03] realiza una exhaustiva revisión bibliográfica sobre los factores que influyen en los TME en las extremidades superiores y concluye que los factores mecánicos y psicosociales contribuyen sustancialmente al desarrollo de dolencias músculo-esqueléticas en los miembros superiores.

Los factores psicosociales también han sido citados como factores adicionales causantes del *síndrome del túnel carpiano* por [Katz et al., 01; Butler et al., 02; Walker-Bone et al., 03].

En el sector sanitario los TME son una afección extendida entre las enfermeras, sobre todo en el cuello y en la zona lumbar. Dichas dolencias son atribuidas a factores tanto físicos como psicosociales [Ylipaa et al., 97; Brulin et al., 98; Gunnarsdottir et al., 03; Simon et al., 08].

[Niedhammer et al., 98] asocia los dolores en los hombros de las cajeras de supermercado con factores psicosociales de su trabajo.

En el estudio realizado por [Simon et al., 08] se concluye que los factores psicosociales están incluso más fuertemente asociados con las dolencias músculo-esqueléticas en la espalda y el cuello que los factores físicos. Los factores psicosociales incluidos en el estudio corresponden a la *exigencia cuantitativa del*

trabajo o intensidad del trabajo (medida basada en la escala del Cuestionario Psicosocial de Copenhagen (COPSOQ, [Kristensen et al., 05]), la *influencia en el trabajo* que mide el control sobre el entorno de trabajo, y la *relación entre el esfuerzo del trabajador y la recompensa obtenida* (*effort-reward imbalance ratio*, *ERI ratio*). La recompensa no sólo incluye el beneficio económico, sino también oportunidades/seguridad en la carrera y la valoración profesional. Éste último factor resultó ser el de mayor influencia sobre los TME en la espalda y en el cuello. Según los autores, dicho resultado es consistente con otros estudios que han indicado evidencias sobre la asociación significativa entre los factores psicosociales y estados de dolor agudos y crónicos (discapacidades) en la espalda y el cuello [Linton, 00]. Finalmente, el estudio concluye que la fuerte relación entre los factores psicosociales (especialmente la relación entre esfuerzo y recompensa) y las discapacidades en la espalda y el cuello deben dar lugar a medidas preventivas que traten de reducir dichas lesiones.

[Crook et al., 02] tras realizar una amplia revisión bibliográfica sobre los determinantes de las lesiones en la parte baja de la espalda, concluye que la angustia psicológica y el entorno de trabajo (además de otros factores no psicosociales como: los factores demográficos, la discapacidad funcional, el informe de dolor y los episodios previos), se identifican como importantes factores de pronóstico de las discapacidades en la zona baja de la espalda. Por su parte [Bernard, 97] también concluye que al igual que en el caso de las extremidades superiores, parece existir una evidencia creciente de la asociación entre los TME en zona baja de la espalda y los factores psicosociales.

[Linton et al., 89] analiza la relación entre las variables psicológicas del trabajo y el dolor de cuello y hombros entre 420 secretarias. El estudio concluye que los entornos de trabajo psicológicamente mediocres, presentan una mayor frecuencia del dolor de cuello y hombros. Además, también se observa relación entre los TME en el cuello y los hombros y el contenido del trabajo y el soporte social. Según el autor, el resultado del estudio demuestra la posible importancia del entorno psicológico de trabajo en el desarrollo de desórdenes músculo-esqueléticos.

[Wang et al., 05b] en su estudio sobre los riesgos asociados a la confección de ropa con máquinas de coser, concluye que existe relación entre la baja autonomía de decisión y el dolor en las extremidades superiores, espalda y caderas. Además, la elevada exigencia psicológica del trabajo está asociada con el incremento del riesgo de dolor en las extremidades superiores.

[Rissen, 06] en su estudio sobre el trabajo repetitivo y monótono entre las cajeras de supermercado, obtiene como resultado que las reacciones negativas al estrés (tensión, agotamiento) durante el trabajo, se asocian a una mayor actividad muscular en el músculo trapecio y una menor cantidad de reposo de dicho músculo. En contraposición, no parece existir correlación significativa entre reacciones positivas al estrés (estimulación, concentración, felicidad) y la actividad muscular.

La [Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 00a] señala que aunque existen pruebas que apoyan la relación entre las reacciones de estrés y los

TME, es difícil concluir si tales reacciones participan de un modo significativo en el desarrollo de los TME, o si las reacciones de estrés que experimentan las personas que padecen TME se deben sencillamente al dolor y al deterioro funcional. Por su parte la [Comisión Europea, 00] ha elaborado una guía con el objetivo de prevenir el estrés en el trabajo y con ello tratar de reducir una amplia gama de trastornos, enfermedades y malestares, así como evitar la disminución de productividad. En la guía se discuten con detalle las enfermedades músculo-esqueléticas.

Numerosas investigaciones [Linton et al., 89; Bongers et al., 93; Leino et al., 95; Ylipaa et al., 97; Brulin et al., 98; Carayon et al., 99; Linton, 00; Bongers, 01; Katz et al., 01; Devereux et al., 02; Butler et al., 02; Crook et al., 02; Gunnarsdottir et al., 03; Smith et al., 04; Devereux et al., 04; Flaspöler et al., 05; European Agency for Safety and Health at Work, 05; Smith et al., 06b; Menzel, 07; Simon et al., 08] e iniciativas de organizaciones destinadas a preservar la salud de los trabajadores [OIT-OMS, 84; Bernard, 97; Comisión Europea, 00; Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, 00a] parecen coincidir en que los factores psicosociales se relacionan con TME en distintas partes del cuerpo (extremidades superiores, espalda y cuello). Si bien, la mayoría de los estudios subrayan la necesidad de ampliar la investigación que clarifique la asociación entre los factores psicosociales y los TME.

4

**Métodos de evaluación ergonómica de
puestos de trabajo**

4. MÉTODOS DE EVALUACIÓN ERGONÓMICA DE PUESTOS DE TRABAJO

4.1. Introducción

La inclusión de puestos de trabajo en una agenda de rotación con un elevado nivel de riesgo supone exponer al trabajador a una situación que, aunque puntual o de corta duración, puede ser suficiente para que se produzca una lesión músculo-esquelética [Frazer et al., 03]. [Vézina, 04] afirma que cuando una rotación se implementa sin reducir el nivel de riesgo de los puestos, puede ocurrir que la rotación retrase el comienzo de la lesión o que se exponga a más trabajadores al riesgo de desarrollar TME. Por tanto, tal y como se indicó con anterioridad (ver 2.6.3.1.1), la reducción del riesgo de los puestos debe considerarse una fase preliminar de la implantación de un sistema de rotaciones. Los métodos de evaluación ergonómica permiten identificar y valorar los factores de riesgo presentes en los puestos de trabajo para, posteriormente, en base a los resultados obtenidos, plantear opciones de rediseño que reduzcan el riesgo y lo sitúan en niveles aceptables de exposición para el trabajador.

[Winkel et al., 92] afirma que la exposición al riesgo del trabajador depende de la amplitud del riesgo al que se expone, de la frecuencia del riesgo y de su duración. La fase preliminar de rediseño de los puestos permitirá actuar sobre la amplitud del riesgo para, posteriormente, mediante la implantación de un sistema de rotaciones, actuar sobre la duración del riesgo, reduciéndose así la exposición del trabajador. La frecuencia del riesgo es una dimensión, por lo general, determinada por el sistema productivo y cuya modificación se encuentra generalmente fuera del alcance de las actuaciones ergonómicas.

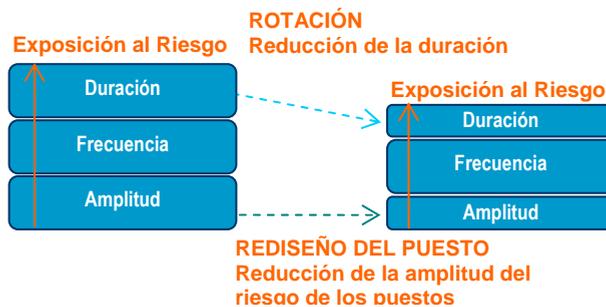


Figura 4.1: Esquema de reducción del riesgo mediante el rediseño de puestos y la rotación al actuar sobre dos de las dimensiones definidas por [Winkel et al., 92]: amplitud y duración.

La rotación de puestos de trabajo permite reducir el nivel total de exposición al riesgo de los trabajadores [Jonsson, 88]. Para llevar a cabo dicha reducción deberán conocerse qué factores de riesgo se encuentran presentes en los diferentes puestos

a rotar y cuál es su amplitud. Dicha información es posible obtenerla mediante métodos de evaluación ergonómica, cuya aplicación resulta sencilla, frente a otras técnicas más complejas o que requieren conocimientos más específicos o instrumentos de medida no siempre al alcance de los diseñadores, como por ejemplo: la medición del consumo de oxígeno, de la frecuencia cardiaca, de la fuerza soportada por el disco intervertebral L5/S1 (unión lumbosacral), del consumo metabólico, el uso de electromiógrafos (EMG), etc. Por ejemplo, [Carnahan et al., 99] utiliza el método de evaluación ergonómica JSI (*Job Severity Index*) [Ayoub et al., 78; Liles et al., 84] para evaluar el riesgo debido al levantamiento de cargas en los puestos a rotar. En base a dicha información desarrolla un AG para asignar los trabajadores a los puestos, de manera que se reduzca la exposición total de los trabajadores a dicho factor de riesgo (ver 6.12.1.1). Así pues, los niveles o amplitud del riesgo de los puestos de trabajo permitirán determinar las asignaciones de los puestos a los trabajadores (ver 2.8.3.). De este modo se equilibra la exposición al riesgo entre éstos y la exposición al riesgo total de cada trabajador se situará en niveles admisibles. Por tanto, resulta de gran utilidad para el proceso de diseño de las agendas de rotación la utilización de los métodos de evaluación ergonómica, tanto para la reducción de la amplitud del riesgo preliminar, como para determinar el orden y duración de las asignaciones de los puestos (y sus niveles de riesgo) a los trabajadores.

Una dificultad importante a la hora de diseñar agendas de rotación que prevengan los TME es la gran cantidad de factores de riesgo que deben ser considerados (movimientos repetitivos, levantamientos de carga, el mantenimiento de posturas forzadas, las posturas estáticas, la exigencia mental, la monotonía, las vibraciones, el frío, etc.). [Li et al., 99] afirma que idealmente en la evaluación de los riesgos asociados con los TME, todos los posibles factores de riesgo deberían ser medidos. Sin embargo, resulta problemático considerar todos los riesgos simultáneamente puesto que se conoce poco sobre la importancia relativa de cada factor y de sus interacciones [Winkel et al., 92]. Por tanto, es complejo determinar el peso o importancia de los diferentes factores de riesgo para establecer un nivel global de riesgo. Además, los métodos de evaluación ergonómica generalmente se centran en el análisis de un determinado factor de riesgo (las posturas forzadas (RULA [McAtamney et al., 93], los levantamientos de cargas [Snook et al., 91; Waters et al., 93] o la repetitividad de los movimientos [Moore et al., 95], etc.) y no existe consenso entre la comunidad científica sobre la utilización de escalas homogéneas para la clasificación del riesgo que permitieran obtener un resultado global que considerase todos los factores de riesgo. En todo caso, la ponderación del riesgo asociado a cada factor en dicho resultado global estaría pendiente de validación por la comunidad científica.

Algunos estudios han tratado de analizar simultáneamente diferentes factores de riesgo ([Guelaud et al., 77; Li et al., 98]), sin embargo, los sistemas de puntuación adoptados son hasta el momento en gran parte hipotéticos [Li et al., 99]. Recientemente el Departamento de Trabajo de la [Generalitat de Catalunya, 06] ha publicado un manual para la prevención de riesgos laborales que incluye una metodología que permite evaluar diferentes factores de riesgo como: el

desplazamiento vertical de cargas, el transporte de cargas, el empuje de cargas, las posturas forzadas, los movimientos repetitivos, el esfuerzo muscular localizado mantenido, el esfuerzo físico general, las vibraciones en todo el cuerpo y las vibraciones en el conjunto de mano-brazo. La principal aportación de dicha metodología es la utilización de la misma clasificación o escala de los niveles de riesgo para todos los factores anteriormente citados (“riesgo muy leve y leve”, “riesgo moderado”, “riesgo grave” y “riesgo ergonómicamente no tolerable”). Dicha aportación permitiría obtener una valoración global del riesgo siempre y cuando se hubiera llegado al consenso científico sobre la ponderación de cada factor de riesgo. Sin embargo, los propios autores de la metodología señalan que se encuentra en fase de validación, por lo que su utilización como método de valoración del riesgo global de los puestos se plantea como posibilidad futura. Como reflejo del problema descrito, las investigaciones que proponen métodos para el diseño de agendas de rotación se centran en la optimización de un único factor de riesgo, como por ejemplo la exposición al ruido [Nanthavanij et al., 01; Tharmmaphornphila et al., 03; Kullpattaranirun et al., 05; Yaoyuenyong et al., 06], el levantamiento de cargas [Carnahan et al., 98; Carnahan et al., 99; Carnahan et al., 00] o la carga de trabajo [Seckiner et al., 07a; Seckiner et al., 07b].

En la actualidad existen un gran número de métodos de evaluación que tratan de asistir al ergónomo en la tarea de identificación de los diferentes riesgos ergonómicos. Además, los métodos más difundidos han dado lugar a numerosas herramientas informáticas con el objetivo de facilitar su aplicación. La selección del método adecuado para medir cada tipo de riesgo, así como la garantía de fidelidad a la fuente de la herramienta o documentación utilizada se ha identificado como un problema importante al que se enfrentan los ergónomos a la hora de iniciar un estudio ergonómico.

En el presente capítulo se describen métodos para la identificación de factores de riesgo asociados con los TME, ampliamente refrendados por la comunidad científica, y utilizados habitualmente por los ergónomos como herramientas de evaluación.

En el capítulo dedicado a la validación de la metodología que se propone (Capítulo 9), ésta es aplicada a la reducción del riesgo por movimientos repetitivos. No obstante, los resultados de la evaluación de los métodos que a continuación se describen, podrían ser utilizados para aplicar la metodología propuesta a la reducción de otros factores de riesgo, como la carga postural o el riesgo relacionado con los levantamientos.

Los métodos que se analizan permiten evaluar el riesgo asociado a la adopción de posturas forzadas (RULA [McAtamney et al., 93], OWAS [Karhu et al., 77]), el manejo de cargas (NIOSH [Waters et al., 93], Tablas de Snook y Ciriello [Snook et al., 91]), la realización de movimientos repetitivos (JSI [Moore et al., 95], OCRA [Colombini et al., 02], Sue Rodgers [Rodgers, 86a; Rodgers, 92]), o a las condiciones globales de trabajo físicas, ambientales y psicosociales (LEST [Gueldaud et al., 77]).

La selección de métodos que se presenta obedece a criterios de sencillez de

aplicación y consolidación entre los ergónomos [Asensio-Cuesta et al., 08]. Dicha selección coincide con los resultados del estudio realizado por [Dempsey et al., 05], sobre las herramientas más utilizadas por los ergónomos, el cual concluye que el método NIOSH (73,4%) destaca para la evaluación manual de cargas, el método RULA (51,6%) para el análisis postural, seguido por el método JSI (*Job Strain Index*) para la evaluación de los movimientos repetitivos (39,3%) y del método OWAS, también para el análisis postural (21,4%). Todos ellos han sido incluidos en el presente capítulo.

4.2. Métodos de evaluación ergonómica para el análisis postural

La adopción continuada o repetida de posturas forzadas durante el trabajo genera fatiga y a la larga puede ocasionar trastornos en el sistema músculo-esquelético [Luopajarvi et al., 79; Amano et al., 88; Byström et al., 95; Bernard, 97; Chee et al., 04; Devereux et al., 04]. Esta carga estática o postural es uno de los factores a tener en cuenta en la evaluación de las condiciones de trabajo, y su reducción es una de las medidas fundamentales a adoptar en la mejora de puestos.

Para la evaluación del riesgo asociado a la carga postural en un puesto de trabajo se han desarrollado diversos métodos, cada uno con un ámbito de aplicación y aporte de resultados diferente, entre ellos destacan: el método POSTURE TARGETTING [Corlett et al., 79] centrado en la evaluación de posturas estáticas, el métodos OWAS [Karhu et al., 77] que analiza las posturas de todo el cuerpo, el método HAMA (Hand-Arm-Movement Analysis) [Christmansson, 94] que se centra en la evaluación de los miembros superiores, el método PLIBEL [Kemmlert et al., 87] que identifica riesgos en diferentes partes del cuerpo, el método RULA [McAtamney et al., 93] que permite evaluar la postura de los miembros superiores, el método REBA [Hignett et al., 00], basado en el método RULA, que amplía la evaluación a los miembros inferiores, el sistema QEC (*Quick Exposure Check for working-related musculoskeletal risks*) [Li et al., 98] que evalúa el riesgo tanto de posturas estáticas como dinámicas para diferentes regiones corporales, etc.

En el presente apartado se describen con detalle dos de los métodos más utilizados por los ergónomos para la evaluación de la carga postural [Dempsey et al., 05], el método RULA [McAtamney et al., 93] y el método OWAS [Karhu et al., 77].

4.2.1 El método RULA (Rapid Upper Limb Assessment)

El método RULA [McAtamney et al., 93] fue desarrollado para evaluar la exposición de los trabajadores a factores de riesgo que pueden ocasionar trastornos músculo-esqueléticos en los miembros superiores del cuerpo como las posturas, la repetitividad de los movimientos, la fuerza aplicada o la actividad estática del sistema músculo-esquelético. Cabe señalar que aunque el método considera la repetitividad de los movimientos, no proporciona suficiente información sobre dicho factor de riesgo como para permitir un análisis detallado de dicho factor de riesgo.

El método RULA evalúa posturas concretas; es importante evaluar aquéllas que supongan una carga postural más elevada. La aplicación del método comienza con

la observación de la actividad del trabajador durante varios ciclos de trabajo. A partir de esta observación se deben seleccionar las tareas y posturas más significativas, bien por su duración, bien por presentar, a priori, una mayor carga postural. Éstas serán las posturas que se evaluarán.

Si el ciclo de trabajo es largo se pueden realizar evaluaciones a intervalos regulares. En este caso se considerará, además, el tiempo que pasa el trabajador en cada postura.

Las mediciones a realizar sobre las posturas adoptadas son fundamentalmente angulares (los ángulos que forman los diferentes miembros del cuerpo respecto de determinadas referencias en la postura estudiada). Estas mediciones pueden realizarse directamente sobre el trabajador mediante transportadores de ángulos, electrogoniómetros, o cualquier dispositivo que permita la toma de datos angulares. No obstante, es posible emplear fotografías del trabajador adoptando la postura estudiada y medir los ángulos sobre éstas. Si se utilizan fotografías es necesario realizar un número suficiente de tomas, desde diferentes puntos de vista (alzado, perfil, vistas de detalle...), y asegurar que los ángulos a medir aparecen en verdadera magnitud en las imágenes.

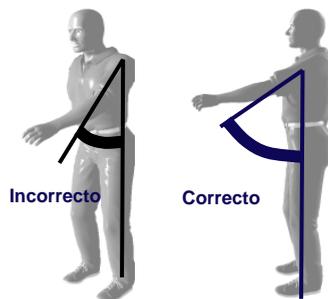


Figura 4.2: Medición de ángulo incorrecta frente a una medición correcta (en verdadera magnitud).

El método debe ser aplicado al lado derecho y al lado izquierdo del cuerpo por separado. El evaluador experto puede elegir a priori el lado que aparentemente esté sometido a mayor carga postural, pero en caso de duda es preferible analizar los dos lados.

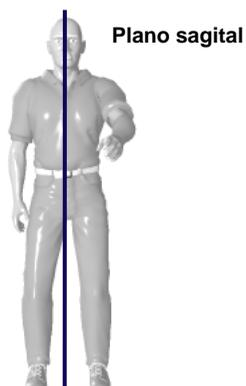


Figura 4.3: División del cuerpo en el lado derecho y el lado izquierdo por el plano sagital.

4.2.1.1 Aplicación del método

El método RULA divide el cuerpo en dos grupos, el grupo A que incluye los miembros superiores (brazos, antebrazos y muñecas) y el grupo B, que comprende las piernas, el tronco y el cuello. Mediante las tablas asociadas al método, se asigna una puntuación a cada zona corporal (piernas, muñecas, brazos, tronco...) para, en función de dichas puntuaciones, asignar valores globales a cada uno de los grupos A y B.

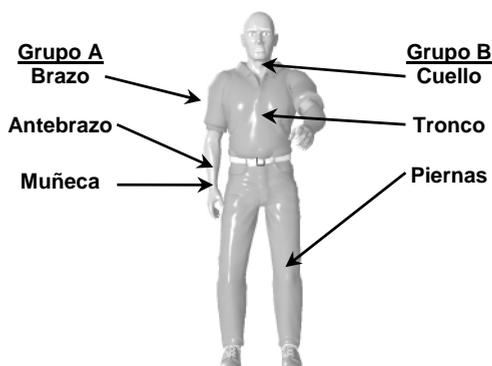


Figura 4.4: Grupos de evaluación en el método Rula

La clave para la asignación de puntuaciones a los miembros es la medición de los ángulos que forman las diferentes partes del cuerpo del operario. El método determina para cada miembro la forma de medición del ángulo.

Posteriormente, las puntuaciones globales de los grupos A y B son modificadas en función del tipo de actividad muscular desarrollada, así como de la fuerza aplicada durante la realización de la tarea. Por último, se obtiene la puntuación final a partir de dichos valores globales modificados. El valor final proporcionado por el

método RULA es proporcional al riesgo que conlleva la realización de la tarea, de forma que valores altos indican un mayor riesgo de aparición de lesiones músculo-esqueléticas.

El método organiza las puntuaciones finales en niveles de actuación que orientan al evaluador sobre las decisiones a tomar tras el análisis. Los niveles de actuación propuestos van del nivel 1, que estima que la postura evaluada resulta aceptable, al nivel 4, que indica la necesidad urgente de cambios en la actividad.

El procedimiento de aplicación del método es, en resumen, el siguiente:

- Determinar los ciclos de trabajo y observar al trabajador durante varios de estos ciclos.
- Seleccionar las posturas que se evaluarán.
- Determinar, para cada postura, si se evaluará el lado izquierdo del cuerpo o el derecho (en caso de duda se evaluarán ambos).
- Determinar las puntuaciones para cada parte del cuerpo.
- Obtener la puntuación final del método y el Nivel de Actuación para determinar la existencia de riesgos.
- Revisar las puntuaciones de las diferentes partes del cuerpo para determinar dónde es necesario aplicar correcciones.
- Rediseñar el puesto o introducir cambios para mejorar la postura si es necesario.

En caso de haber introducido cambios, se debe evaluar de nuevo la postura con el método RULA para comprobar la efectividad de la mejora.

Los siguientes apartados describen cómo obtener las distintas puntuaciones del método.

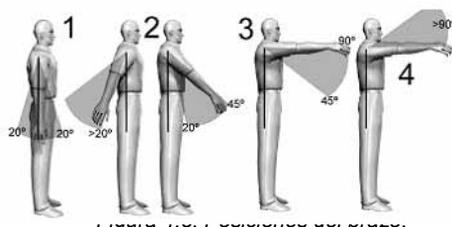
4.2.1.1.1 Grupo A: Puntuaciones de los miembros superiores

El método comienza con la evaluación de los miembros superiores (brazos, antebrazos y muñecas) organizados en el llamado Grupo A.

4.2.1.1.2 Puntuación del brazo

El primer miembro a evaluar será el brazo. Para determinar la puntuación a asignar a dicho miembro, se deberá medir el ángulo que forma con respecto al eje del tronco, la Figura 4.5 muestra las diferentes posturas consideradas por el método y pretende orientar al evaluador a la hora de realizar las mediciones necesarias.

En función del ángulo formado por el brazo, se obtendrá su puntuación consultando la Tabla 4.1.



Puntos	Posición
1	desde 20° de extensión a 20° de flexión
2	extensión >20° o flexión entre 20° y 45°
3	flexión entre 45° y 90°
4	flexión >90°

Tabla 4.1: Puntuación del brazo (fuente [McAtamney et al., 93]).

Es importante recordar que si el tronco está flexionado (extendido) los ángulos deben medirse desde el eje del tronco.

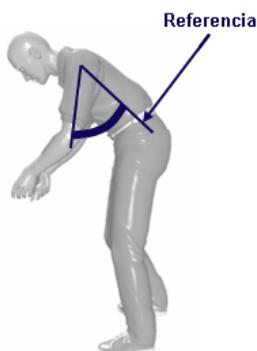


Figura 4.6: Eje de referencia para la medición del ángulo de los brazos.

La puntuación asignada al brazo podrá verse modificada, aumentando o disminuyendo su valor, si el trabajador posee los hombros levantados, si presenta rotación del brazo, si el brazo se encuentra separado o abducido respecto al tronco, o si existe un punto de apoyo durante el desarrollo de la tarea. Cada una de estas circunstancias incrementará o disminuirá el valor original de la puntuación del brazo. Si ninguno de estos casos fuera reconocido en la postura del trabajador, el valor de la puntuación del brazo sería el indicado en la Tabla 4.1 sin alteraciones.

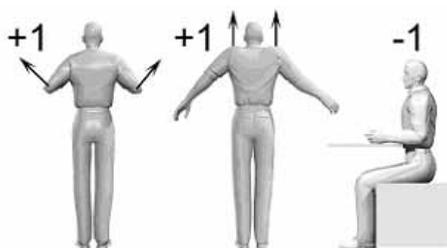


Figura 4.7: Posiciones que modifican la puntuación del brazo.

Puntos	Posición
+1	Si el hombro está elevado o el brazo rotado.
+1	Si los brazos están abducidos.
-1	Si el brazo tiene un punto de apoyo.

Tabla 4.2: Modificaciones sobre la puntuación del brazo (fuente [McAtamney et al., 93])

4.2.1.1.3 Puntuación del antebrazo

A continuación será analizada la posición del antebrazo. La puntuación asignada al antebrazo será nuevamente función de su posición. La Figura 4.8 muestra las diferentes posibilidades. Una vez determinada la posición del antebrazo y su ángulo correspondiente, se consultará la Tabla 4.3 para determinar la puntuación establecida por el método.

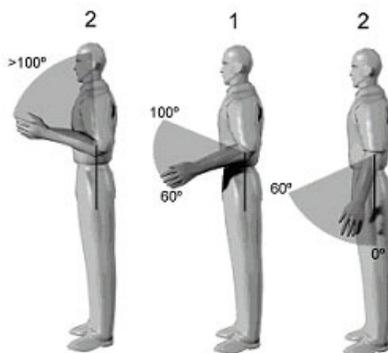


Figura 4.8: Posiciones del antebrazo.

Puntos	Posición
1	flexión entre 60° y 100°
2	flexión < 60° ó > 100°

Tabla 4.3: Puntuación del antebrazo (fuente [McAtamney et al., 93]).

Es importante recordar que si el tronco está flexionado (extendido) los ángulos deben medirse desde el eje del tronco.

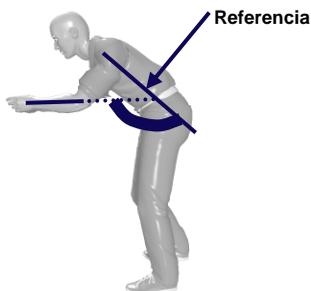


Figura 4.9: Referencia para la medición del ángulo del antebrazo.

La puntuación asignada al antebrazo podrá verse aumentada en dos casos: si el antebrazo cruzara la línea media del cuerpo, o si se realizase una actividad a un lado de éste. Ambos casos resultan excluyentes, por lo que como máximo podrá verse aumentada en un punto la puntuación original. La Figura 4.10 muestra gráficamente las dos posiciones indicadas y en la Tabla 4.4 se muestran los incrementos a aplicar.



Figura 4.10: Posiciones que modifican la puntuación del antebrazo.

Puntos	Posición
+1	Si la proyección vertical del antebrazo se encuentra más allá de la proyección vertical del codo
+1	Si el antebrazo cruza la línea central del cuerpo.

Tabla 4.4: Modificación de la puntuación del antebrazo (fuente [McAtamney et al., 93]).

4.2.1.1.4 Puntuación de la Muñeca

Para finalizar con la puntuación de los miembros superiores (grupo A), se analizará la posición de la muñeca. En primer lugar, se determinará el grado de flexión de la muñeca. La Figura 4.11 muestra las tres posiciones posibles consideradas por el método. Tras el estudio del ángulo, se procederá a la selección de la puntuación correspondiente consultando los valores proporcionados por la Tabla 4.5.

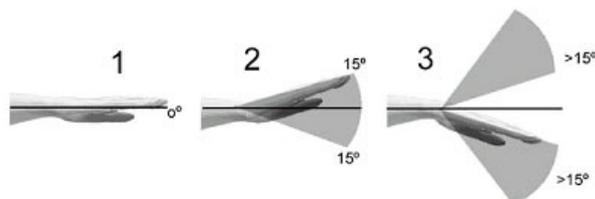


Figura 4.11. Posiciones de la muñeca.

Puntos	Posición
1	Si está en posición neutra respecto a flexión.
2	Si está flexionada o extendida entre 0° y 15°.
3	Para flexión o extensión mayor de 15°.

Tabla 4.5: Puntuación de la muñeca (fuente [McAtamney et al., 93]).

El valor calculado para la muñeca se verá modificado si existe desviación radial o cubital (Figura 4.12). En ese caso se incrementa en una unidad dicha puntuación.



Figura 4.12: Modificación de la puntuación de la muñeca.

Puntos	Posición
+1	Si está desviada radial o cubitalmente.

Tabla 4.6: Puntuación del giro de la muñeca (fuente [McAtamney et al., 93]).

Una vez obtenida la puntuación de la muñeca se valorará el giro de la misma (Tabla 4.7). Este nuevo valor será independiente y no se añadirá a la puntuación anterior, si no que servirá posteriormente para obtener la valoración global del grupo A.

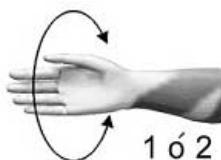


Figura 4.13: Giro de la muñeca.

Puntos	Posición
1	Si está en posición neutra respecto a flexión.
2	Si está flexionada o extendida entre 0° y 15°.

Tabla 4.7: Puntuación del giro de la muñeca (fuente [McAtamney et al., 93]).

4.2.1.1.5 Grupo B: Puntuaciones para las piernas, el tronco y el cuello.

Analizada la evaluación de los miembros superiores, se procederá a la valoración de las piernas, el tronco y el cuello, miembros englobados en el grupo B.

4.2.1.1.6 Puntuación del cuello

El primer miembro a evaluar de este segundo bloque será el cuello. Se evaluará inicialmente la flexión de este miembro: la puntuación asignada por el método se muestra en la Tabla 4.8. La Figura 4.14 muestra las tres posiciones de flexión del cuello así como la posición de extensión puntuadas por el método.

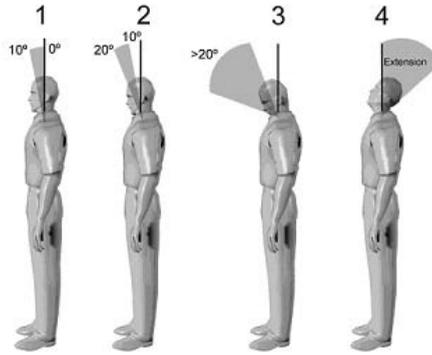


Figura 4.14: Posiciones del cuello.

Puntos	Posición
1	Si existe flexión entre 0° y 10°
2	Si está flexionado entre 10° y 20°.
3	Para flexión mayor de 20°.
4	Si está extendido.

Tabla 4.8: Puntuación del cuello (fuente [McAtamney et al., 93]).

La puntuación hasta el momento calculada para el cuello podrá verse incrementada si el trabajador presenta inclinación lateral o rotación, tal y como indica la Tabla 4.9.

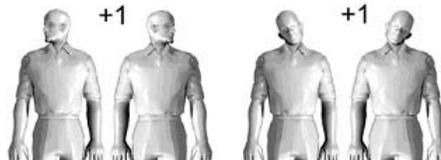


Figura 4.15: Posiciones que modifican la puntuación del cuello.

Puntos	Posición
+1	Si el cuello está rotado.
+1	Si hay inclinación lateral.

Tabla 4.9: Modificación de la puntuación del cuello (fuente [McAtamney et al., 93]).

4.2.1.1.7 Puntuación del tronco

El segundo miembro a evaluar del grupo B será el tronco. Se deberá determinar si el trabajador realiza la tarea sentado o bien la realiza de pie, indicando en este último caso el grado de flexión del tronco. Se seleccionará la puntuación adecuada

de la Tabla 4.10.

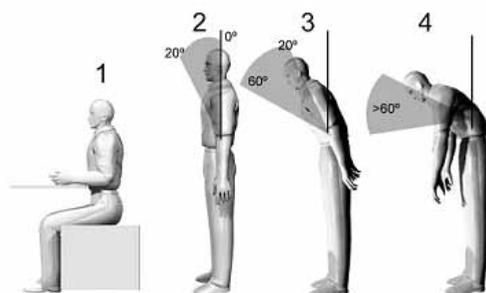


Figura 4.16: Posiciones del tronco.

Puntos	Posición
1	Sentado, bien apoyado y con un ángulo tronco-caderas >90°
2	Si está flexionado entre 0° y 20°
3	Si está flexionado entre 20° y 60°.
4	Si está flexionado más de 60°.

Tabla 4.10: Puntuación del tronco (fuente [McAtamney et al., 93]).

La puntuación del tronco incrementará su valor si existe torsión o lateralización del tronco. Ambas circunstancias no son excluyentes y por tanto podrán incrementar el valor original del tronco hasta en 2 unidades si se dan simultáneamente.

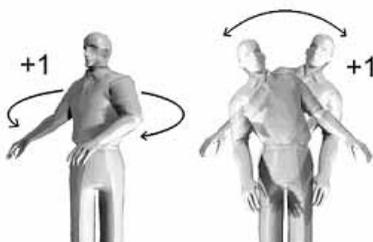


Figura 4.17: Posiciones que modifican la puntuación del tronco.

Puntos	Posición
+1	Si hay torsión de tronco.
+1	Si hay inclinación lateral del tronco.

Tabla 4.11: Modificación de la puntuación del tronco (fuente [McAtamney et al., 93]).

4.2.1.1.8 Puntuación de las piernas

Para terminar con la asignación de puntuaciones a los diferentes miembros del trabajador se evaluará la posición de las piernas. En el caso de las piernas el método no se centrará, como en los análisis anteriores, en la medición de ángulos. Serán aspectos como la distribución del peso entre las piernas, los apoyos

existentes y la posición sentada o de pie, los que determinarán la puntuación asignada. Con la ayuda de la Tabla 4.12 será finalmente obtenida la puntuación.

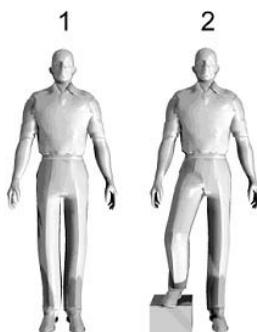


Figura 4.18: Posición de las piernas.

Puntos	Posición
1	Sentado, con pies y piernas bien apoyados
1	De pie con el peso simétricamente distribuido y espacio para cambiar de posición
2	Si los pies no están apoyados, o si el peso no está simétricamente distribuido

Tabla 4.12: Puntuación de las piernas (fuente [McAtamney et al., 93]).

4.2.1.1.9 Puntuaciones globales

Tras la obtención de las puntuaciones de los miembros del grupo A y del grupo B de forma individual, se procederá a la asignación de una puntuación global a ambos grupos.

4.2.1.1.10 Puntuación global para los miembros del grupo A.

Con las puntuaciones de brazo, antebrazo, muñeca y giro de muñeca, se asignará mediante la Tabla 4.13 una puntuación global para el grupo A.

Brazo	Antebrazo	Muñeca								
		1		2		3		4		
		Giro de Muñeca		Giro de Muñeca		Giro de Muñeca		Giro de Muñeca		
		1	2	1	2	1	2	1	2	
1	1	1	2	2	2	2	3	3	3	3
	2	2	2	2	2	3	3	3	3	3
	3	2	3	3	3	3	3	4	4	4
2	1	2	3	3	3	3	4	4	4	4
	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4
	3	3	4	4	4	4	4	5	5	5
3	1	3	3	4	4	4	4	5	5	5
	2	3	4	4	4	4	4	5	5	5
	3	4	4	4	4	4	5	5	5	5
4	1	4	4	4	4	4	5	5	5	5
	2	4	4	4	4	4	5	5	5	5
	3	4	4	4	5	5	5	6	6	6
5	1	5	5	5	5	5	6	6	7	7
	2	5	6	6	6	6	7	7	7	7
	3	6	6	6	7	7	7	7	8	8
6	1	7	7	7	7	7	8	8	9	9
	2	8	8	8	8	8	9	9	9	9
	3	9	9	9	9	9	9	9	9	9

Tabla 4.13: Puntuación global para el grupo A (fuente [McAtamney et al., 93]).

4.2.1.1.11 Puntuación global para los miembros del grupo B.

De la misma manera, se obtendrá una puntuación general para el grupo B a partir de la puntuación del cuello, el tronco y las piernas consultando la Tabla 4.14.

Cuello	Tronco											
	1		2		3		4		5		6	
	Piernas		Piernas		Piernas		Piernas		Piernas		Piernas	
	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
1	1	3	2	3	3	4	5	5	6	6	7	7
2	2	3	2	3	4	5	5	6	7	7	7	7
3	3	3	3	4	4	5	5	6	7	7	7	7
4	5	5	5	6	6	7	7	7	7	8	8	8
5	7	7	7	7	7	8	8	8	8	8	8	8
6	8	8	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9

Tabla 4.14: Puntuación global para el grupo B (fuente [McAtamney et al., 93]).

4.2.1.1.12 Puntuación del tipo de actividad muscular desarrollada y la fuerza aplicada

Las puntuaciones globales obtenidas se verán modificadas en función del tipo de actividad muscular desarrollada y de la fuerza aplicada durante la tarea. La puntuación de los grupos A y B se incrementarán en un punto si la actividad es

principalmente estática (la postura analizada se mantiene más de un minuto seguido) o bien si es repetitiva (se repite más de 4 veces cada minuto). Si la tarea es ocasional, poco frecuente y de corta duración, se considerará actividad dinámica y las puntuaciones no se modificarán. Además, para considerar las fuerzas ejercidas o la carga manejada, se añadirá a los valores anteriores la puntuación conveniente según la siguiente tabla:

Puntos	Posición
0	si la carga o fuerza es menor de 2 Kg. y se realiza intermitentemente.
1	si la carga o fuerza está entre 2 y 10 Kg. y se levanta intermitente.
2	si la carga o fuerza está entre 2 y 10 Kg. y es estática o repetitiva.
2	si la carga o fuerza es intermitente y superior a 10 Kg.
3	si la carga o fuerza es superior a los 10 Kg., y es estática o repetitiva.
3	si se producen golpes o fuerzas bruscas o repentinas.

Tabla 4.15: Puntuación para la actividad muscular y las fuerzas ejercida (fuente [McAtamney et al., 93])s.

4.2.1.1.13 Puntuación Final

La puntuación obtenida de sumar a la del grupo A la correspondiente a la actividad muscular y la debida a las fuerzas aplicadas pasará a denominarse puntuación C. De la misma manera, la puntuación obtenida de sumar a la del grupo B la debida a la actividad muscular y las fuerzas aplicadas se denominará puntuación D. A partir de las puntuaciones C y D se obtendrá una puntuación final global para la tarea que oscilará entre 1 y 7, siendo mayor cuanto más elevado sea el riesgo de lesión. La puntuación final se extraerá de la Tabla 4.16.

Puntuación C	Puntuación D						
	1	2	3	4	5	6	7+
1	1	2	3	3	4	5	5
2	2	2	3	4	4	5	5
3	3	3	3	4	4	5	6
4	3	3	3	4	5	6	6
5	4	4	4	5	6	7	7
6	4	4	5	6	6	7	7
7	5	5	6	6	7	7	7
8+	5	5	6	7	7	7	7

Tabla 4.16: Puntuación final (fuente [McAtamney et al., 93]).

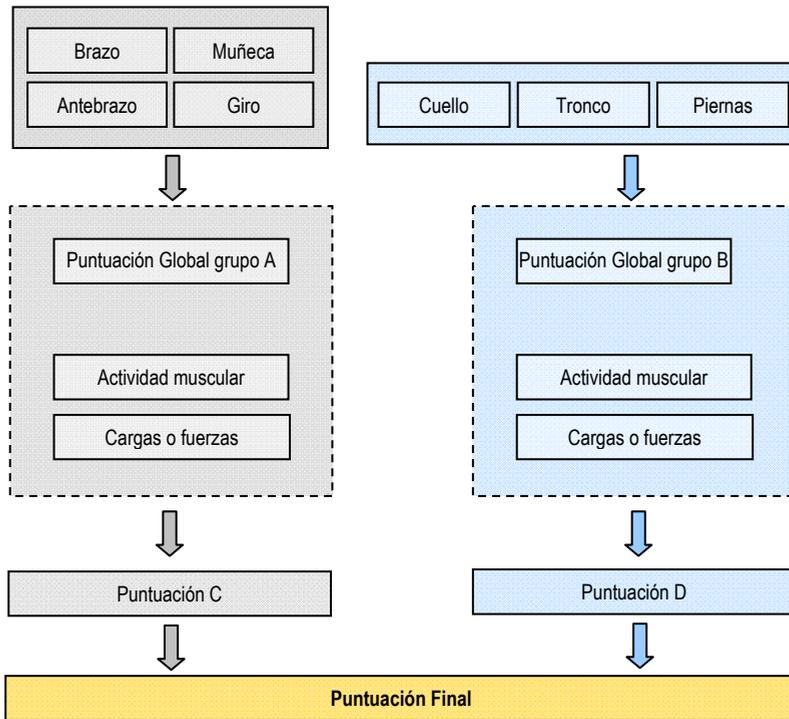


Figura 4.19: Flujo de obtención de puntuaciones en el método RULA.

4.2.1.1.14 Recomendaciones

Por último, conocida la puntuación final, y mediante la Tabla 4.17, se obtendrá el nivel de actuación propuesto por el método RULA. Así el evaluador habrá determinado si la tarea resulta aceptable tal y como se encuentra definida, si es necesario un estudio en profundidad del puesto para determinar con mayor concreción las acciones a realizar, si se debe plantear el rediseño del puesto o si, finalmente, existe la necesidad apremiante de cambios en la realización de la tarea. El evaluador será capaz, por tanto, de detectar posibles problemas ergonómicos y determinar las necesidades de rediseño de la tarea o puesto de trabajo.

En definitiva, el uso del método RULA permite priorizar los trabajos que deberían ser investigados. La puntuación postural, así como las puntuaciones de fuerza y actividad muscular, indicarán al evaluador los aspectos donde pueden encontrarse los problemas ergonómicos del puesto, y por tanto, realizar las convenientes recomendaciones de mejora de éste.

Puntos	Posición
1	Cuando la puntuación final es 1 ó 2 la postura es aceptable.
2	Cuando la puntuación final es 3 ó 4 pueden requerirse cambios en la tarea; es conveniente profundizar en el estudio
3	La puntuación final es 5 ó 6. Se requiere el rediseño de la tarea; es necesario realizar actividades de investigación.
4	La puntuación final es 7. Se requieren cambios urgentes en el puesto o tarea.

Tabla 4.17: Niveles de actuación según la puntuación final obtenida (fuente [McAtamney et al., 93]).

4.2.2 El método OWAS (Ovako Working Analysis System)

El método OWAS [Karhu et al., 77], tal y como afirman sus autores, es un método sencillo destinado al análisis ergonómico de la carga postural. Su aplicación, proporciona buenos resultados, tanto en la mejora de la comodidad de los puestos, como en el aumento de la calidad de la producción, consecuencia ésta última de las mejoras ergonómicas que pueden aplicarse.

El método OWAS es el resultado de un estudio realizado en el sector del acero finlandés con la colaboración de ingenieros, ergónomos y trabajadores. En la actualidad, un gran número de estudios avalan los resultados proporcionados por el método, siendo dichos estudios de ámbitos laborales tan dispares como la construcción [Kivi et al., 91] la industria de procesado de carne de ave [Scott et al., 96], o la ganadería [Perkiö-Mäkelä et al., 05], entre otros.

Por otra parte, las propuestas informáticas para el cálculo de la carga postural, basadas en los fundamentos teóricos del método OWAS original (la primera versión presentada en [Kivi et al., 91]), han favorecido su consolidación como "método de carga postural por excelencia" [Nogareda-Cuixart et al., 06].

4.2.2.1 Aplicación del método

El método OWAS basa sus resultados en la observación de las diferentes posturas adoptadas por el trabajador durante el desarrollo de la tarea, permitiendo identificar hasta 252 posiciones diferentes como resultado de las posibles combinaciones de la posición de la espalda (4 posiciones), brazos (3 posiciones), piernas (7 posiciones) y carga levantada (3 intervalos).

La primera parte del método, de toma de datos o registro de posiciones, puede ser realizada mediante la observación "*in situ*" del trabajador, el análisis de fotografías, o la visualización de videos de la actividad tomados con anterioridad.

Una vez realizada la observación el método codifica las posturas recopiladas. A cada postura le asigna un código identificativo, es decir, establece una relación unívoca entre la postura y su código. El termino "Código de postura" será utilizado en adelante para designar dicha relación.

En función del riesgo o incomodidad que representa una postura para el

trabajador, el método OWAS distingue cuatro Niveles o "Categorías de riesgo" que enumera en orden ascendente, siendo, por tanto, la de valor 1 la de menor riesgo y la de valor 4 la de mayor riesgo. Para cada Categoría de riesgo el método establecerá una propuesta de acción, indicando en cada caso la necesidad o no de rediseño de la postura y su urgencia.

Así pues, realizada la codificación, el método determina la Categoría de riesgo de cada postura, reflejo de la incomodidad que supone para el trabajador. Posteriormente, evalúa el riesgo o incomodidad para cada parte del cuerpo (espalda, brazos y piernas) asignando, en función de la frecuencia relativa de cada posición, una Categoría de riesgo.

Finalmente, el análisis de las Categorías de riesgo calculadas para las posturas observadas y para las distintas partes del cuerpo, permitirá identificar las posturas y posiciones más críticas, así como las acciones correctivas necesarias para mejorar el puesto, definiendo, de esta forma, una guía de actuaciones para el rediseño de la tarea evaluada.

El método OWAS presenta una limitación a señalar. El método permite la identificación de una serie de posiciones básicas de espalda, brazos y piernas, que codifica en cada "Código de postura", sin embargo, no permite el estudio detallado de la gravedad de cada posición. Por ejemplo, el método identifica si el trabajador realiza su tarea con las rodillas flexionadas o no, pero no permite diferenciar entre varios grados de flexión. Dos posturas con idéntica codificación podrían variar en cuanto a grado de flexión de las piernas, y como consecuencia en cuanto a nivel de incomodidad para el trabajador. Por tanto, una vez identificadas las posturas críticas mediante el método OWAS, la aplicación complementaria de métodos de mayor concreción, en cuanto a la clasificación de la gravedad de las diferentes posiciones, podría ayudar al evaluador a profundizar sobre los resultados obtenidos.

El procedimiento de aplicación del método es, en resumen, el siguiente:

- Determinar si la observación de la tarea debe ser dividida en varias fases o etapas, con el fin de facilitar la observación (Evaluación Simple o Multi-fase).
- Establecer el tiempo total de observación de la tarea (entre 20 y 40 minutos).
- Determinar la duración de los intervalos de tiempo en que se dividirá la observación (el método propone intervalos de tiempo entre 30 y 60 segundos.)
- Identificar, durante la observación de la tarea o fase, las diferentes posturas que adopta el trabajador. Para cada postura, determinar la posición de la espalda, los brazos y piernas, así como la carga levantada.
- Codificar las posturas observadas, asignando a cada posición y carga los valores de los dígitos que configuran su "Código de postura" identificativo.
- Calcular para cada "Código de postura", la Categoría de riesgo a la que pertenece, con el fin de identificar aquellas posturas críticas o de mayor nivel de riesgo para el trabajador. El cálculo del porcentaje de posturas catalogadas en

cada categoría de riesgo, puede resultar de gran utilidad para la determinación de dichas posturas críticas.

- Calcular el porcentaje de repeticiones o frecuencia relativa de cada posición de la espalda, brazos y piernas con respecto a las demás²⁸.
- Determinar, en función de la frecuencia relativa de cada postura, la Categoría de riesgo a la que pertenece cada posición de las distintas partes del cuerpo (espalda, brazos y piernas), con el fin de identificar aquellas que presentan una actividad más crítica.
- Determinar, en función de los riesgos calculados, las acciones correctivas y de rediseño necesarias.
- En caso de haber introducido cambios, evaluar de nuevo la tarea con el método OWAS para comprobar la efectividad de la mejora.

4.2.2.1.1 Método de codificación de las posturas observadas.

El método comienza con la recopilación, previa observación, de las diferentes posturas adoptadas por el trabajador durante la realización de la tarea. Cabe destacar que cuanto mayor sea el número de posturas observadas menor será el posible error introducido por el observador (se estima que con 100 observaciones se introduce un error del 10%, mientras que para 400 el posible error queda reducido aproximadamente a la mitad).

El método asigna cuatro dígitos a cada postura observada en función de la posición de la espalda, los brazos, las piernas y de la carga soportada, configurando de este modo su código identificativo o "Código de postura".

Para aquellas observaciones divididas en fases, el método añade un quinto dígito al "Código de postura", dicho dígito determina la fase en la que ha sido observada la postura codificada.

Posición de la Espalda	Posición de los Brazos	Posición de las Piernas	Cargas		Fase
------------------------	------------------------	-------------------------	--------	--	------

Figura 4.20: Esquema de codificación de las posturas observadas (Código de postura).

A continuación se detalla la forma de codificación y clasificación de las posturas propuesta por el método:

4.2.2.1.2 Posiciones de la espalda: Primer dígito del "Código de postura"

El primer miembro a codificar será la espalda. Para establecer el valor del dígito que lo representa se deberá determinar si la posición adoptada por la espalda es derecha, doblada, con giro o doblada con giro. El valor del primer dígito del "Código

²⁸ El método OWAS no permite calcular el riesgo asociado a la frecuencia relativa de las cargas levantadas, sin embargo, su cálculo puede orientar al evaluador sobre la necesidad de realizar un estudio complementario del levantamiento de cargas.

de postura" se obtendrá consultado la tabla que se muestra a continuación (Tabla 4.18).

Posición de espalda		Primer dígito del Código de postura.
<p>Espalda Recta La espalda está alineada con el eje cadera-piernas</p>		1
<p>Espalda inclinada hacia delante/atrás Se refiere a la inclinación hacia delante o hacia atrás. No se establecen distinciones entre los posibles ángulos de inclinación. El método tampoco indica explícitamente a partir de qué ángulo se considera la espalda inclinada, no obstante algunos autores recomiendan clasificar la espalda en este nivel cuando el ángulo de inclinación es igual o superior a 20° [Mattila et al., 99]</p>		2
<p>Espalda girada o inclinada lateralmente La espalda está girada un ángulo de 20° o más, o bien está inclinada hacia los lados un ángulo igual o superior a 20°</p>		3
<p>Espalda inclinada y girada o doblemente inclinada. Combinación de las posiciones 2 y 3. La espalda está girada e inclinada hacia delante/atrás, o bien, inclinada lateralmente y hacia delante/atrás.</p>		4

Tabla 4.18: Codificación de las posiciones de la espalda (Adaptado de fuente [Karhu et al., 77]).

4.2.2.1.3 Posiciones de los brazos: Segundo dígito del "Código de postura.

Seguidamente, será analizada la posición de los brazos. El valor del segundo dígito del "Código de postura" será de 1 si los dos brazos están bajos, 2 si uno está bajo y el otro elevado y finalmente 3 si los dos brazos están elevados, tal y como muestra la siguiente tabla de codificación (Tabla 4.19).

Posición de los brazos		Segundo dígito del Código de postura.
<p>Ambos brazos por debajo del nivel de los hombros. Los brazos del trabajador están completamente por debajo del nivel de los hombros.</p>		1
<p>Un brazo por encima o a nivel del hombro. Un brazo, o parte de este, está por encima o a nivel del hombro.</p>		2

<p>Ambos brazos por encima o a nivel de los hombros. Los dos brazos están totalmente o parcialmente por encima o a nivel de los hombros del trabajador.</p>		<p>3</p>
--	---	----------

Tabla 4.19. Codificación de las posiciones de los brazos (Adaptado de fuente [Karhu et al., 77]).

4.2.2.1.4 Posiciones de las piernas: Tercer dígito del "Código de postura"

Con la codificación de la posición de las piernas, se completarán los tres primeros dígitos del "Código de postura", que identifican a las partes del cuerpo analizadas por el método. La Tabla 4.20 proporciona el valor del dígito asociado a las piernas, considerando como relevantes o básicas 7 posiciones diferentes.

Posición de las piernas		Tercer dígito del Código de postura.
<p>Sentado El peso del cuerpo descansa mayoritariamente sobre las nalgas de la persona. En esta postura las piernas permanecen por debajo de las nalgas.</p>		<p>1</p>
<p>De pie con las dos piernas rectas. El trabajador está de pie repartiendo el peso del cuerpo entre ambas piernas rectas.</p>		<p>2</p>
<p>De pie con el peso sobre una pierna recta. El trabajador apoya el peso del cuerpo sobre una sola pierna que está recta.</p>		<p>3</p>
<p>De pie con las rodillas flexionadas. La persona trabaja de pie o agachada repartiendo el peso del cuerpo sobre las dos rodillas flexionadas. Se considera flexión de piernas cuando el ángulo de las rodillas es igual o inferior a 150° [Mattila et al., 99] Ángulos superiores a 150° se considerarán como piernas rectas. Si el trabajador está en cuclillas también se clasifica en esta categoría.</p>		<p>4</p>
<p>De pie con el peso sobre una pierna con la rodilla flexionada. El trabajador está de pie o agachado y el peso del cuerpo descansa sobre una sola pierna con la rodilla flexionada un ángulo igual o inferior a 150°.</p>		<p>5</p>
<p>De rodillas sobre una o dos piernas. El trabajador está apoyando una o ambas rodillas en el suelo.</p>		<p>6</p>

<p>Caminando La persona está caminando o se está desplazando por el lugar de trabajo. La postura caminando implica un trabajo muscular dinámico, en esto se diferencia del resto de posturas que consideran el OWAS.</p>		<p>7</p>
---	---	----------

Tabla 4.20: Codificación de las posiciones de las piernas (Adaptado de fuente [Karhu et al., 77]).

4.2.2.1.5 Cargas y fuerzas soportadas: Cuarto dígito del "Código de postura"

Finalmente, se deberá determinar a qué rango de cargas, de entre los tres propuestos por el método, pertenece la carga que el trabajador levanta cuando adopta la postura. La consulta de la Tabla 4.21 permitirá al evaluador asignar el cuarto dígito del código en configuración. Finalizando en este punto la parte de codificación de la postura para estudios de una sola tarea (evaluación simple).

Cargas y fuerzas soportadas	Cuarto dígito del Código de postura.
<p>Fuerza o carga menos o igual a 10 Kg. La fuerza que realiza el trabajador o el peso de la carga que manipula en el momento de codificar la postura es inferior o igual a 10kg.</p>	<p>1</p>
<p>Fuerza o carga mayor a 10 Kg. y menos o igual a 20 Kg. La fuerza o carga está entre 10y 20 Kg.</p>	<p>2</p>
<p>Fuerza o carga mayor a 20 Kg. La fuerza o carga es superior a 20 Kg.</p>	<p>3</p>

Tabla 4.21: Codificación de las cargas y fuerzas soportadas (Adaptado de fuente [Karhu et al., 77]).

4.2.2.1.6 Codificación de fase: Quinto dígito del "Código de postura"

El quinto dígito del "Código de postura", identifica la fase en la que se ha observado la postura, por lo tanto, este último valor, sólo tendrá sentido, para aquellas observaciones en la que el evaluador, normalmente por motivos de claridad y simplificación, decide dividir la tarea objeto de estudio en más de una fase, es decir, para evaluaciones de tipo "Multi-fase".

El método original, no establece valores concretos para el dígito de la fase, así pues, será el criterio del evaluador el que determine dichos valores.

Fase	Quinto dígito del Código de postura.	
	Codificación alfanumérica	Codificación numérica
Colocación de azulejos en horizontal	FAH	1
Colocación de azulejos en vertical	FAV	2
Colocación de baldosas en horizontal	FBH	3

Tabla 4.22: Ejemplo de codificación de fases.

Una vez realizada la codificación de todas las posturas recopiladas, se procederá a la fase de clasificación por riesgos.

4.2.2.1.7 Categorías de riesgo

El método, clasifica los diferentes códigos en cuatro niveles o Categorías de riesgo. Cada Categoría de Riesgo, a su vez, determina cuál es el posible efecto, sobre el sistema músculo-esquelético del trabajador, de cada postura recopilada, así como la acción correctiva a considerar en cada caso.

Categoría de Riesgo	Efectos sobre el sistema músculo-esquelético	Acción correctiva
1	Postura normal y natural sin efectos dañinos en el sistema músculo-esquelético.	No requiere acción
2	Postura con posibilidad de causar daño al sistema músculo-esquelético.	Se requieren acciones correctivas en un futuro cercano.
3	Postura con efectos dañinos sobre el sistema músculo-esquelético.	Se requieren acciones correctivas lo antes posible.
4	La carga causada por esta postura tiene efectos sumamente dañinos sobre el sistema músculo-esquelético.	Se requiere tomar acciones correctivas inmediatamente.

Tabla 4.23: Tabla de Categorías de Riesgo²⁹ y Acciones correctivas (Adaptado de fuente [Karhu et al., 77]).

Finalizada la fase de codificación de las posturas y conocidas las posibles categorías de riesgo propuestas por el método, se procederá a la asignación de la Categoría del riesgo correspondiente a cada "Código de postura". La Tabla 4.24 muestra la Categoría de riesgo para cada posible combinación de la posición de la espalda, de los brazos, de las piernas y de la carga levantada.

		Piernas																						
		1			2			3			4			5			6			7				
Espalda	Cargas	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
	1	Brazos 1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1	1	
2		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	1		
3		1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	3	2	2	3	1	1	1	1	1	2		
2	1	2	2	3	2	2	3	2	2	3	3	3	3	3	3	4	3	4	3	3	4	2	3	4
	2	2	2	3	2	2	3	2	2	3	3	3	4	4	3	4	3	3	3	4	2	3	4	4
	3	3	3	4	2	2	3	3	3	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4	4
3	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2	3	3	3	4	4	4	1	1	1	1	1	1	1	1
	2	2	2	3	1	1	1	1	1	2	4	4	4	4	4	4	3	3	3	1	1	1	1	1
	3	2	2	3	1	1	1	2	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1
4	1	2	3	3	2	2	3	2	2	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4	4
	2	3	3	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4	4
	3	4	4	4	2	3	4	3	3	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	2	3	4	4

Tabla 4.24: Tabla de clasificación de las Categorías de Riesgo de los "Códigos de postura" (Adaptado de fuente [Karhu et al., 77]).

²⁹ A cada categoría de riesgo se le ha asignado un código de color con el fin de facilitar su identificación en tablas no porque el método OWAS indique ningún código de color identificativo.

En este punto, y una vez calculada la categoría del riesgo para cada postura, es posible un primer análisis, el tratamiento estadístico de los resultados obtenidos hasta el momento permitirá la interpretación de los valores del riesgo proporcionados por el método.

Sin embargo, el método no se limita a la clasificación de las posturas según el riesgo que representan sobre el sistema músculo-esquelético, también contempla el análisis de las frecuencias relativas de las diferentes posiciones de la espalda, brazos y piernas que han sido observadas y registradas en cada "Código de postura".

Por tanto, se deberá calcular el número de veces que se repite cada posición de espalda, brazos y piernas en relación a las demás durante el tiempo total de la observación, es decir, su frecuencia relativa.

Una vez realizado dicho cálculo y como último paso de la aplicación del método, la consulta de la Tabla 4.25 determinará la Categoría de Riesgo en la que se engloba cada posición.

	ESPALDA										
Espalda derecha	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Espalda doblada	2	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3
Espalda con giro	3	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3
Espalda doblada con giro	4	1	2	2	3	3	3	3	4	4	4
	BRAZOS										
Los dos brazos bajos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Un brazo bajo y el otro elevado	2	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3
Los dos brazos elevados	3	1	1	2	2	2	2	2	3	3	3
	PIERNAS										
Sentado	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	2
De pie	2	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
Sobre pierna recta	3	1	1	1	2	2	2	2	2	3	3
Sobre rodillas flexionadas	4	1	2	2	3	3	3	3	4	4	4
Sobre rodilla flexionada	5	1	2	2	3	3	3	3	4	4	4
Arrodillado	6	1	1	2	2	2	3	3	3	3	3
Andando	7	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2
FRECUENCIA RELATIVA (%)		≤10%	≤20%	≤30%	≤40%	≤50%	≤60%	≤70%	≤80%	≤90%	≤100%

Tabla 4.25: Tabla de clasificación de las Categorías de Riesgo de las posiciones del cuerpo según su frecuencia relativa (Adaptado de fuente [Karhu et al., 77]).

Los valores del riesgo calculados para cada posición permitirán al evaluador identificar aquellas partes del cuerpo que soportan una mayor incomodidad y proponer, finalmente, las acciones correctivas necesarias para el rediseño, en caso de ser necesario, de la tarea evaluada.

Tal y como se ha indicado con anterioridad, el método no contempla el cálculo del riesgo para la carga soportada, sin embargo, puesto que el manejo de cargas queda reflejado en los "Códigos de postura" obtenidos, un análisis porcentual de los rangos de cargas que maneja el trabajador puede alertar al evaluador sobre la necesidad de profundizar en el estudio de cargas aplicando métodos específicos para tal fin como el método NIOSH [Waters et al., 93], la Guía técnica para la manipulación manual de cargas del INSHT [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo], las Tablas de Snook y Ciriello [Snook et al., 91], el método Job Seveity Index [Liles et al., 84], etc...

4.3. Métodos para la evaluación del riesgo derivado de la manipulación manual de cargas.

La manipulación manual de cargas (levantamientos, empujes, arrastres, transportes) se asocia con lesiones músculo-esqueléticas que afectan principalmente a la espalda [Chaffin, 79; Punnett et al., 91; Holmström, 92; Marras et al., 95; Bernard, 97; Xiao et al., 04; Wang et al., 05b; Hangai et al., 08], siendo éste tipo de lesiones las de mayor frecuencia entre las dolencias músculo-esqueléticas [Bernard, 97; Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 05]. Estos datos proporcionan una idea de la importancia de una correcta evaluación de las tareas que implican manipulación de cargas y del adecuado acondicionamiento de los puestos implicados. Diferentes investigaciones han dado lugar a métodos de evaluación ergonómica destinados a servir de herramienta a los ergónomos para la correcta adecuación de los puestos con manipulación de cargas a las capacidades físicas de los trabajadores, de entre los cuales destacan: el método Job Seveity Index [Liles et al., 84], el método NIOSH [Waters et al., 93], las Tablas de Snook y Ciriello [Snook, 78b; Snook et al., 91] o la Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la Manipulación Manual de Cargas INSHT [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo], entre otros.

En el presente apartado se describen los fundamentos y modo de aplicación de los métodos NIOSH (Ecuación revisada de NIOSH) y Las Tablas de Snook y Ciriello, los más difundidos entre los ergónomos.

4.3.1 La ecuación Revisada de NIOSH (National Institute for Occupational Safety and Health).

La ecuación de NIOSH [Waters et al., 93] permite evaluar tareas en las que se realizan levantamientos de carga, ofreciendo como resultado el peso máximo recomendado (*RWL: Recommended Weight Limit*) que es posible levantar en las condiciones del puesto para evitar la aparición de lumbalgias y problemas de espalda. Además, el método proporciona una valoración de la posibilidad de aparición de dichos trastornos dadas las condiciones del levantamiento y el peso levantado. Los resultados intermedios sirven de apoyo al evaluador para determinar los cambios a introducir en el puesto para mejorar las condiciones del levantamiento.

En 1981 el Instituto para la Seguridad Ocupacional y Salud del Departamento de Salud y Servicios Humanos de Estados Unidos publicó una primera versión de la ecuación NIOSH [National Institute for Occupational Safety and Health, 81] posteriormente, en 1991 hizo pública una segunda versión en la que se recogían los nuevos avances en la materia, permitiendo evaluar levantamientos asimétricos, con agarres de la carga no óptimos y con un mayor rango de tiempos y frecuencias de levantamiento. Introdujo además el Índice de Levantamiento (LI), un indicador que permite identificar levantamientos peligrosos [Waters et al., 94].

Básicamente son tres los criterios empleados para definir los componentes de la ecuación: biomecánico, fisiológico y psicofísico. El criterio biomecánico se basa en que al manejar una carga pesada o una carga ligera incorrectamente levantada, aparecen momentos mecánicos que se transmiten por los segmentos corporales hasta las vértebras lumbares dando lugar a un acusado estrés. A través del empleo de modelos biomecánicos, y usando datos recogidos en estudios sobre la resistencia de dichas vértebras, se llegó a considerar un valor de 3,4 kN como fuerza límite de compresión en la vértebra L5/S1 para la aparición de riesgo de lumbalgia. El criterio fisiológico reconoce que las tareas con levantamientos repetitivos pueden fácilmente exceder las capacidades normales de energía del trabajador, provocando una prematura disminución de su resistencia y un aumento de la probabilidad de lesión. El comité NIOSH recogió unos límites de la máxima capacidad aeróbica para el cálculo del gasto energético y los aplicó a su fórmula. La capacidad de levantamiento máximo aeróbico se fijó para aplicar este criterio en 9,5 kcal/min. Por último, el criterio psicofísico se basa en datos sobre la resistencia y la capacidad de los trabajadores que manejan cargas con diferentes frecuencias y duraciones, para considerar combinadamente los efectos biomecánico y fisiológico del levantamiento.

A partir de los criterios expuestos se establecen los componentes de la ecuación de NIOSH. La ecuación parte de definir un "levantamiento ideal", que sería aquél realizado desde lo que NIOSH define como "localización estándar de levantamiento" y bajo condiciones óptimas; es decir, en posición sagital (sin giros de torso ni posturas asimétricas), haciendo un levantamiento ocasional, con un buen asimiento de la carga y levantándola menos de 25 cm. En estas condiciones, el peso máximo recomendado es de 23 Kg. Este valor, denominado Constante de Carga (LC) se basa en los criterios psicofísico y biomecánico, y es el que podría ser levantado sin problemas en esas condiciones por el 75% de las mujeres y el 90% de los hombres. Es decir, el peso límite recomendado (RWL) para un levantamiento ideal es de 23 Kg. Otros estudio consideran que la Constante de Carga puede tomar valores mayores (por ejemplo 25 Kg.) [Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, 97].

La ecuación de NIOSH calcula el peso límite recomendado mediante la siguiente fórmula:

$$RWL = LC * HM * VM * DM * AM * FM * CM$$

en la que LC es la constante de carga y el resto de los términos del segundo miembro de la ecuación son factores multiplicadores que toman el valor 1 en el caso

de tratarse de un levantamiento en condiciones óptimas, y valores más cercanos a 0 cuanto mayor sea la desviación de las condiciones del levantamiento respecto de las ideales. Así pues, RWL toma el valor de LC (23 Kg.) en caso de un levantamiento óptimo, y valores menores conforme empeora la forma de llevar a cabo el levantamiento.

4.3.1.1 Localización Estándar de Levantamiento

La posición mostrada en la Figura 4.21 es la posición considerada óptima para llevar a cabo el izado de la carga; cualquier desviación respecto a esta referencia implica un alejamiento de las condiciones ideales de levantamiento. Esta postura estándar se da cuando la distancia (proyectada en un plano horizontal) entre el punto agarre y el punto medio entre los tobillos es de 25 cm. y la vertical desde el punto de agarre hasta el suelo de 75 cm. (en la aplicación del método todas las medidas deben ser expresadas en centímetros).



Figura 4.21: Posición estándar de levantamiento.

La distancia vertical del agarre de la carga al suelo es de 75 cm. (V). La distancia horizontal del agarre al punto medio entre los tobillos es de 25 cm. (H).

4.3.1.2 Limitaciones del método

Como en la aplicación de cualquier método de evaluación ergonómica, para emplear la ecuación de NIOSH deben cumplirse una serie de condiciones en la tarea a evaluar. En caso de no cumplirse dichas condiciones será necesario un análisis de la tarea por otros medios. Para que una tarea pueda ser evaluada convenientemente con la ecuación de NIOSH ésta debe cumplir que:

- Las tareas de manejo de cargas que habitualmente acompañan al levantamiento (mantener la carga, empujar, estirar, transportar, subir,

caminar...) no supongan un gasto significativo de energía respecto al propio levantamiento. En general no deben suponer más de un 10% de la actividad desarrollada por el trabajador. La ecuación será aplicable si estas actividades se limitan a caminar unos pasos, o un ligero mantenimiento o transporte de la carga [Garg et al., 78].

- No debe haber posibilidad de caídas o incrementos bruscos de la carga.
- El ambiente térmico debe ser adecuado, con un rango de temperaturas de entre 19° y 26° y una humedad relativa entre el 35% y el 50% [National Institute for Occupational Safety and Health, 81].
- La carga no sea inestable, no se levante con una sola mano, en posición sentado o arrodillado, ni en espacios reducidos.
- El coeficiente de rozamiento entre el suelo y las suelas del calzado del trabajador debe ser suficiente para impedir deslizamiento y caídas, debiendo estar entre 0.4 y 0.5.
- No se emplean carretillas o elevadores
- El riesgo del levantamiento y descenso de la carga es similar.
- El levantamiento no es excesivamente rápido, no debiendo superar los 76 centímetros por segundo.

4.3.1.3 Aplicación del método

La aplicación del método [Waters et al., 94] comienza con la observación de la actividad desarrollada por el trabajador y la determinación de cada una de las tareas realizadas. A partir de dicha observación deberá determinarse si el puesto será analizado como tarea simple o multitarea.

Se escogerá un análisis multitarea cuando las variables a considerar en los diferentes levantamientos varíen significativamente. Por ejemplo, si la carga debe ser recogida desde diferentes alturas o el peso de la carga varía de unos levantamientos a otros se dividirá la actividad en una tarea para cada tipo de levantamiento y se efectuará un análisis multitarea. El análisis multitarea requiere recoger información de cada una de las tareas, llevando a cabo la aplicación de la ecuación de NIOSH para cada una de ellas y calculando, posteriormente, el Índice de Levantamiento Compuesto. En caso de que los levantamientos no varíen significativamente de unos a otros se llevará a cabo un análisis simple.

En segundo lugar, para cada una de las tareas determinadas, se establecerá si existe control significativo de la carga en el destino del levantamiento. Habitualmente la parte más problemática de un levantamiento es el inicio, pues es en éste donde mayores esfuerzos se efectúan. Por ello las mediciones se realizan habitualmente en el origen del movimiento, y a partir de ellas se obtiene el límite de peso recomendado. Sin embargo, en determinadas tareas, puede ocurrir que el gesto de dejar la carga provoque esfuerzos equiparables o superiores a levantarla. Esto suele suceder cuando la carga debe ser depositada con exactitud, debe mantenerse

suspendida durante algún tiempo antes de colocarla, o el lugar de colocación tiene dificultades de acceso. Cuando esto ocurre se indica que el levantamiento requiere control significativo de la carga en el destino. En estos casos se deben evaluar ambos gestos, el inicio y el final del levantamiento, aplicando dos veces la ecuación de NIOSH seleccionando como peso máximo recomendado (RWL) el más desfavorable de los dos (el menor), y como índice de carga (LI) el mayor. Por ejemplo, tomar cajas de una mesa transportadora y colocarlas ordenadamente en el estante superior de una estantería puede requerir un control significativo de la carga en el destino, dado que las cajas deben colocarse de una manera determinada y el acceso puede ser difícil por elevado.

Una vez determinadas las tareas a analizar se debe realizar la toma de los datos pertinentes para cada tarea. Estos datos deben recogerse en el origen del levantamiento, y si existe control significativo de la carga en el destino, también en el final del movimiento. Los datos a recoger son:

- El peso del objeto manipulado en kilogramos incluido su posible contenedor.
- Las distancias horizontal (H) y vertical (V) existente entre el punto de agarre y la proyección sobre el suelo del punto medio de la línea que une los tobillos (Tabla 4.20). V debe medirse tanto en el origen del levantamiento como en el destino del mismo independientemente de que exista o no control significativo de la carga.
- La Frecuencia de los levantamientos (F) en cada tarea. Se debe determinar el número de veces por minuto que el trabajador levanta la carga en cada tarea. Para ello se observará al trabajador durante 15 minutos de desempeño de la tarea obteniendo el número medio de levantamientos por minuto. Si existen diferencias superiores a dos levantamientos por minuto en la misma tarea entre diferentes sesiones de trabajo debería considerarse la división en tareas diferentes.
- La Duración del Levantamiento y los Tiempos de Recuperación. Se debe establecer el tiempo total empleado en los levantamientos y el tiempo de recuperación tras un periodo de levantamiento. Se considera que el tiempo de recuperación es un periodo en el que se realiza una actividad ligera diferente al propio levantamiento. Ejemplos de actividades de este estilo son permanecer sentado frente a un ordenador, operaciones de monitoreo, operaciones de ensamblaje, etc.
- El Tipo de Agarre clasificado como Bueno, Regular o Malo (Tabla 4.57).
- El Ángulo de Asimetría (A) formado por el plano sagital del trabajador y el centro de gravedad de la carga (Figura 4.22). El ángulo de asimetría es un indicador de la torsión del tronco del trabajador durante el levantamiento, tanto en el origen como en el destino del levantamiento.

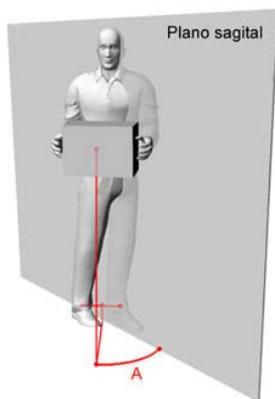


Figura 4.22: Medición del Ángulo de Asimetría.

Realizada la toma de datos se procederá a calcular los factores multiplicadores de la ecuación de NIOSH (*HM*, *VM*, *DM*, *AM*, *FM* y *CM*). El procedimiento de cálculo de cada factor se expondrá en apartados posteriores. Conocidos los factores se obtendrá el valor del Peso Máximo Recomendado (*RWL*, *Recommended Weight Limit*) para cada tarea mediante la aplicación de la ecuación de NIOSH:

$$RWL = HM * VM * DM * AM * FM * CM$$

donde:

RWL es el Peso Máximo Recomendado.

HM es el multiplicador horizontal.

VM es el multiplicador vertical.

DM es el multiplicador de distancia.

AM es el multiplicador de asimetría.

FM es el multiplicador de frecuencia.

CM es el multiplicador de agarre.

En el caso de tareas con control significativo de la carga en el destino se calculará un *RWL* para el origen del desplazamiento y otro para el destino. Se considerará que el *RWL* de dicho tipo de tareas será el más desfavorable de los dos, es decir, el más pequeño. El *RWL* de cada tarea es el peso máximo que es recomendable manipular en las condiciones del levantamiento analizado. Si el *RWL* es mayor o igual al peso levantado se considera que la tarea puede ser desarrollada por la mayor parte de los trabajadores sin problemas. Si el *RWL* es menor que el peso realmente levantado existe riesgo de lumbalgias y lesiones.

Conocido el *RWL* se calcula el Índice de levantamiento (*LI*). Es necesario distinguir la forma en la que se calcula *LI* en función de si se trata de una única tarea o si el análisis es multitarea:

4.3.1.3.1 Cálculo de *LI* en análisis monotarea

El Índice de Levantamiento se calcula como el cociente entre el peso de la carga levantada y el límite de peso recomendado calculado para la tarea.

$$LI = \frac{PC}{RWL}$$

donde:

LI es el índice de levantamiento.

PC es el peso de la carga.

RWL es el Peso Máximo Recomendado.

4.3.1.3.2 Cálculo de LI en análisis multitarea

Una simple media de los distintos índices de levantamiento de las diversas tareas daría lugar a una compensación de efectos que no valoraría el riesgo real. Por otra parte, la selección del mayor índice para valorar globalmente la actividad no tendría en cuenta el incremento de riesgo que aportan el resto de las tareas. NIOSH recomienda el cálculo de un índice de levantamiento compuesto (IL_c), cuya fórmula es la siguiente:

$$IL_c = ILT_1 * \sum_{i=2}^n \Delta ILT_i$$

en la que el sumatorio del segundo miembro de la ecuación se calcula de la siguiente manera:

$$\sum_{i=2}^n \Delta ILT_i = (ILT_2(F_1 + F_2) - ILT_2(F_1)) + (ILT_3(F_1 + F_2 + F_3) - ILT_3(F_1 + F_2)) + \dots \\ \dots + (ILT_n(F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_n) - (ILT_n(F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_{(n-1)})))$$

donde:

ILT_1 es el mayor índice de levantamiento obtenido de entre todas las tareas simples.

$ILT_i(F_j)$ es el índice de levantamiento de la tarea i, calculado a la frecuencia de la tarea j.

$ILT_i(F_j + F_k)$ es el índice de levantamiento de la tarea i, calculado a la frecuencia de la tarea j, más la frecuencia de la tarea k.

El proceso de cálculo es el siguiente:

1. Cálculo de los índices de levantamiento de las tareas simples (ILT_j).
2. Ordenación de mayor a menor de los índices simples ($ILT_1, ILT_2, ILT_3, \dots, ILT_n$).
3. Cálculo del acumulado de incrementos de riesgo asociados a las diferentes tareas simples. Este incremento es la diferencia entre el riesgo de la tarea simple a la frecuencia de todas las tareas simples consideradas hasta el momento incluida la actual, y el riesgo de la tarea simple a la frecuencia de todas las tareas consideradas hasta el momento, menos la actual $ILT_i(F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_i) - ILT_i(F_1 + F_2 + F_3 + \dots + F_{(i-1)})$.

Aunque es recomendable realizar el cálculo del índice de levantamiento compuesto mediante la ecuación de riesgo acumulado, otros autores consideran la posibilidad de calcular el IL_c de tres formas más:

- **Suma de riesgos:** suma los índices de cada tarea.
- **Riesgo promedio:** calcula el valor medio de los índices de levantamiento de cada tarea.
- **Mayor riesgo:** el IL_c es igual al mayor de los índices de levantamiento simple.

Finalmente, conocido el valor del Índice de Levantamiento puede valorarse el riesgo que entraña la tarea para el trabajador. NIOSH considera tres intervalos de riesgo:

- Si LI es menor o igual a 1 la tarea puede ser realizada por la mayor parte de los trabajadores sin ocasionarles problemas.
- Si LI está entre 1 y 3 la tarea puede ocasionar problemas a algunos trabajadores. Conviene estudiar el puesto de trabajo y realizar las modificaciones pertinentes.
- Si LI es mayor o igual a 3 la tarea ocasionará problemas a la mayor parte de los trabajadores. Debe modificarse.

El procedimiento de aplicación del método es, en resumen, el siguiente:

- Observar al trabajador durante un periodo de tiempo suficientemente largo.
- Determinar si se cumplen las condiciones de aplicabilidad de la ecuación de NIOSH.
- Determinar las tareas que se evaluarán y si se realizará un análisis monotarea o multitarea.
- Para cada una de las tareas, establecer si existe control significativo de la carga en el destino del levantamiento
- Tomar los datos pertinentes para cada tarea
- Calcular los factores multiplicadores de la ecuación de NIOSH para cada tarea en el origen y, si es necesario, en el destino del levantamiento.
- Obtener el valor del Peso Máximo Recomendado (RWL) para cada tarea mediante la aplicación de la ecuación de NIOSH.
- Calcular el Índice de Levantamiento o el Índice de Levantamiento Compuesto en función de si se trata de una única tarea o si el análisis es multitarea y determinar las existencias de riesgos.
- Revisar los valores de los factores multiplicadores para determinar dónde es necesario aplicar correcciones.
- Rediseñar el puesto o introducir cambios para disminuir el riesgo si es

necesario.

- En caso de haber introducido cambios, evaluar de nuevo la tarea con la ecuación de NIOSH para comprobar la efectividad de la mejora.

A continuación se muestra la forma de calcular los diferentes factores multiplicadores de la ecuación de NIOSH.

4.3.1.3.3 Factor de distancia horizontal (HM, *Horizontal multiplier*)

Penaliza los levantamientos en los que la carga se levanta alejada del cuerpo. Para calcularlo se emplea la siguiente fórmula:

$$HM = \frac{25}{H}$$

Donde H es la distancia proyectada en un plano horizontal, entre el punto medio entre los agarres de la carga y el punto medio entre los tobillos (Figura 4.21). Se tendrá en cuenta que:

$$Si H < 25 \text{ cm.} \Rightarrow HM = 1$$

$$Si H > 63 \text{ cm.} \Rightarrow HM = 0$$

Una forma alternativa a la medición directa para obtener H es estimarla a partir de la altura de las manos medida desde el suelo (V) y de la anchura de la carga en el plano sagital del trabajador (w). Para ello se considera:

$$Si V = 25 \text{ cm.} \Rightarrow H = 20 + w/2$$

$$Si V < 25 \text{ cm.} \Rightarrow H = 25 + w/2$$

Si existe control significativo de la carga en el destino HM deberá calcularse con el valor de H en el origen y con el valor de H en el destino.

4.3.1.3.4 Factor de distancia vertical (VM, *Vertical multiplier*)

Penaliza levantamientos con origen o destino en posiciones muy bajas o muy elevadas. Se calcula empleando la siguiente fórmula:

$$VM = 1 - 0,003 * |V - 75|$$

en la que V es la distancia entre el punto medio entre los agarres de la carga y el suelo medida verticalmente (Figura 4.21). Es fácil comprobar que en la posición estándar de levantamiento el factor de altura vale 1, puesto que V toma el valor de 75. VM decrece conforme la altura del origen del levantamiento se aleja de 75 cm. Se tendrá en cuenta que:

$$Si V > 175 \text{ cm.} \Rightarrow VM = 0$$

4.3.1.3.5 Factor de distancia vertical (DM, *Distance multiplier*)

Penaliza los levantamientos en los que el recorrido vertical de la carga es grande. Para su cálculo se empleará la fórmula:

$$DM = 0,82 + \frac{4,5}{D}$$

donde D es la diferencia, tomada en valor absoluto, entre la altura de la carga al inicio del levantamiento (V en el origen) y al final del levantamiento (V en el destino). Así pues DM decrece gradualmente cuando aumenta el desnivel del levantamiento.

$$D = |V_o - V_d|$$

Se tendrá en cuenta que:

$$\text{Si } D < 25 \text{ cm.} \Rightarrow DM = 1$$

$$D < 175 \text{ cm.}$$

4.3.1.3.6 Factor de asimetría (AM, *Asymmetry multiplier*)

Penaliza los levantamientos que requieran torsión del tronco. Si en el levantamiento la carga empieza o termina su movimiento fuera del plano sagital del trabajador se tratará de un levantamiento asimétrico. En general los levantamientos asimétricos deben ser evitados. Para calcular el factor de asimetría se empleará la siguiente fórmula:

$$AM = 1 - (0,032 * A)$$

donde A es ángulo de giro (en grados sexagesimales) que debe medirse como se muestra en la Figura 4.21. AM toma el valor 1 cuando no existe asimetría, y su valor decrece conforme aumenta el ángulo de asimetría. Se considerará que:

$$\text{Si } A > 135^\circ \Rightarrow AM = 0$$

Si existe control significativo de la carga en el destino AM deberá calcularse con el valor de A en el origen y con el valor de A en el destino.

4.3.1.3.7 Factor de frecuencia (FM, *Frequency multiplier*)

Penaliza elevaciones realizadas con mucha frecuencia, durante periodos prolongados o sin tiempo de recuperación. El factor de frecuencia puede calcularse a partir de la Tabla 4.26 a partir de la duración del trabajo, y de la frecuencia y distancia vertical del levantamiento. Como ya se ha indicado la frecuencia de levantamiento se mide en elevaciones por minuto y se determinara observando al trabajador un periodo de 15 minutos. Para calcular la duración del trabajo solicitada en la Tabla 4.26 deberá emplearse la Tabla 4.27.

FRECUENCIA elev/min	DURACIÓN DEL TRABAJO					
	Corta		Moderada		Larga	
	V<75	V>75	V<75	V>75	V<75	V>75
0,2	1,00	1,00	0,95	0,95	0,85	0,85
0,5	0,97	0,97	0,92	0,92	0,81	0,81
1	0,94	0,94	0,88	0,88	0,75	0,75
2	0,91	0,91	0,84	0,84	0,65	0,65
3	0,88	0,88	0,79	0,79	0,55	0,55
4	0,84	0,84	0,72	0,72	0,45	0,45
5	0,80	0,80	0,60	0,60	0,35	0,35
6	0,75	0,75	0,50	0,50	0,27	0,27
7	0,70	0,70	0,42	0,42	0,22	0,22
8	0,60	0,60	0,35	0,35	0,18	0,18
9	0,52	0,52	0,30	0,30	0,00	0,15
10	0,45	0,45	0,26	0,26	0,00	0,13
11	0,41	0,41	0,00	0,23	0,00	0,00
12	0,37	0,37	0,00	0,21	0,00	0,00
13	0,00	0,34	0,00	0,00	0,00	0,00
14	0,00	0,31	0,00	0,00	0,00	0,00
15	0,00	0,28	0,00	0,00	0,00	0,00
>15	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Tabla 4.26: Cálculo del Factor de Frecuencia

La duración de la tarea se obtiene de la siguiente tabla:

Tiempo	Duración	Tiempo de recuperación
<=1 hora	Corta	al menos 1'2 veces el tiempo de trabajo
>1- 2 horas	Moderada	al menos 0'3 veces el tiempo de trabajo
>2 - 8 horas	Larga	

Tabla 4.27: Cálculo de la duración de la tarea

Para considerar 'Corta' una tarea debe durar 1 hora como máximo y estar seguida de un tiempo de recuperación de al menos 1,2 veces el tiempo de trabajo. En caso de no cumplirse esta condición, se considerará de duración 'Moderada'. Para considerar 'Moderada' una tarea debe durar entre 1 y 2 horas y estar seguida de un tiempo de recuperación de al menos 0,3 veces el tiempo de trabajo. En caso de no cumplirse esta condición, se considerará de duración 'Larga'.

4.3.1.3.8 Factor de agarre (CM, *Coupling multiplier*)

Este factor penaliza elevaciones en las que el agarre de la carga es deficiente. El factor de agarre puede obtenerse en la Tabla 4.28 a partir del tipo y de la altura del agarre. Para decidir el tipo de agarre puede emplearse el árbol de decisión presentado en la Figura 4.23.

TIPO DE AGARRE	(CM) FACTOR DE AGARRE	
	v < 75	v ≥ 75
Bueno	1.00	1.00
Regular	0.95	1.00
Malo	0.90	0.90

Tabla 4.28: Cálculo del factor de agarre.

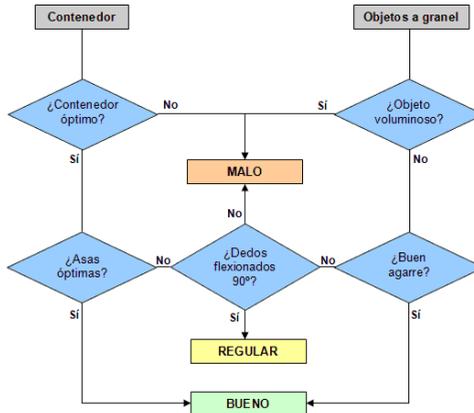


Figura 4.23: Árbol de Decisión para la determinación del tipo de agarre (Adaptado de [Waters et al., 94]).

Se consideran agarres buenos los llevados a cabo con contenedores de diseño óptimo con asas o agarraderas, o aquellos sobre objetos sin contenedor que permitan un buen asimiento y en el que las manos pueden ser bien acomodadas alrededor del objeto.

Un agarre regular es el llevado a cabo sobre contenedores con asas a agarraderas no óptimas por ser de tamaño inadecuado, o el realizado sujetando el objeto flexionando los dedos 90°.

Se considera agarre pobre el realizado sobre contenedores mal diseñados, objetos voluminosos a granel, irregulares o con aristas y los realizados sin flexionar los dedos manteniendo el objeto presionando sobre sus laterales.

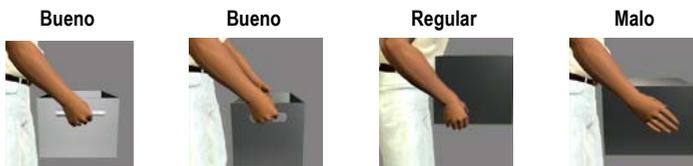


Figura 4.24: Ejemplos de tipo de agarre.

4.3.2 Las tablas de Snook y Ciriello

La investigación realizada por [Snook, 78b] en el seno de la compañía aseguradora Liberty Mutual sobre manipulación manual de cargas, dio lugar en 1978 a la publicación de un conjunto de tablas con los pesos máximos aceptables para diferentes acciones como el levantamiento, el descenso, el empuje, el arrastre y el transporte de cargas, diferenciados por géneros. Posteriormente, a raíz de nuevos experimentos, los mismos autores [Snook et al., 91] publicaron la revisión de dichas tablas cuyos valores son ampliamente utilizados en la actualidad.

Los cuatro experimentos realizados para la elaboración y revisión de las tablas evaluaron las capacidades de hombres y mujeres en el ámbito industrial. En cada experimento se utilizó una metodología psicofísica con medidas del consumo de oxígeno, ritmo cardiaco y características antropométricas. Además se consideraron como variables independientes la frecuencia de la tarea, la distancia, la altura, la duración, el tamaño del objeto y sus agarres, los alcances horizontales y la combinación de tareas. Finalmente, los resultados de estos cuatro experimentos fueron integrados con los resultados de siete experimentos similares publicados con anterioridad.

El peso máximo aceptable corresponde al mayor peso que una persona puede levantar a una frecuencia dada y durante determinado tiempo, sin llegar a estresarse o a cansarse excesivamente. Los pesos máximos aceptados son determinados para cuatro percentiles (10, 25, 50, 75 y 90), que indican los pesos máximos permitidos para al 10, 25, 50, 75 y 90 % de la población masculina o femenina.

El objetivo de las tablas es proporcionar directrices para la evaluación y el diseño de tareas con manipulación manual de cargas sensibles a las limitaciones y capacidades de los trabajadores, y de este modo, contribuir a la reducción de las lesiones de tipo lumbar [Snook, 87].

Otras investigaciones de la aseguradora Liberty Mutual (Liberty Mutual Research Center) sobre manipulación manual de cargas bajo un enfoque psicofísico, pueden consultarse en [Snook et al., 67; Snook et al., 70; Snook, 71; Snook et al., 74; Snook, 78a; Ciriello et al., 83].

La aplicación del método es muy sencilla. Consiste en la consulta de la tabla correspondiente a la acción de manipulación manual de cargas que se desea evaluar. Las tablas se encuentran publicadas en [Snook et al., 91]. Debido al gran número de tablas publicadas en el estudio, en el presente apartado no han sido incluidas y únicamente se describe el método de consulta.

El método incluye tablas con los pesos máximos aceptables para:

1. el levantamiento para hombres.
2. el levantamiento para mujeres.
3. la descarga para hombres.
4. la descarga para mujeres.

5. el arrastre para hombres.
6. el arrastre para mujeres.
7. el empuje para hombres.
8. el empuje para mujeres.
9. el transporte para hombres/mujeres (en este caso la misma tabla contiene los valores para hombres y mujeres)

Cabe señalar una dificultad en la aplicación del método, las entradas para la consulta de las tablas no contemplan todas las situaciones posibles de la acción. Así pues, será el evaluador el que seleccione aquellas entradas que más se aproximen a su situación concreta. Se recomienda que ante diferentes alternativas de aproximación se seleccione la más restrictiva en peso, es decir, aquella con un resultado del peso máximo aceptable menor.

Para la consulta de las tablas de **elevación** y **descarga** son necesarios los siguientes datos:

Sexo del trabajador: Hombre, Mujer.
Anchura de la carga: 75 cm., 49 cm., 34 cm.
Distancia vertical: diferencia entre la altura inicial de la carga y la final medida en cm. Las entradas tabuladas son 25 cm., 51 cm., 76 cm.
Percentil: 10, 25, 50, 75, 90.
Zona de manipulación de la carga: <ul style="list-style-type: none"> ● Desde el nivel del suelo a la altura de los nudillos. ● Desde la altura de los nudillos a la altura del los hombros. ● Desde la altura de los hombros hasta el alcance vertical de los brazos.
Frecuencia: <ul style="list-style-type: none"> ● una acción cada 5, 9 o 14 segundos. ● una acción cada 1, 2, 5, 30 minutos. ● una acción cada 8 horas.

Tabla 4.29: Datos necesarios para la consulta de las tablas de elevación y descarga de [Snook et al., 91].

Para la consulta de las tablas de empuje y arrastre son necesarios los siguientes datos:

En estas tablas los valores de frecuencia tabulados varían según la distancia recorrida. La anchura de la carga no se consideró puesto que los experimentos realizados indicaron que en este tipo de acciones dicha característica no influía significativamente en el peso máximo aceptable.

Sexo del trabajador: Hombre, Mujer.
Altura de manejo de la carga: 144 cm., 95cm., 64 cm.
Percentil: 10, 25, 50, 75, 90.
Distancia recorrida y frecuencia:
<ul style="list-style-type: none"> ● 2.1 m.: Frecuencia: una acción cada: 6,12 segundos; 1, 2, 5, 30 minutos; 8 horas. ● 7.6 m.: Frecuencia: una acción cada: 15, 22 segundos; 1, 2, 5,30 minutos; 8 horas. ● 15.2 m.: Frecuencia: una acción cada 25, 35 segundos; 1, 2, 5, 30 minutos; 8 horas. ● 30.5 m.: Frecuencia: una acción cada 1, 2, 5, 30 minutos; 8 horas. ● 45.7 m.: Frecuencia: una acción cada 1, 2, 5, 30 minutos; 8 horas. ● 61 m.: Frecuencia: una acción cada 2, 5, 30 minutos; 8 horas.
Tipo de fuerza: sólo impulso inicial o sostenida.

Tabla 4.30: Datos necesarios para la consulta de las tablas de empuje y arrastre de [Snook et al., 91].

Para la consulta de la tabla de transporte son necesarios los siguientes datos:

Sexo del trabajador: Hombre, Mujer.
Altura de manejo de la carga: Hombres:111 cm., 79 cm., 64 cm. ; Mujeres: 105 cm., 72 cm.
Percentil: 10, 25, 50, 75, 90.
Distancia recorrida:
<ul style="list-style-type: none"> ● 2.1 m.: Frecuencias: una acción cada: 6,12 segundos; 1, 2, 5,30 minutos; 8 horas. ● 4.3 m.: Frecuencias: una acción cada: 10,16 segundos; 1, 2, 5,30 minutos; 8 horas. ● 8.5 m.: Frecuencias: una acción cada: 18, 24 segundos; 1, 2, 5,30 minutos; 8 horas.

Tabla 4.31: Datos necesarios para la consulta de la tabla de transporte de [Snook et al., 91].

Los pesos máximos tabulados deberán corregirse en los siguientes casos:

Si la carga no tiene asas el peso máximo aceptable debería reducirse un 15%.
Si la carga se maneja alejada del cuerpo: el peso máximo aceptable debería reducirse un 50%.

Tabla 4.32: Casos de corrección de los pesos tabulados en [Snook et al., 91].

4.3.2.1 Observaciones al método

Existen una serie de observaciones que es necesario tener en consideración a la hora de utilizar el método:

- Los pesos máximos aceptables de todas las tablas corresponden a la manipulación de cajas con asas y cerca del cuerpo.
- Algunos de los pesos máximos aceptables no se han obtenido de forma experimental sino a partir de ajustes. Por ejemplo, en las tablas tanto de hombres como de mujeres para la descarga, los pesos máximos aceptables para cargas con una anchuras de 49 cm. y 75 cm no se han obtenido de forma experimental, sino que están basados en ajustes desarrollados para las tareas de levantamiento.
- Algunos de los pesos máximos tabulados como aceptables exceden el criterio fisiológico recomendado [National Institute for Occupational Safety and Health, 81] cuando se realizan de forma continuada durante 8 horas o más. En dichas circunstancias se establece un límite recomendado de 1000 ml/min. de consumo de oxígeno para hombres y 700 ml/min. para mujeres. En las tablas revisadas [Snook et al., 91] los valores que exceden dichos límites se muestran en cursiva.
- Los valores de las tablas corresponden a tareas de manipulación manual de cargas simples. Los autores recomiendan analizar cada componente de la tarea múltiple de forma individual utilizando la frecuencia de la tarea combinada. El peso del componente con menor porcentaje de población se tomará como el peso máximo aceptable para la tarea compuesta. Sin embargo cabe remarcar que el coste fisiológico de tareas compuestas será mayor que el coste para los componentes individuales, y puede ocurrir que la tarea compuesta exceda los límites fisiológicos recomendados para periodos largos indicados en el párrafo anterior.

Si el peso de la carga manipulada excede el peso tabulado en [Snook et al., 91] será necesario llevar a cabo el rediseño del puesto, reduciéndose el peso de la carga o mejorando las condiciones de levantamiento, al encontrarse el trabajador en una situación de exposición a un nivel de riesgo inaceptable. El rediseño deberá situar la carga y las condiciones dentro de los límites indicados por [Snook et al., 91] de modo que se establezcan unas condiciones de trabajo que prevengan al trabajador de posibles TME.

4.4. Métodos de evaluación ergonómica para el análisis de la repetitividad

La repetitividad de movimientos es un importante factor de riesgo que puede derivar en lesiones músculo-esqueléticas en el cuello, los hombros [Ohlsson et al., 94], el codo, por ejemplo provocando *epicondilitis* [Shir et al., 06], en la mano/muñeca ocasionando *tendinitis* [Amano et al., 88; Byström et al., 95; Latko et

al., 99] o causando el *síndrome del túnel carpiano* [Silverstein et al., 87; Chiang et al., 90; Osorio et al., 94; Liss et al., 95; Latko et al., 99; Bonfiglioli et al., 07] e incluso, aunque en menor proporción, provocando dolencias músculo-esqueléticas en la espalda [Xiao et al., 04]. Dadas las repercusiones negativas de dicho factor de riesgo y la gran cantidad de trabajadores que se exponen a él, al tratarse de un riesgo generalmente presente en el trabajo en cadena o en el manejo de máquinas que requieren la manipulación repetitiva a alta frecuencia [Asociación Española de Normalización y Certificación, 07], se han desarrollado numerosos métodos de evaluación ergonómica que permiten determinar el nivel de riesgo al que se expone el trabajador al exponer a la repetitividad de movimientos. Cabe señalar que si bien existen métodos como el JSI (*Job Strain Index*) [Moore et al., 95], el método OCRA [Colombini et al., 02] o el Sue Rodgers [Rodgers, 86b; Rodgers, 92], especialmente orientados a analizar dicho factor de riesgo, existen otros métodos que, si bien están especializados en la evaluación de otros factores de riesgo, como la carga postural, el levantamiento de cargas o el estudio general de las condiciones de trabajo, también incluyen en su análisis la repetitividad. Es el caso del método RULA [McAtamney et al., 93], NIOSH [Waters et al., 93], REBA [Hignett et al., 00], Tablas de Snook y Ciriello [Snook et al., 91], LEST [Guelaud et al., 77], RENUR o RENAUL [Regie Nationale Des Usines Renault (Boulogne-Billancourt) Conditions De Travail (Service), 76], o EWA (*Ergonomic Workplace Analysis*) [Ahonen et al., 89].

En el presente apartado se describen con detalle tres métodos habitualmente utilizados por los ergonomistas en la evaluación de la repetitividad, el método JSI (*Job Strain Index*) [Moore et al., 95] para la evaluación de los riesgos debidos a movimientos repetitivos en las manos/muñeca, el método Check List OCRA [Colombini et al., 02] que se centra en la repercusión de la repetitividad en los miembros superiores del cuerpo y, por último, el método Sue Rodgers [Rodgers, 86b; Rodgers, 92] que permite evaluar la fatiga muscular a partir de la interacción entre el nivel de esfuerzo, la duración del esfuerzo y la frecuencia de activación de los músculos por minuto para cada grupo muscular.

4.4.1 El método JSI (*Job Strain Index*)

El JSI (*Job Strain Index*) [Moore et al., 95] es un método de evaluación de puestos de trabajo que permite valorar si los trabajadores que los ocupan están expuestos a desarrollar desórdenes traumáticos acumulativos en la parte distal de las extremidades superiores debido a movimientos repetitivos. Así pues, se implican en la valoración la mano, la muñeca, el antebrazo y el codo. El método se basa en la medición de seis variables, que una vez valoradas, dan lugar a seis factores multiplicadores de una ecuación que proporciona el *Strain Index*. Este último valor indica el riesgo de aparición de desórdenes en las extremidades superiores, siendo mayor el riesgo cuanto mayor sea el índice. Las variables a medir por el evaluador son: la intensidad del esfuerzo, la duración del esfuerzo por ciclo de trabajo, el número de esfuerzos realizados en un minuto de trabajo, la desviación de la muñeca respecto a la posición neutra, la velocidad con la que se realiza la tarea y la duración de la misma por jornada de trabajo.

Las variables y puntuaciones empleadas se derivan de principios fisiológicos, biomecánicos y epidemiológicos. Tratan de valorar el esfuerzo físico que sobre los músculos y tendones de los extremos distales de las extremidades superiores supone el desarrollo de la tarea, así como el esfuerzo psíquico derivado de su realización. Las variables intensidad del esfuerzo y postura mano-muñeca tratan de valorar el esfuerzo físico, mientras que el resto miden la carga psicológica a través de la duración de la tarea y el tiempo de descanso. Las variables que miden el esfuerzo físico valoran tanto la intensidad del esfuerzo como la carga derivada a la realización del esfuerzo en posturas alejadas de la posición neutra del sistema mano-muñeca.

El método permite evaluar el riesgo de desarrollar desórdenes músculo-esqueléticos en tareas en las que se usa intensamente el sistema mano-muñeca, por lo que es aplicable a gran cantidad de puestos de trabajo. Su validez fue refrendada en estudios posteriores, aunque siempre sobre tareas simples [Rucker et al., 02]. Se han realizado propuestas para extender su uso a trabajos multitarea, empleando un método de cálculo similar al del Índice de Levantamiento Compuesto empleado en la ecuación de levantamiento de NIOSH. Esta propuesta puede consultarse en [Drinkaus et al., 03].

Mientras que tres de las seis variables del método son valoradas cuantitativamente, las otras tres son medidas subjetivamente basándose en las apreciaciones del evaluador y empleando escalas como la CR10 de Borg, [Borg et al., 06] y [Borg, 98]. En ocasiones esto es considerado como una limitación del método [Borg, 01], a las que podrían sumarse que el procedimiento no considera vibraciones o golpes en el desarrollo de la tarea. No obstante, se trata de una de los métodos más extendidos y empleados para analizar los riesgos en las extremidades superiores.

4.4.1.1 La aplicación del método

La aplicación del método comienza con la determinación de cada una de las tareas realizadas por el trabajador y la duración de los ciclos de trabajo. Conocidas las tareas que se evaluarán se observará cada una de ellas dando el valor adecuado a las seis variables que propone el método. Una vez valoradas se calcularán los factores multiplicadores de la ecuación para cada tarea mediante las tablas correspondientes. Conocido el valor de los factores se calculará el *Strain Index* de cada tarea como el producto de los mismos.

El procedimiento de aplicación del método es, en resumen, el siguiente:

- Determinar los ciclos de trabajo³⁰ y observar al trabajador durante varios de

³⁰ *Ciclo de trabajo*: secuencia de acciones técnicas que se repiten siempre de la misma manera [Asociación Española de Normalización y Certificación, 07].

Tiempo de ciclo: lapso de tiempo comprendido desde el momento en el que un operador empieza un ciclo de trabajo hasta el momento en que ese mismo ciclo de trabajo vuelve a comenzar (en segundo) [Asociación Española de Normalización y Certificación, 07].

Acción técnica: acciones manuales elementales necesarias para completar las operaciones dentro del ciclo de trabajo, tales como mantener, girar, empujar, cortar.

estos ciclos.

- Determinar las tareas que se evaluarán y el tiempo de observación necesario (generalmente se hace coincidir con el tiempo de ciclo).
- Observar cada tarea y dar un valor a cada una de las seis variables de acuerdo con las escalas propuestas por el método.
- Determinar el valor de los multiplicadores de la ecuación de acuerdo a los valores de cada variable.
- Obtener el valor del JSI y determinar la existencia de riesgos.
- Revisar las puntuaciones para determinar dónde es necesario aplicar correcciones.
- Rediseñar el puesto o introducir cambios para disminuir el riesgo si es necesario.
- En caso de haber introducido cambios, evaluar de nuevo la tarea con el método JSI para comprobar la efectividad de la mejora.

A continuación se muestra la forma de evaluar las diferentes variables, cómo calcular los multiplicadores y cómo obtener el *Strain Index*:

4.4.1.1.1 Estimación cualitativa del esfuerzo necesario para realizar la tarea una vez

En función del esfuerzo percibido por el evaluador se asignará la valoración según la Tabla 4.33.

Intensidad del esfuerzo	%MS ³¹	EB ³²	Esfuerzo percibido	Valoración
Ligero	<10%	<=2	Escasamente perceptible, esfuerzo relajado	1
Un poco duro	10%-29%	3	Esfuerzo perceptible	2
Duro	30%-49%	4-5	Esfuerzo obvio; sin cambio en la expresión facial	3
Muy duro	50%-79%	6-7	Esfuerzo importante; cambios en la expresión facial	4
Cercano al máximo	>=80%	>7	Uso de los hombros o tronco para generar fuerzas	5

Tabla 4.33: Tabla de valoración de la intensidad del esfuerzo (adaptado de [Moore et al., 95])

³¹ Comparación con el porcentaje de la fuerza máxima (Maximal Strength)

³² Comparación con la escala de Borg CR-10

4.4.1.1.2 Medición de la duración de los esfuerzos

La duración del esfuerzo se calcula midiendo la duración de todos los esfuerzos realizados por el trabajador durante el periodo de observación (generalmente un ciclo de trabajo). Se debe calcular el porcentaje de duración del esfuerzo respecto al tiempo total de observación. Para ello se suma la duración de todos los esfuerzos y el valor obtenido se divide entre el tiempo total de observación. Finalmente se multiplica el resultado por 100.

Es necesario mantener la coherencia de las unidades de medida de tiempos.

$$PDE = 100 * DTE / TO$$

donde:

PDE es el porcentaje de duración del esfuerzo

DTE es la duración de todos los esfuerzo

TO es el tiempo de observación

Una vez calculado el porcentaje de duración se obtendrá la valoración correspondiente mediante la Tabla 4.34.

Porcentaje de duración del esfuerzo	Valoración
<10%	1
10%-29%	2
30%-49	3
50%-79%	4
80%-100%	5

Tabla 4.34: Tabla de valoración del porcentaje de duración del esfuerzo (fuente [Moore et al., 95]).

4.4.1.1.3 Frecuencia de los esfuerzos

Los esfuerzos por minuto se calculan contando el número de esfuerzos que realiza el trabajador durante el tiempo de observación y dividiendo este valor por la duración del periodo de observación medido en minutos. Es frecuente que el tiempo de observación coincida con el tiempo de ciclo.

$$EPM = NE / TO$$

donde:

EPM son los esfuerzos por minuto.

NE es el número de esfuerzos.

TO es el tiempo de observación (minutos).

Una vez calculados los esfuerzos por minuto se obtendrá la valoración correspondiente mediante la Tabla 4.35.

Esfuerzos por minuto	Valoración
<4	1
4-8	2
9-14	3

15-19	4
>=20	5

Tabla 4.35: Tabla de valoración de los esfuerzos por minuto (fuente [Moore et al., 95]).

4.4.1.1.4 Estimación de la posición anatómica de la mano

Se evalúa la desviación de la muñeca respecto de la posición neutra, tanto en flexión-extensión como en desviación lateral. En función de la posición de la muñeca percibida por el evaluador se asignará la valoración según la Tabla 4.36.

Postura muñeca	Extensión	Flexión	Desviación	Postura percibida	Valoración
Muy buena	0°-10°	0°-5°	0°-10°	Perfectamente neutral	1
Buena	11°-25°	6°-15°	11°-15°	Cercana a la neutral	2
Regular	26°-40°	16°-30°	16°-20°	No neutral	3
Mala	41°-55°	31°-50°	21°-25°	Desviación importante	4
Muy mala	>55°	>50°	>25°	Desviación extrema	5

Tabla 4.36: Tabla de valoración de la posición de la mano (fuente [Moore et al., 95]).

4.4.1.1.5 Estimación cualitativa de la velocidad con la que el trabajador realiza la tarea

En función del ritmo de trabajo percibido por el evaluador se asignará la valoración según la Tabla 4.37.

Ritmo de trabajo	Comparación con MTM-1 ³³	Velocidad percibida	Valoración
Muy lento	<=80%	Ritmo extremadamente relajado	1
Lento	81%-90%	Ritmo lento	2
Regular	91%-100%	Velocidad de movimientos normal	3
Rápido	101%-115%	Ritmo impetuoso pero sostenible	4
Muy rápido	>115%	Ritmo impetuoso y prácticamente insostenible	5

Tabla 4.37: Tabla de valoración de la velocidad del trabajo (fuente [Moore et al., 95]).

4.4.1.1.6 Tiempo de la jornada dedicado a la realización de la tarea

Es el tiempo diario en horas que el trabajador dedica a la tarea específica analizada. La duración de la tarea por día puede ser medida directamente u obtener la información del personal implicado. Conocida la duración se obtendrá la valoración correspondiente mediante la Tabla 4.38.

³³ Ritmo observado dividido por el ritmo predicho por MTM-1 y expresado como porcentaje

Duración de la tarea por día en horas	Valoración
<1	1
1-2	2
2-4	3
4-8	4
>=8	5

Tabla 4.38: Tabla de valoración de la duración de la tarea por día (fuente [Moore et al., 95]).

4.4.1.1.7 Cálculo de los factores multiplicadores

Una vez establecida la valoración de las 6 variables puede determinarse el valor de los factores multiplicadores mediante la consulta de las siguientes tablas.

Intensidad del esfuerzo	
Valoración	IE
1	1
2	3
3	6
4	9
5	13

Tabla 4.39: Tabla de valoración del multiplicador Intensidad del esfuerzo (fuente [Moore et al., 95]).

Porcentaje de duración del esfuerzo	
Valoración	DE
1	0,5
2	1
3	1,5
4	2
5	3

Tabla 4.40: Tabla de valoración del multiplicador Intensidad del esfuerzo (fuente [Moore et al., 95]).

Esfuerzo por minuto	
Valoración	EM
1	0,5
2	1
3	1,5
4	2
5	3

Tabla 4.41: Tabla de valoración del multiplicador Esfuerzo por minuto (fuente [Moore et al., 95]).

% postura mano-muñeca	
Valoración	HWP
1	1
2	1
3	1,5
4	2
5	3

Tabla 4.42: Tabla de valoración del multiplicador Postura de muñeca (fuente [Moore et al., 95]).

Velocidad de trabajo	
Valoración	SW
1	1
2	1
3	1
4	1,5
5	2

Tabla 4.43: Tabla de valoración del multiplicador Velocidad de trabajo (fuente [Moore et al., 95]).

Duración del día	
Valoración	DD
1	0,25
2	0,5
3	0,75
4	1
5	1,5

Tabla 4.44: Tabla de valoración del multiplicador Duración por día (fuente [Moore et al., 95]).

4.4.1.1.8 Cálculo del Strain Index

El Strain Index se calcula mediante la aplicación de la ecuación:

$$JSI = IE * DE * EM * HWP * DD$$

donde:

IE es el multiplicador correspondiente a la intensidad del esfuerzo.

DE es el multiplicador correspondiente a la duración del esfuerzo.

EM es el multiplicador correspondiente a los esfuerzos realizados por minuto.

HWP es el multiplicador correspondiente a la posición de la mano-muñeca.

SW es el multiplicador correspondiente al ritmo de trabajo.

DD es el multiplicador correspondiente a la duración por día de la tarea.

La ecuación es el producto de 6 factores calculados mediante las tablas Tabla 4.39 a la Tabla 4.44.

La valoración de la puntuación final JSI obtenida se realiza en base al siguiente criterio:

Valores de JSI inferiores o iguales a 3 indican que la tarea es probablemente segura.

Puntuaciones superiores o iguales a 7 indican que la tarea es probablemente peligrosa.

En general, puntuaciones superiores a 5 están asociadas a desórdenes músculo-esqueléticos de las extremidades superiores.

4.4.2 El método Check List OCRA

El Check List OCRA³⁴ [Colombini et al., 02] es el resultado de la simplificación del método OCRA "Occupational Repetitive Action" [Colombini, 98]. El nivel de detalle del resultado proporcionado por el método OCRA, es directamente proporcional a la cantidad de información requerida y a la complejidad de los cálculos necesarios durante su aplicación. El método abreviado Check List OCRA permite, con menor

³⁴ En lo sucesivo el término método Check List OCRA hará referencia a la versión Check List del método OCRA, presentada bajo el título "Modelo para la evaluación rápida de la exposición al riesgo (OCRA index)" [Colombini et al., 02].

esfuerzo, obtener un resultado básico de valoración del riesgo por movimientos repetitivos de los miembros superiores, previniendo sobre la urgencia de realizar estudios más detallados.

El método Check List OCRA tiene como objetivo alertar sobre posibles trastornos, principalmente de tipo músculo-esquelético (TME), derivados de una actividad repetitiva. Los TME suponen en la actualidad una de las principales causas de enfermedad profesional, de ahí la importancia de su detección y prevención (ver capítulo 3).

El método Check List OCRA centra su estudio en los miembros superiores del cuerpo, permitiendo prevenir problemas tales como la *tendinitis en el hombro*, la *tendinitis en la muñeca* o el *síndrome del túnel carpiano*, descritos como los trastornos músculo-esqueléticos más frecuentes debidos a movimientos repetitivos [Bernard, 97].

El ámbito de aplicación del método OCRA y por analogía del método Check List OCRA es muy variado, la experiencia de los propios autores se ha centrado principalmente en la industria del metal, aunque también han realizado estudios en sectores tan dispares como la industria avícola, la alta costura, la agricultura, y la pesca.

El método evalúa, en primera instancia, el riesgo intrínseco de un puesto, es decir, el riesgo que implica la utilización del puesto independientemente de las características particulares del trabajador. El método obtiene, a partir del análisis de una serie de factores, un valor numérico denominado Índice Check List OCRA. Dependiendo de la puntuación obtenida para el Índice Check List OCRA el método clasifica el riesgo como "Óptimo", "Aceptable", "Muy Ligero", "Ligero", "Medio" o "Alto". Finalmente, en función del nivel de riesgo, el método sugiere una serie de acciones básicas, salvo en caso de riesgo "Óptimo" o "Aceptable" en los que se considera que no son necesarias actuaciones sobre el puesto. Para el resto de casos el método propone acciones tales como realizar un nuevo análisis o mejora del puesto (riesgo "Muy Ligero"), o la necesidad de supervisión médica y entrenamiento para el trabajador que ocupa el puesto (riesgo "Ligero", "Medio" o "Alto").

El método también permite obtener el índice de riesgo asociado a un trabajador, para ello se parte del cálculo del Índice Check List OCRA del puesto, anteriormente descrito, siendo modificado en función del porcentaje real de ocupación del puesto por el trabajador.

Se proponen, además, cálculos adicionales que permiten obtener el riesgo global asociado a un conjunto de puestos y el índice de riesgo correspondiente a un trabajador que deba rotar entre diferentes puestos.

En la actualidad, el método OCRA y por extensión el Check List OCRA se encuentra en pleno proceso de difusión y valoración por la comunidad ergonómica. A pesar de su reciente creación, la contribución del método OCRA a la norma UNE-EN 1005-5:2007 (*Seguridad de las máquinas. Comportamiento físico del ser*

humano. Parte 5: Evaluación del riesgo por manipulación repetitiva de alta frecuencia) [Asociación Española de Normalización y Certificación, 07], y su recomendación en la norma ISO 11228-3:2007 (*Ergonomics. Manual handling. Part 3: Handling of low loads at high frequency*) [International Organization for Standardization, 07] para la evaluación de movimientos repetitivos, avalan los resultados que proporciona.

4.4.2.1 Características del método Check List OCRA

El método Check List OCRA evalúa el riesgo en función de los siguientes factores:

- La duración real o neta del movimiento repetitivo.
- Los periodos de recuperación o de descanso permitidos en el puesto.
- La frecuencia de las acciones requeridas.
- La duración y tipo de fuerza ejercida.
- La postura de los hombros, codos, muñeca y manos, adoptada durante la realización del movimiento.
- La existencia de factores adicionales de riesgo tales como la utilización de guantes, presencia de vibraciones, tareas de precisión, el ritmo de trabajo, etc.

Las principales características del método Check List OCRA son:

- Se trata de un método sencillo y rápido de aplicar.
 - Cerca de 60 opciones agrupadas en 5 factores completan el cuestionario.
 - La evaluación de un puesto con un ciclo de trabajo de unos 15 segundos puede realizarse en 3-4 minutos. Para un ciclo de 15 minutos, puede aproximarse a 30 minutos el tiempo de evaluación, incluyendo tareas adicionales de registro de la información (mapas de riesgo, software, videos, etc.).
- El método permite evaluar el riesgo asociado a un puesto, a un conjunto de puestos y por extensión el riesgo de exposición para un trabajador que ocupa un sólo puesto o bien que rota entre varios puestos.
- El método valora el riesgo en función del tiempo:
 - La valoración del riesgo debida a cada factor es proporcional al tiempo durante el cual dicho factor está presente en la actividad.
 - El método considera la duración del movimiento real o neta como un factor más de aumento o disminución del riesgo final.
 - Para la evaluación del riesgo asociado a un trabajador el

método considera el tiempo de ocupación real del puesto/s por el trabajador.

- Los resultados son concisos y de fácil interpretación:
 - El resultado final es un valor numérico, Índice Check List OCRA, que pertenece a uno de los 6 rangos de valores en los que el método organiza los posibles resultados. A cada rango de valores le corresponde una descripción del riesgo (Óptimo, Aceptable, Muy Ligero, Ligero, Medio, Alto) y una escueta recomendación de acción (No se requiere acción, Nuevo análisis o mejora del puesto, Mejora del puesto, supervisión médica y entrenamiento).
 - A cada factor evaluado se le otorga una puntuación o subíndice. El análisis de su aportación al riesgo o índice final puede orientar el enfoque de posteriores estudios del puesto.
- El método considera factores tales como la frecuencia, la fuerza o la postura, considerados relevantes por la mayoría de métodos que evalúan movimientos repetitivos (RULA, REBA, JSI,...).
- Incluye en la evaluación factores adicionales como la utilización de guantes, el uso de herramientas con vibración, uso de herramientas que provocan compresiones en la piel, así como la importancia del ritmo determinado o no por la máquina.

Respecto a las limitaciones del método Check List OCRA cabe señalar:

- Su carácter preliminar no concluyente, y por tanto la dependencia de otros métodos más exhaustivos para el análisis del riesgo en profundidad.
- El método sugiere la posibilidad de asignar puntuaciones intermedias a los factores para los cuales no se encuentra descrita la situación concreta en estudio, siendo dichas puntuaciones subjetivas y dependientes del criterio del evaluador.
- Evalúa el riesgo de posturas forzadas únicamente de los miembros superiores, dejando fuera del análisis las posturas forzadas de la cabeza, el cuello, el tronco, las piernas, etc.
- En las evaluaciones de los factores adicionales (guantes, vibraciones, compresión, precisión...) permite seleccionar un único factor, el más significativo, perdiéndose información y concreción del riesgo al coincidir varias de dichas circunstancias.
- El método está orientado hacia la evaluación de puestos ocupados durante un máximo de 8 horas (480 minutos).
 - Si la ocupación es de más de 8 horas la fiabilidad del resultado se ve afectada al incrementarse el riesgo en la misma

proporción para 9 horas de trabajo, que para 12 horas, 13 horas, etc.

- Las posibles opciones planteadas por el método respecto a los periodos de recuperación hacen referencia a movimientos de entre 6 y 8 horas de duración como máximo.
- El método no clasifica el riesgo para las puntuaciones intermedias otorgadas a los diferentes factores. El análisis complementario de la importancia de cada factor se reduce a la comparación subjetiva de los resultados parciales entre sí y con respecto al índice final.
- El método valora la fuerza únicamente si ésta se ejerce cada pocos ciclos y está presente durante todo el movimiento repetitivo. De esta forma, el riesgo asociado al manejo puntual de cargas requerido por un puesto no quedaría convenientemente reflejado en la valoración final riesgo.
- Para resultados del Índice Check List OCRA menores o iguales a 5 el método establece que el riesgo es "Óptimo" y para valores de entre 5 y 7,5 considera el riesgo "Aceptable". En ambos casos señala que no es necesaria acción alguna. Sin embargo, la existencia de factores con puntuaciones distintas a cero, es decir con presencia de riesgo, podrían interpretarse como aspectos a mejorar del puesto, acción ésta siempre recomendable.

El Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo de España apunta además las siguientes limitaciones [Rojas-Picazo et al.]:

- El método no considera las "micropausas" como periodos de recuperación y por tanto de disminución del riesgo (ejemplo de circunstancia con "micropausas": cinta transportadora sin producto pendiente de recoger cada pocos segundos).
- No permite evaluar el factor fuerza si ésta es de carácter ligero.
- Se consideran todas las posturas con idéntica gravedad y sólo su prolongación en el tiempo afecta al riesgo.
- El método valora todos los tipos de agarre con el mismo riesgo. Sólo la duración del mismo influye en el incremento del riesgo, sin embargo, los agarres "en pinza" son por lo general más propensos a provocar trastornos músculo-esqueléticos que los agarres palmares o en gancho.

4.4.2.2 Aplicación del método Check List OCRA

Los diferentes escenarios de aplicación del método Check List OCRA determinarán en cada caso los pasos necesarios para la valoración del riesgo.

La exposición del método se organizará en base a los siguientes casos de evaluación, ordenados de menor a mayor "complejidad" respecto a los cálculos

necesarios:

- Evaluación del riesgo intrínseco de un puesto.
- Evaluación del riesgo asociado a un trabajador que ocupa un único puesto.
- Evaluación del riesgo intrínseco asociado a un conjunto de puestos.
- Evaluación del riesgo asociado a un trabajador que rota entre un conjunto de puestos (que comprende 2 posibles casos).
 - El trabajador cambia de puesto al menos una vez cada hora.
 - El trabajador cambia de puesto menos de una vez cada hora.

En primer lugar se describirá el método en su versión más sencilla, destinada a la evaluación del riesgo intrínseco de un único puesto:

4.4.2.2.1 Evaluación del riesgo intrínseco de un único puesto.

El método Check List OCRA describe el riesgo intrínseco de un puesto en base a un único valor numérico llamado Índice Check List OCRA. Dicho valor es el resultado de la suma de una serie de factores (factor de recuperación, frecuencia, fuerza, postura y factores adicionales) posteriormente modificado por la duración real del movimiento (multiplicador de duración).

La siguiente fórmula ilustra el cálculo necesario para la obtención del Índice Check List OCRA de un puesto:

$$ICKOCRA = (FR + FFr + FF + FP + FA) * MD$$

donde:

ICKOCRA es el índice Check List OCRA.

FR es el factor de recuperación.

FFr es el factor de frecuencia.

FF es el factor de fuerza.

FP es el factor de postura.

FA son los factores adicionales.

DM es el multiplicador de duración.

El procedimiento de obtención del Índice Check List OCRA de un puesto consta de los siguientes pasos:

4.4.2.2.2 Evaluación de la duración neta del movimiento repetitivo y de la duración neta del ciclo

El método plantea un pequeño análisis previo a la evaluación del riesgo, con el fin de determinar la duración real o neta del movimiento repetitivo y la duración neta del ciclo de trabajo.

La determinación de la duración neta del movimiento será posteriormente

utilizada para corregir, si fuera necesario, el Índice de riesgo Check List OCRA obtenido a partir de los factores de recuperación, frecuencia, fuerza, postura y adicionales.

La siguiente tabla muestra los datos solicitados por el método para la evaluación de la duración neta del movimiento repetitivo y del ciclo de trabajo:

Descripción		Minutos
Duración total del movimiento	oficial	
	real	
Pausas oficiales	contractual	
Otras pausas		
Almuerzo	oficial	
	real	
Tareas no repetitivas	oficial	
	real	
DURACIÓN NETA DE LA/S TAREA/S REPETITIVAS		
Nº de unidades (o ciclos)	Previstos	
	Reales	
DURACIÓN NETA DEL CICLO (seg.)		
DURACIÓN DEL CICLO OBSERVADO (seg.)		

Tabla 4.45: Tabla para la evaluación de la duración neta de la tarea repetitiva y del ciclo (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).

A partir de la información recopilada en la Tabla 4.45 es posible determinar la Duración Neta del movimiento repetitivo, como:

$$DNTR = DTM - (PAO - OPA - PAL - TNR)$$

donde:

DNTR es la duración de la/s tarea/S repetitivas en minutos.

DTM es la duración total del movimiento en minutos.

PAO son las pausas oficiales en minutos.

OPA son otras pausas en minutos.

PAL es la pausa para el almuerzo en minutos.

TNR es la duración en minutos de las tares no repetitiva.

La siguiente fórmula muestra el cálculo para la obtención del la duración neta del ciclo de trabajo en segundos:

$$DNTC = \frac{NC * 60}{DNTR}$$

donde:

DNTC es la duración neta del ciclo en segundos.

NC es el número de unidades o ciclos

DNTR es la duración neta de las tareas repetitivas en segundos

El método recomienda comparar la duración neta del ciclo con la duración del ciclo observada, estableciendo que si dichos valores son similares es posible iniciar

la evaluación del riesgo. En otro caso, se debería describir las circunstancias concretas causantes de dicha desviación antes de proseguir con la evaluación.

Una vez finalizada la evaluación preliminar de la Duración Neta del movimiento repetitivo y del ciclo de trabajo se detalla la obtención de cada uno de los elementos de la fórmula descrita con anterioridad para el cálculo de Índice Check List OCRA.

4.4.2.2.3 Factor de recuperación

El factor de recuperación representa el riesgo asociado a la distribución inadecuada de los periodos de recuperación³⁵.

La frecuencia de los perdidos de recuperación, su duración y distribución en la tarea repetitiva, determinarán el riesgo debido a la falta de reposo y por consecuencia al aumento de la fatiga.

El método considera como situación óptima aquella en la cual "existe una interrupción de al menos 8/10 minutos cada hora (contando el descanso del almuerzo) o el periodo de recuperación está incluido en el ciclo", es decir, la proporción entre trabajo repetitivo y recuperación es de 50 minutos de tarea repetitiva por cada 10 minutos de recuperación (5 (trabajo):1 (recuperación)).

Cabe resaltar que la puntuación asignada al factor de recuperación depende de la duración total del movimiento, en contraposición al resto de factores cuya puntuación depende del tiempo empleado en la realización de la actividad concreta descrita por el factor.

La Tabla 4.46 muestra las puntuaciones para el factor de recuperación según las pausas y/o descansos existentes durante la duración total del movimiento, pudiéndose seleccionar una única de las opciones propuestas.

Si no se encontrara descrita la circunstancia exacta en estudio el método plantea dos alternativas (válidas para el resto de factores):

- Utilización de puntuaciones intermedias, respecto a las propuestas en la Tabla 4.46, si de esta forma quedara mejor descrita la situación real en estudio.
- Selección de la opción más aproximada a la situación real (el evaluador deberá valorar posteriormente el resultado considerando la aproximación realizada).

³⁵ Periodo de recuperación: periodo durante el cual uno o varios grupos musculares implicados en el movimiento permanecen totalmente en reposo, tales como los descansos para el almuerzo, las tareas de control visual, las pausas en el trabajo (oficiales o no), las tareas que permiten el reposo de los grupos de músculos utilizados en tareas anteriores (empujar objetos alternativamente con un brazo y otro), etc.

Factor de recuperación	Puntos
Existe una interrupción de al menos 8/10 minutos cada hora (contando el descanso del almuerzo) o el periodo de recuperación está incluido en el ciclo.	0
Existen 2 interrupciones por la mañana y 2 por la tarde (además del descanso del almuerzo) de al menos 7-10 minutos para un movimiento de 7-8 horas; o bien existen 4 interrupciones del movimiento (además del descanso del almuerzo); o cuatro interrupciones de 8-10 minutos en un movimiento de 7-8 horas; o bien al menos 4 interrupciones por movimiento (además del descanso del almuerzo); o bien 4 interrupciones de 8/10 minutos en un movimiento de 6 horas.	2
Existen 2 pausas, de al menos 8-10 minutos cada una para un movimiento de 6 horas (sin descanso para el almuerzo); o bien existen 3 pausas, además del descanso para el almuerzo, en un movimiento de 7-8 horas.	3
Existen 2 pausas, además del descanso para almorzar, de entre 8 y 10 minutos cada una para un movimiento de entre 7 y 8 horas (o 3 pausas sin descanso para almorzar); o 1 pausa de al menos 8-10 minutos en un movimiento de 6 horas.	4
Existe una única pausa, de al menos 10 minutos, en un movimiento de 7 horas sin descanso para almorzar; o en 8 horas sólo existe el descanso para almorzar (el descanso del almuerzo se incluye en las horas de trabajo).	6
No existen pausas reales, excepto de unos pocos minutos (menos de 5) en 7-8 horas de movimiento.	10

Tabla 4.46: Tabla de puntuación del factor de recuperación (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).

4.4.2.2.4 Factor de frecuencia

El método describe la frecuencia de trabajo en términos de acciones técnicas realizadas por minuto:

- **Acción técnica:** movimiento o movimientos necesarios para completar una operación simple con implicación de una o varias articulaciones de los miembros superiores. Se consideran acciones técnicas: mover objetos, alcanzar objetos, coger un objeto con la mano o los dedos, pasar un objeto de la mano derecha a la izquierda y viceversa, colocar un objeto o herramienta en un lugar determinado para realizar una actividad, empujar o tirar un objeto con requerimiento de fuerza, apretar botones o palancas con la mano o los dedos para activar una herramienta, doblar, cepillar, rotar, etc.

El método divide las opciones de la lista de validación para el factor frecuencia en dos grupos, según se trate de acciones técnicas dinámicas (sucesión periódica de tensiones y relajamientos de los músculos activos de corta duración) o estáticas (contracción de los músculos continua y mantenida durante un cierto período de tiempo).

Pasos para la obtención de la puntuación del factor de frecuencia:

- Si sólo las acciones dinámicas son significativas la puntuación del factor de frecuencia será igual a la puntuación de la opción seleccionada en la tabla

de acciones técnicas dinámicas (Tabla 4.47).

- Si es posible seleccionar una opción de la tabla de acciones técnicas dinámicas (Tabla 4.47) y de la tabla de acciones estáticas (Tabla 4.48), la puntuación final del factor de frecuencia será la mayor de ellas.

Para ambos tipos de acciones (dinámicas y estáticas), si la circunstancia concreta en estudio no se encontrara reflejada en la tabla se deberá seleccionar la opción más aproximada con mayor puntuación del riesgo, o bien otorgar puntuaciones intermedias de entre las propuestas (con una puntuación máxima permitida para el factor de frecuencia de hasta 10 puntos).

ACCIONES TÉCNICAS DINÁMICAS	Puntos
Los movimientos del brazo son lentos (20 acciones/minuto). Se permiten pequeñas pausas frecuentes.	0
Los movimientos del brazo no son demasiado rápidos (30 acciones/minuto). Se permiten pequeñas pausas.	1
Los movimientos del brazo son bastante rápidos (más de 40 acciones/minuto). Se permiten pequeñas pausas.	3
Los movimientos del brazo son bastante rápidos (más de 40 acciones/minuto). Sólo se permiten pequeñas pausas ocasionales e irregulares.	4
Los movimientos del brazo son rápidos (más de 50 acciones/minuto). Sólo se permiten pequeñas pausas ocasionales e irregulares.	6
Los movimientos del brazo son rápidos (más de 60 acciones/minuto). La carencia de pausas dificulta el mantenimiento del ritmo.	8
Los movimientos del brazo se realizan con una frecuencia muy alta (70 acciones/minuto o más). No se permite bajo ningún concepto las pausas.	10

Tabla 4.47: Tabla de puntuación del factor de frecuencias para acciones técnicas dinámicas (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).

ACCIONES TÉCNICAS ESTÁTICAS	Puntos
Se sostiene un objeto durante al menos 5 segundos consecutivos, realizándose una o más acciones estáticas durante 2/3 del tiempo de ciclo (o de observación).	2,5
Se sostiene un objeto durante al menos 5 segundos consecutivos, realizándose una o más acciones estáticas durante 3/3 del tiempo de ciclo (o de observación).	4,5

Tabla 4.48: Tabla de puntuación del factor de frecuencias para acciones técnicas estáticas (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).

4.4.2.2.5 Factor de fuerza

El método considera significativo el factor de fuerza únicamente si se ejerce fuerza con los brazos y/o manos al menos una vez cada pocos ciclos. Además, la aplicación de dicha fuerza debe estar presente durante todo el movimiento repetitivo.

Las opciones propuestas por el método describen algunas de las acciones más comunes con requerimiento de fuerza, tales como empujar palancas, pulsar botones, cerrar o abrir, manejar o apretar componentes, la utilización de herramientas o elevar o sujetar objetos.

Acciones
Es necesario empujar o tirar de palancas.
Es necesario pulsar botones.
Es necesario cerrar o abrir.
Es necesario manejar o apretar componentes.
Es necesario utilizar herramientas.
Es necesario elevar o sujetar objetos

Tabla 4.49: Ejemplos de acciones técnicas (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).

Cualquiera de estas acciones es puntuada en función de la intensidad de la fuerza requerida y su duración total.

El método clasifica la fuerza en tres niveles según la intensidad del esfuerzo requerido. Para obtener la puntuación del factor de fuerza se deberán seguir los siguientes pasos:

- Selección de una o varias acciones de entre las descritas en la Tabla 4.49.
- Determinación de la intensidad del esfuerzo según la Tabla 4.50.
- En función de la intensidad del esfuerzo obtener la puntuación de las siguientes tablas: para fuerza moderada (3-4 puntos en la escala CR-10 de Borg [Borg, 98]) consultar la Tabla 4.51, para fuerza intensa (5-6-7 puntos en la escala CR-10 de Borg) consultar la Tabla 4.52 y para fuerza máxima (8 o más puntos en la escala CR-10 de Borg) consultar la Tabla 4.53.

Intensidad del esfuerzo	Escala de Borg CR-10
Ligero	<=2
Un poco duro	3
Duro	4-5
Muy duro	6-7
Cercano al máximo	>7

Tabla 4.50: Escala de Borg CR-10 (fuente [Borg, 98]) .

- Suma de las puntuaciones obtenidas para las acciones y duraciones seleccionadas.

A continuación se muestran las tablas de puntuación del factor de fuerza según la intensidad de la fuerza:

Fuerza moderada (3-4 puntos en la escala de Borg).		
Duración		Puntos
1/3 del tiempo.	⇒	2
Más o menos la mitad del tiempo.		4
Más de la mitad del tiempo.		6
Casi todo el tiempo.		8

Tabla 4.51: Puntuación del factor de fuerza con fuerza moderada (3-4 puntos en la escala de Borg) (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).

Fuerza intensa (5-6-7 puntos en la escala de Borg).		
Duración		Puntos
2 segundos cada 10 minutos	⇒	4
1% del tiempo.		8
5% del tiempo		16
más del 10% del tiempo		24

Tabla 4.52: Puntuación del factor de fuerza con fuerza casi máxima (8 puntos en la escala de Borg) (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).

Fuerza casi máxima (8 puntos o más en la escala de Borg).		
Duración		Puntos
2 segundos cada 10 minutos	⇒	6
1% del tiempo.		12
5% del tiempo		24
más del 10% del tiempo		32

Tabla 4.53: Puntuación del factor de fuerza con fuerza intensa (8 puntos en la escala de Borg) (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).

Si ninguna de las acciones propuestas reflejara la circunstancia concreta en estudio, el método permite indicar nuevas acciones. La puntuación de dichas acciones será igual a las descritas en el método y dependerá únicamente de su duración.

El método también permite asignar puntuaciones intermedias para reflejar mejor la duración real del esfuerzo.

4.4.2.2.6 Factor de postura

La valoración del riesgo asociado a la postura se realiza evaluando la posición del hombro, del codo, de la muñeca y de las manos.

El método incrementa el riesgo debido a la postura si existen movimientos

estereotipados o bien todas las acciones implican a los miembros superiores y la duración del ciclo es corta.

Para la obtención del factor postural se deberán seguir los siguientes pasos:

- Selección de una única opción para cada grupo corporal: hombro, codo, muñeca y manos.
- Puntuación de la opción seleccionada para cada grupo: Puntuación del hombro, codo, muñeca y manos.
- Obtención del valor máximo de las puntuaciones del hombro, codo, muñeca y manos.
- Si existen movimientos estereotipados: selección de la opción correspondiente y suma de su puntuación al valor máximo de las puntuaciones del hombro, codo, muñeca y manos.

La siguiente expresión resume el cálculo del factor de postura:

$$FP = MAX(ph, pc, pñ, pm) + pmve$$

donde:

ph es la puntuación del hombro.

pc es la puntuación del codo

pñ es la puntuación de la muñeca

pm es la puntuación de las manos

pmve es la puntuación por movimientos estereotipados

A continuación se muestran las tablas de puntuación correspondientes a cada grupo corporal:

HOMBRO	Puntos
<i>Si las manos permanecen por encima de la altura de la cabeza se duplicarán las puntuaciones.</i>	
El brazo/s no posee apoyo y permanece ligeramente elevado algo más de la mitad el tiempo.	1
Los brazos se mantienen a la altura de los hombros y sin soporte (o en otra postura extrema) más o menos el 10% del tiempo.	2
Los brazos se mantienen a la altura de los hombros y sin soporte (o en otra postura extrema) más o menos el 1/3 del tiempo.	6
Los brazos se mantienen a la altura de los hombros y sin soporte más de la mitad del tiempo.	12
Los brazos se mantienen a la altura de los hombros y sin soporte todo el tiempo.	24

Tabla 4.54: Puntuación del factor de postura para el HOMBRO (fuente [Colombini et al., 02]).

CODO	Puntos
El codo realiza movimientos repentinos (flexión-extensión o pronosupinación extrema, tirones, golpes) al menos un tercio del tiempo.	2
El codo realiza movimientos repentinos (flexión-extensión o pronosupinación extrema, tirones, golpes) más de la mitad del tiempo.	4
El codo realiza movimientos repentinos (flexión-extensión o pronosupinación extrema, tirones, golpes) casi todo el tiempo.	8

Tabla 4.55: Puntuación del factor de postura para el CODO (fuente [Colombini et al., 02]).

MUÑECA	Puntos
La muñeca permanece doblada en una posición extrema o adopta posturas forzadas (alto grado de flexión-extensión o desviación lateral) al menos 1/3 del tiempo.	2
La muñeca permanece doblada en una posición extrema o adopta posturas forzadas (alto grado de flexión-extensión o desviación lateral) más de la mitad del tiempo.	4
La muñeca permanece doblada en una posición extrema, todo el tiempo.	8

Tabla 4.56: Puntuación del factor de postura para la MUÑECA (fuente [Colombini et al., 02]).

Si se realizan agarres de objetos de cualquiera de los tipos indicados en la Tabla 4.57 se asignará la puntuación en función de la duración del agarre. La puntuación a asignar se indica en la Tabla 4.58.

AGARRE
Los dedos están apretados (agarre en pinza o pellizco).
La mano está casi abierta (agarre con la palma de la mano).
Los dedos están en forma de gancho (agarre en gancho).

Tabla 4.57: Tipos de AGARRE (fuente [Colombini et al., 02]).

Duración	Puntos
Alrededor de 1/3 del tiempo.	2
Más de la mitad del tiempo.	4
Casi todo el tiempo.	8

Tabla 4.58: Puntuación del factor de postura para el AGARRE (fuente [Colombini et al., 02]).

La siguiente tabla muestra la puntuación a sumar si existen movimientos estereotipados:

MOVIMIENTOS ESTEREOTIPADOS	Puntos
Repetición de movimientos idénticos del hombro y/o codo, y/o muñeca, y/o dedos al menos 2/3 del tiempo (o el tiempo de ciclo está entre 8 y 15 segundos, todas las acciones técnicas se realizan con los miembros superiores. Las acciones pueden ser diferentes entre si).	1,5
Repetición de movimientos idénticos del hombro y/o codo, y/o muñeca, y/o dedos casi todo el tiempo (o el tiempo de ciclo es inferior a 8 segundos, todas las acciones técnicas se realizan con los miembros superiores. Las acciones pueden ser diferentes entre si).	3

Tabla 4.59: Puntuación de los movimientos estereotipados (fuente [Colombini et al., 02]).

4.4.2.2.7 Factores adicionales

Por último el método engloba en los llamados factores adicionales una serie de

circunstancias que aumentan el riesgo debido a su presencia durante gran parte del ciclo.

En este punto se consideran elementos que contribuyen al riesgo: la utilización de guantes, el uso de herramientas que provocan vibraciones o contracciones en la piel, el tipo de ritmo de trabajo (impuesto o no por la máquina), etc.

Para obtener la puntuación debida a los factores adicionales se deberá:

- Seleccionar una única opción de las descritas para factores adicionales y consultar su puntuación.
- Sumar a la puntuación de la opción seleccionada 1 punto si el ritmo está parcialmente impuesto por la máquina y hasta 2 puntos si éste está totalmente determinado por la máquina.

FACTORES ADICIONALES	Puntos
Se utilizan guantes inadecuados (que interfieren en la destreza de sujeción requerida por la tarea) más de la mitad del tiempo.	2
La actividad implica golpear (con un martillo, golpear con un pico sobre superficies duras, etc.) con una frecuencia de 2 veces por minuto o más.	2
La actividad implica golpear (con un martillo, golpear con un pico sobre superficies duras, etc.) con una frecuencia de 10 veces por hora o más.	2
Existe exposición al frío (a menos de 0 grados centígrados) más de la mitad del tiempo.	2
Se utilizan herramientas que producen vibraciones de nivel bajo/medio 1/3 del tiempo o más.	2
Se utilizan herramientas que producen vibraciones de nivel alto 1/3 del tiempo o más.	2
Las herramientas utilizadas causan compresiones en la piel (enrojecimiento, callosidades, ampollas, etc.).	2
Se realizan tareas de precisión más de la mitad del tiempo (tareas sobre áreas de menos de 2 o 3 mm.).	2
Existen varios factores adicionales concurrentes, y en total ocupan más de la mitad del tiempo.	2
Existen varios factores adicionales concurrentes, y en total ocupan todo el tiempo.	3

Tabla 4.60: Puntuación de los factores adicionales (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).

La siguiente tabla muestra la puntuación a sumar según el tipo de ritmo exigido en el puesto:

RITMO DE TRABAJO	Puntos
El ritmo de trabajo está parcialmente determinado por la máquina, con pequeños lapsos de tiempo en los que el ritmo de trabajo puede disminuirse o acelerarse.	1
El ritmo de trabajo está totalmente determinado por la máquina.	2

Tabla 4.61: Puntuación del ritmo de trabajo (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).

4.4.2.2.8 Multiplicador correspondiente a la duración neta del movimiento repetitivo

El multiplicador de duración es un valor que traslada la influencia de la duración real del movimiento repetitivo al cálculo del riesgo.

El método plantea la corrección de la puntuación obtenida por la suma de los factores de riesgo evaluados (recuperación, frecuencia, fuerza, postura y adicionales), en función de la duración neta o real del movimiento repetitivo.

Si la duración del movimiento repetitivo es menor a 8 horas (480 min.) el índice de riesgo disminuye, mientras que éste aumenta para movimientos repetitivos mantenidos durante más de 8 horas tal y como muestra la siguiente tabla de puntuaciones para el multiplicador de duración:

Duración del movimiento	Multiplicador de duración
60-120 minutos	0,5
121-180 minutos	0,65
181-240 minutos	0,75
241-300 minutos	0,85
301-360 minutos	0,925
361-420 minutos	0,95
421-480 minutos	1
> 480 minutos	1,5

Tabla 4.62: Puntuación para el multiplicador de duración neta del movimiento repetitivo (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)]).

4.4.2.2.9 Obtención de la Puntuación Final

En este punto será posible la obtención final del Índice Check List OCRA mediante la suma de las puntuaciones de los diferentes factores (recuperación, frecuencia, fuerza, postura y adicionales) corregida por la puntuación del multiplicador de duración (ver 4.4.2.2.1).

Finalmente, la consulta de la tabla de clasificación de resultados (Tabla 4.63) permitirá describir el riesgo asociado al valor del Índice Check List OCRA obtenido y las acciones correctivas sugeridas por el método.

El método propone un código de colores³⁶ para identificar visualmente los diferentes niveles de riesgo. La escala de colores va desde el verde para el riesgo Óptimo o Aceptable, pasando por el amarillo para indicar el riesgo Muy ligero y finalmente el rojo para identificar el riesgo Ligero, Medio y alto.

³⁶ En la escala de colores original propuesta por el método se diferencian únicamente 3 colores (verde, amarillo y rojo). En la escala mostrada en la tabla 18 se ha ampliado la gama de colores dividiendo el verde en dos tonos y el rojo en tres tonos (rosa, rojo medio, rojo intenso).

Índice Check List OCRA	Riesgo	Acción sugerida
Menor o igual a 5	Óptimo	No se requiere
Entre 5,1 y 7,5	Aceptable	No se requiere
Entre 7,6 y 11	Muy Ligero	Se recomienda un nuevo análisis o mejora del puesto
Entre 11,1 y 14	Ligero	Se recomienda mejora del puesto, supervisión médica y entrenamiento
Entre 14,1 y 22,5	Medio	Se recomienda mejora del puesto, supervisión médica y entrenamiento
Más de 22,5	Alto	Se recomienda mejora del puesto, supervisión médica y entrenamiento

Tabla 4.63: Tabla de clasificación del Índice Check List OCRA (fuente [Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)])

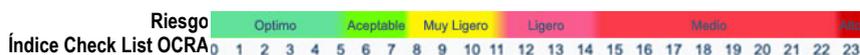


Figura 4.25: Escala de color para el riesgo asociado al Índice Check List Ocra.

4.4.2.2.10 Descripción de procedimientos adicionales para el cálculo de índice Check List OCRA.

El procedimiento de obtención del Índice Check List OCRA descrito hasta el momento corresponde a los pasos necesarios para determinar el riesgo intrínseco de un puesto.

A continuación se detallan otros posibles tipos de evaluación que el método contempla a partir de la implementación realizada por la Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM)

Evaluación del riesgo asociado a un trabajador que ocupa un único puesto:

Para el cálculo de Índice Check List OCRA de un trabajador que ocupa un único puesto, se deberá aplicar el mismo procedimiento descrito para la obtención del Índice Check List OCRA de un puesto o riesgo intrínseco de un puesto.

En este caso, la duración neta del movimiento repetitivo se corresponde con el tiempo real de ocupación del puesto por el trabajador concreto en evaluación. El multiplicador de duración resultante de dicha duración neta aumentará o disminuirá el riesgo debido a la suma de los diferentes factores (recuperación, frecuencia, fuerza y adicionales) en función del tiempo que el trabajador realmente realiza la tarea/s repetitiva.

La descripción del riesgo asociado al trabajador se obtendrá, al igual que para el puesto, mediante la consulta de la Tabla de clasificación de los resultados de Índice

Check List OCRA (Tabla 4.63)

Evaluación del riesgo intrínseco asociado a un conjunto de puestos:

Seguidamente se enumeran los pasos necesarios para la obtención del Índice Check List OCRA global de un conjunto de puestos:

- Calcular el riesgo intrínseco correspondiente a cada uno de los puestos, es decir, el Índice Check List OCRA de cada puesto de forma independiente.
- El Índice Check List OCRA global de los puestos será igual al valor medio de los Índices Check List OCRA de los puestos.
- La consulta de la tabla de clasificación de resultados (Tabla 4.63) para la puntuación del Índice Check List OCRA global describirá el riesgo asociado al conjunto de puestos.
- La consulta de la (Tabla 4.63) para los Índices Check List OCRA de los diferentes puestos describirá el riesgo de cada puesto de forma individual y permitirá analizar la aportación al riesgo global de cada uno de ellos.

La siguiente fórmula expresa el cálculo del Índice Check List OCRA global para un conjunto de puestos:

$$ICKL_OCRA_global = \frac{\sum_{p=1}^N ICKL_OCRA(p)}{N}$$

donde:

Índice CKL_OCRA_global es el valor del índice Check Lista Ocra para todos los puestos.

Índice CKL_OCRA(p) es el valor del Índice Check List Ocra para el puesto *p*.

N es el número de puestos.

Evaluación del riesgo asociado a un trabajador que rota entre un conjunto de puestos:

Para determinar el índice de riesgo asociado a un trabajador que rota entre un conjunto de puestos se distinguirán dos casos:

El trabajador cambia de puestos al menos una vez cada hora.

En este caso los pasos a seguir serán los siguientes:

- Cálculo del Índice Check List OCRA de cada puesto de forma independiente.
- Se deberá determinar el tiempo de ocupación real (sin pausas y/o descansos) de cada puesto (es posible utilizar porcentajes, si se optara por dicha opción se debería dividir por 100 en la expresión de cálculo del Índice Check List OCRA global del trabajador mostrada a continuación).

$$PRO(p,t) = \frac{TRO(p,t)}{DNM} * 100$$

donde:

PRO(p,t) es el porcentaje de tiempo real de ocupación del puesto *p* por el trabajador *t*.

TRO(p,t) es el tiempo real de ocupación del puesto *p* descontadas las pausas.

DNM es la duración neta del movimiento repetitivo.

- La siguiente expresión muestra el cálculo de Índice Check List OCRA global del trabajador :

$$ICKKOCRA_global(t) = \frac{\sum_{p=1}^N ICKKOCRA(p) * PRO(p,t)}{100}$$

donde:

ICKKOCRA_{global}(t) es el índice Check List Ocro global de trabajador t.

ICKKOCRA(p) es el índice Check List Ocro para el puesto p.

POR(p,t) es el porcentaje de tiempo de ocupación real del puesto p por el trabajador t .

- Finalmente la consulta de la tabla de clasificación de resultados Tabla 4.63 para la puntuación del índice Check List OCRA global del trabajador describirá el riesgo asociado al trabajador al rotar entre los puestos así como las acciones propuestas por el método.
- La consulta de la Tabla 4.63 para cada Índice Check List OCRA de los diferentes puestos describirá el riesgo de cada puesto de forma individual y permitirá analizar la aportación al riesgo global de cada uno de ellos.

Se recomienda como complemento al método, analizar el producto

$$ICKKOCRA(p) * PRO(p,t)$$

con el fin de determinar qué puesto, bien por su riesgo intrínseco, bien por el porcentaje de ocupación, resulta más significativo para el riesgo global del trabajador. Este análisis adicional resultará útil para orientar futuros estudios sobre los puestos más críticos

El trabajador cambia de puesto menos de una vez cada hora.

A continuación se describe el procedimiento de cálculo para la obtención del Índice Check List OCRA del trabajador:

- Cálculo del Índice Check List OCRA de cada puesto de forma independiente.
- Se deberá determinar el tiempo real de ocupación (sin pausas y/o descansos) de cada puesto *TRO(p,t)* en minutos y obtener el valor del multiplicador correspondiente consultando la Tabla 4.62 *DM(TRO(p,t))*.
- Cálculo del riesgo asociado al trabajador en cada puesto de forma independiente. Dicho valor se identificará en lo sucesivo como índice Check List Ocro parcial del trabajador.

$$ICKKOCRA_parcial(p,t) = (FR + FFr + FF + FP + FA) * DM(TRO(p,t))$$

donde:

ICKKOCRA_{parcial}(p,t) es el índice Check List Ocro parcial del trabajador t en el puesto p.

FR es el factor de recuperación.

FF es el factor de frecuencia.

FF es el factor de fuerza.

FP es el factor de postura.

FA son los factores adicionales.

DM es el multiplicador de duración correspondiente al tiempo real de ocupación del puesto.

- Determinar el Índice Check List Ocra máximo de los puestos (obtenidos en el primer punto).

$$MAXICKLOCRAP = \max(ICKLOCRA(p))_{\forall p \in P}$$

donde:

MAXICKLOCRAP es el máximo índice Check List Ocra de los puestos.

ICKLOCRA(p) es el índice Check List Ocra del puesto *p*.

- Determinar el máximo índice Check List Ocra parcial del trabajador.

$$MAXICKLOCRAparcial(t) = \max(ICKLOCRAparcial(p,t))_{\forall p \in P}$$

- Finalmente se deberá aplicar la siguiente fórmula para el cálculo del Índice Check List Ocra global del trabajador al rotar menos de una vez cada hora:

$$ICKLOCRAglobal(t) = MAXICKLOCRAparcial(t) + (MAXICKLOCRAP - MAXICKLOCRAparcial(t)) * M$$

donde:

ICKLOCRAglobal(T) es el índice Check List Ocra global del trabajador.

MAXICKLOCRAparcial(T) es el máximo índice Check List Ocra parcial del trabajador.

MAXICKLOCRA es el máximo índice Check List Ocra de los puestos.

$$M = \frac{\sum_{p=1}^N ICKLOCRA(p) * PRO(p,t)}{MAXICKLOCRAP * 100}$$

donde:

ICKLOCRA(p) es el índice Check List Ocra para el puesto *p*.

mult(TRO(p,t)) es el valor del multiplicador correspondiente al tiempo ocupado por el trabajador en el puesto *t*. porcentaje de ocupación del puesto *p*.

MAXICKLOCRA es el máximo índice Check List Ocra de los puestos.

- La consulta de la tabla de clasificación de resultados Tabla 4.63 para la puntuación del índice Check List OCRA global del trabajador describirá el riesgo asociado al trabajador al rotar entre los puestos así como las acciones propuestas por el método.

La consulta de la Tabla 4.63 para cada Índice Check List OCRA de los diferentes

puestos describirá el riesgo de cada puesto de forma individual y permitirá analizar la aportación al riesgo global de cada uno de ellos.

Los valores máximos calculados permitirán determinar:

- El puesto con mayor riesgo intrínseco. (*MAXICKLOCRAP*)
- El puesto en el que el índice de riesgo para el trabajador es mayor, debido a las características propias del puesto y/o al tiempo de ocupación del puesto por el trabajador (*MAXICKLOCRAP**parcial(t)*).

4.4.2.2.11 Conclusiones

El método Check List OCRA permite la realización de estudios preliminares del riesgo asociado a la realización de movimientos repetitivos.

El método permite al evaluador detectar la necesidad y urgencia de realizar análisis más detallados ante la existencia de riesgos por movimientos repetitivos. Por otra parte, el análisis de los factores que configuran el resultado final del método permite detectar los aspectos más críticos y enfocar evaluaciones ergonómicas futuras.

4.4.3 El método Sue Rodgers

El método de evaluación de Sue Rodgers [Rodgers, 86b; Rodgers, 92] permite predecir la fatiga muscular provocada por la interacción del nivel de esfuerzo (grado de esfuerzo exigido por la tarea a cada grupo muscular), la duración del esfuerzo antes de la relajación (lapso de tiempo en que el grupo muscular se dedica a una tarea sin descanso, aunque sea momentáneo) y la frecuencia de activación de los músculos por minuto para cada grupo muscular. El método es apropiado para la evaluación puestos caracterizados por la repetitividad cuando la frecuencia del esfuerzo observado se encuentra entre 1 y 15 esfuerzos por minuto, llegando a su mayor precisión en el establecimiento de probabilidades de fatiga en esfuerzos que se realizan entre 1 a 10 por minutos. Cabe señalar que el método no es apropiado para evaluar puestos con una elevada repetitividad de la tarea, con más de 15 esfuerzos por minuto para el trabajador. El método identifica las tareas que conllevan riesgo ergonómico para los distintos grupos musculares y establece la urgencia (baja, moderada, alta) de la acción correctiva para situar al puesto en niveles ergonómicamente aceptables. A partir de la valoración del riesgo para cada grupo muscular el evaluador podrá determinar las acciones correctivas más adecuadas, prestando especial atención a la corrección de la actividad de los grupos musculares para los que se haya obtenido una prioridad de cambio alta.

El método valora de 1 a 3 (Ligero=1, Moderado=2, Fuerte=3) el nivel de esfuerzo, la duración y la frecuencia de los movimientos de los grupos musculares. Tras asignar los correspondientes valores a los tres factores de riesgo esfuerzo-duración-frecuencia para cada grupo muscular (columnas 1, 2 y 3 de la Tabla 4.64), el método determina la Severidad del puesto o la Urgencia de la acción correctiva en cada grupo muscular (columna 4 de la Tabla 4.64) mediante la consulta de la Tabla 4.65.

El siguiente formulario junto con la consulta de la Tabla 4.65 puede utilizarse para la aplicación del método Sue Rodger.

ANÁLISIS SUE RODGERS				
Página ___ de ___				
Preparado por:			Fecha:	
Planta:		Departamento:		
Descripción de la Operación:				
Operación N°:			Tiempo de ciclo:	
Fase Revisión: Diseño <input type="checkbox"/> Construcción <input type="checkbox"/> Lanzamiento <input type="checkbox"/> Funcionamiento <input type="checkbox"/>				
Grupo muscular	Nivel de Esfuerzo	Duración del Esfuerzo	Esfuerzos / Minuto	Prioridad
	1 = Ligero 2 = Moderado 3 = Duro	1 = < 6 seg. 2 = 6-20 seg. 3 = >20 seg.	1 = < 1 / min. 2 = 1 a 5 / min. 3 = > 5 / min.	Ver Tabla 4.65
Cuello				
Hombros				
Espalda				
Brazos/Codos				
Muñecas/Manos/ Dedos				
Piernas/ Rodillas				
Tobillos/ Pies/ Dedos				

Tabla 4.64: Formulario para la aplicación del método Sue Rodgers.

Prioridad de acción	Combinación de esfuerzo-duración-frecuencia	Prioridad de acción	Combinación de esfuerzo-duración-frecuencia
Moderada Severidad = 5 Color amarillo.	1.2.3	Alta Severidad = 7 Color rojo.	2.2.3
	1.3.2		3.1.3
	2.1.3		3.2.1
	2.2.2		3.2.2
	2.3.1		3.2.3
	2.3.2		3.3.2
	3.1.2		3.3.1
El resto de combinaciones corresponden a una Prioridad Baja de acción. Severidad = 2; Color verde.			

Tabla 4.65: Tabla de asignación de prioridad en función de los valores de esfuerzo-duración-frecuencia.

El análisis puede limitarse a los grupos musculares identificados a priori como de mayor riesgo por el evaluador, sin embargo, dicha opción podría enmascarar problemas ergonómicos en grupos musculares no analizados.

A continuación se describe con detalle los pasos de aplicación del método Sue Rodgers:

4.4.3.1 Valoración del nivel de esfuerzo

El método comienza con la puntuación o valoración del nivel de esfuerzo para cada grupo muscular (columna 1 de la Tabla 4.64). Al nivel de esfuerzo se le asigna

una puntuación de 1 si es ligero, 2 si es moderado y 3 si se considera fuerte. Para determinar si el nivel de esfuerzo asociado a los distintos grupos musculares es ligero, moderado o fuerte se pueden consultar la Tabla 4.66 y la Tabla 4.65 que incluyen descripciones cualitativas para cada grupo muscular que pueden guiar a la hora de determinar el tipo de esfuerzo requerido en cada grupo muscular.

Grupo muscular	Nivel de esfuerzo		
	Ligero (1)	Moderado (2)	Fuerte (3)
Cuello	Cabeza girada parcialmente a un lado, hacia atrás o ligeramente hacia delante.	Cabeza girada a un lado. Cabeza completamente hacia atrás. Cabeza hacia delante unos 20°.	Igual que en moderado, pero con fuerza o peso. Cabeza estirada hacia delante.
Hombros	Brazos ligeramente despegados. Brazos extendidos sobre algún apoyo.	Brazos despegados del cuerpo, sin apoyo. Trabajar por encima de la cabeza.	Ejercer fuerzas o sostener peso con las manos despegadas del cuerpo o por encima de la cabeza.
Espalda	Espalda doblada a un lado o inclinada. Espalda arqueada.	Espalda inclinada hacia delante, sin peso. Elevar cargas pesadas cerca del cuerpo. Trabajar por encima de la cabeza.	Subir cargas o ejercer fuerza con la espalda girada. Fuerza elevada o carga mientras se está inclinado.
Brazos/Codos	Brazos despegados del cuerpo, sin carga. Elevar cargas ligeras cerca del cuerpo.	Girar el brazo mientras se hace una fuerza moderada.	Ejercer fuerzas grandes con rotación. Elevar cargas con los brazos extendidos.
Manos/ Dedos/ Muñecas	Fuerzas o pesos leves que se cogen junto al cuerpo. Muñecas derechas. Agarre cómodo.	Mangos demasiado anchos o estrechos. Ángulos moderados en la muñeca, especialmente de flexión. Uso de guantes con fuerza moderada.	Agarre punzante. Ángulos grandes de giro en la muñeca. Superficies deslizantes.
Piernas/ Rodillas/ Tobillos/ Pies/ Dedos	Permanecer de pie. Andar sin inclinarse o girarse. Peso repartido entre ambos pies.	Inclinación hacia delante. Inclinarse sobre una mesa. Peso sobre un solo lado. Pivotar mientras se ejerce fuerza.	Ejercer fuerzas grandes empujando o elevando cargas. Agacharse mientras se ejerce una fuerza.

Tabla 4.66: Descripción de niveles de esfuerzo para cada grupo muscular.

Grupos mayores de músculos	Nivel de esfuerzo			
	Ligero (1)	Moderado (2)		Fuerte (3)
	Poca fuerza y postura moderada	Poca fuerza y postura forzada	Mucha fuerza y postura moderada	Mucha fuerza con postura forzada
Espalda	Tirar/empujar con poca fuerza y postura moderada.	Empujar o tirar con fuerza moderada o postura difícil, pivotar al aplicar fuerza.		Aplicar fuerza girando el tronco, mucha fuerza o carga inclinado, alcance > de 80 cm.
Rodillas /Tobillos	Tirar/empujar con poca fuerza y postura moderada.	Empujar/tirar con fuerza moderada o postura difícil, pivotar al aplicar fuerza.		Aplicando mucha fuerza al empujar o tirar, agachado aplicando fuerza.
Cuello	Movilidad de la cabeza: -Rotación lateral completa -Inclinación anterior o posterior.	Movilidad de la cabeza: -Rotación lateral completa -Inclinación anterior o posterior.		Igual que el moderado pero con fuerza o peso. Cabeza estirada hacia delante.
Hombros	Brazos ligeramente separados del costado o extendidos con algún apoyo.	Brazos alejados del cuerpo, sin apoyo o por encima de la cabeza.		Aplicar fuerza con los brazos extendidos o por encima de la cabeza.
Brazos/ Muñecas	Empuñadura de herramienta cómoda, poca fuerza cargando junto al cuerpo.	Rotación de antebrazo con fuerza moderada, ángulo de muñeca moderado con flexión.		Mucha fuerza aplicada con rotación, ángulos extremos de muñeca.
Dedos pulgares	Empujar con el pulgar o los dedos con poca fuerza y postura moderada.	Agarre con los dedos, brazos abiertos o cerrados, usando guantes con fuerza moderada.		Agarre de pinzas, superficies resbaladizas, empujar con el pulgar o los dedos con mucha fuerza.

Tabla 4.67: Descripción de niveles de esfuerzo para los grupos mayores de músculos.

4.4.3.2 Valoración de la duración del Esfuerzo.

Determinado el valor del nivel de esfuerzo para cada grupo muscular se deberá establecer la puntuación de la duración del esfuerzo para cada grupo muscular (columna 2 de la Tabla 4.64) mediante la consulta de la Tabla 4.68: Si los valores de la duración estuvieran cerca de la frontera de una de las tres posibles puntuaciones, se deberá asignar la puntuación más alta.

Puntuación	Duración para un nivel de esfuerzo específico
1	< 6 segundos
2	entre 6 y 20 segundos
3	> 20 segundos

Tabla 4.68: Valoración de la duración del esfuerzo.

4.4.3.3 Valoración de la frecuencia del Esfuerzo

Obtenida la puntuación para los distintos grupos musculares correspondientes al nivel de esfuerzo y a la duración del esfuerzo, se deberá determinar la puntuación correspondiente a la frecuencia del movimiento asociada a cada tupla esfuerzo-

duración para grupo muscular (columna 3 de la Tabla 4.64). Para ello se deberá consultar la siguiente tabla:

Puntuación	Esfuerzos por minuto
1	< 1 por minuto
2	1 a 5 por minuto
3	> 5 y hasta 15 por minuto

Tabla 4.69: Valoración de la frecuencia del esfuerzo.

4.4.3.4 Obtención de la severidad asociada a cada parte del cuerpo

La severidad o dureza de las condiciones del puesto de trabajo para cada grupo muscular se obtendrá a partir sus puntuaciones del nivel de esfuerzo, la duración del esfuerzo y la frecuencia del esfuerzo (Tabla 4.65). El valor de severidad obtenido indicará la prioridad o urgencia de las acciones correctivas necesarias.

Para cada grupo muscular, si se obtiene una prioridad de cambio alta, se deberán tomar medidas correctivas cuanto antes con el objetivo de reducir el riesgo potencial de lesión músculo-esquelética para el trabajador en dicha zona. Si por el contrario se obtiene una prioridad de cambio moderada o baja se recomienda realizar un seguimiento periódico del puesto que garantice que las condiciones de trabajo actualmente aceptables no empeoran y se mantienen dentro de los límites ergonómicos aceptables.

ANÁLISIS SUE RODGERS				
Página 4 de 4				
Preparado por: Sabina Asensio Cuesta			Fecha: 22/07/08	
Planta: Montaje			Departamento: Ergonomía	
Descripción de la Operación: Colocación y apretado de tornillos en el interior del vehículo				
Operación Nº: 2			Tiempo de ciclo:	
Fase Revisión: Diseño <input type="checkbox"/> Construcción <input type="checkbox"/> Lanzamiento <input type="checkbox"/> Funcionamiento <input checked="" type="checkbox"/>				
Parte del cuerpo	Nivel de Esfuerzo	Duración del Esfuerzo	Esfuerzos / Minuto	Prioridad
	1 = Ligero 2 = Moderado 3 = Duro	1 = < 6 seg. 2 = 6-20 seg. 3 = >20 seg.	1 = < 1 / min. 2 = 1 a 5 / min. 3 = > 5 / min.	Severidad
Cuello	1	2	3	5
Hombros	1	3	2	5
Espalda	2	2	3	7
Brazos/Codos	3	1	3	7
Muñecas/Manos/ Dedos	2	2	2	5
Piernas/ Rodillas	1	2	1	2
Tobillos/ Pies/ Dedos	1	1	1	2

Tabla 4.70: Ejemplo de aplicación de método Sue Rodgers para la evaluación de un puesto de trabajo.

En el ejemplo mostrado en la Tabla 4.70 correspondiente a la evaluación de un

puesto de trabajo caracterizado por la repetitividad de movimientos. Se ha obtenido que el puesto resulta altamente perjudicial para la espalda y los brazos, y por tanto debería rediseñarse adoptando medidas correctivas que actúen especialmente sobre la mejora de las condiciones de trabajo de la espalda y los brazos/codos del trabajador. Respecto al cuello, los hombros y las muñecas/manos/dedos deberían realizarse evaluaciones periódicas para garantizar que continúan bajo condiciones ergonómicas aceptables o de riesgo moderado. Por último, las piernas/rodillas y los tobillos/pies/dedos parecen no presentar riesgo de lesiones, habiéndose obtenido una prioridad de cambio baja.

4.5. Métodos para la evaluación de factores psicosociales

Tal y como se deriva de la revisión bibliográfica realizada (ver capítulo 3) los factores psicosociales parecen estar relacionados con los TME. Por ello es necesario completar las evaluaciones centradas en factores de riesgo directamente relacionados con los TME (repetitividad, levantamiento de cargas, posturas forzadas, etc.) con evaluaciones de los factores psicosociales.

En la actualidad existen diferentes métodos de evaluación de los factores psicosociales, por ejemplo el método LEST que se describe en el apartado siguiente, que es un método global de evaluación de las condiciones ergonómicas de trabajo incluye la evaluación de la carga mental a la que se exponen los trabajadores. Destaca también el método ISTAS 21 [Moncada et al., 02] que es la versión española del método danés CoPsoQ [Arbejdsmiljøinstituttet, 00; Kristensen et al., 05].

4.6. Métodos para la evaluación de múltiples factores de riesgo

Entre las propuestas para el análisis del riesgo de múltiples factores más consolidadas se encuentra el método LEST (Laboratoire de Economie et Sociologie du Travail) [Guelaud et al., 77], en cuya descripción se centra el presente apartado, o métodos como FAGOR [FAGOR, 87], RENUR o RENAUL [Regie Nationale Des Usines Renault (Boulogne-Billancourt) Conditions De Travail (Service), 76], ANACT [Piotet et al., 84] o EWA (*Ergonomic Workplace Analysis*) [Ahonen et al., 89]. Dichos métodos permiten evaluar las condiciones de trabajo de forma global, es decir, analizan tanto factores de riesgo físicos, como ambientales y psicosociales (Tabla 4.78). Si bien dichos métodos suponen aportaciones importantes al problema de la valoración global de los riesgos asociados a los TME, hasta el momento persiste el problema de la escasez de estudios científicos que determinen la interacción entre los factores de riesgo y su importancia relativa [Li et al., 99].

RENAULT	FAGOR	ANACT	EWA
Concepción del puesto Altura y alejamiento del punto De operación Alimentación- evacuación de piezas Condiciones de espacio Mando y señales Seguridad Entorno físico Ambiente térmico Ambiente sonoro Iluminación artificial Vibraciones Higiene industrial Aspecto del puesto Carga física Postura principal Postura más desfavorable Esfuerzo de trabajo Postura de trabajo Esfuerzo de manutención Postura de manutención Carga mental Operaciones mentales Nivel de atención Autonomía Autonomía individual Autonomía de grupo Relaciones Independientes del trabajo Dependientes del trabajo Repetitividad Repetitividad del ciclo Contenido del trabajo Potencial Responsabilidad Interés del trabajo	Ambiente físico Iluminación Ruido Ambiente térmico Ambiente atmosférico Carga física Postura habitual Habilidad manual Organización Horario de trabajo Tiempo de ciclo Tiempo de autonomía Espacios y grupos Definición del puesto Material que utiliza prendas de seguridad del puesto Riesgo de accidente Opinión del operador	Contenido del trabajo Puesto de trabajo Entorno del puesto Distribución del trabajo Ejecución de las tareas Evaluación- promoción del personal Relaciones sociales Individuo y grupos Estilo de mando	Puesto de trabajo Actividad física general Levantamiento de cargas Postura de trabajo y movimientos Riesgo de accidente Contenido del trabajo Autonomía Comunicación del trabajo y contactos personales Toma de decisiones Repetitividad del trabajo Atención Iluminación Ambiente térmico Ruido

Tabla 4.71: Factores de riesgo analizados por los métodos generalista RENAULT, FAGOR, ANACT y EWA (fuentes [Mondelo et al., 01; Dalmáu-Pons et al., 08]).

4.6.1 El método LEST

El método LEST pretende la evaluación de las condiciones de trabajo de la forma más objetiva y global posible, estableciendo un diagnóstico final que indique si cada una de las situaciones consideradas en el puesto es satisfactoria, molesta o nociva.

El método es de carácter global considerando cada aspecto del puesto de trabajo de manera general. No se profundiza en cada uno de esos aspectos, si no que se obtiene una primera valoración que permite establecer si se requiere un análisis más profundo con métodos específicos. El objetivo es, según los autores [Guelaud et al., 77], evaluar el conjunto de factores relativos al contenido del trabajo que pueden tener repercusión tanto sobre la salud como sobre la vida personal de los

trabajadores. Antes de la aplicación del método deben haberse considerado y resuelto los riesgos laborales referentes a la Seguridad e Higiene en el Trabajo dado que no son contemplados por el método.

La información que es preciso recoger para aplicar el método tiene un doble carácter objetivo-subjetivo. Por un lado se emplean variables cuantitativas como la temperatura o el nivel sonoro, y por otra, es necesario recoger la opinión del trabajador respecto a la labor que realiza en el puesto para valorar la carga mental o los aspectos psicosociales del mismo. Es pues necesaria la participación en la evaluación del personal implicado.

A pesar de tratarse de un método general no puede aplicarse a la evaluación de cualquier tipo de puesto. En principio, el método se desarrolló para valorar las condiciones laborales de puestos de trabajo fijos del sector industrial, en los que el grado de cualificación necesario para su desempeño es bajo. Algunas partes del método (ambiente físico, postura, carga física...) pueden ser empleadas para evaluar puestos con un nivel de cualificación mayor del sector industrial o servicios, siempre y cuando el lugar de trabajo y las condiciones ambientales permanezcan constantes [Pérez-Morral, 08].

Para determinar el diagnóstico el método considera 16 variables agrupadas en 5 aspectos (dimensiones): entorno físico, carga física, carga mental, aspectos psicosociales y tiempo de trabajo. La evaluación se basa en las puntuaciones obtenidas para cada una de las 16 variables consideradas.

Las dimensiones y variables consideradas son:

ENTORNO FÍSICO	CARGA FÍSICA	CARGA MENTAL	ASPECTOS PSICOSOCIALES	TIEMPOS DE TRABAJO
Ambiente térmico	Carga estática	Apremio de tiempo	Iniciativa	Tiempo de trabajo
Ruido		Complejidad	Estatus social	
Iluminación		Atención	Comunicaciones	
Vibraciones			Relación con el mando	

Tabla 4.72: Dimensiones y variables consideradas en la implementación del método.

Mediante los datos recogidos en la observación del puesto (Tabla 4.74 a Tabla 4.78) y el empleo de las tablas de puntuaciones [Guelaud et al., 77] se obtienen las valoraciones de cada variable y dimensión. La valoración obtenida oscila entre 0 y 10 y la interpretación de dichas puntuaciones se realiza según la siguiente tabla:

SISTEMA DE PuntuACIÓN	
0, 1, 2	Situación satisfactoria
3, 4, 5	Débiles molestias. Algunas mejoras podrían aportar más comodidad al trabajador
6, 7	Molestias medias. Existe riesgo de fatiga.
8, 9	Molestias fuertes. Fatiga
10	Nocividad

Tabla 4.73: Sistema de puntuación del método LEST

Una representación de los resultados en forma de histograma permite tener una visión rápida de las condiciones de trabajo y establecer así un primer diagnóstico. Conociendo cuáles son los elementos más desfavorables de las condiciones de trabajo en forma globalizada, se pueden establecer prioridades a la hora de intervenir sobre los distintos factores observados.

Cabe señalar que el método LEST no obtiene un único valor que represente el riesgo global al que se expone el trabajador, sino que ofrece 5 valores o niveles de riesgo, uno por cada una de las dimensiones de riesgo que analiza. Si bien todas las dimensiones obtiene un valor en la misma escala (Tabla 4.73).

La aplicación del método comienza con la observación de la actividad desarrollada por el trabajador en la que deberán recogerse los datos necesarios para la evaluación. En general, para la toma de datos objetivos será necesaria la utilización de instrumental adecuado como: un psicómetro para la medición de temperaturas, un luxómetro para la medición de la intensidad luminosa, un sonómetro para la medición de niveles de intensidad sonora, un anemómetro para evaluar la velocidad del aire en el puesto e instrumentos para la medición de distancias y tiempos como cintas métricas y cronómetros.

CARGA FÍSICA	
CARGA ESTÁTICA	Las posturas más frecuentemente adoptadas por el trabajador así como su duración en minutos por hora de trabajo
CARGA DINÁMICA	<p>Respecto al esfuerzo realizado en el puesto El peso en Kg. de la carga que provoca el esfuerzo. Si esfuerzo realizado en el puesto de trabajo es Continuo o Breve pero repetido Si el esfuerzo es continuo se indicará la duración total del esfuerzo en minutos por hora. Si los esfuerzos son breves pero repetidos se indicará las veces por hora que se realiza el esfuerzo</p> <p>Respecto al esfuerzo de aprovisionamiento La distancia recorrida con el peso en metros, la frecuencia por hora del transporte y el peso transportado en Kg.</p>

Tabla 4.74: Datos requeridos por el método LEST para la evaluación de la dimensión Carga Física.

ENTORNO FÍSICO	
AMBIENTE TÉRMICO	Velocidad del aire en el puesto de trabajo Temperatura del aire seca y húmeda Duración de la exposición diaria a estas condiciones Veces que el trabajador sufre variaciones de temperatura en la jornada
RUIDO	El nivel de atención requerido por la tarea El número de ruidos impulsivos a los que está sometido el trabajador
AMBIENTE LUMINOSO	El nivel de iluminación en el puesto de trabajo El nivel (medio) de iluminación general del taller El nivel de contraste en el puesto de trabajo El nivel de percepción requerido en la tarea Si se trabaja con luz artificial Si existen deslumbramientos
VIBRACIONES	La duración diaria de exposición a las vibraciones El carácter de las vibraciones

Tabla 4.75: Datos requeridos por el método LEST para la evaluación de la dimensión Entorno

físico.

CARGA MENTAL	
PRESIÓN DE TIEMPOS	Tiempo en alcanzar el ritmo normal de trabajo Modo de remuneración del trabajador Si el trabajador puede realizar pausas Si el trabajo es en cadena Si deben recuperarse los retrasos Si en caso de incidente puede el trabajador parar la máquina o la cadena Si el trabajador tiene posibilidad de ausentarse momentáneamente de su puesto de trabajo fuera de las pausas previstas Si tiene necesidad de hacerse reemplazar por otro trabajador Las consecuencias de las ausencias del trabajador
ATENCIÓN	El nivel de atención requerido por la tarea El tiempo que debe mantenerse el nivel de atención referido La importancia de los riesgos que puede acarrear la falta de atención La frecuencia con que el trabajador sufre dichos riesgos La posibilidad técnica de hablar en el puesto El tiempo que puede el trabajador apartar la vista del trabajo por cada hora dado el nivel de atención El número de máquinas a las que debe atender el trabajador El número medio de señales por máquina y hora es Intervenciones diferentes que el trabajador debe realizar Duración total del conjunto de las intervenciones por hora
COMPLEJIDAD	Duración media de cada operación repetida Duración media de cada ciclo

Tabla 4.76: Datos requeridos por el método LEST para la evaluación de la dimensión Carga Mental.

ASPECTOS PSICOSOCIALES	
INICIATIVA	Si el trabajador puede modificar el orden de las operaciones que realiza Si el trabajador puede controlar el ritmo de las operaciones que realiza Si puede adelantarse Si el trabajador controla las piezas que realiza Si el trabajador realiza retoques eventuales La norma de calidad del producto fabricado Si existe influencia positiva del trabajador en la calidad del producto La posibilidad de cometer errores En caso de producirse un incidente quién debe intervenir Quién realiza la regulación de la máquina
COMUNICACIÓN CON LOS DEMÁS TRABAJADORES	El número de personas visibles por el trabajador en un radio de 6 metros Si el trabajador puede ausentarse de su trabajo Qué estipula el reglamento sobre el derecho a hablar La posibilidad técnica de hablar en el puesto La necesidad de hablar en el puesto Si existe expresión obrera organizada
RELACIÓN CON EL MANDO	La frecuencia de las consignas recibidas del mando en la jornada La amplitud de encuadramiento en primera línea La intensidad del control jerárquico La dependencia de puestos de categoría superior no jerárquica
STATUS SOCIAL	La duración del aprendizaje del trabajador para el puesto La formación general del trabajador requerida

Tabla 4.77: Datos requeridos por el método LEST para la evaluación de la dimensión Aspectos Psicosociales.

TIEMPOS DE TRABAJO	
CANTIDAD Y ORGANIZACIÓN DEL TIEMPO DE TRABAJO	Duración semanal en horas del tiempo de trabajo Tipo de horario del trabajador Norma respecto a horas extraordinarias Si son tolerados los retrasos horarios Si el trabajador puede fijar las pausas Si puede fijar el final de su jornada Los tiempos de descanso

Tabla 4.78: Datos requeridos por el método LEST para la evaluación de la dimensión Tiempos de trabajo.

5

**Metaheurísticas para la generación de
agendas de rotación de puestos de trabajo**

5. METAHEURÍSTICAS PARA LA GENERACIÓN DE AGENDAS DE ROTACIÓN DE PUESTOS DE TRABAJO

5.1. Introducción

La obtención de una agenda de rotación no es una tarea sencilla debido al elevado número de criterios a considerar para la correcta asignación de los trabajadores a los diferentes puestos, y a la gran cantidad de restricciones que es necesario imponer para obtener un resultado práctico y ajustado a las posibilidades reales del sistema productivo.

El problema planteado pertenece a la categoría de problemas de optimización combinatoria [Papadimitriou et al., 82], concretamente al grupo de *Timetabling and Scheduling problems* (Problemas de horarios y secuenciación), en el que se pretende localizar la mejor configuración de un grupo de variables que, cumpliendo ciertas restricciones, minimicen (o en su caso maximicen) una función objetivo. El tamaño del espacio de búsqueda de soluciones dependerá del número de rotaciones y del número de puestos a incluir en la rotación, pero en general, la búsqueda de soluciones aceptables es un problema complejo, sobre todo cuando el número de restricciones impuestas es elevado y cuando, como en el caso propuesto, el orden en que se asignan los puestos a los trabajadores influye en el resultado obtenido. Según afirma [Tharmmaphornphila et al., 07] el problema de la generación de agendas de rotación es complejo debido a que el espacio de soluciones es grande. Aunque existen técnicas como la programación entera (*Integer Programming*), aplicables a la resolución de este tipo de problemas [Carnahan et al., 00; Tharmmaphornphila et al., 04], el uso de heurísticas y metaheurísticas [Glover, 86a] en los *Timetabling Problems* (problemas de horarios) proporciona soluciones aceptables sin prolongar excesivamente el tiempo de cálculo.

La teoría de la complejidad nos indica que, para los problemas de generación de agendas de rotación de cierta envergadura y con un número suficiente de restricciones, es muy improbable encontrar métodos exactos de resolución. Por ejemplo, [Tharmmaphornphila et al., 03] propone un modelo matemático para la creación de agendas de rotación que minimicen la exposición al ruido de los trabajadores, sin embargo, señala como limitación del modelo el incremento de tiempo de proceso en función del número de tareas, trabajadores y frecuencia de las rotaciones. Para un problema con n trabajadores, n tareas (puestos) y m periodos (rotaciones), el número total de posibles formas de rotación de los trabajadores es de $(n!)^m$ (por ejemplo, para 5 trabajadores, 5 puestos y 5 periodos, el número de soluciones es de 24.883.200.000). Debido al tamaño del espacio de búsqueda, incluso para problemas de tamaño pequeño no es posible enumerar todas las posibles soluciones (en un tiempo aceptable) y por tanto se hace necesario desarrollar técnicas para la generación de agendas de rotación que incluyan procedimientos heurísticos o metaheurísticos como técnicas capaces de localizar

soluciones aceptables (sub-óptimos) en tiempos razonables de cálculo.

Respecto a la aplicación de heurísticas y metaheurísticas al problema de la generación de agendas de rotación de puestos de trabajo, [Seçkiner et al., 07a] confirma la importancia de la propuesta de [Carnahan et al., 00], considerada por dicho autor, como un estudio clave para la modelización y la resolución del problema de la generación de agendas de rotación, así como la primera aproximación seria al problema. La propuesta de [Carnahan et al., 00] incluye la aplicación de un AG para la obtención de agendas de rotación que prevengan a los trabajadores de posibles lesiones de espalda (dicha propuesta se describe con detalle en el capítulo 6). Otras metodologías desarrolladas para la obtención de agendas de rotación mediante procedimientos heurísticos o metaheurísticos destacadas son [Nanthavanij et al., 01; Kullpattaranirun et al., 05; Yaoyuenyong et al., 06; Tharmmaphornphilas et al., 07; Seçkiner et al., 07b]. Cabe subrayar la escasez de literatura al respecto, así como la relativamente reciente publicación de los estudios existentes, lo cual pone de manifiesto el carácter novedoso e innovador de la metodología propuesta. [Nanthavanij et al., 01; Kullpattaranirun et al., 05], al igual que [Carnahan et al., 00], estudian la aplicación de algoritmos genéticos para la obtención de agendas de rotación, pero en su caso, centrados en la reducción de la exposición al ruido diario de los trabajadores. [Yaoyuenyong et al., 06] desarrolla tres algoritmos heurísticos con el mismo propósito de reducción de la exposición al ruido de los trabajadores. [Tharmmaphornphilas et al., 07] aplica procedimientos heurísticos para la generación de agendas de rotación que, bien minimicen las lesiones de espalda de los trabajadores, bien reduzcan el número de días perdidos por bajas debidas a este tipo de dolencias. [Seçkiner et al., 07a] propone un algoritmo de recocido simulado para la generación de agendas de rotación cuyo objetivo es minimizar la carga de trabajo para cada trabajador. El mismo autor amplía su investigación sobre la aplicación de metaheurísticas al problema de las agendas de rotación de puestos de trabajo, con el desarrollo de dos algoritmos de hormigas para la obtención de agendas de rotación que distribuyan la carga de trabajo de forma equitativa entre los trabajadores [Seçkiner et al., 07b]. Posteriormente, el autor compara los resultados obtenidos mediante la aplicación del algoritmo de recocido simulado y de colonias de hormigas, concluyendo el rendimiento aceptable de ambas propuestas, si bien el algoritmo de recocido simulado parece proporcionar mejor rendimiento.

El presente capítulo comienza con una breve introducción al concepto de heurística. Posteriormente, dado que la metodología que se propone en esta tesis plantea la utilización de un AG, perteneciente al grupo de técnicas metaheurísticas, se centrará en la revisión de los procedimientos de este tipo más utilizados y referenciados en la literatura [Diego-Mas, 06], aludiendo, cuando sea posible, a su aplicación al problema de la generación de agendas de rotación de puestos de trabajo.

5.2. Métodos heurísticos

Como ya se ha indicado en la introducción del capítulo, el problema de la generación de agendas de rotación es intrínsecamente difícil de resolver de manera

óptima. Para la mayoría de este tipo de problemas es imposible encontrar procedimientos exactos de resolución que operen en tiempos realistas y con tecnologías asequibles. Como alternativa surgen los procedimientos heurísticos, que proporcionan soluciones factibles aceptablemente buenas, aunque no necesariamente óptimas, en tiempos de cálculo razonables.

Existen diversos intentos de dar una definición de los procedimientos heurísticos; por ejemplo en [Zanakis et al., 81] se puede leer que son:

“...procedimientos simples, a menudo basados en el sentido común, que tienden a ofrecer una buena solución (aunque no necesariamente la óptima) a problemas difíciles, de un modo fácil y rápido”

En [Adenso-Díaz et al., 96] se ofrecen ocho definiciones diferentes de heurística entre las que se encuentra la siguiente:

“Un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema de optimización bien definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución”

Acudiendo al diccionario de la Real Academia de la Lengua Española (edición electrónica en www.rae.es) se encuentran las siguientes acepciones³⁷:

(Del griego εὐρίσκειν, hallar, inventar).

1. *adj. Perteneciente o relativo a la heurística.*
2. *f. Técnica de la indagación y del descubrimiento.*
3. *f. Búsqueda o investigación de documentos o fuentes históricas.*
4. *f. En algunas ciencias, manera de buscar la solución de un problema mediante métodos no rigurosos, como por tanteo, reglas empíricas, etc.*

Como puede comprobarse, es difícil ofrecer una definición exacta de heurística, aunque en general, y sobre todo en la cuarta acepción de la definición de la Real Academia, se denota un cierto sentido de falta de metodología o sistematicidad en los métodos heurísticos. Nada más lejano a la realidad; los métodos heurísticos han logrado un elevado grado de desarrollo metodológico y, en muchos casos, los fundamentos de su funcionamiento han sido estudiados y enunciados.

El empleo de los procedimientos heurísticos es conveniente cuando se dan una o varias de las siguientes circunstancias [Adenso-Díaz et al., 96]

- Cuando no existe un método exacto de resolución.
- Cuando no se necesita la solución óptima.
- Cuando los datos son poco fiables.

³⁷ *Metaheurística*, un término que emplearemos posteriormente en este trabajo, no viene recogido en el diccionario de la Real Academia de la Lengua Española.

- Cuando existen limitaciones de tiempo o espacio de almacenamiento a la hora de obtener una respuesta al problema.
- Como un paso intermedio en la aplicación de otro algoritmo.

Ejemplos de aplicación de heurísticas al problema de la generación de agendas de rotación bajo criterios ergonómicos pueden consultarse en [Yaoyuenyong et al., 06] y [Tharmmaphornphilas et al., 07] (ésta última propuesta se describe con detalle en el siguiente apartado 5.2.1.1).

En [Yaoyuenyong et al., 06] se desarrollan cuatro algoritmos para determinar el menor número de trabajadores necesarios y su asignación a puestos de trabajo para obtener agendas de rotación que minimicen la exposición al ruido diario de los trabajadores. Tres de los algoritmos obtienen soluciones aproximadas mediante heurísticas, y un cuarto algoritmo proporciona soluciones exactas. Posteriormente, define un único procedimiento híbrido de obtención de soluciones que incluye los cuatro algoritmos desarrollados para la generación de agendas de rotación con reducción de la exposición al ruido.

5.2.1.1 Aplicación de heurísticas para la obtención de agendas de rotación

[Tharmmaphornphilas et al., 07] ha desarrollado recientemente una metodología para la obtención de agendas de rotación de puestos de trabajo que reduzcan las lesiones de espalda provocadas por el levantamiento de cargas. La metodología contempla la posibilidad de que el trabajador sea expuesto a tareas imprevistas, así como la existencia de trabajadores con perfiles o capacidades de levantamiento diferentes, con el objetivo de adaptarse a las posibles situaciones reales de trabajo. En el estudio en el que se propone dicha metodología, en primer lugar, se desarrolla un modelo de programación entera para la resolución de problemas deterministas, en los que se conoce a priori las tareas de levantamiento que se realizarán en cada puesto. Sin embargo, ante las limitaciones de la aplicación de la programación entera a problemas estocásticos, en los cuales las características de las tareas de levantamiento no se conocen a priori (aumentos en las ordenes de producción imprevistos, cambios en las órdenes de producción, etc.), [Tharmmaphornphilas et al., 07] decide desarrollar dos procedimientos heurísticos con el objetivo de obtener soluciones robustas, poco sensibles a cambios en los datos del problema.

Para demostrar la efectividad de los procedimientos heurísticos propuestos, [Tharmmaphornphilas et al., 07] estudia una versión del problema determinista, en la que se conocen las características de los levantamientos a priori y que puede ser resuelto de forma óptima, obteniendo buenos resultados. Posteriormente verificada la efectividad y la robustez de los procedimientos heurísticos al ser aplicados para la resolución de versiones estocásticas del problema. Según el autor, la metodología propuesta puede utilizarse no sólo para generar agendas de rotación que prevengan las lesiones de espalda, sino que puede ser aplicada para obtener agendas de rotación cuyo objetivo sea distinto, por ejemplo, maximizar la producción o reducir la exposición del trabajador a otros factores de riesgo como el ruido excesivo.

A continuación se describen las funciones objetivo propuestas por

[Tharmmaphornphilas et al., 07] para determinar la bondad de las agendas de rotación correspondientes a problemas deterministas. Posteriormente se describen las heurísticas desarrolladas para la obtención de dichas agendas de rotación.

5.2.1.1.1 Definición de las funciones objetivo

Para determinar el rendimiento de la agenda de rotación [Tharmmaphornphilas et al., 07] utiliza dos medidas. El índice *Job Severity Index* (JSI) [Liles et al., 84] y el número de días perdidos por lesiones, que representan la incidencia y la severidad de las lesiones de espalda.

El método *Job severity Index* es una medida sin unidades utilizada para evaluar el riesgo potencial de lesión de espalda provocado por tareas de levantamiento de cargas. El índice considera el ratio entre el peso que debe levantar el trabajador y el peso que está capacitado para levantar. Si el trabajador excede su capacidad de levantamiento (valor alto del índice JSI) entonces existe un alto riesgo de lesión de espalda. Así el riesgo de lesión de espalda es mayor para trabajadores con elevado índice JSI. Estadísticamente se ha comprobado que para valores del índice de más de 1,5 del índice, el riesgo de lesión de espalda aumenta rápidamente.

En base al JSI y considerando que mantener el valor del índice por debajo de 1,5 reduce el riesgo, [Tharmmaphornphilas et al., 07] determina una función objetivo denominada MinMaxJSI para minimizar el valor más alto del índice JSI entre los trabajadores. Otra posible alternativa planteada es minimizar la suma de los valores JSI de todos los trabajadores (MinTotJSI), sin embargo, ésta opción puede ocasionar una elevada varianza en los valores JSI de los trabajadores. La función MinMaxJSI balancea los valores JSI entre todos los trabajadores y mantiene cada uno de ellos lo más bajo posible.

Aunque el valor del índice JSI puede ser utilizado para evaluar el riesgo potencial de lesión de espalda, no está tan clara su utilidad para indicar las pérdidas por lesiones, por lo que [Tharmmaphornphilas et al., 07] propone otra función objetivo con dicho propósito (MinMaxDays), basada en el número de días de trabajo perdidos debido a lesiones de espalda. La función objetivo MinMaxDays es función de los valores del índice JSI. Basado en los datos publicados por [Liles et al., 84], se define un modelo de regresión lineal, donde x representa el valor JSI.

$$\text{Número de días perdidos} = \begin{cases} 0,888 + 8,633x & \text{si } 0 \leq x < 1,5 \\ -547,5405 + 374,25x & \text{si } 1,5 \leq x < 1,6 \\ 20.0467 + 19,51x & \text{si } x \geq 1,6 \end{cases}$$

Se observa que existe un aumento brusco del número de días perdidos en la región entre 1,5 y 1,6 y para valores mayores que 1,6, lo cual demuestra que el valor 1,5 es un umbral crítico que no debe ser excedido en la medida de lo posible. Al igual que con el índice JSI, en este caso [Tharmmaphornphilas et al., 07] propone dos posibles funciones objetivo (MinMaxDays) para minimizar el máximo número de días perdidos para cada trabajador y (MinTotDays) que minimiza el número total de días perdidos por todos los trabajadores.

5.2.1.1.2 Descripción del procedimiento heurístico GreedyRD

El procedimiento *GreedyRD* incluye un método voraz de búsqueda y una técnica de diversificación. El método voraz se utiliza para la búsqueda de una solución óptima local, rotando al trabajador con mayor índice JSI. La técnica de diversificación se utiliza como mecanismo de escape de soluciones óptimas locales alterando dichas soluciones.

El método comienza con la generación aleatoria de una solución inicial o agenda de rotación inicial y el cálculo del valor de su función objetivo. Las soluciones vecinas se exploran rotando al trabajador con el máximo índice JSI. Por ejemplo, si se considera la Tabla 5.1 como la solución inicial, y dado que el percentil 90 de mujeres tiene el mayor índice JSI (1,6), el proceso de mejora investigará la asignación de estos trabajadores a otras tareas en cada periodo. Así pues, entre las 8:00 y las 9:00 se considerarán las agendas 1, 2 y 3 de la Tabla 5.2. La agenda 1 intercambia las tareas del percentil 50 de hombres con las del percentil 90 de mujeres, sin cambios en el resto de tareas. De manera similar, las agendas 2 y 3 intercambian la asignación de tareas del percentil 90 de mujeres con las del percentil 25 de hombres y el percentil 50 de mujeres respectivamente.

El intercambio de asignación de tareas se aplica a cada periodo para encontrar la mejor asignación. Para n trabajadores, n tareas y m periodos, existen $m(n-1)$ soluciones vecinas. Si la mejor solución de entre dichas $m(n-1)$ posibles soluciones vecinas es mejor que la solución actual, ésta será reemplazada. El proceso descrito continúa hasta que no existe mejora de las soluciones vecinas y por tanto se ha encontrado un óptimo local.

Periodo	Percentil 50 hombres	Percentil 90 mujeres	Percentil 25 hombres	Percentil 50 mujeres
8:00 - 9:00	Tarea A	Tarea B	Tarea C	Tarea D
9:00 - 10:00	Tarea B	Tarea A	Tarea C	Tarea D
10:00 - 11:00	Tarea D	Tarea B	Tarea C	Tarea A
11:00 - 12:00	Tarea C	Tarea A	Tarea B	Tarea D
13:00 - 14:00	Tarea A	Tarea B	Tarea C	Tarea D
14:00 - 15:00	Tarea B	Tarea A	Tarea C	Tarea D
15:00 - 16:00	Tarea D	Tarea B	Tarea A	Tarea C
16:00 - 17:00	Tarea C	Tarea A	Tarea B	Tarea D
JSI	1,23	1,60	1,30	0,98

Tabla 5.1: Ejemplo de rotación de puestos para 4 trabajadores y 4 tareas (fuente [Thammaphornphilas et al., 07])

Solución vecina	Percentil 50 hombres	Percentil 90 mujeres	Percentil 25 hombres	Percentil 50 mujeres
Agenda 1	Tarea B	Tarea A	Tarea C	Tarea D

Agenda 2	Tarea A	Tarea C	Tarea B	Tarea D
Agenda 3	Tarea A	Tarea D	Tarea C	Tarea B

Tabla 5.2: Ejemplo de soluciones vecinas para el periodo 8:00-9:00 tareas (fuente [Tharmmaphornphilas et al., 07])

Después de que el método voraz encuentre un óptimo local se utiliza una técnica de diversificación para alterar dicha solución y ésta pasa a ser la solución actual, independientemente de su calidad. El procedimiento utiliza una probabilidad de intercambio aleatorio de tareas entre dos trabajadores de 0,3 para cada periodo. A partir de la solución generada se inicia nuevamente el procedimiento voraz de búsqueda de una solución óptima local. El procedimiento voraz y de diversificación se repiten hasta que se cumple un criterio de parada. Dicho criterio se establece, en base a las pruebas realizadas, en 200 movimientos consecutivos sin mejora.

El procedimiento *GreedyRD* descrito para la minimización del máximo índice JSI (*Job Severity Index*) (MinMaxJSI) resulta igualmente eficaz para la minimización de los días perdidos por bajas (MinMaxDays).

5.2.1.1.3 Descripción del procedimiento heurístico GreedyFD

Al aplicar el procedimiento heurístico *GeedyRD* al problema de minimización del máximo número total de días perdidos (*MinTotDays*), [Tharmmaphornphilas et al., 07] observó que en algunos casos las soluciones obtenidas estaban alejadas del óptimo. Después de investigar las causas, se observó que el número de trabajadores con valores por encima de 1,5 en el índice JSI en la solución óptima era menor que el de la solución subóptimas proporcionada por el procedimiento *GeedyRD*. Ello es debido a que la pendiente de la función objetivo (*MinTotDays*) es más pronunciada cuando los valores JSI son 1,5, por lo que, para minimizar el número total de días perdidos, en ocasiones es mejor permitir que un trabajador tenga un valor JSI alto para que el resto tenga valores JSI por debajo de 1,5, en lugar de balancear los valores JSI entre todos los trabajadores. Basado en dicho razonamiento [Tharmmaphornphilas et al., 07] propone un mecanismo adicional de diversificación como extensión del procedimiento voraz y de diversificación utilizado en *GreedyRD*. Éste nuevo mecanismo de diversificación fuerza la exploración de soluciones en las que el número de trabajadores con JSI por encima de 1,5 es pequeño. Sin embargo, antes de realizar la búsqueda se utiliza un procedimiento de investigación entre los trabajadores con valores JSI por encima de 1,5 (*grupo activo*). En dicho procedimiento, en cada periodo, al trabajador más fuerte en el *grupo activo* se le asigna la tarea más sencilla. Si la asignación no puede reducir el valor JSI de dicho trabajador más fuerte por debajo de 1,5 no se aplicará la nueva técnica de diversificación. Esto se debe a que no es posible reducir el número de trabajadores que tiene valores JSI por encima de 1,5 realizando éste tipo de diversificación. Puesto que la nueva diversificación fuerza la búsqueda en nuevas áreas, se le denomina técnica de *diversificación forzada*.

La técnica de diversificación forzada genera aleatoriamente una secuencia de periodos y selecciona aleatoriamente un trabajador del grupo activo. Empezando por el primer periodo de la secuencia, la tarea del trabajador seleccionado es intercambiada por la tarea de otro trabajador del grupo activo. El intercambio es aceptado si reduce el valor JSI del trabajador seleccionado y además el número de trabajadores con valores JSI por encima de 1,5 no aumenta. El periodo se repite hasta que las reasignaciones en los 8 periodos son completadas. La nueva solución pasa a ser la nueva solución si el número de trabajadores con JSI por encima de 1,5 se reduce. En otro caso el proceso se repite con otros trabajadores. Ésta técnica se aplica en combinación con la GreedyRD.

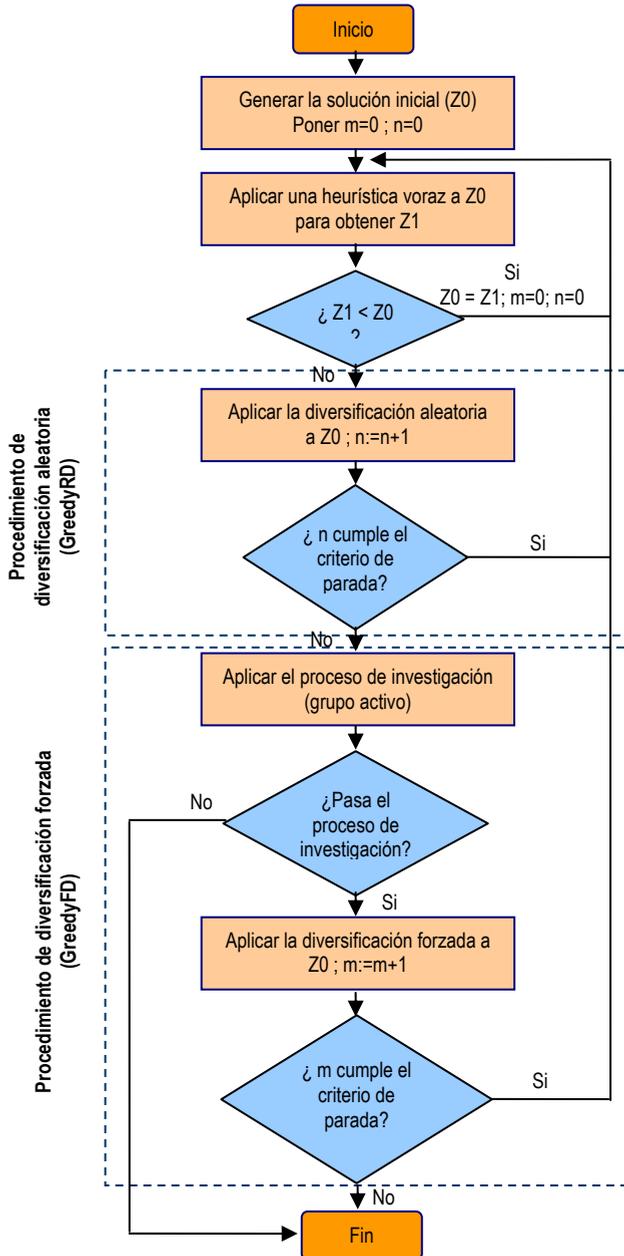


Figura 5.1: Diagrama de flujo de un método heurístico para minimizar el número total de días perdidos por lesiones de espalda (adaptado de [Tharmmaphornphilas et al., 07]).

Tal y como muestra la Figura 5.1 GreedyFD comienza con la creación aleatoria de una solución inicial. Posteriormente se aplica una búsqueda voraz para encontrar la mejor solución local. A continuación se aplica un mecanismo de diversificación aleatoria para alterar la solución óptima local extendiéndose la búsqueda a otras

áreas. La solución tras la diversificación aleatoria pasa a ser la solución actual independientemente de su calidad. Posteriormente se aplica la búsqueda voraz para mejorar la calidad de la solución. El proceso se repite hasta alcanzar el criterio de parada. En este punto se aplica el mecanismo de *diversificación forzada*. La solución obtenida pasa a ser la solución actual si el número de trabajadores con valores JSI por encima de 1,5 disminuye. Seguidamente se aplica nuevamente el método voraz con diversificación aleatoria. Si la técnica de *diversificación forzada* no puede encontrar soluciones que reduzcan el número de trabajadores con valores JSI por encima de 1,5 el procedimiento finaliza.

5.3. Metaheurísticas: definición y clasificación

Las metaheurísticas son estrategias inteligentes para mejorar procedimientos heurísticos muy generales, y que ofrecen muy altos rendimientos. En general emplean analogías con sistemas naturales o sociales [Colorni et al., 96].

Osman [Osman, 95] proporciona una definición acertada de metaheurística:

“Dentro de la clase denominada metaheurísticas se incluyen todos aquellos procedimientos que en un proceso iterativo, guían a una heurística subordinada combinando inteligentemente diferentes conceptos tomados de analogías de la naturaleza, y exploran el espacio de soluciones utilizando estrategias de aprendizaje para estructurar la información, con el objeto de encontrar eficientemente soluciones cercanas al óptimo.”

Las metaheurísticas pueden clasificarse en los siguientes grupos según [González-García, 05]:

De relajación: utilizan modelos relajados del original para la solución del problema. Se entiende por relajación la modificación, flexibilización o eliminación de restricciones del problema original.

Constructivas: tratan de obtener soluciones al problema a partir del análisis y selección paulatina de las componentes que las forman. Se parte de una estructura de solución vacía a la que se incorporan iterativamente sus diferentes elementos. De este estilo es por ejemplo GRASP (Greedy randomized adaptive search procedures), que modifica una estrategia *greedy* incluyendo pasos aleatorios para seleccionar los elementos a incluir en una solución.

De búsqueda: procedimientos que emplean transformaciones denominadas *movimientos* para recorrer el espacio de búsqueda cercano a una solución (vecindario de la solución actual). Pueden distinguirse varios subtipos:

- De búsqueda local: establecen pautas de selección iterativa de las soluciones vecinas a la actual que dan lugar a búsquedas heurísticas de alto rendimiento.
- De búsqueda global: emplean diversos métodos para escapar de óptimos locales. Tres de ellos son:

- Re-arrancar la búsqueda desde otra posición del espacio de soluciones (metaheurísticas de arranque múltiple o *Multistart*)
- Modificar la estructura del entorno de una solución (búsqueda por entornos variables o *variable neighborhood search*).
- Permitir soluciones que no mejoran el valor de la función objetivo de la solución actual con cierta probabilidad.
- De búsqueda basada en poblaciones: en lugar de recorrer el espacio de soluciones partiendo de un único punto, es una población de soluciones iniciales la que recorre el espacio de manera simultánea e interactuando entre ellas. Contemplan mecanismos (operadores) para generar nuevas soluciones a partir de las ya existentes. A este grupo pertenecen por ejemplo los algoritmos meméticos, la búsqueda dispersa (*scatter search*) o los algoritmos de hormigas.

Evolutivas: en éstas, un conjunto de soluciones evoluciona en el espacio de búsqueda estableciendo procedimientos de guiado del proceso. Se distinguen por la forma en que combinan la información de las diferentes soluciones para obtener otras nuevas. A este grupo pertenecen por ejemplo los algoritmos genéticos

De memoria a largo plazo: metaheurísticas de aprendizaje que emplean la memoria del proceso de búsqueda para mejorar su rendimiento. El paradigma de este tipo de algoritmos es la búsqueda tabú.

Los siguientes autores han propuesto algoritmos basados en diferentes metaheurísticas para la generación de rotaciones [Carnahan et al., 99; Carnahan et al., 00; Nanthavanij et al., 01; Kullpattaranirun et al., 05; Yaoyuenyong et al., 06; Thammaphornphilas et al., 07; Seçkiner et al., 07a; Seçkiner et al., 07b]. Sin embargo, a pesar de los estudios referenciados, cabe señalar la escasa literatura sobre la aplicación de metaheurísticas al problema de la generación de agendas de rotación.

5.3.1 Recocido Simulado (Simulated Annealing)

5.3.1.1 Definición general

El recocido simulado como técnica de búsqueda aleatoria dirigida fue introducida por Kirkpatrick, Gelatt y Vecchi en 1983 [Kirkpatrick et al., 83], basándose en una analogía con el proceso de enfriamiento lento de los metales, modelizado previamente en [Metropolis et al., 53]. Kirkpatrick y sus colaboradores emplearon este método en la resolución de problemas de optimización combinatoria que aparecen en el diseño de circuitos impresos.

El recocido (*annealing*) de los metales es un proceso que permite que estos materiales adquieran de nuevo la ductilidad o temple que pierden al trabajarlos³⁸. Lo que se persigue mediante este proceso es que los átomos del material adopten una

³⁸ Según la definición de la Real Academia de la Lengua Española.

estructura estable o de mínima energía. Para ello se calienta la sustancia hasta altas temperaturas permitiendo que sus partículas puedan moverse con libertad. Posteriormente se lleva a cabo un enfriamiento lento, de tal forma que dichas partículas adopten, para cada temperatura, la configuración más estable posible. En el proceso de enfriamiento el metal va recorriendo sucesivos estados de equilibrio hasta alcanzar la temperatura ambiente. Si se produjera un cambio brusco en la temperatura, las estructuras cristalinas resultantes serían defectuosas o se alcanzaría un estado metaestable con estructuras localmente óptimas.

5.3.1.1.1 El algoritmo Metropolis

Nicholas Metropolis y sus colaboradores [Metropolis et al., 53] propusieron en 1953 un método para calcular el estado energético de un sistema de partículas que aprovechaba las capacidades de cálculo de los ordenadores. La base de dicho método es la simulación Montecarlo simple.

5.3.1.1.2 La simulación Montecarlo

Una simulación Montecarlo permite explorar un espacio de búsqueda de soluciones para obtener información del mismo. De manera simple, esta simulación realiza un número elevado de exploraciones del espacio, tabulando los resultados obtenidos de dichos sondeos. A partir de dichos resultados es posible obtener información sobre el espacio de soluciones. Como ejemplo, si se quiere determinar la probabilidad de lanzar una moneda al aire y que caiga mostrando “cruz”, con la premisa de que su posición de partida en la mano sea mostrando “cara”, la simulación Montecarlo exploraría el espacio de soluciones realizando el lanzamiento un número determinado de veces, partiendo de la posición “cara”, y registrando el resultado. El cociente entre el número de veces que se obtiene una “cruz” y el número de lanzamientos proporciona la probabilidad de obtener “cruz” partiendo de “cara”.

El método Montecarlo puede emplearse, entre otras posibilidades, para calcular prácticamente cualquier integral o para determinar la calidad de los generadores de números aleatorios uniformes. El número de exploraciones necesario para obtener resultados aceptables puede determinarse mediante los métodos Jackknife [Quenouille, 49] o Bootstrap [Efron, 79].

La simulación Montecarlo simple explora el espacio de soluciones realizando movimientos aleatorios, y cualquier punto del espacio es considerado válido para obtener información sobre la configuración de dicho espacio. Este procedimiento es aceptable en determinadas aplicaciones, sin embargo, resulta inadecuado para, por ejemplo, espacios que representan estados energéticos de sistemas de partículas.

Suponiendo un sistema de partículas formado por átomos de helio, la posición de cada átomo en el espacio vendría representada por tres coordenadas. Cada átomo de helio interactúa con cada uno de los restantes, siendo la energía total del sistema la suma de cada una de las interacciones entre pares de átomos. Si se emplea el método Montecarlo simple para calcular la energía media de dicho sistema, los

átomos se distribuirían dando valores aleatorios a las coordenadas de cada partícula en cada simulación y registrando la energía de cada una de las configuraciones resultantes. La energía media se calcularía como el cociente entre la suma de la energía de cada configuración y el número total de configuraciones exploradas. La colocación aleatoria en el espacio de los átomos de helio puede provocar que, para alguna de las configuraciones generadas, dos átomos sean situados lo suficientemente cerca como para que su energía de interacción sea virtualmente infinita. De esta manera, la energía de una de las configuraciones es infinita y, por tanto, la energía media del sistema es infinita. En realidad dos átomos de helio nunca se situarían tan cerca en condiciones normales, por lo que el cálculo de la energía media resultaría fallido.

5.3.1.1.3 El método Metropolis

El método Metropolis es una modificación del Montecarlo. La diferencia fundamental estriba en la forma de generar las configuraciones del sistema que serán analizadas para evitar situaciones como las descritas en el apartado anterior. Cada nueva configuración se genera modificando ligeramente la configuración anterior. Así, por ejemplo, la nueva disposición del conjunto de átomos de helio se creará variando leve y aleatoriamente las posiciones de los átomos de la configuración previa. Esta nueva configuración se somete a un criterio de aceptación. Es aceptada si la energía de la nueva configuración es inferior a la energía de la configuración previa. Si la energía de la nueva configuración es superior se emplea un criterio de aceptación Boltzmann:

$$e^{-\frac{\Delta E}{K_B T}}$$

donde:

ΔE es la variación de la energía del sistema respecto a la configuración anterior;

K_B es la constante de Boltzmann y

T es la temperatura del sistema.

El uso de esta probabilidad de aceptación implica que la media de cualquier propiedad de una muestra, por ejemplo la energía, es igual a la media Boltzmann de esa propiedad, como determina la Ley de Distribución de Boltzmann, si la muestra es suficientemente grande. Este valor será dependiente de la temperatura del sistema.

5.3.1.2 La propuesta de Kirkpatrick, Gelatt y Vecchi

En [Kirkpatrick et al., 83] se propone emplear una simulación Metropolis Montecarlo para determinar la configuración de mínima energía, y por tanto más estable, de un sistema. El método consiste en elevar la temperatura del sistema para permitir una evolución rápida del mismo hacia una configuración estable. La temperatura se disminuye progresivamente permitiendo en que el sistema evolucione hacia sucesivas configuraciones de mínima energía. Este proceso de enfriamiento lento es conocido como “annealing” y el método propuesto como “Simulated Annealing” (Recocido Simulado).

El recocido simulado comienza realizando una simulación Metropolis del sistema a alta temperatura. Dado el criterio de aceptación de la simulación Metropolis, será aceptado un elevado porcentaje de configuraciones que supongan incrementos en la energía del sistema. Tras un número de simulaciones suficiente, la temperatura es disminuida y vuelve a realizarse una simulación Metropolis. Este proceso continúa hasta que el sistema alcanza una temperatura final previamente definida. Conforme disminuye la temperatura disminuye la probabilidad de aceptar configuraciones que supongan un incremento de la energía del sistema. Así pues, a temperaturas altas son las características del sistema que más afectan a su estado energético las que guían el proceso, mientras que al disminuir la temperatura son los detalles de la configuración los que predominan en la evolución.

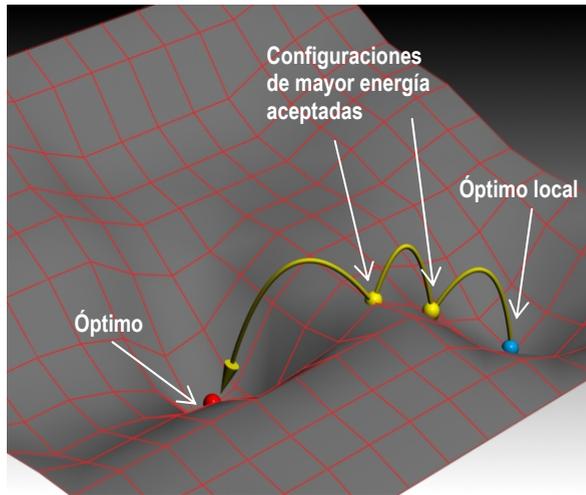


Figura 5.2: Escape de un óptimo local mediante la aceptación de configuraciones de mayor energía en el "Simulated annealing".

Esta técnica posee una elevada capacidad para escapar de los mínimos locales gracias al empleo del criterio Metropolis de aceptación de configuraciones de mayor energía (Figura 5.2)³⁹. Desde su aparición en 1983, el ámbito de aplicación del recocido simulado se ha extendido a todo tipo de problemas de optimización combinatoria, entre los cuales se encuentra su reciente aplicación al problema de la generación de agendas de rotación [Seçkiner et al., 07a].

Esta técnica posee una elevada capacidad para escapar de los mínimos locales gracias al empleo del criterio Metropolis de aceptación de configuraciones de mayor energía (Figura 5.2)³⁹. Desde su aparición en 1983, el ámbito de aplicación del recocido simulado se ha extendido a todo tipo de problemas de optimización combinatoria, entre los cuales se encuentra su reciente aplicación al problema de la generación de agendas de rotación [Seçkiner et al., 07a].

5.3.1.3 Estructura del algoritmo

El recocido simulado es una estrategia heurística de búsqueda por entornos no determinista. Definido el entorno \mathbf{N} de un elemento \mathbf{x}_0 , el paso a otro elemento $\mathbf{x}_1 \in \mathbf{N}(\mathbf{x}_0)$ es aceptado si el valor de la función objetivo para \mathbf{x}_1 es inferior que para \mathbf{x}_0 . En caso de resultar superior la aceptación se realiza con una probabilidad:

$$p = e^{-\frac{\Delta F}{T(M)}}$$

donde ΔF es la diferencia de los valores de la función objetivo para \mathbf{x}_1 y

³⁹ En todo el presente documento las representaciones gráficas de los espacios de soluciones, adoptarán el convenio de que la aptitud de una solución es inversamente proporcional a la altura; las zonas más altas de la topografía serán "peores" soluciones que las más profundas.

x_0 ($F(x_1) - F(x_0)$), y $T(M)$ es un parámetro que decrece durante la ejecución del algoritmo denominado temperatura y que varía para cada iteración M . La temperatura en una iteración $M+1$ es función de la temperatura de la iteración precedente M según la expresión:

$$T_{M+1} = f(T_M)$$

Otras versiones del algoritmo aplican la denominada aceptación con umbral [Dudek et al., 90], en las que la función probabilística es reemplazada por un umbral determinista T_k , de manera que un $x_1 \in N(x_0)$ es aceptado si ΔF es menor que T_k . Los valores que toma T_k se generan mediante una función que tiende a cero durante la ejecución.

En [Downsland, 93b] se propone variar la función de Boltzmann empleando una constante K de forma que la probabilidad de aceptación sea:

resultando este procedimiento adecuado para problemas en los que la geometría

$$p = e^{-\frac{\Delta F}{T(M)+K}}$$

del espacio de soluciones es muy irregular.

El algoritmo consiste en dos bucles anidados. El exterior controla la temperatura y el interior realiza una simulación Metropolis a la temperatura fijada por el bucle exterior. En la Figura 5.3 se esquematiza al algoritmo mediante un diagrama de flujo. La manera en que se realiza la disminución de la temperatura en el bucle externo se denomina *esquema de enfriamiento*, y será tratado en el apartado 5.3.1.3.5. La simulación Metropolis realizada en el bucle interno del algoritmo no necesita realizar un número de intentos tan elevado como una simulación Metropolis pura. Mientras que en éstas se intenta reproducir lo más fielmente posible una distribución de Boltzmann en cada temperatura, en un algoritmo de recocido simulado, sólo es necesaria una exploración razonable del espacio de búsqueda. El número de pasos necesario depende, por tanto, de las características del espacio de soluciones. Este aspecto será tratado también en 5.3.1.3.5.

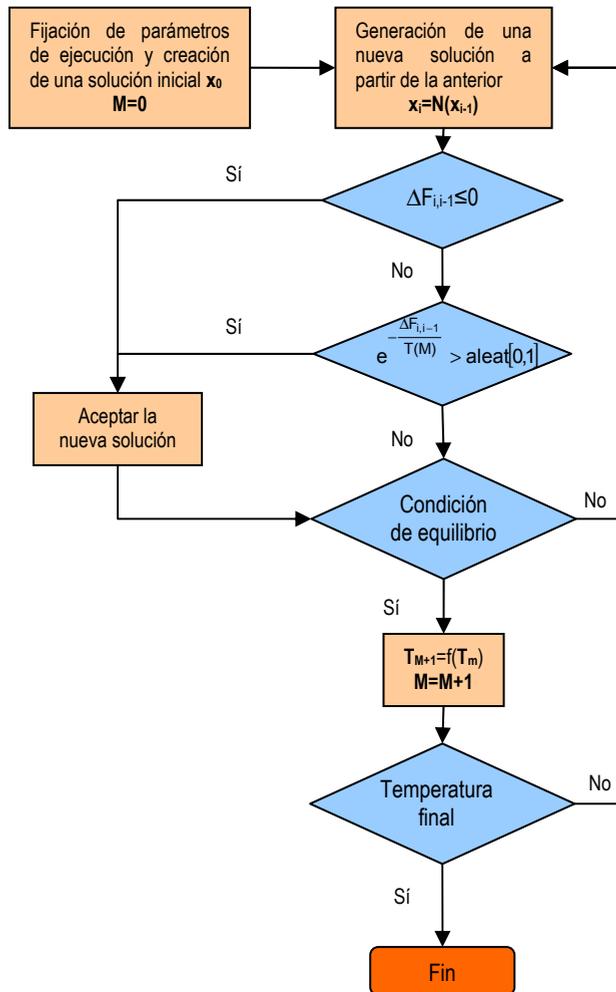


Figura 5.3: Simulated annealing aplicado a un problema de optimización (adaptado de [Santamarina, 95]).

5.3.1.3.1 Generación de la solución inicial

Para lograr que la evolución del algoritmo sea independiente de la solución inicial empleada (característica primordial de cualquier heurística), las primeras iteraciones se realizan a una temperatura muy elevada. De esta manera se consigue que en sus primeros pasos se recorran soluciones muy alejadas entre sí. La forma de generar la solución inicial es, habitualmente, aleatoria. Dado que la elevada temperatura de comienzo permitirá la aceptación de soluciones peores que la inicial, no es necesaria

la búsqueda de una buena solución de partida mediante alguna heurística preliminar. En algunos casos se inicia el algoritmo desde varios puntos del espacio para lograr una exploración más exhaustiva, y en otros se toma como punto de partida la mejor solución de una muestra aleatoria.

5.3.1.3.2 Determinación de la temperatura inicial

Como se ha indicado en 5.3.1.3.1, la temperatura inicial debe ser tal que permita una elevada probabilidad de aceptación de soluciones menos eficientes que la inicial. Es habitual escoger T_0 de tal suerte que la probabilidad de aceptación sea:

$$p = e^{-\frac{\Delta F}{T_0}} \approx 1$$

En [Kirkpatrick et al., 83] se propone determinar empíricamente la temperatura inicial. En primer lugar se determina la probabilidad de aceptación deseada. Como paso previo a la ejecución del algoritmo se realizan una serie de iteraciones de prueba, en las que se determina la temperatura inicial que proporciona dicha probabilidad de aceptación.

Otras posibilidades son las propuestas de [Johnson et al., 91] y las de [Kouvelis et al., 92]. En la primera la temperatura inicial se determina de nuevo experimentalmente, fijando la probabilidad p_0 de aceptar soluciones un μ por uno peores que la inicial:

$$T_0 = \frac{\mu}{-\ln(p_0)} F(x_0)$$

En la segunda, se calcula el incremento del coste medio de una serie de transacciones y se fija de antemano el valor χ_0 (ratio de soluciones evaluadas-aceptadas), quedando la temperatura inicial determinada por la expresión:

$$T_0 = \frac{\overline{\Delta F}^{(+)}}{\ln(\chi_0^{-1})}$$

5.3.1.3.3 Definición del entorno de una solución

El simulated annealing es un proceso de búsqueda por entornos. Se define el entorno \mathbf{N} de una solución \mathbf{x}_0 , como todas aquellas soluciones accesibles directamente desde \mathbf{x}_0 . Algunos autores han señalado la importancia de la definición del entorno y su influencia sobre los procedimientos de búsqueda local [Cerny, 85]. Evidentemente la definición del entorno dependerá de la forma de generar las soluciones y, por lo tanto, del tipo de problema a resolver.

Los algoritmos básicos emplean un método probabilista de exploración del

entorno, lo cuál puede provocar la aparición de ciclos exploratorios visitando sucesivamente las mismas soluciones. Implementaciones más elaboradas del algoritmo emplean técnicas para evitar la aparición de ciclos, como el empleo de listas de soluciones ya visitadas similares a las de los algoritmos Tabú (apartado 5.3.2.2). En otros casos se realiza una exploración ordenada del entorno de las soluciones, resultando este método más eficiente que el enfoque probabilista clásico [Connolly, 90].

5.3.1.3.4 El criterio de parada (criterio de congelación)

Existen diferentes criterios en base a los cuales el algoritmo detendrá su evolución. El más sencillo de estos es predefinir un número de iteraciones a completar antes de la detención. Otro es definir una temperatura de congelación, alcanzada la cuál, el algoritmo se detiene. Esta temperatura de congelación puede ser un valor prefijado ($T_f=0$, por ejemplo) o bien una expresión más elaborada como la propuesta en [Lundy et al., 86], en la que ϵ es un estimador de la diferencia de

$$T_f \approx \frac{\epsilon}{\ln(n)}$$

costes entre la solución final y el óptimo global.

En [Johnson et al., 89] se propone definir una constante k , que indica un número de etapas consecutivas tras la cuál se detendrá el proceso si no se produce una mejora de la última solución obtenida de un determinado porcentaje.

5.3.1.3.5 Condición de equilibrio y esquema de enfriamiento

El mecanismo del bucle interno de un algoritmo de recocido simulado es asimilable a una cadena de Markov⁴⁰, cuyo parámetro de control es la temperatura fijada en el bucle externo. Para una determinada temperatura se realiza una secuencia de experimentos, en la que el resultado de cada uno depende únicamente del resultado del experimento anterior. Se entiende aquí experimento como el proceso realizado con cada una de las configuraciones del sistema, y es sabido que cada configuración es obtenida seleccionando un elemento del entorno de la configuración anterior.

Sin embargo, la implementación real del algoritmo sólo puede realizar una convergencia asintótica aproximada. El número de experimentos realizados en cada temperatura debe ser necesariamente finito, y la disminución de la temperatura no puede ser continua sino que evoluciona de manera discreta. Así pues, la implementación habitual del algoritmo puede tratarse como una secuencia de cadenas de Markov homogéneas de longitud finita, en las que el parámetro de control es la temperatura.

⁴⁰ Una cadena de Markov es una secuencia de eventos, donde la probabilidad del resultado de un evento depende sólo del resultado del evento anterior.

Determinando la longitud de las cadenas de Markov se determinará el número de pasos a realizar por el algoritmo en cada temperatura. Se considera que el algoritmo cumple la condición de equilibrio para una temperatura dada cuando la cadena de Markov alcance la longitud establecida para esa temperatura.

Existen diferentes propuestas para la definición de las condiciones de equilibrio. La más simple es que la longitud de la k-ésima cadena de Markov L_k dependa polinómicamente del tamaño del problema. De otra forma, puede definirse un número mínimo de configuraciones analizadas para cada temperatura, teniendo la precaución de acotar superiormente la longitud de las cadenas de Markov. Cuando la temperatura desciende disminuye la probabilidad de aceptar configuraciones que no mejoren la actual, por lo que la longitud de las cadenas puede tender a infinito cuando la temperatura se acerca a cero. Para evitar esto se define una constante que determina la longitud máxima de las cadenas. En [Kirkpatrick et al., 83] se propuso que el valor de esta constante fuera igual al número de incógnitas el problema a resolver. Por último, otras propuestas condicionan la longitud de una cadena de Markov a la longitud de las cadenas anteriores.

Una vez alcanzada la condición de equilibrio a una temperatura dada se debe hacer evolucionar la temperatura. La forma de evolución es denominada *esquema de enfriamiento*, *programa de enfriamiento*, o *ley de evolución de la temperatura*.

El grado de enfriamiento α regula la evolución de la temperatura en cada iteración. En la definición de α debe llegarse a un compromiso entre una disminución rápida que puede producir una convergencia prematura del algoritmo, y una evolución lenta en exceso que prolonga demasiado el tiempo de cálculo.

El esquema de enfriamiento más sencillo es una expresión de tipo geométrico [Downsland, 93a] como:

$$T_M = \alpha T_{M-1}$$

en la que α es un real perteneciente a $]0, 1[$.

El valor de dicho intervalo varía según autores y tipo de problema. En [Kuik et al., 90] se plantea, para problemas de determinación de tamaño de lotes, que α tome valores en $[0.8, 0.99]$, aunque lo habitual es que oscile entre 0,5 y 0,99.

Alternativamente es posible dar al enfriamiento carácter potencial, de manera que sea más rápido a temperaturas elevadas y más lento a temperaturas bajas, mediante expresiones del tipo:

$$T_M = \alpha^M T_0$$

Otros autores plantean esquemas de enfriamiento más complejos como es el caso de [Lundy et al., 86], que plantean determinar la temperatura en una iteración

$$T_M = \frac{T_{M-1}}{1 + \beta T_{M-1}} \quad \text{con} \quad \beta \ll \frac{1}{\max_j (F(x_j) - F(x))} \quad \forall j$$

M como:

partiendo de una temperatura inicial definida como:

$$T_0 \gg \max_j (F(x_j) - F(x)) \quad \forall x_i, x$$

o el caso de [Maniezzo et al., 95] que en la resolución del problema de asignación cuadrática mediante recocido simulado emplea el esquema:

$$T_M = \frac{T_0}{1 + \beta T_{M-1}}$$

u [Osman, 93] que propone adaptar la temperatura a la forma de evolución del algoritmo. En su aplicación al problema del *vehicle routing*, la temperatura es aumenta cuando siguiendo el esquema de enfriamiento no se consigue mejorar las soluciones. Se trata pues de un procedimiento de diversificación de la búsqueda similar al empleado en los algoritmos de búsqueda tabú (véase el apartado 5.3.2.4.2). Un sistema parecido es empleado en [Downsland, 93b], que reduce la temperatura si un movimiento se acepta y la incrementa si se rechaza mediante la fórmula:

$$T_M = \frac{T_{M-1}}{1 + \delta T_{M-1}}$$

donde δ es parámetro que se adapta en función de la aceptación o no de las soluciones.

Existe otra tendencia en la definición de la ley de evolución de la temperatura en la que se define una variación constante. Generalmente este tipo de algoritmos definen una longitud variable para las cadenas de Markov.

5.3.1.4 Aplicación del recocido simulado a la obtención de agendas de rotación

[Seçkiner et al., 07a] aplica un algoritmo de recocido simulado para la generación de agendas de rotación que minimicen la carga de trabajo para cada trabajador. Según el autor, el método desarrollado puede ser aplicado a las organizaciones de servicios donde la demanda de los clientes varía en el transcurso de un día o de una semana. A pesar de la efectividad del recocido simulado para resolver problemas combinatorios de optimización, no ha sido aplicado con anterioridad a [Seçkiner et al., 07a] a la obtención de agendas de rotación, por lo que el propio autor subraya el carácter novedoso de su propuesta.

[Seçkiner et al., 07a] propone el diseño de agendas de rotación en las que se varía la exigencia de trabajo de los trabajadores para asegurar que ésta está balanceada. Para la obtención de resultados plantea un modelo de programación entera basado en el desarrollado por [Carnahan et al., 00] con algunos cambios. Debido a que la obtención de la solución óptima no es posible en un tiempo limitado de CPU con el modelo de programación entera, el autor compara la mejor solución obtenida por el modelo en un tiempo determinado de CPU, con la solución obtenida con el algoritmo de recocido simulado. El estudio concluye, en base a las pruebas realizadas, un buen rendimiento del algoritmo propuesto.

5.3.1.4.1 Terminología

En la propuesta de [Seçkiner et al., 07a] se utiliza la siguiente terminología que será utilizada durante la descripción del algoritmo (también en el apartado 5.3.4.1).

X es la solución inicial
f(X) es la desviación estándar (S) de la solución inicial X
X' es una solución vecina de X
X* es la solución con desviación estándar
 δ es $f(X') - f(X)$
T_{in} es la temperatura inicial
T_f es la temperatura final o temperatura de enfriamiento
 α es el ratio de enfriamiento ($\alpha < 1$)
f_{min} es el límite inferior para la solución dada
f_{max} es el límite superior para la solución dada
P_c es la probabilidad inicial de aceptación
P_f es la probabilidad final de aceptación
i índice que muestra el día de la semana
k tipo de turno
n índice que representa al trabajador
m índice que representa el número de tipos de trabajo
r número de asignaciones para cada trabajador
K_i número de posibles plantillas de turnos en un día
X_{nmik} 0-1 valor binario que vale 1 si el empleado *n* es asignado al turno tipo *k* para realizar la tarea *m* en el día *i* y 0 en otro caso.
D_{mik} número de trabajadores asignados a un turno *k* en el día *i* que realizan un trabajo del tipo *m*.

$$D_{mik} = \sum_n X_{nmik}$$

$$i = 1, \dots, 7 \quad k = 1, \dots, K \quad m = 1, \dots, M$$

C_{mik} número real que representa el coste de la asignación, en términos de carga de trabajo, de cualquier trabajador que realice el trabajo de tipo *m*, en el turno *k* en el día *i*.

W carga de trabajo.

$$W = \sum_{m \in M} \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} C_{mik} X_{nmik} \quad n = 1, \dots, N$$

5.3.1.4.2 Descripción del algoritmo

La solución al problema se presenta mediante una matriz bidimensional, donde cada fila corresponde a un trabajador y cada columna a una rotación. La demanda (tipo de trabajo, día y tipo de turno) se coloca en las intersecciones, y representa el número de trabajadores asignados a un turno *k* en el día *i* que realizan el trabajo *m*. La Tabla 5.3 ilustra la codificación de una solución del algoritmo de [Seçkiner et al., 07a], para un ejemplo concreto de 14 trabajadores y 4 trabajos. En dicho ejemplo el trabajador 1 en la rotación 1 es asignado a la demanda D241, es decir, realiza un trabajo de tipo 2 en el día 4 en un turno de tipo 1. Al mismo tipo de demanda (D241) son también asignados el trabajador 9 en la rotación 1 y los trabajadores 5, 6, 7, 11 y 12 en la rotación 2, en total son asignados 7 trabajadores a dicho tipo de demanda D241.

En la Tabla 5.3 el coste de la carga de trabajo de cada trabajador (*W_i*) se calcula mediante la suma del coste de la demanda de cada asignación trabajador/puesto, tal y como se muestra en la columna "Carga de trabajo". A cada tipo de demanda **D_{mik}** le corresponde un coste de carga de trabajo **C_{mik}**. El coste de la carga total se calcula

mediante la suma del coste de la demanda de todos los trabajadores. Por último, la calidad de la solución se obtiene mediante la desviación estándar (S) de los costes de asignación de cada trabajador. La mejor solución se obtiene cuando la desviación estándar es 0.

		ROTACIÓN				Carga de trabajo
		1	2	3	4	
TRABAJADORES	1	D241	D121	D131	D221	c241+ c121+ c131+ c221 =W1
	2	D121	D141	D131	D211	c121+c141+c131+ c211= W2
	3	D121	D141	D111	D231	c121+ c141+ c111+ c231=W3
	4	D221	D141	D111	D231	c221+ c141+ c111+ c231=W4
	5	D131	D241	D121	D211	c131+ c241+ c121+ c211=W5
	6	D131	D241	D121	D211	c131+ c241+ c121+ c211=W6
	7	D131	D241	D121	D211	c131+ c241+ c121+ c211=W7
	8	D221	D141	D111	D231	c221+ c141+ c111+ c231=W8
	9	D241	D121	D231	D211	c241+ c121+ c231+ c211=W9
	10	D221	D141	D111	D231	c221+ c141+ c111+ c231=W10
	11	D131	D241	D211	D221	c131+ c241+ c211+ c221=W11
	12	D111	D241	D231	D221	c111+c241+c231+c221=W12
	13	D141	D131	D 111	D221	c141+c131+c 111+c221=W13
	14	D111	D221	D141	D231	c111+c221+c141+c231=W14
Función objetivo:		$f(X) = S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n W_i - \bar{W}}{N}$			Carga total de trabajo = $\sum W$	

Tabla 5.3: Ejemplo de solución del algoritmo de recocido"o simulado de [Seçkiner et al., 07a].

Las soluciones vecinas son generadas intercambiando las asignaciones del trabajador con mayor carga de trabajo con las del trabajador con menor carga. El mecanismo de selección de los intercambios propuesto garantiza la obtención de soluciones factibles, ya que se intercambian la asignación de la rotación en las que los trabajadores hayan sido asignados al mismo día, si existen varias rotaciones candidatas, se selecciona una aleatoriamente para el intercambio.

La función objetivo utilizada para determinar la bondad de una solución es la desviación estándar.

$$f(X) = S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n W_i - \bar{W}}{N}$$

Una solución vecina es aceptada si la función objetivo mejora. En otro caso, la solución es aceptada en base a una probabilidad determinada por la temperatura. Dicha temperatura permite, al inicio del algoritmo, aceptar soluciones vecinas

independientemente de su calidad con una alta probabilidad y, posteriormente, es modificada para disminuir la probabilidad de aceptación. Así, para dos soluciones i, j con una desviación estándar $f(i)$ y $f(j)$, la probabilidad de aceptar j para sustituir a i vendrá dada por la siguiente ecuación:

$$P_c \{ \text{aceptación}, j \} = \begin{cases} 1 & \text{si } f(j) \leq f(i) \\ e^{-((f(i)-f(j))/T)} & \text{si } f(j) > f(i) \end{cases}$$

$T \in \mathbb{R}^+$ denota el parámetro de control (temperatura)

El propósito de aceptar soluciones peores es escapar de soluciones óptimas locales.

El esquema de enfriamiento determina cuándo la temperatura actual debe ser disminuida, cuánto debe disminuirse, y cuando el proceso de recocido debe finalizar.

El esquema de enfriamiento definido por [Seçkiner et al., 07a] es el siguiente:

Temperatura inicial (T_{in}): La T_{in} se obtiene a partir de P_c mediante la siguiente ecuación:

$$T_{in} = \frac{f_{min} - f_{max}}{\ln P_c}$$

donde:

$$f_{min} = \frac{\text{carga total de trabajo}}{\text{Número de trabajadores}} \quad f_{max} = 1.1 * \frac{\text{carga total de trabajo}}{\text{Número de trabajadores}}$$

La probabilidad inicial de aceptación (P_c) se establece en 0,99 (cercana a 1 para favorecer la aceptación de soluciones).

Ratio de enfriamiento (α): la temperatura disminuye según la siguiente ecuación:

$$T_{in} = \alpha T_{n-1}$$

donde:

α es el ratio de enfriamiento que toma valores entre 0 y 1.

Al igual que la T_{in} se obtiene a partir de la probabilidad inicial de aceptación P_c , la T_f se obtiene a partir de una probabilidad final de aceptación P_f . Así pues el ratio de enfriamiento depende de P_c , de P_f y del número de ciclos de reducción (t) (número de iteraciones). [Seçkiner et al., 07a] utiliza la siguiente ecuación:

$$\alpha = \left(\frac{\ln P_c}{\ln P_f} \right)^{1/(t-1)}$$

Donde a P_f se le asigna un valor de 1×10^{-15} en la propuesta, valor muy cercano a cero para evitar la aceptación de soluciones sin mejora hacia el final del algoritmo.

Para cada temperatura el número de experimentos viene dado por la longitud de la cadena de Markov (L) que [Seçkiner et al., 07a] iguala al número de trabajadores.

Cuando el número máximo de las iteraciones (t) es alcanzado el algoritmo termina. t debe ser determinado de manera que al final de la última iteración la temperatura final T_f pueda ser alcanzada. Para comprobarlo, el valor de T_f puede ser calculado usando la siguiente ecuación:

$$T_f = T_{in} \alpha^t$$

Si el valor de T_f obtenido con la ecuación no está muy cerca o es igual a la T_f estimada, entonces t debe ser recalculado, así como el ratio de enfriamiento (α). Éste procedimiento debe repetirse hasta que el número de iteraciones (t) sea determinado.

A continuación se muestra el pseudocódigo del algoritmo de SA propuesto por [Seçkiner et al., 07a] para el problema de la generación de agendas de rotación de puestos de trabajo.

```

Generar aleatoriamente una solución factible X;
Calcular la función objetivo f(X)=S;
Asignar el valor de la temperatura inicial (Tin);
Asignar el número de iteraciones (t);
Asignar el ratio de enfriamiento (α);
Asignar la probabilidad de aceptación inicial (P0);
Asignar la probabilidad de aceptación final (Pf);
Asignar los límites inferior y superior (fmin, fmax);
t = 0;
REPETIR
    l = 0
    REPETIR
        Generar la solución vecina y calcular el nuevo valor de la función objetivo
        δ = f(X') - f(X);
        Si (δ ≤ 0) entonces X=X' si no generar un número aleatorio entre 0 y 1 u.
        Si (u < exp(-δ/T)) then X=X';
        l=l+1;
    HASTA l=L; "número de trabajadores";
    t=t+1;
    Tin = αTn-1
HASTA "Se cumple el criterio de parada (t)";
    
```

Figura 5.4: pseudocódigo del algoritmo de SA propuesto por [Seçkiner et al., 07a].

5.3.2 Búsqueda Tabú (Tabu Search)

5.3.2.1 Definición general

La técnica de la búsqueda tabú fue introducida de manera general por Fred Glover en 1986 [Glover, 86b], aunque se basa en ideas que el mismo autor presentaba ya en 1977. El método fue posteriormente refinado en [Glover, 89;

Glover, 90].

Se trata de un algoritmo metaheurístico que realiza una búsqueda secuencial escogiendo en cada iteración una única solución, y cuya característica fundamental es la memorización de los últimos movimientos realizados para alcanzar una determinada situación. Así pues, para la exploración del espacio de soluciones, se emplea información referida al proceso seguido para alcanzar la posición actual. Ésta metaheurísticas ha sido utilizada con éxito en áreas como la planificación de la producción, problemas de asignación cuadrática, vehicle routing, telecomunicaciones, optimización gráfica, optimización de estructuras, localización, diversos tipos de *scheduling*, diseño de circuitos integrados, coloreado de gráficos, sistemas expertos, redes neuronales etc. [Glover et al., 95; Tabu Search Applications, 04] Sin embargo, a pesar de los buenos resultados proporcionados por la búsqueda tabú en problemas de optimización, hasta el momento, no ha sido aplicada a la generación de agendas de rotación de puestos de trabajo.

Podría establecerse una analogía con la forma de actuar de un escalador en su búsqueda de la cumbre. Desde una determinada posición debe decidir la dirección del siguiente paso para alcanzar una posición aledaña a la actual que le permita ir avanzando hacia la cumbre. Esta elección estará basada en la experiencia obtenida en situaciones similares encontradas durante el ascenso. Llegado el momento puede ser necesario retroceder a la posición anterior puesto que una ruta determinada no ofrece posibilidades de continuar. Debe recordar los caminos y lugares ya visitados para no repetir dichos itinerarios, lo cual además de no ser eficiente, podría llevarle a realizar una trayectoria cíclica.

Así, la búsqueda tabú realiza una refinada búsqueda local basándose en una memoria de corto plazo para escapar de los óptimos locales, y evitar recorridos cíclicos. Para su implementación debe poderse pasar de una posición del espacio de soluciones a otra mediante variaciones de la codificación de la solución actual (*movimiento*). Las posiciones del espacio accesibles mediante un movimiento forman el *entorno* de la solución actual. Es necesario, asimismo, definir una función evaluadora de la calidad de los movimientos, que puede ser simplemente la función de coste o considerar factores diversos.

A partir de una determinada solución s (generada de manera aleatoria o mediante alguna heurística), se define un conjunto de soluciones vecinas $V(s)$ a las que se puede acceder desde s mediante una operación m denominada movimiento. Así pues $V(s)$ se obtiene de aplicar a s todos los posibles movimientos. El algoritmo se desarrolla escogiendo en cada iteración un elemento s' del conjunto $V(s)$ del entorno de la solución actual. La selección se realiza en función de la evaluación de cada una de las alternativas. Dado que s pertenecerá al entorno $V(s')$ de la nueva solución, existe el riesgo de visitar una misma solución más de una vez, o de forma más general, de que se establezcan ciclos sin fin (Figura 5.5). Para evitar esto se dota al algoritmo de la capacidad de memorizar las posiciones visitadas más recientemente mediante la utilización de una estructura en forma de

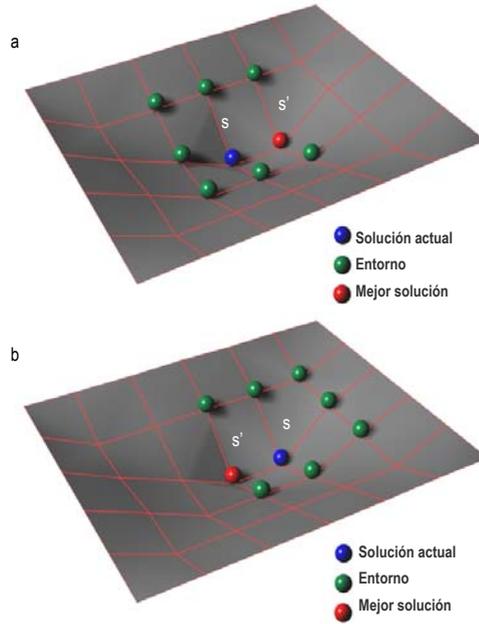


Figura 5.5: Ciclos en la búsqueda tabú; la lista tabú impide que las situaciones a y b se alternen indefinidamente.

lista circular (lista tabú) de tamaño L , impidiendo que éstas sean revisitadas, a menos que se cumplan determinadas condiciones (aspiraciones). El criterio de aspiración más sencillo es el conocido como *criterio del mejor costo*, en el que el movimiento hacia una solución es aceptado si su costo es mejor que el costo de la mejor solución obtenida hasta el momento. Para la actualización de la lista tabú se emplea habitualmente una estrategia FIFO, en la que en cada iteración los movimientos recientes van sustituyendo a aquellos que se han realizado hace más de L iteraciones (Figura 5.6).

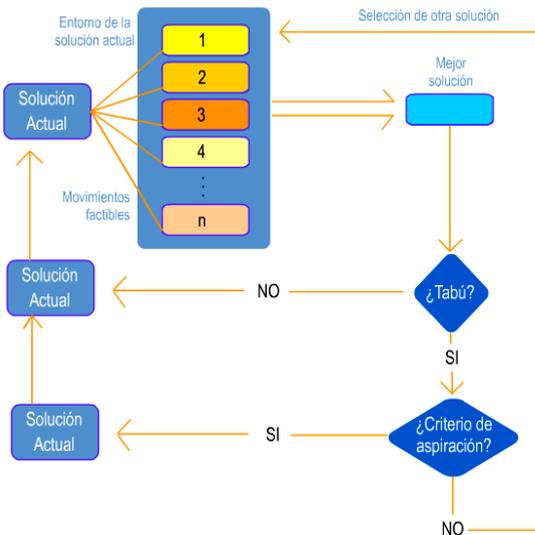


Figura 5.6: Diagrama de flujo de búsqueda tabú; memoria a corto plazo. Adaptado de [Youssef et al., 01].

El criterio de aspiración más sencillo es el conocido como *criterio del mejor costo*, en el que el movimiento hacia una solución es aceptado si su costo es mejor que el costo de la mejor solución obtenida hasta el momento. Para la actualización de la lista tabú se emplea habitualmente una estrategia FIFO, en la que en cada iteración los movimientos recientes van sustituyendo a aquellos que se han realizado hace más de L iteraciones (Figura 5.6).

Tras varias iteraciones de este proceso, se intercalan fases de diferente naturaleza, que persiguen la diversificación e intensificación en la búsqueda de soluciones y que serán analizadas posteriormente. El número de iteraciones que se han de realizar antes de comenzar una fase de intensificación o diversificación, es un parámetro que permite definir si la evolución del algoritmo estará más influida por la memoria a corto plazo, o por las memorias a medio y largo plazo de dichas fases.

Los criterios de parada más habitualmente aplicados al algoritmo son finalizar la búsqueda cuando se alcanza un número de iteraciones prefijado, o cuando se supera un número determinado de iteraciones sin que se produzca una mejora en la solución obtenida. Otro criterio de detención más elaborado, consiste en lanzar en paralelo diferentes instancias del algoritmo, comparando las mejores soluciones de cada uno tras un número prefijado de iteraciones. Si dos o más soluciones se encuentran entre las mejores obtenidas hasta el momento se detiene la ejecución.

5.3.2.2 La lista tabú y los criterios de aspiración

La lista tabú es la denominada memoria a corto plazo del algoritmo. En ella se almacenan las soluciones visitadas recientemente impidiendo que se repitan los movimientos hacia ellas. En cada iteración se selecciona la mejor solución del entorno de la solución actual, pasando aquella a estar incluida en la lista tabú.

Manejar una lista tabú en la que se consignen soluciones completas puede resultar ineficiente y costoso si la codificación de las mismas es compleja, recurriéndose en este caso a almacenar determinados **atributos** de la solución en lugar de la solución en sí. Esto supone, evidentemente, una generalización que produce cierta pérdida de información, que puede provocar que soluciones no visitadas hasta el momento, y que comparten atributos con otras que sí lo han sido, sean incluidas en la lista tabú. Este problema puede solventarse con una adecuada definición de los criterios de aspiración, que permitan en determinados casos, aceptar una solución perteneciente a la lista tabú. El algoritmo generará y actualizará tantas listas tabú como atributos de las soluciones visitadas contemple.

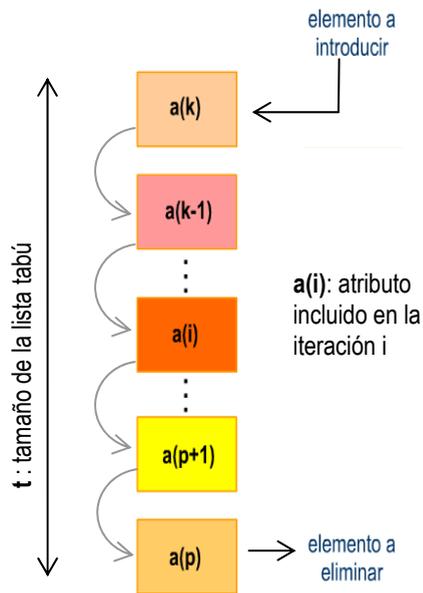


Figura 5.7: Actualización de la lista tabú.

En cada iteración realizada, la lista tabú (o listas en caso de considerar diversos atributos) es actualizada para incluir el nuevo movimiento. Dado que la lista tiene un

tamaño limitado (*tenencia*), debe excluirse algún elemento de la misma para dar cabida al nuevo movimiento; de forma habitual se emplea una sustitución de tipo FIFO (aunque existen otras alternativas) en la que la solución actual sustituye a la solución que más tiempo lleva en la lista, perdiendo ésta su condición de tabú. Un atributo permanece en la lista t iteraciones, siendo t el tamaño de la lista tabú (Figura 5.7). Si nos encontramos en la iteración k , el atributo $a(k)$ entra en la lista, saliendo de la misma $a(p)$, el atributo que entró en la iteración p ($p=k-t+1$).

Glover [Glover, 90] define la lista tabú como:

$$T = \{s_h^{-1}; \forall h > k - t\}$$

donde s_h^{-1} designa el movimiento inverso al realizado en la iteración h .

Así, para la iteración k en la que se produce el movimiento s_k , el mecanismo de actualización de la lista sería denotado por:

donde “+” y “-“ expresan las operaciones de añadir y eliminar elementos de la

$$T = T - s_{k-t}^{-1} + s_k^{-1}$$

lista.

El tamaño de la lista tabú es fundamental en el buen desempeño del algoritmo. Un tamaño pequeño implica una memoria a más corto plazo, que permite una búsqueda intensiva en un área pequeña del espacio de soluciones. Un tamaño grande implica el estudio de regiones mayores, dado que el número de movimientos prohibidos en el entorno es mayor. Algunos autores emplean un tamaño de 7 para la lista tabú (sin que parezca haber una justificación clara para escoger este valor), otros $(n)^{1/2}$ siendo n una medida del tamaño del problema [Andrés 2001].

El tamaño de la lista puede ser variable adaptándose durante la búsqueda. El caso más simple es cambiar el tamaño de la lista periódicamente, dándole un valor comprendido dentro de un cierto intervalo. En otros casos se estudian las repeticiones de las soluciones, incrementando el tamaño de la lista si se dan muchas (es necesario una mayor diversificación) y disminuyéndolas si no se producen mejoras (es necesario una mayor intensificación).

Existen otros sistemas de lista de tamaño variable (cancellation sequence, reverse elimination method, moving gap...) y formas para definir el tamaño de la lista adecuado al problema en estudio. Cuando se empleen varias listas tabú para contener distintos atributos de las soluciones visitadas, Salhi [Salhi, 02] (y ya antes en [Glover, 89]) recomienda emplear tenencias diferentes para cada una de ellas, adaptadas a las características de los atributos que contienen y en como influyen estos en las soluciones obtenidas.

Si se prohíben todos los movimientos incluidos en la lista tabú se evita de manera eficaz la entrada del algoritmo en ciclos de movimientos. Sin embargo, esto puede dar lugar a una restricción excesiva de la exploración que obstaculice la llegada a buenas soluciones. Esto es así cuando la lista tabú incluye atributos de las

soluciones recorridas en lugar de la codificación de la propia solución. Una buena solución no visitada todavía, podría ser prohibida debido a que los atributos de dicha solución contemplados por el algoritmo, coinciden con los de otra solución ya visitada. Este problema puede ser solventado mediante una correcta definición de los criterios de aspiración.

Como se indicó en el apartado 5.3.2.1, el criterio de aspiración más sencillo es el conocido como criterio del *mejor costo*, en el que el movimiento hacia una solución tabú es aceptado si su costo es menor que el costo de la mejor solución obtenida hasta el momento $C(\mathbf{s}^*)$. Otro criterio posible es emplear funciones de aspiración F_a , aceptando una solución tabú \mathbf{s} cuando el valor de $C(\mathbf{s})$ sea mejor que el de $F_a(C(\mathbf{s}))$. [Andrés, 2001 295 /id].

[Glover et al., 03] realizan una clasificación de los criterios de aspiración citando algunos ejemplos:

Aspiración por defecto

Llegado el caso en el que todos los movimientos posibles están clasificados como tabú, y ninguno ha superado algún otro criterio de aspiración, se selecciona el aspirante “menos tabú”, aquel que antes pierde su condición de tabú ante variaciones crecientes de las condiciones del problema (por ejemplo el número de iteración actual).

Aspiración por objetivo

Aspiración de movimiento ⁴¹	
Forma global	Es el ya mencionado criterio del mejor costo, en el que el movimiento hacia una solución tabú es aceptado si su costo es mejor que el costo de la mejor solución obtenida hasta el momento
Forma regional	Se subdivide el espacio de búsqueda en varias regiones R_i . Llamemos MCR_i al mejor coste encontrado en una solución perteneciente a la región R_i . Sea x una solución candidata perteneciente una región R_x , esta solución será aceptada si el coste de x es inferior a MCR_x .
Aspiración de atributo ⁴²	
Aspiración por dirección de búsqueda	Consideremos el atributo e y su atributo inverso \hat{e} . Si el movimiento más reciente conteniendo a \hat{e} fue un movimiento de mejora, un movimiento candidato que contenga a e satisfará el criterio de aspiración (hará a e tabú-inactivo) si además su coste es inferior al de la solución actual. El movimiento puede seguir siendo tabú si además posee otros atributos tabú-activos.
Aspiración por influencia	Emplea el concepto de influencia, que mide el grado de cambio inducido en la estructura de la solución o en la factibilidad de la solución.

Tabla 5.4: Una clasificación de los criterios de aspiración. Adaptado de [Glover et al., 03].

⁴¹ Cuando se cumple una aspiración de movimiento queda revocada la condición de tabú de dicho movimiento.

⁴² En caso de cumplirse una aspiración de atributo, lo que pierde su condición de tabú es el atributo en cuestión, pudiendo el movimiento seguir siéndolo si ésta condición depende de otros atributos.

5.3.2.3 Definición del entorno y creación de la lista de candidatos

El entorno de una solución $V(s)$ es el conjunto formado por todas las soluciones accesibles desde s mediante un movimiento; evidentemente la estructura de $V(s)$ dependerá de la definición de movimiento.

El algoritmo debe evaluar cada una de las soluciones comprendidas en $V(s)$ para escoger el mejor de los movimientos posibles, pudiendo resultar ésta una labor muy costosa si el conjunto es muy extenso. Para solventar el problema se restringe la búsqueda a ciertos elementos del entorno que conformarán la *lista de candidatos* [Glover et al., 93].

La lista de candidatos puede formarse bajo diferentes criterios [Santamarina, 95], siendo el más sencillo restringir la lista a un número determinado de soluciones escogidas aleatoriamente. Este procedimiento es empleado habitualmente en las técnicas de optimización basadas en redes neuronales, en los que la lista de candidatos es formada mediante un muestreo estadístico aleatorio, en el que cada candidato es aceptado o rechazado según un test de aceptación.

Otros sistemas realizan dicha selección de una manera más sistemática. La técnica de **descomposición de movimientos** de Glover, crea subconjuntos de movimientos basados en atributos de la estructura del problema o de la solución actual, persiguiendo centrar la búsqueda en zonas en las que dichos atributos prometen buenos resultados, lo cual es una forma de intensificación de la búsqueda (ver apartado 5.3.2.4.1). La técnica de las **evaluaciones sucesivas** disminuye progresivamente el número de candidatos (mejorando simultáneamente su calidad), mediante la aplicación de sucesivas de reglas de filtrado en diferentes fases. La fase inicial incluye en la lista de candidatos a todos los movimientos posibles; las fases sucesivas aplican filtros sobre dicha lista, reteniendo los mejores movimientos de la fase precedente. Las **estrategias de desdoblamiento** son aplicables a movimientos interpretables como el intercambio de elementos entre diferentes grupos. Dado que dicho movimiento puede descomponerse en la eliminación de un elemento de un grupo, y la inclusión en otro, la selección se basaría en la búsqueda de la mejor eliminación y/o la mejor inclusión.

5.3.2.4 Tipos de memoria; estrategias de intensificación y diversificación

Las estructuras para el almacenamiento de información referida al proceso seguido por el algoritmo (memoria) pueden implementarse de diferentes maneras. Como se ha visto, en algunos casos se almacenan las soluciones visitadas al completo (memoria explícita), mientras que en otros, son determinados atributos de las soluciones los que quedan registrados en las estructuras de memoria (memoria por atributos).

La lista tabú es una forma de almacenamiento de la historia de búsqueda reciente, y es habitualmente asociada con una memoria de corto plazo, quedando el "tamaño" de dicho plazo definido por la tenencia de la lista (ver apartado 5.3.2.2). Esta memoria a corto plazo fomenta una exploración agresiva del entorno de la

solución actual, buscando en cada movimiento la mejor alternativa posible que satisfaga ciertas restricciones. Sin embargo, es posible extraer información útil del proceso de búsqueda si se contempla éste a más largo plazo, dotando al algoritmo de una cierta capacidad de aprendizaje.

Ejemplos de este estilo serían las estructuras de memoria basadas en frecuencias, que complementan la información proporcionada por la memoria a corto plazo para la selección de movimientos de entre los candidatos. Las estructuras basadas en **frecuencia de residencia**, guían al algoritmo introduciendo incentivos y penalizaciones basados en el número de veces que determinados atributos han aparecido entre las soluciones visitadas; se supone que los atributos frecuentes entre las buenas soluciones son deseables en la solución final, y que los atributos que aparecen asiduamente entre las malas soluciones deben ser evitados.

Otro tipo de información de valor proporcionado por estructuras de memoria basadas en la frecuencia de residencia, es la que permite localizar atributos *fortalecidos/excluidos* [Glover et al., 03]. Si en una secuencia de soluciones que contiene tanto soluciones de alta como de baja calidad, un determinado atributo tiene una alta frecuencia de residencia, puede considerarse que dicho atributo está fortalecido y que se está restringiendo el espacio de búsqueda a zonas donde las soluciones poseen dicha cualidad. En aras de la diversidad puede resultar necesario desechar soluciones que posean dicho atributo. Por otra parte es posible dirigir la búsqueda hacia zonas del espacio en el que las soluciones posean atributos poco frecuentes entre las soluciones recorridas, realizando así una exploración de zonas poco frecuentadas.

Un tipo diferente de estructuras de memoria se basan en **frecuencias de transición**, almacenando información referida a la frecuencia con que cambian determinados atributos de las soluciones recorridas. Así, un atributo con una elevada frecuencia de transición puede ser considerado como poco influyente en la calidad de las soluciones.

Otras posibilidades son [Blum et al., 03]:

- las estructuras basadas en lo reciente (recency-based memory), que recuerdan cuál fue la iteración más reciente en la que apareció un determinado atributo
- las basadas en la calidad, que acumulan y extraen información de la historia de búsqueda para localizar características presentes en las buenas soluciones; este sistema es empleado también por otras metaheurísticas como las de colonias de hormigas (ver apartado 5.3.4)
- las basadas en la influencia, que memorizan elecciones de candidatos realizadas durante la búsqueda que han resultado críticas en el transcurrir del proceso de exploración.

Así pues, al esquema básico del algoritmo basado en una memoria a corto plazo, se pueden añadir esquemas de memoria a plazo medio y largo, que permiten relanzar la búsqueda hacia otras partes del espacio cuando el ritmo de mejora de las

soluciones decae.

5.3.2.4.1 El proceso de intensificación

Se denominan estrategias de intensificación a los procedimientos destinados a realizar una búsqueda más exhaustiva, de aquellas zonas del espacio cuyas soluciones poseen atributos frecuentes entre las mejores soluciones localizadas hasta el momento. Se pretende así, guiar la búsqueda hacia zonas prometedoras del campo de soluciones, no suficientemente exploradas en el proceso básico del algoritmo.

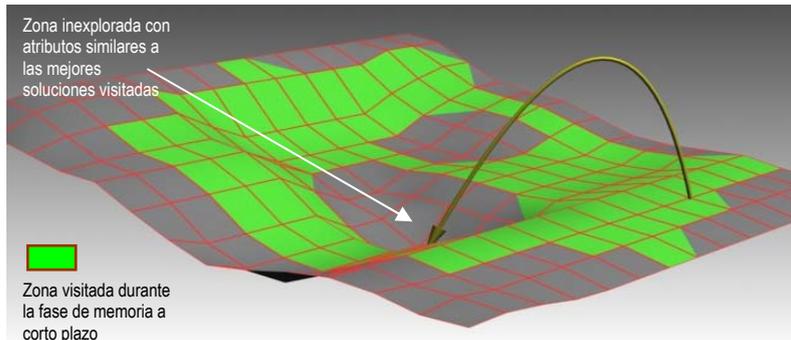


Figura 5.8: Estrategia de intensificación.

Las estrategias de intensificación se asocian con las estructuras de memoria a medio plazo, que conservan y comparan las mejores soluciones generadas (lista élite) durante un determinado número de iteraciones (periodo de prueba). Las características que se presentan frecuentemente en las soluciones son consideradas atributos regionales de buenas soluciones.

De manera alternativa es posible aplicar las estrategias de intensificación imponiendo restricciones al problema o la estructura de la solución que centralicen la búsqueda en determinadas partes del espacio.

5.3.2.4.2 El proceso de diversificación

Ya se ha visto que las estrategias intensificadoras emplean la memoria de medio plazo, para extender la búsqueda a zonas del espacio en las que las soluciones reúnen características similares a las mejores encontradas durante la exploración. En contraposición, las estrategias diversificadoras permiten evitar la convergencia prematura del algoritmo en óptimos locales, dirigiendo la búsqueda hacia zonas del espacio poco exploradas.

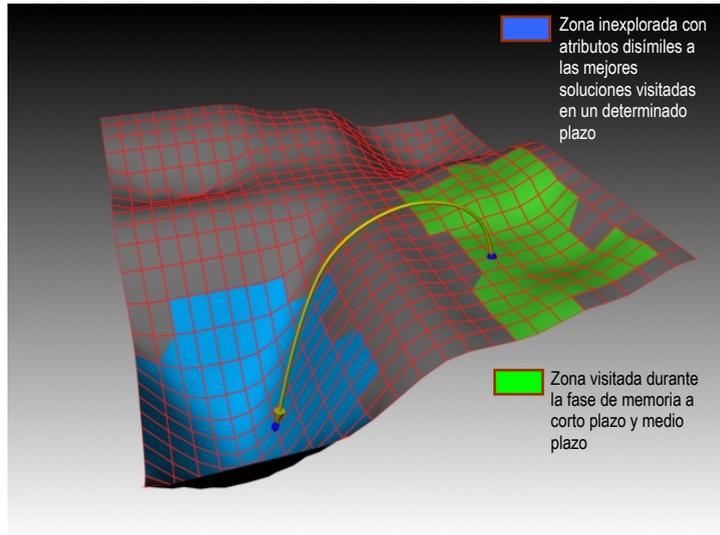


Figura 5.9: Estrategia de diversificación.

La memoria a largo plazo recopila información sobre las soluciones visitadas hasta un momento determinado, penalizando aquellos atributos de las nuevas soluciones que se han dado frecuentemente en aquellas y favoreciendo la aparición de otros poco estudiados. Este es un proceso similar a establecer una lista tabú que se activa periódicamente para redirigir la búsqueda.

Como ejemplo de implementación, Laguna y Glover [Andrés, 01a] proponen penalizar la inclusión de atributos frecuentes hasta el momento en las nuevas soluciones, en función de la frecuencia relativa de dicho atributo. Dado un movimiento desde la solución i hacia la solución j con coste $cm(i,j)$, se define una función penalizadora:

$$Pm(i,j) = cm(i,j) \pm \alpha \cdot frecuencia(i,j)$$

expresión en la que (\pm) dependerá de si se está minimizando o maximizando el coste y α es una constante a determinar de manera experimental.

Este mecanismo se pone en marcha si la tasa de obtención de nuevas soluciones cae por debajo de un cierto umbral.

En [Andrés et al., 98] si el hallazgo de nuevas buenas soluciones se vuelve lento, y durante un número concreto de iteraciones no aparece ninguna, se aumenta la tenencia de la lista tabú, provocando una restricción de la búsqueda en las zonas cercanas y fomentando el salto hacia zonas alejadas del punto actual.

5.3.2.4.3 Path Relinking y Tunneling

Las estrategias de intensificación y diversificación son a veces combinadas en el

llamado *path relinking*. Esta técnica explora paso a paso, la trayectoria más corta entre dos buenas soluciones ya obtenidas, recomenzando la búsqueda desde alguna de las soluciones encontradas en el camino. Esto permite salvar zonas intermedias en las que las soluciones no son factibles (tunneling).

Si las soluciones de inicio y final de la trayectoria son similares, se estaría forzando un proceso de intensificación (Figura 5.10); por el contrario, escoger como soluciones de inicio y final para el *path relinking* soluciones desemejantes, es asimilable a un proceso de diversificación (Figura 5.11).

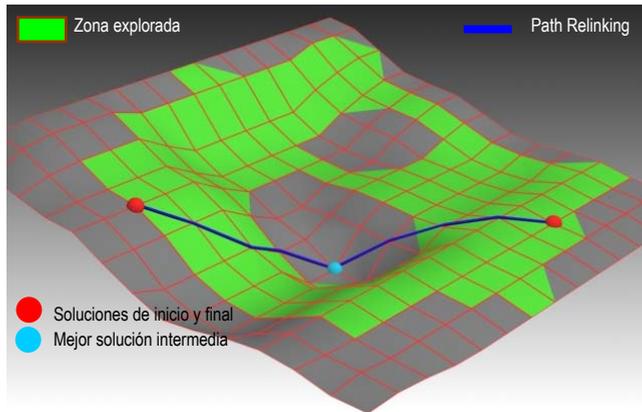


Figura 5.10: Path Relinking en proceso de intensificación.

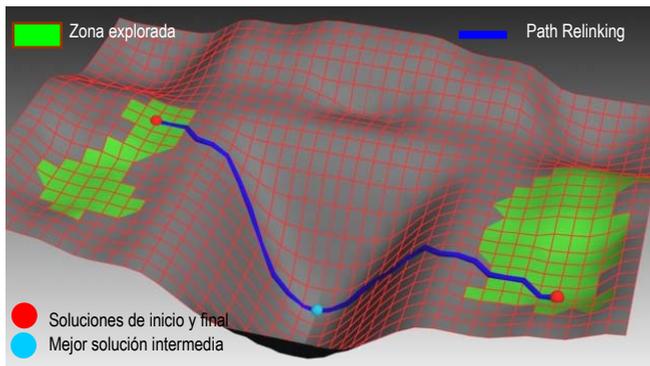


Figura 5.11: Path Relinking en proceso de diversificación.

5.3.2.4.4 Oscilación estratégica

La oscilación estratégica permite al algoritmo avanzar sobre zonas no factibles del espacio de soluciones, para obligarle posteriormente a regresar a zonas factibles. En la evolución normal del algoritmo, éste puede llegar a la frontera con

una zona no factible, donde habitualmente el algoritmo se detendría. La oscilación estratégica modifica la definición del entorno, o bien cambia los criterios de evaluación para seleccionar los movimientos de tal manera que pueda avanzar sobre la zona no factible. Durante un cierto número de iteraciones se permite al algoritmo evolucionar por esta zona, hasta que se le obliga a regresar al espacio factible. Los acercamientos y cruces de la frontera se repiten desde diferentes direcciones dando lugar a la denominada oscilación estratégica. Los procedimientos tabú estándar evitan la posibilidad de recorrer varias veces una trayectoria.

5.3.2.4.5 Los algoritmos tabú con umbral

El algoritmo tabú con umbral [Glover, 91] es una simplificación del algoritmo tabú, que se caracteriza por prescindir de las estructuras de memoria. La exploración reiterada se evita introduciendo criterios probabilísticos en la selección de los movimientos a realizar.

Existen en este algoritmo dos fases diferenciadas. La primera es una fase de intensificación en la que únicamente se admiten soluciones que mejoren la solución actual, lo cual conduce a la obtención de un óptimo local. Posteriormente en una fase de diversificación o mezcla, se admiten soluciones que ofrecen peores valores de la función objetivo (además, por supuesto, de las que mejoran la mejor solución actual), logrando de esta manera escapar del óptimo local explorando nuevas zonas del espacio de soluciones.

El conjunto de movimientos posibles permite, en principio, abarcar todo el espacio de soluciones. Sin embargo, en esta variante del algoritmo, se divide este conjunto en bloques o subconjuntos de movimientos que pueden ser usados en cualquiera de las fases antes mencionadas. Mediante un procedimiento probabilístico (que puede ser diferente en cada fase) se selecciona uno de los subconjuntos generados. En la primera fase se exploran los bloques escogidos aceptando soluciones que mejoren la mejor solución actual, mientras que en la diversificación se acepta el mejor movimiento dentro de cada bloque, independientemente de si mejora o no la solución actual. Los bloques explorados no vuelven a ser visitados.

En ambas fases se guía la búsqueda hacia el movimiento que conduzca a la mejor solución mediante listas de candidatos, permitiendo acelerar el proceso de optimización.

5.3.3 Computación evolutiva

5.3.3.1 Introducción

La computación evolutiva plantea los problemas complejos de búsqueda y optimización bajo un enfoque evolutivo, basado inicialmente y a grandes rasgos, en la teoría evolucionista del desarrollo de las especies naturales elaborada por Darwin. La computación evolutiva es implementada en los denominados algoritmos evolutivos. De forma general, estos algoritmos realizan una búsqueda estocástica

guiada basándose en la evolución reiterada de un conjunto de estructuras, y la selección de las más adecuadas en cada ciclo. Estas técnicas pueden ser clasificadas en tres categorías principales: los algoritmos genéticos (AG), las estrategias evolutivas (EE) y la programación evolutiva (PE). Algunos autores añaden a estas categorías los sistemas clasificadores genéticos (SCG) empleados habitualmente en la inferencia de reglas y patrones.

A pesar de sus similitudes, cada uno de estos procedimientos fueron desarrollados de manera independiente, no existiendo contacto formal entre los investigadores de cada área hasta 1990 [Fogel et al., 94]. Todas las técnicas incluidas bajo la denominación de computación evolutiva se basan en un esquema general común (Figura 5.12). El punto de partida es un conjunto de soluciones al problema generadas de manera aleatoria (población inicial). Esta población es sometida a una serie de transformaciones que dan lugar a una nueva población de soluciones. Se valora la adaptabilidad al medio de cada una de las soluciones de dicha población mediante una función de transformación (función objetivo). A partir de la valoración de los individuos de la población, e incluyendo cierto grado de aleatoriedad, se favorece a los individuos mejor dotados en un proceso de selección para conformar la siguiente generación. Este proceso es repetido a la espera de que, tras cierto número de ciclos (generaciones), los individuos de la población hayan evolucionado hacia una mayor adaptación al medio.

Así, los algoritmos evolutivos tendrán en común:

- un conjunto de soluciones debidamente codificadas (individuos) formando una población
- un procedimiento de transformación para la construcción de nuevas soluciones a partir de las soluciones de la población anterior
- una función evaluadora de la bondad de las soluciones que forman parte de la población
- un mecanismo de selección de individuos en función de su adaptación al medio.

```

Begin;
P[0]:= Inicialización_de_la_población( );
Bondad_P[0]:= Evaluación (P[0]);
G:=0;
Until (condición_de_terminación) do
  Begin;
  Paux[G]:=Selección_de_reproductores (P[G], Bondad_P[G]);
  Paux[G]:=Transformación (Paux[G]);
  Bondad_Paux[G]:= Evaluación (Paux[G]);
  P[G]:=Selección_de_supervivientes (P[G], Paux[G], Bondad_P[G], Bondad_Paux[G]);
  Bondad_P[G]:= Evaluación (P[G]);
  End;
End;

```

Figura 5.12: Esquema general de un Algoritmo Evolutivo.

Las diferencias fundamentales entre cada una de las técnicas radican en los tipos de alteraciones que se realizan sobre las soluciones para obtener nuevos individuos, y en los métodos empleados para la selección de los supervivientes y los reproductores.

La naturaleza del problema que se pretende resolver determinará el tipo de técnica evolucionista más adecuada. Los algoritmos evolutivos han sido aplicados a problemas de naturaleza muy diferente: robótica, tratamiento de imágenes, inteligencia artificial, problemas de asignación, etc. [Goldberg, 89]

Antes de comenzar con una explicación más detallada de cada una de las técnicas de la computación evolutiva, se hace necesario realizar alguna consideración previa sobre el evolucionismo como proceso de optimización.

5.3.3.2 Dualidad genotipo / fenotipo

El genotipo de un individuo designa la constitución genética completa (expresa o latente) de un individuo, es decir, el genotipo es la información contenida en los alelos de los genes del individuo. Por otra parte el fenotipo es el conjunto de rasgos o características visibles del individuo. Es de algún modo la expresión o el resultado de la constitución genética de ese ser y está determinado por los genes y por las condiciones ambientales en las que se desarrolla⁴³. Así pues, los rasgos fenotípicos no son necesariamente consecuencia exclusiva de la carga genética del individuo, sino que el desarrollo y la conducta de éste frente al medio exterior está condicionada por el propio medio (epigénesis⁴⁴) [Atmar, 94] y por el aprendizaje sociogenético y ontogenético del individuo y del grupo a lo largo de su existencia.

⁴³ Fuente: Glosario de Términos Genéticos. National Human Genome Research Institute. <http://www.genome.gov/sglossary.cfm>

⁴⁴ Teoría desarrollada por William Harvey (1578-1657), médico inglés, en la que el desarrollo orgánico era visto como la producción de forma acumulativa de estructuras complejas a partir de un material inicialmente homogéneo. Se basa en las ideas desarrolladas por Aristóteles.

Por otra parte, fenómenos como la pleiotropía⁴⁵ y la poligenia⁴⁶ impiden la existencia de una relación biunívoca entre la carga genética del individuo y los caracteres en que ésta se expresa (Figura 5.13). Así pues, diferentes estructuras genéticas pueden dar lugar a conductas similares, mientras que diferentes conductas pueden ser la expresión de idénticas estructuras genéticas.

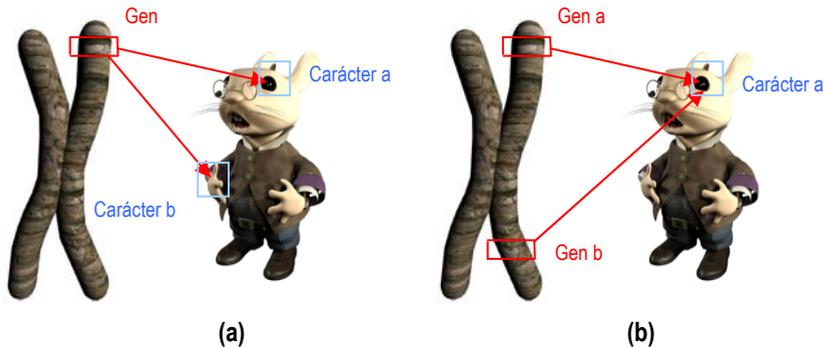


Figura 5.13: Pleiotropía (a) y poligenia (b).

La adaptabilidad de un individuo al medio en que se desarrolla, está condicionada por la forma en la que se expresa su carga genética, es decir, su fenotipo, y no existe una relación directa entre el código genético y el comportamiento desarrollado; la selección natural actúa directamente sólo sobre la base de los comportamientos expresados de los individuos y las especies, no sobre su genotipo [Mayr, 88].

Llamando \mathbf{G} al espacio de todas las posibles configuraciones genéticas de un individuo (espacio de los genotipos), y \mathbf{F} al de los posibles fenotipos que es viable desarrollar a partir del espacio de genotipos \mathbf{G} en un medio externo concreto, es posible establecer gráficamente la relación entre ambos [Santamarina, 95] (Figura 5.14).

Cada punto del espacio (\mathbf{g}) de los genotipos representa la estructura genética de un determinado individuo, al cual puede hacersele corresponder un punto del espacio (\mathbf{f}) de los fenotipos. El fenotipo es una función no lineal compleja de la interacción entre las estructuras genéticas subyacentes del individuo, y las condiciones ambientales actuales [Fogel, 94]. Llamando μ a la función que mide la adaptación del individuo al medio, podemos establecer una relación entre cada punto del espacio de los fenotipos (\mathbf{f}) y la medida de dicha adaptación $\mu(\mathbf{f})$. Representando gráficamente el conjunto imagen de dicha correspondencia, obtendremos la topografía de la función "nivel de adaptación de los individuos al medio" (lo que Write (1936) denominaba "topología adaptativa" [Fogel, 94]). Los algoritmos evolutivos realizan una búsqueda dirigida del máximo global de la función

⁴⁵ La pleiotropía es un fenómeno por el cual un solo gen puede estar relacionado e influir en más de un carácter fenotípico.

⁴⁶ La poligenia es un fenómeno que implica a varios genes en la expresión de una única conducta fenotípica.

de adaptación recorriendo dicha topografía.

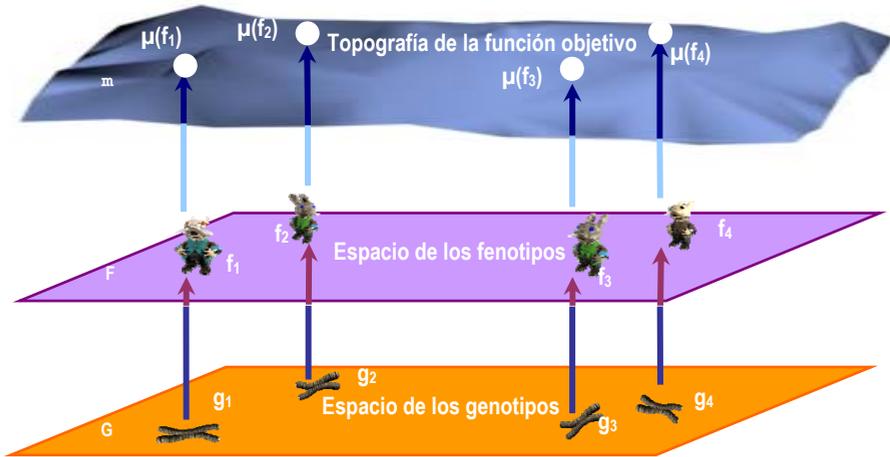


Figura 5.14: Relación entre el espacio de los genotipos y el de los fenotipos. Topografía de la función objetivo.

5.3.3.3 Técnicas de computación evolutiva

5.3.3.3.1 Algoritmos genéticos

Dentro de las técnicas de computación evolutiva, los algoritmos genéticos [Holland, 75] ocupan un lugar preeminente debido, fundamentalmente, a los siguientes motivos [Pérez, 04]:

- las ideas fundamentales del enfoque evolutivo están recogidas de una manera natural en dicha técnica
- son flexibles y adaptables a una gran cantidad de problemas diferentes pertenecientes a distintas áreas y permiten ser combinados con otras técnicas no necesariamente pertenecientes a la computación evolutiva (hibridación)
- dentro de las técnicas de computación evolutiva de los algoritmos genéticos son los que poseen una mayor base teórica
- poseen una gran versatilidad pues son los que necesitan menos conocimiento específico del problema para su resolución
- es posible implantarlos en ordenadores con capacidades medias obteniendo resultados muy aceptables

dentro de las técnicas metaheurísticas son, con diferencia, las más empleadas [Jones et al., 02], existiendo multitud de estudios previos referidos a su empleo, parametrización e implantación, así como herramientas informáticas genéricas

adaptables a diferentes problemas [Whitley et al., 88; Grefenstette, 90; Smith et al., 91; Pérez, 04].

Pérez proporciona la siguiente definición de AG:

“Los algoritmos genéticos son métodos estocásticos de búsqueda ciega de soluciones cuasi-óptimas. En ellos se mantiene una población que representa un conjunto de posibles soluciones que son sometidas a ciertas transformaciones con las que se trata de obtener nuevos candidatos, y a un proceso de selección sesgado en favor de los mejores candidatos.”

Se dice que los algoritmos genéticos son métodos de búsqueda ciega debido a que éstos no disponen de más información del problema a resolver que aquella obtenida de la función objetivo empleada. Esta característica junto con el hecho de que la búsqueda se realiza simultáneamente sobre un conjunto poblacional más o menos amplio, hacen de los algoritmos genéticos una técnica robusta de resolución de problemas.

A esto contribuye el denominado *paralelismo implícito* de los algoritmos genéticos; debido al tipo de codificación empleado (generalmente binario), del procesamiento de cada individuo (del código de cada individuo) se obtiene información sobre todos los individuos cuyos códigos siguen patrones similares.

El proceso comienza, como en el resto de las técnicas de computación evolutiva, generando un conjunto de soluciones al problema de manera aleatoria. Cada una de estas soluciones está codificada mediante una cadena de longitud finita (cuyo contenido son habitualmente valores binarios) que la hace corresponder con un punto del dominio del problema. Estableciendo la analogía natural, dicha cadena sería un cromosoma y cada elemento de la cadena un gen.

La transformación de los individuos de cada generación se lleva a cabo mediante la definición de una serie de operadores genéticos. Los más habituales son la selección, el cruce, y la mutación, aunque existen otros tipos y múltiples variantes de los anteriores (mutación no uniforme, mutación no estacionaria, cruces con adaptación, cruces solitarios, cruces anulares...). Mediante la aplicación de estos operadores sobre los cromosomas de diferentes miembros de la población, es posible obtener individuos que hereden las características de sus predecesores.

Para ello se deberán escoger previamente los individuos que participarán de cada uno de los operadores genéticos, y aquellos que sobrevivirán y pasarán a la siguiente generación. El mecanismo de muestreo empleado puede ser muy diverso, yendo desde la selección directa de los mejores individuos (aquellos cuyos caracteres los hacen más adaptados al medio), a muestreos estocásticos de diversos tipos (por sorteo, por ruleta, por torneos, por restos...).

El proceso se repite hasta que algún individuo alcanza un valor prefijado del nivel de adaptación, el algoritmo converge [Goldberg, 89; Rudolph, 94; Srinivas et al., 94b], o simplemente, hasta que el número de interacciones llega a un valor determinado.

Los algoritmos genéticos serán tratados en profundidad en el siguiente capítulo de este trabajo.

5.3.3.3.2 Programas de evolución

Aunque algunos autores proponen a los programas de evolución como una categoría particular dentro de la computación evolutiva [Michalewicz, 92; Pérez, 04; Romero et al., 04], la mayor parte coincide en incluirlos como una variante de los algoritmos genéticos [Spears et al., 93; Fogel, 94; Santamarina, 95].

Los algoritmos genéticos requieren una mínima cantidad de información y conocimiento específico sobre el problema a resolver, logrando de esta manera una gran generalidad y una importante reducción del esfuerzo de implantación para cada problema concreto. Ésta generalidad es obtenida, entre otras causas, por la exigencia de representar los individuos a través de cadenas binarias (existiendo sólo dos posibles alelos para cada gen) cumpliendo el principio del alfabeto de símbolos mínimo, lo cual maximiza, además, el grado de paralelismo implícito. Esta forma de representación limitada supone un grave inconveniente para resolver problemas en los que se deban considerar restricciones importantes en el espacio de búsqueda. Este es el caso de gran parte de los problemas de ingeniería en los que se requiera gran precisión. La representación binaria puede, en estos casos, originar individuos de gran tamaño que requieren grandes capacidades de cómputo y almacenamiento. Por otra parte, individuos representados por cadenas extremadamente largas, hacen aumentar el tamaño del espacio de posibles soluciones, lo que según Zbigniew Michalewicz [Michalewicz, 92] hace disminuir el rendimiento de los algoritmos genéticos.

Este autor propuso una representación alternativa (matrices, listas, árboles, vectores de reales...) más cercana al dominio del problema y de mayor significación. Por otra parte, propone que los operadores genéticos sean adaptados al dominio de búsqueda y en general al problema. Se trata de lograr operadores genéticos cerrados, es decir, que el resultado de aplicar dichos operadores sea siempre un individuo factible. Así pues, bastaría con generar una población inicial factible para que el algoritmo permaneciera siempre en el dominio del problema. Estas modificaciones proporcionan cierto conocimiento específico al algoritmo, que aunque disminuyen su generalidad respecto a los algoritmos genéticos, aumentan su eficiencia en la consideración de restricciones importantes y en la resolución de problemas de optimización numérica.

Los programas de evolución parecen obtener buenos resultados comparables con otros métodos con un carácter marcadamente heurístico. Al parecer, la pérdida de paralelismo implícito, consecuencia de la violación del principio del alfabeto de símbolos mínimo (que reduce la variedad de los esquemas), queda compensada por la inclusión de información en la codificación de los individuos y por el empleo de operadores genéticos sensibles al problema.

5.3.3.3 Estrategias evolutivas

Las estrategias evolutivas fueron desarrolladas por Rechenberg [Rechenberg, 73] como procedimientos estocásticos de optimización paramétrica de paso variable adaptativo (dadas estas características podrían encontrarse ciertas analogías con el recocido simulado), diseñadas específicamente para resolver problemas de optimización paramétrica [Atmar, 94; Fogel, 94; Fogel et al., 94; Nissen, 94].

Las estrategias evolutivas **simples** (o de dos miembros) hacen evolucionar a un único individuo y emplean la mutación como único operador genético. El único individuo será representado mediante dos cromosomas (vectores reales), uno de los cuales representa un punto del dominio de búsqueda y el otro es un vector de desviaciones empleado para realizar la mutación. Dado que existe un único individuo no tiene sentido el operador selección, y el criterio de reemplazo se limita a que el descendiente sustituye al progenitor si aquél es mejor que éste.

Las estrategias evolutivas **múltiples** surgen como respuesta a la tendencia de las estrategias simples a converger prematuramente hacia sub-óptimos locales [Schwefel, 81]. Este problema se afronta mediante la búsqueda múltiple y la adecuada discriminación de los descendientes. Para ello se hace necesario introducir el operador selección y el operador cruce, que permiten dicha discriminación y la recombinación de los cromosomas de diferentes individuos. A diferencia de los algoritmos genéticos el criterio de reemplazo es puramente determinista.

Las diferencias fundamentales entre algoritmos genéticos y estrategias evolutivas podrían resumirse en:

- las estrategias evolutivas requieren de un mayor conocimiento específico del problema a resolver que los algoritmos genéticos
- los algoritmos genéticos realizan una búsqueda global mientras que las estrategias evolutivas obtienen mejores resultados en búsquedas localizadas
- mientras que el operador genético clave en un AG es el que permite la recombinación (cruce), en las estrategias evolutivas este papel lo asumen los operadores de alteración (mutación)
- el procedimiento de reemplazo en los algoritmos genéticos es estocástico, mientras que las estrategias evolutivas utilizan criterios deterministas (se escogen los mejores individuos de la población)
- mientras que los algoritmos genéticos son de adecuada aplicación en la optimización de atributos, las estrategias evolutivas se emplean preferentemente en la optimización paramétrica.

Es posible encontrar diferencias también en la analogía natural de cada una de las técnicas. Mientras que en los algoritmos genéticos cada elemento de la cadena empleada para codificar un individuo representa un gen (siendo la cadena un cromosoma), en las estrategias evolutivas cada elemento de la cadena representa

un carácter (un rasgo fenotípico). En el primer caso el procedimiento de optimización se lleva a cabo actuando sobre el genotipo, mientras que el segundo se actúa directamente sobre el fenotipo.

5.3.3.3.4 Programación evolutiva

La programación evolutiva [Fogel et al., 66] nace como uno de los primeros intentos de dotar de inteligencia a las máquinas empleando analogías evolutivas, y encontró en sus inicios algunas reticencias por parte de la comunidad científica. La intención de Fogel era que las máquinas pudieran conocer su entorno, prever los cambios y reaccionar adecuadamente ante estos.

El problema fue planteado por Fogel codificando el entorno como una secuencia de símbolos tomados de un alfabeto finito. El algoritmo opera sobre esa secuencia para producir un símbolo de salida que anticipe el siguiente símbolo a aparecer en el entorno. La representación de dicho comportamiento se llevó a cabo mediante máquinas de estados finitos (o autómatas finitos), que consiste en un conjunto de estados y reglas de transición entre ellos, de forma que, al recibir una entrada, cambia o no de estado y produce una salida.

La programación evolutiva basada en autómatas finitos opera de la siguiente manera [Fogel, 94]:

- se crea una población inicial de autómatas de manera aleatoria
- se proporciona a dicha población una cadena de símbolos que codifican las variaciones del entorno observadas hasta el momento
- ante cada símbolo de entrada, las máquinas suministran un símbolo de salida que es comparado con el siguiente símbolo de la cadena proporcionada, siendo valorado cada individuo en función de la proximidad de la predicción a la realidad
- nuevos autómatas son creados a partir de la mutación aleatoria de los anteriores, siendo evaluados en su comportamiento ante la misma cadena representativa del entorno que sus progenitores
- se escoge a los mejores individuos de entre los autómatas originales y aquellos creados por mutación para formar parte de la nueva población que mantendrá un tamaño constante
- los dos últimos pasos son repetidos hasta que aparece un nuevo símbolo en la cadena representativa del entorno que aún no ha sido experimentado por los autómatas, momento en el que se reinicia el proceso

En la codificación de los individuos, cada gen podría interpretarse como una terna en la que se indica: el estado de partida, la cadena reconocida procedente del entorno y el estado al que se llegará partiendo del estado original y ante dicho entorno. En definitiva, cada gen es una regla que especifica las condiciones (cadena reconocida) que se deben cumplir para llegar a un estado (estado destino)

suponiendo que la máquina se encuentra en un cierto estado (estado origen).

Aunque el procedimiento es análogo al resto de las técnicas evolucionistas, pueden remarcar algunas diferencias respecto a la analogía natural. La codificación empleada difícilmente permite asociar cada cadena con un individuo, si no que más bien, representaría a un conjunto de individuos con características comunes dotados de aislamiento reproductivo (especie). El cruce aplicado a individuos de diferentes especies da lugar a individuos inviables, de hecho, no existe como tal en ésta técnica el operador de cruzamiento, siendo la adaptación de cada especie al medio mediante la mutación de sus caracteres, la que rige el proceso de optimización.

5.3.3.3.5 Otras técnicas

Aunque las categorías antes descritas son los paradigmas de la computación evolutiva, existen otras muchas técnicas clasificables como tales. Éstas surgen habitualmente por el refinamiento del comportamiento de los algoritmos en aspectos concretos, por la introducción de modificaciones que aportan al algoritmo conocimiento específico para la resolución de problemas en diversas áreas, por el empleo de otro tipo de analogías naturales o por la combinación de diferentes técnicas, heurísticas o no, dando lugar a algoritmos híbridos. Ejemplos de lo dicho son los algoritmos meméticos, la evolución diferencial o la programación genética.

Los **algoritmos meméticos** combinan conceptos y estrategias de diferentes metaheurísticas para intentar aunar las ventajas de las mismas. Emplean el concepto de transmisión memética⁴⁷ en una evolución de tipo poblacional combinada con mejoras individualizadas de las soluciones. Introducen el concepto de metaoperador, que modifica la forma de proceder del operador mutación, en función de aquellas actuaciones que mejores resultados previos han ofrecido. Estos metaoperadores operan como optimizadores locales.

La **evolución diferencial** es una variante relativamente simple de los algoritmos genéticos empleada para el modelado de sistemas. Emplea operadores de recombinación y mutación, teniendo este último operador la capacidad de autoadaptarse durante la evolución de la población.

La **programación genética** tiene la particularidad de no tratar de resolver un problema de forma directa si no de encontrar la manera más sencilla de resolverlo. En este caso los individuos codificados (mediante árboles de análisis) son algoritmos o programas que resuelven dicho problema. La capacidad y eficiencia de cada individuo en la resolución determinará sus posibilidades de transmitir su carga genética. Los operadores empleados están adaptados a la forma de codificación empleada.

⁴⁷ El término memes fue acuñado por Richard Dawkins como analogía de genes en 1976 en su libro "The Selfish Gene". En esencia los memes son ideas que evolucionan de acuerdo a los mismos principios que gobiernan la evolución biológica; son conocimiento adquirido, cultura, comportamientos, formas de actuar, que son transmitidos entre individuos por imitación.

Por último, cabe destacar la tendencia actual hacia la paralelización en la ejecución de los algoritmos evolutivos. Es posible la ejecución descentralizada de los algoritmos debido a que en la aplicación de los operadores interviene un número limitado de individuos (habitualmente uno en la mutación y dos en el cruce), y a que la evaluación se realiza individuo a individuo de manera independiente al resto de la población. La más sencilla de las posibilidades es que varios procesadores compartan las tareas de evaluación (habitualmente las más intensivas en empleo de recursos). La mayor parte de las tareas se realizan en un único procesador que tras cada evolución envía los individuos al resto de máquinas para ser evaluados. Otras estructuras más complejas y eficientes dividen a la población (formando *islas* o *demes*) en diferentes equipos de cálculo que, cada cierto número de generaciones, se intercambian individuos (migración) [Tam et al., 98].

5.3.4 Colonias de hormigas

Las hormigas son capaces de encontrar el camino más corto desde el hormiguero hasta una fuente de comida sin necesidad de referencias visuales. Son capaces, además, de adaptarse a cambios en el entorno que les obligan a modificar las rutas preestablecidas; la aparición de un nuevo obstáculo en su camino es ejemplo de ello. El mecanismo empleado por las hormigas para realizar dichas actividades esta basado en el seguimiento de rastros de feromonas⁴⁸.

El movimiento de una hormiga de manera individual se realiza de forma aleatoria. Al topar con un obstáculo en su camino elige para continuar cualquiera de las posibilidades sin un criterio definido (Figura 5.15 a). Durante el recorrido deja en el camino un rastro de feromonas cuya intensidad será inversamente proporcional a la distancia desde el hormiguero, dado que la velocidad de desplazamiento es prácticamente constante. Así, el rastro será más intenso en el camino más corto (Figura 5.15 b). A partir de ese punto el resto de hormigas seguirán con una mayor probabilidad el camino más corto hacia el objetivo marcado con mayor intensidad por la feromona (Figura 5.15 c).

Mediante una analogía con dicho comportamiento de las hormigas, Marco Dorigo presentó en su tesis doctoral [Dorigo , 92] un algoritmo basado en agentes (hormigas) que cooperan entre sí para obtener la solución a un problema intercambiando sus experiencias. En los sistemas reales esa memoria distribuida está representada por el rastro de feromonas que marca el camino a seguir. Si un camino resulta interesante se incrementa la cantidad de feromona. En los sistemas artificiales se modeliza mediante el aumento de la probabilidad de elegir un elemento en la construcción de la solución.

⁴⁸ Las feromonas son sustancias químicas producidas por las glándulas sexuales de algunos animales (de forma destacable en los insectos) para atraer al individuo del otro sexo. La palabra feromona ha derivado para referirse a todo tipo de hormonas de atracción sexual, cuando en realidad las feromonas son un tipo de hormona de atracción específica producida por las hembras de muchas especies de animales, incluyendo a los seres humanos.

Los algoritmos de colonias de hormigas han sido aplicados a diversos ámbitos, entre los cuales se encuentran el problema del viajante de negocios [Dorigo et al., 97; Dorigo et al., 97], la secuenciación de la producción [Andrés, 01b], el problema cuadrático de asignación [Maniezzo et al., 95; Colomi et al., 96], en combinación con algoritmos genéticos aplicado al problema de asignación de actividades [Lee et al., 05], el problema de la disposición ergonómica de las teclas en un teclado [Eggers et al., 03] o el problema de la generación de agendas de rotación [Seçkiner et al., 07b] (ver 5.3.4.1).

Como ejemplo, en [Colomi et al., 92] se aplica el algoritmo al problema del viajante de negocios. Para ello, se define el número de agentes (hormigas) que participarán en la búsqueda (h), el coeficiente de evaporación ρ que marca el ritmo con el que desaparecerá la feromona depositada por los agentes en sus recorridos, la intensidad inicial de las trayectorias (feromona inicial depositada en las trayectorias) $\tau_{ij}(t)$, y el número de hormigas que parten de cada ciudad $h_i(\mathbf{0})$.

Cada hormiga construye un recorrido haciendo variar la intensidad de su trayectoria de acuerdo a la expresión:

$$\tau_{ij}(t + 1) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t, t + 1)$$

en la que $\tau_{ij}(t)$ es la intensidad de la trayectoria entre las ciudades i y j en el instante t , y $\Delta \tau_{ij}(t, t+1)$ es el aumento de la intensidad entre las ciudades i y j definido como la suma de los aumentos de intensidad para los h agentes u hormigas definidos. Este proceso se repite durante un número de ciclos determinado.

Para calcular el aumento de la intensidad del recorrido individual de cada hormiga, Marco Dorigo y sus colaboradores propusieron tres posibilidades [Dorigo et al., 97] que se diferencian en el momento y la forma de actualizar una matriz de intensidades [Dorigo et al., 96].

La primera propuesta se denomina *Ant-density* y en ella se realiza una actualización constante de la intensidad en el recorrido de la hormiga según la expresión:

$$\Delta^k \tau_{ij}(t, t+1) = \begin{cases} Q_1 & \text{si la hormiga } k \text{ viaja desde } i \text{ a } j \text{ entre } t \text{ y } t+1 \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

En la segunda propuesta, llamada *Ant-quantity*, la actualización se realiza de manera proporcional inversa a la distancia recorrida entre dos ciudades:

$$\Delta^k \tau_{ij}(t, t+1) = \begin{cases} \frac{Q_2}{d_{ij}} & \text{si la hormiga } k \text{ viaja desde } i \text{ a } j \text{ entre } t \text{ y } t+1 \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

Por último, en la denominada *Ant-cycle*, la actualización es inversamente proporcional al trayecto completo realizado por la hormiga:

$$\Delta^k \tau_{ij}(t, t+1) = \begin{cases} \frac{Q_3}{L^k} & \text{si la hormiga } k \text{ utiliza el tramo } ij \text{ en su recorrido} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$

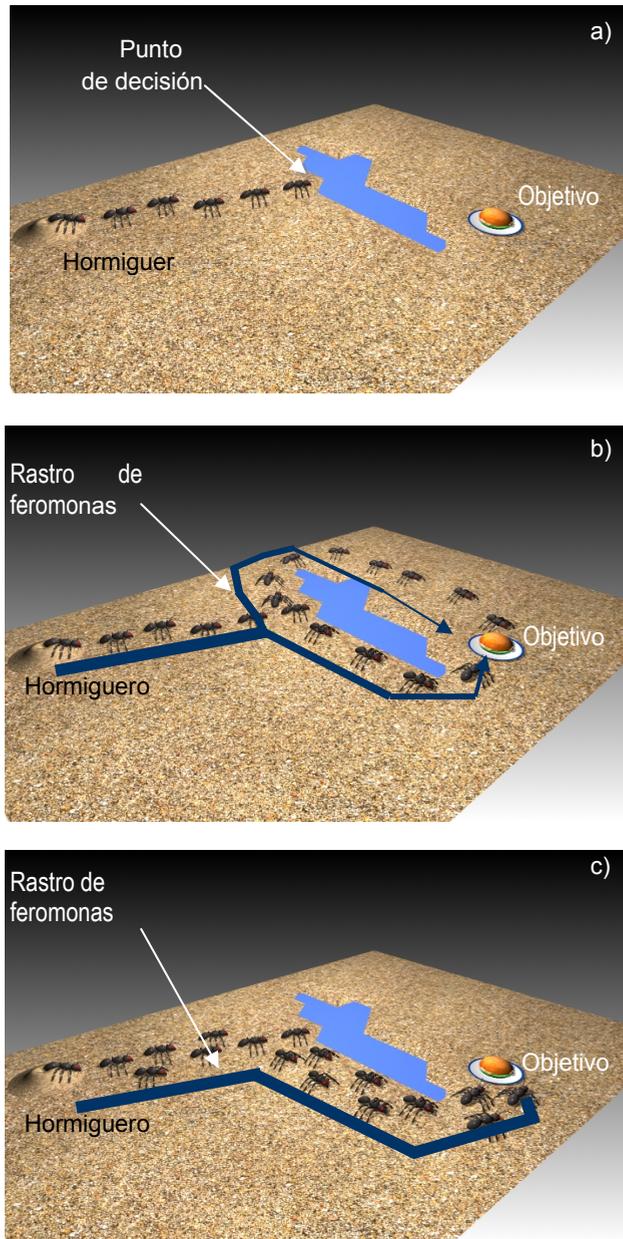
En estas tres expresiones Q_i es una constante denominada *intensidad de la feromona*, d_{ij} es la distancia entre dos ciudades medida de forma euclídea y L^k es la distancia total recorrida por la hormiga k .

Definiendo la visibilidad μ_{ij} como el inverso de la distancia euclídea entre las ciudades i y j , la probabilidad de que una hormiga k vaya desde la ciudad i a la ciudad j en una iteración es una función de la intensidad expresada mediante:

$$p_{ij} = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\mu_{ij}(t)]^\beta}{\sum_{j=1}^n [\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\mu_{ij}(t)]^\beta}$$

en la que α y β ponderan la importancia de cada factor. Se evita que una hormiga visite más de una vez una misma ciudad en un recorrido mediante una lista tabú simple (ver 5.3.2.2).

En definitiva, en cada iteración cada hormiga parte de la ciudad a la que fue asignada y realiza movimientos entre ciudades, basándose en las intensidades de los caminos entre ellas para escoger el más adecuado hasta completar todo el recorrido (hasta que la lista tabú esté completa). Se memoriza el recorrido de menos coste, se actualizan las intensidades y se vuelve a repetir el proceso.



5.3.4.1 Aplicación de los algoritmos de hormigas a la obtención de agendas de rotación

Tras las aplicación del recocido simulado al problema de las agendas de rotación de puestos de trabajo en [Seçkiner et al., 07a], los mismos autores exploran la efectividad de los algoritmos de colonias de hormigas aplicados a dicho tipo de problema [Seçkiner et al., 07b]. El obojtivo del estudio, es al igual que en el anterior, la minimización de la carga de trabajo de los empleados. El estudio propone dos algoritmos de colonias de hormigas (ACO-1 y ACO-2) cuyos resultados son comparados con los obtenidos con la aplicación del algoritmo de recocido simulado y la solución obtenida a partir de un modelo de programación entera (idéntico al descrito en [Seçkiner et al., 07a]). Los resultados del estudio ponen de manifiesto que los algoritmos de colonias de hormigas son capaces de competir de forma efectiva con el algoritmo de recocido simulado o el modelo de programación entera (en un tiempo limitado de CPU, sin haber sido alcanzada la solución óptima) en la búsqueda de soluciones sub-óptimas.No obstante, según afirma [Seçkiner et al., 07b], el algoritmo de recocido simulado parece ofrecer un mejor rendimiento que los algoritmos de hormigas propuestos.

5.3.4.1.1 Descripción del algoritmo de colonias de hormigas

En [Seçkiner et al., 07b] la distancia entre nodos o arco es indicada por c_{mik} que representa el coste, en términos de carga de trabajo, de cada trabajador al realizar el trabajo m en el turno k en el día i . Cada nodo está representado por la demanda de trabajo D_{mik} , que representa el número de empleados asignados al turno k en el día i para realizar la tarea m .

En un tiempo t , una hormiga n en un nodo i (equivalente en lo sucesivo a D_{mik} para simplificar las expresiones) elige el siguiente nodo j (equivalente a los nodos vecinos $D_{m(i+1)k}$, $D_{(m+1)(i+1)k}$, $D_{m(i+1)k}$ o $D_{(m+1)(i+1)(k+1)}$, etc.) en base a la siguiente probabilidad:

$$p_{ij}^n(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{l \in \text{tabu}_n} [\tau_{il}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{il}]^\beta} \quad j \notin \text{tabu}_n \\ 0 \quad j \in \text{tabu}_n \end{array} \right\}$$

Ecuación 1: Probabilidad de visitar el nodo j desde el nodo i por la hormiga n en un tiempo t .

En la Ecuación 1 la visibilidad (η_{ij}), definida como $1/d_{ij}$ favorece la selección del nodo más cercano en términos de coste de carga de trabajo (c_{mik}). La probabilidad de selección está también afectada por $\tau_{ij}(t)$ que es la intensidad de la senda de feromona del arco i y j . En la inicialización del algoritmo, a cada arco se le asigna una intensidad arbitraria positiva y de bajo nivel τ_0 . Los parámetros α y β

son utilizados para variar la importancia relativa de la visibilidad y la intensidad del camino. Para asegurar la obtención de soluciones factibles, los nodos que ya han sido visitados en el camino actual son excluidos de la selección mediante el uso de una lista tabú $tabu_n$, sin embargo, en el estudio de [Seçkiner et al., 07b] los nodos se refieren a requerimientos de trabajadores que pueden ser visitados más de una vez, por lo que la lista tabú utilizada difiere de la lista normalmente empleada en los sistemas de hormigas. En el estudio la lista tabú contiene nodos que han sido visitados. Por ejemplo, si el nodo D_{mik} corresponde a una demanda de tres trabajadores, entonces tres hormigas visitaron el nodo D_{mik} y la solución factible contiene tres veces el nodo D_{mik} .

En el estudio un recorrido está formado por nodos que representan días diferentes. El número de hormigas es igual al número de trabajadores (n). El número de recorridos o soluciones es, por tanto, igual al número de trabajadores. El conjunto de recorridos de todos los trabajadores configuran la agenda de rotaciones. Dichos recorridos se completan cuando sus correspondientes hormigas han recorrido d nodos, con la restricción de que una hormiga (trabajador) no puede pasar por nodos que compartan el mismo día.

En el algoritmo ACO-1, descrito hasta el momento, se completa un ciclo cuando las n hormigas (trabajadores) han completado un recorrido por d nodos. Al final de cada ciclo se actualiza la intensidad de las trayectorias seguidas por cada hormiga en función del resultado de la evaluación de la solución encontrada en él. La cantidad de feromona añadida por la hormiga n al arco ij es proporcional a la calidad del recorrido medido por $Q/L_n(t)$, donde Q es un parámetro del sistema y $L_n(t)$ es la longitud del recorrido encontrado en t por la hormiga n ésima (n). A la actualización del camino también le afecta el factor de evaporación $1 - \rho$, que disminuye la feromona del camino presente durante los ciclos previos.

Las modificaciones realizadas en el algoritmo ACO-1, respecto a los algoritmos de hormigas generales, afectan en primer lugar, a la construcción de la solución y en segundo lugar, al cálculo de la función objetivo al final del ciclo. El algoritmo busca la carga de trabajo más suave entre los trabajadores y el indicador es la desviación estándar de la longitud de los recorridos encontrados por las n hormigas en términos de carga de trabajo.

Definido el algoritmo ACO-1 se define el algoritmo ACO-2 que se diferencia del primero en la ecuación de la visibilidad η_{ij} :

La visibilidad de ACO-1 es $\eta_{ij} = 1/c_{ij}$

La visibilidad de ACO-2 es $\eta_{ij} = 1/(carcs / arcs - \frac{W}{N})$

donde:

$carcs$ es el coste de los arcos recorridos.

$arcs$ los arcos

W es la carga de trabajo total

N es el número de nodos

Por último, la representación de la solución de los algoritmos ACO-1 y ACO-2 es

idéntica a la descrita con anterioridad para el algoritmo de recocido simulado (ver 5.3.1.4).

A continuación se muestra el pseudocódigo del algoritmo de hormigas adaptado por [Seçkiner et al., 07b] para su aplicación al problema de la generación de agendas de rotación.

```

For cada arco (i,j) do /*Inicialización*/
    Asignar valor inicial para cada hormiga  $\tau_{ij}(0) = \tau_0$ 
End for
Inicializar STD (desviación estándar inicial)
Inicializar T+ (mejor recorrido inicial) y L+ es su longitud
For t=1 to tmax do /*Bucle principal*/
    For n hormigas do /* Recorrer nodos*/
        Situar hormiga en un nodo seleccionado aleatoriamente
        Comprobar en la lista tabun si ha sido visitado
    End for
    For n hormigas do /*construcción del recorrido de cada hormiga*/
        Construir recorridos Tn(t) aplicando n-1 veces los siguientes pasos:
            Elegir el siguiente nodo j con la probabilidad  $p_{ij}^n(t)$  (Ecuación 1)
            Comprobar en la lista tabun si ha sido visitado
            Calcular la longitud  $L_n(t)$  del recorrido Tn(t) obtenido por cada hormiga
            Calcular la STD ( $L_n(t)$ )
            If existe una hormiga que mejore STD actual then
                Actualizar T+ y L+
            En if
    End For
    For cada arco (i,j) do /*Actualizar el rastro de feromona*/
        
$$\Delta^n \tau_{ij}(t) = \begin{cases} \frac{Q}{L(t)} & \text{si la hormiga n utiliza el tramo ij en su recorrido} \\ 0 & \text{en cualquier otro caso} \end{cases}$$


$$\tau_{ij}(t+1) = \rho * \tau_{ij}(t) + \sum_n \Delta \tau_{ij}^n(t) \text{ donde}$$

    End for
    Vaciar la lista tabun
End For (tmax)
    Imprimir la menor STD y el camino T+ y su longitud L+
    
```

Figura 5.16: pseudocódigo del algoritmo de colonia de hormigas propuesto por [Seçkiner et al., 07b]

6

**Algoritmos genéticos y su aplicación a la
generación de agendas de rotación**

6. ALGORITMOS GENÉTICOS Y SU APLICACIÓN A LA GENERACIÓN DE AGENDAS DE ROTACIÓN

6.1. Introducción

Aunque los algoritmos genéticos fueron tratados brevemente en el capítulo anterior, incluyéndolos en el grupo de técnicas de computación evolutiva, se considera necesario en este punto, dado que será la técnica empleada en la metodología que la presente tesis propone, realizar una exposición más completa y detallada de su estructura, sus principios de funcionamiento, las bases teóricas que los sustentan, sus diferentes variantes, su ámbito de uso y aplicaciones, así como de las limitaciones prácticas y las estrategias para superarlas. Tras su estudio en profundidad, se abordará la aplicación de los algoritmos genéticos al problema de la generación de agendas de rotación de puestos de trabajo. En concreto se describirán con detalle las propuestas de [Carnahan et al., 00] y [Nanthavanij et al., 01; Kullpattaranirun et al., 05]. Tal y como se señaló en el capítulo anterior, la aplicación de este tipo de metaheurísticas al problema de la rotación de puestos de trabajo es escasa y novedosa.

El aumento de la capacidad de proceso de los ordenadores durante la década de los 60, convirtieron a éstos en instrumentos adecuados para la resolución de problemas con grandes requerimientos de cálculo. A finales de esa década y principios de la siguiente, un grupo de investigadores de la Universidad de Michigan en Ann Arbor, denominado *Logic of Computers*, encabezados por John Holland, desarrollan los algoritmos genéticos basándose en una analogía con la evolución de los seres vivos [Holland, 75].

La resolución de un problema complejo determinado puede asimilarse a la búsqueda de una solución óptima (o al menos sub-óptima) en un espacio de soluciones extenso. La naturaleza se enfrenta a un problema de este estilo en su búsqueda de la mejor adaptación de los individuos al medio. Los miembros de una determinada población compiten entre ellos en la búsqueda de la supervivencia. Aquellos individuos capaces de adaptarse mejor a las condiciones del medio que les rodea tendrán mayor probabilidad de sobrevivir. Los miembros de la población con mayor habilidad para conseguir alimentos, soportar las condiciones climáticas o defenderse de otras especies, disfrutarán de una esperanza de vida mayor, de una mayor probabilidad de reproducirse y lograrán una descendencia más numerosa. De esta manera, las características del individuo que han determinado su mayor

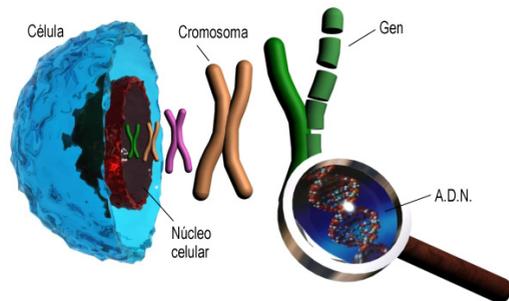


Figura 6.1: Estructura celular.

habilidad para desenvolverse en el medio serán transmitidas a su descendencia. Por otra parte, los individuos menos dotados y adaptados al entorno tendrán una probabilidad menor de transmitir dichas características a las siguientes generaciones.

El conjunto de rasgos o características observables del individuo (fenotipo) que han determinado su éxito o su fracaso, son la expresión de la información contenida en su carga genética⁴⁹. Dicha información se encuentra codificada en los genes, una secuencia de nucleótidos (fragmento de ADN) en una determinada localización de un cromosoma específico. Los cromosomas, generalmente agrupados por parejas, se encuentran en el interior del núcleo celular (Figura 6.1).

Durante la reproducción cada uno de los padres transmite a su descendencia parte de su carga genética. Como resultado de este cruce los individuos descendientes poseerán características fenéticas de ambos progenitores. Dado que los individuos mejor dotados poseerán una mayor descendencia, las sucesivas generaciones disfrutarán de la combinación de las buenas características de generaciones pasadas, lo que se traducirá en una mejor adaptación al medio.

El hecho de que la probabilidad de reproducción sea mayor en los individuos mejor dotados, no significa que por diversas razones individuos con una menor capacidad de adaptación al medio, sean capaces de sobrevivir y de transmitir su carga genética a generaciones futuras. Aunque las características de dichos individuos no sean las apropiadas para la supervivencia en unas condiciones determinadas, el cruce de su información genética con la de otros miembros de la población, puede dar lugar a particularidades que resulten exitosas en generaciones futuras. Esto introduce diversidad genética en el proceso y una mayor capacidad de respuesta ante cambios en el entorno.

Otra fuente de variabilidad genética es la debida a las mutaciones producidas en el material genético. Estas mutaciones introducen en la población características diferentes a las heredadas de generaciones anteriores. En realidad, este cambio aleatorio en los genes de un organismo, difícilmente procurará una mejora en un individuo bien adaptado a su entorno; la mayor parte de las características que aportan las mutaciones suelen desaparecer durante el proceso de selección. Sin embargo, en casos determinados, pueden suponer rasgos que permitan una mayor adaptación de los individuos al medio.

La información genética determina el poder de adaptación de cada especie (y

⁴⁹ Siendo exhaustivos, el fenotipo no es consecuencia únicamente de la información genética del individuo, sino que se ve afectado por las condiciones ambientales en las que el individuo se desarrolla. Así, el glosario de términos genéticos del National Human Genome Research Institute define fenotipo como: "[...] conjunto de rasgos o características observables de un organismo. [...] el fenotipo es siempre algo que podemos observar. Se puede observar en la clínica, en el laboratorio o en las interacciones sociales. El fenotipo no es la constitución genética de un organismo. Es de algún modo la expresión o el resultado de la constitución genética de ese organismo y está determinado por los genes y por el ambiente en que el individuo crece y se desarrolla."

dentro de cada especie, de cada individuo). Los individuos más adaptados sobreviven y se reproducen en mayor medida dando lugar al proceso de cambio dirigido denominado Selección Natural. Dicho proceso resulta evidentemente eficaz y, sobre todo, robusto, dado que permite la adaptación exitosa de las poblaciones en ambientes mutables e inciertos. En realidad, la Selección Natural no persigue una mejora continua de los individuos y las poblaciones, si no la mejor adaptación posible de estos al entorno en el que sobreviven. Individuos bien adaptados a un entorno concreto pueden tener un peor comportamiento en los entornos de sus antecesores. La selección natural, y por analogía los algoritmos genéticos, son procesos robustos dado que permiten la obtención de buenas soluciones en entornos muy diferentes.

6.2. Terminología y analogías planteadas

Antes de profundizar en la exposición se hace necesario proporcionar algunas definiciones de términos posteriormente empleados:

Solución o alternativa: Configuración compatible con las restricciones del problema y que le da solución.

Individuo: Equivalente analógicamente a solución o alternativa.

Espacio de soluciones: Conjunto de todas las posibles soluciones a un problema determinado que es posible alcanzar con el sistema de resolución empleado. Equivale a espacio de individuos.

Población: Conjunto de individuos existentes en un momento (iteración) dado. En adelante denotado por **P**.

Generación: Proceso de creación de nuevos individuos. También se emplea como sinónimo de población.

Función objetivo o función de evaluación: Función empleada para evaluar la calidad de las soluciones. Analógicamente mediría la adaptación de los individuos a su entorno, denominándose entonces *adaptabilidad*. Generalmente es una función definida sobre el espacio de soluciones **S** y con imagen en **R**:

$$FO: S \rightarrow R$$

Los problemas planteados pretenden encontrar individuos en **S** que minimicen (o en su caso maximicen) su imagen en **R**.

Solución óptima: Solución **s** \in **S** tal que **FO(s)** sea óptimo. Análogamente, el individuo mejor adaptado a su entorno.

Solución sub-óptima: Solución de calidad cercana a la de la solución óptima o bien, de calidad aceptable para las condiciones del problema planteado.

Cadena, estructura o codificación: Secuencia de elementos que representa (codifica) a una solución o individuo. En la analogía natural es un *cromosoma*.

Gen: Analogía natural de cada uno de los elementos que conforman la cadena o cromosoma que representa un individuo.

Alelo: Valor que puede adoptar un gen.

Genotipo: Se empleará para denotar el contenido genético de un individuo, es decir, el cromosoma que lo codifica.

Medio externo: Entorno en el que se desarrollan y compiten los individuos.

Fenotipo: Características físicas de un individuo determinadas por su genotipo y las condiciones del medio externo.

Las figuras siguientes, adaptadas de [Diego-Mas, 06], aclaran algunas de las analogías planteadas en el caso del problema de la rotación de puestos de trabajo. La Figura 6.2 representa la analogía entre una solución al problema y su codificación, y un individuo y su genotipo.

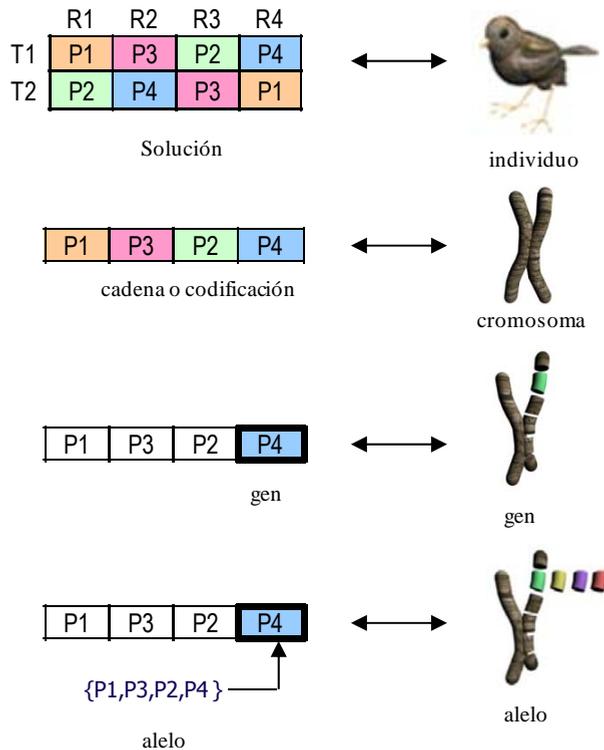


Figura 6.2: Analogías en los algoritmos genéticos, donde cada P_i (gen) corresponde a un puesto. Adaptado de [Diego-Mas, 06].

6.3. Estructura básica de un algoritmo genético

En el capítulo anterior ya se expuso brevemente la estructura básica de un algoritmo genético, pero se considera conveniente reproducirla aquí, para que sirva de guía al análisis detallado de cada uno de sus componentes.

El algoritmo comienza creando un número determinado de cadenas que codifican un conjunto de soluciones al problema objeto de estudio. Este conjunto de individuos representa la población inicial y su tamaño es un parámetro fundamental del proceso.

El criterio para valorar la calidad de cada una de las soluciones (en la analogía el grado de adecuación de cada individuo al entorno) es el valor de la función objetivo. Así en un proceso denominado genéricamente *evaluación*, se determina el valor de la función para cada individuo.

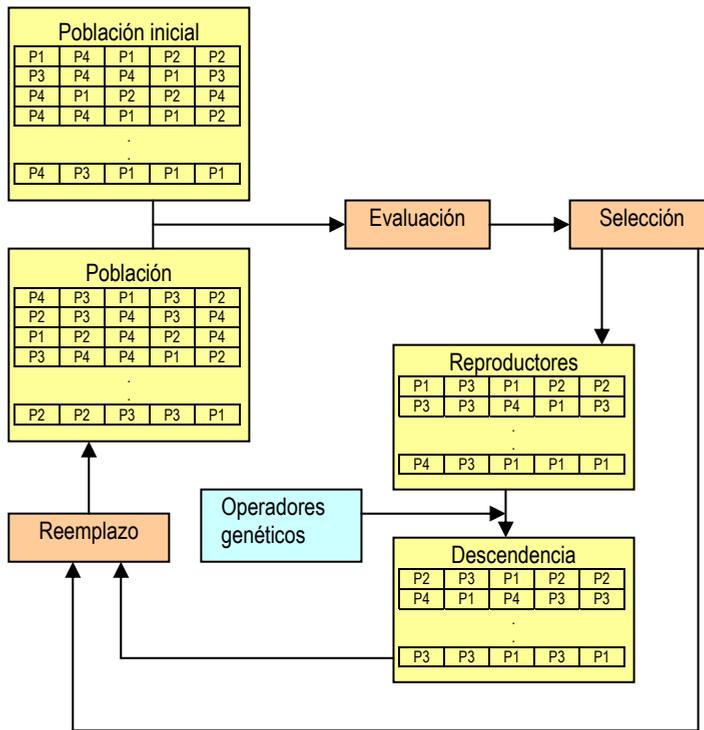


Figura 6.3: Esquema general de un algoritmo genético.

Una vez conocida la valoración de cada individuo se somete a la población a un proceso denominado *selección*, mediante el cuál se escoge un grupo de individuos que determinarán la nueva generación. La selección puede llevarse a cabo mediante diversos procedimientos, pero en general se realiza otorgando una mayor

probabilidad de ser escogido a los individuos mejor valorados.

Aunque de esta fase del algoritmo existen múltiples variantes, en general, los individuos escogidos forman una población intermedia o auxiliar, de la que se seleccionarán los individuos que se reproducirán de manera efectiva. Estos serán sometidos a los operadores genéticos (habitualmente cruzamiento y mutación), que permitirán obtener una descendencia que recoja las mejores características de los progenitores e introduzcan diversidad en la población. Del conjunto de la población auxiliar y de la descendencia se escogerá el número suficiente de individuos como para formar una nueva población. Este proceso de sustitución de los individuos de la generación anterior por nuevos individuos (que pueden ser idénticos a los ya existentes) se denomina *reemplazo*. Todo el proceso (evaluación, selección, aplicación de operadores y reemplazo) se repite hasta que se cumple un criterio de parada preestablecido.

Este procedimiento general posee algunas variantes. En algunos casos existe un doble proceso de selección. En una primera fase se seleccionan de la población los individuos destinados a reproducirse, y en la segunda se seleccionan, de manera independiente, aquellos que pasarán directamente a la nueva población. En otros casos se selecciona directamente de la población un grupo pequeño de individuos que se reproducirán y sustituirán a sus progenitores o a otros miembros de la población. Además, existen diferentes propuestas en cuanto a la forma de muestrear la población, la forma de seleccionar a los individuos, la forma de aplicar los operadores genéticos, el criterio de parada, la forma de construir la función objetivo...

Ante toda esta diversidad se hace necesario establecer las condiciones para una correcta implementación de los algoritmos genéticos.

6.3.1 Condiciones para una correcta implementación de los algoritmos genéticos

Para implementar de forma adecuada y con garantías un algoritmo genético es necesario observar el cumplimiento de una serie de condiciones, que pueden resumirse en la correcta definición de los siguientes aspectos:

- Codificación de las soluciones
- Creación de la población inicial
- Función de evaluación
- Criterios de selección
- Operadores genéticos
- Tratamiento de los individuos no factibles
- Parámetros de funcionamiento
- Criterio de parada

Cada uno de estos aspectos y la forma de una adecuada implementación serán tratados en profundidad posteriormente, pero antes, es necesario exponer algunos resultados teóricos.

6.4. Base teórica de los algoritmos genéticos

El algoritmo genético es con mucha probabilidad la metaheurística con más base teórica de las expuestas en este trabajo. Estos resultados teóricos permiten conocer porqué y cómo funcionan los algoritmos, y establecer las condiciones que maximizarán su eficacia.

6.4.1 Concepto de esquema

Como ya se ha expuesto, en los algoritmos genéticos los individuos deben ser codificados mediante cadenas (\mathbf{s}) de longitud finita (\mathbf{k}). A cada uno de los componentes de esa cadena se le denomina *gen*, y puede adoptar valores de un conjunto predefinido $\{\Theta\}$. Cada uno de los valores de dicho conjunto se denomina *alelo*. Así pues, llamando \mathbf{S} al espacio de todas las cadenas se cumple que:

$$\forall \mathbf{s} \in \mathbf{S}; \mathbf{s}=(s_1, \dots, s_i, \dots, s_k) / \forall s_i, s_i \in \{\Theta\}$$

El tamaño del espacio de las cadenas será:

$$|\mathbf{S}| = |\Theta|^k$$

Es decir, el número de cadenas posibles es igual al número de alelos elevado a la longitud de las cadenas. Mediante la introducción del concepto de esquema, es posible analizar cómo un algoritmo genético analiza el espacio de las cadenas o estructuras que representan las soluciones.

Un esquema podría definirse como un patrón de similitud entre un grupo de cadenas. Este patrón puede representar a todas las cadenas que se adaptan al patrón. Definiéndolo en sentido estricto se dirá que un esquema (\mathbf{H}) es una cadena en la que sus componentes se definen sobre el conjunto $\{\Theta \cap \#\}$ siendo $\#$ un símbolo que representa cualquiera de los alelos de Θ . Así pues el tamaño del espacio de los esquemas es:

$$(|\Theta|+1)^k$$

Como ejemplo, el esquema de carácter binario (0,#,#,1,1,0), es representativo de las cadenas (0,0,0,1,1,0), (0,0,1,1,1,0), (0,1,0,1,1,0) y (0,1,1,1,1,0).

A partir de lo expuesto puede deducirse que para un espacio de cadenas de longitud \mathbf{k} , cuyos elementos pueden tomar \mathbf{a} valores diferentes:

- un esquema \mathbf{H} que contenga \mathbf{n} símbolos $\#$ representa a \mathbf{a}^n cadenas
- una cadena dada puede ser representada por 2^k esquemas distintos
- en una población de \mathbf{P} cadenas existen entre \mathbf{a}^k y $\mathbf{P} \cdot \mathbf{a}^k$ esquemas

distintos

Dos caracterizadores fundamentales de un esquema son el orden y la longitud. Se denomina **orden de un esquema** $o(H)$ al número de componentes de la cadena diferentes de #, es decir, fijados. Se denomina **longitud de un esquema** $\delta(H)$, a la diferencia entre las posiciones ocupadas por el primer y el último componente fijo (distintos de #).

Como ejemplo, el esquema (0,#,#,1,1,0) es de orden 4 y de longitud 5.

Dado que ya es conocido que un esquema H que contenga n símbolos # representa a a^n cadenas, es fácil deducir que el número de cadenas representadas se puede calcular también como $a^{k-o(H)}$, es decir, cuanto mayor sea el orden del esquema a menos cadenas representará. El orden de un esquema será posteriormente empleado para deducir la probabilidad de supervivencia de un esquema frente al operador mutación. La longitud del esquema es una medida de la compacidad de la representación, y se empleará para estimar la probabilidad de supervivencia del esquema frente a los cruces.

Analizando la evolución de los esquemas durante la ejecución de los algoritmos genéticos, John H. Holland dedujo dos resultados teóricos conocidos como el teorema fundamental de los algoritmos genéticos y el paralelismo implícito de los algoritmos genéticos. Ambos resultados son abordados a continuación.

6.4.2 Teorema fundamental de los algoritmos genéticos. Teorema del esquema o teorema de Holland

Considérese una población de tamaño p de cadenas de longitud k en una generación g . Llámese $m(H,g)$ al número de cadenas de la población que se ajustan a un esquema H . El teorema de Holland, permite realizar una estimación del número de cadenas ajustadas a H que existirán en la siguiente generación de un *algoritmo genético básico*⁵⁰, tras haber actuado los operadores genéticos básicos (selección, cruzamiento y mutación).

De forma simplificada puede expresarse que:

$$m(H,g+1)=m(H,g) k_g k_s$$

Es decir, el número de cadenas representadas por el esquema H en una generación, será el de la generación anterior afectado por dos factores, el factor de crecimiento (k_g) y el factor de supervivencia (k_s). El factor de crecimiento mide la tendencia del esquema a aumentar su presencia en la población, estando relacionado con el operador selección. El factor de supervivencia mide la probabilidad de que el esquema sobreviva en la generación siguiente, estando

⁵⁰ El teorema fundamental se enuncia sobre un algoritmo genético propuesto por Goldberg [Goldberg, 89], habitualmente denominado algoritmo genético básico (SGA). En un SGA la codificación de los individuos es binaria, la inicialización aleatoria, la selección por sorteo y el reemplazo inmediato. Los operadores genéticos son el cruzamiento y la mutación bit a bit. De manera ideal, se considera a los operadores cerrados (no pueden generar individuos no factibles) por lo que no existe tratamiento de individuos no válidos.

relacionado con los operadores cruce y mutación.

El operador selección escoge a los individuos que se reproducirán en función su adaptación. En un algoritmo genético básico la selección se realiza por sorteo, por lo que:

$$P(\mathbf{s},g) = \frac{\mu(\mathbf{s})}{\bar{\mu}}$$

donde:

$P(\mathbf{s},g)$ es la probabilidad de que la cadena \mathbf{s} sea seleccionada con fines reproductivos en la generación g .

$\mu(\mathbf{s})$ es la adaptación de la cadena \mathbf{s} en la generación g .

$\bar{\mu}$ es la adaptación media de todas las cadenas presentes en la población en la generación g .

De la misma manera, el número de cadenas representadas por un determinado esquema \mathbf{H} que serán escogidas para la reproducción puede expresarse como:

$$m(\mathbf{H},g)_s = m(\mathbf{H},g) \frac{\mu(\mathbf{H})}{\bar{\mu}}$$

donde:

$m(\mathbf{H},g)_s$ es el número de cadenas representadas por un determinado esquema \mathbf{H} que serán escogidas para la reproducción en la generación g .

$m(\mathbf{H},g)$ es el número de cadenas representadas por un determinado esquema \mathbf{H} que están presentes en la población en la generación g .

$\mu(\mathbf{H})$ es la adaptación media de las cadenas representadas por \mathbf{H} en la generación g .

$\bar{\mu}$ es la adaptación media de todas las cadenas presentes en la población en la generación g .

Así pues, el factor de crecimiento (k_g) se expresa como:

$$k_g = \frac{\mu(\mathbf{H})}{\bar{\mu}}$$

Aunque un esquema sea seleccionado como reproductor, la aplicación de los operadores genéticos puede destruirlos, impidiendo que aparezcan en la generación siguiente. El factor de supervivencia (k_s) indica la probabilidad de supervivencia del esquema tras ser sometido a los operadores cruce y mutación. Su valor exacto es difícil de calcular, pero puede ser acotado analizando cómo actúan los operadores.

El cruce en un SGA es monopunto; se realiza escogiendo una posición

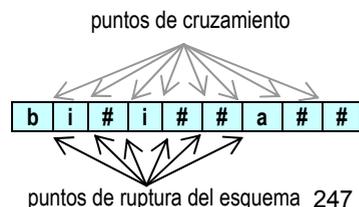


Figura 6.4: Posibles puntos de ruptura de un esquema. Adaptado de [Santamarina,

(punto de cruzamiento) e intercambiando entre las cadenas progenitoras las subcadenas que quedan a cada lado del punto de cruzamiento. En un SGA el criterio de reemplazo empleado es el *reemplazo inmediato*, por el que la descendencia sustituye a los progenitores. De esta forma las cadenas seleccionadas para un cruce son sustituidas por las cadenas resultantes del cruce.

Es posible determinar la probabilidad de que las cadenas representadas por un esquema determinado **H**, sobrevivan al operador cruce apareciendo en la siguiente generación. Si **k** es la longitud de las cadenas, existen **k-1** posibles puntos de cruzamiento. Un punto de cruzamiento determinado provocará la ruptura del esquema, si se encuentra entre el primer y el último gen fijo (diferente de #) del esquema (Figura 6.4). Así pues, el número de posibles puntos de ruptura de **H** es $\delta(H)$, definido anteriormente como la longitud del esquema.

La probabilidad de que una cadena sea sometida a cruzamiento es un parámetro del algoritmo denotado por **P_c**. Esto permite determinar que la probabilidad de que un esquema sobreviva a la aplicación del operador cruzamiento, y aparezca en la siguiente generación, es:

$$P_s(H) \geq 1 - P_c \frac{\delta(H)}{k-1}$$

El otro operador a considerar en la supervivencia de los esquemas es la mutación. En los SGA ésta se produce cambiando el valor de un determinado gen por otro alelo. Para que un determinado esquema **H** sobreviva, no debe alterarse el valor de ninguno de los genes fijos. Así pues, la mutación no debe afectar a ninguno de los **o(H)** elementos distintos de # del esquema. La probabilidad de que una cadena de la población mute vendrá dada por un parámetro del algoritmo denominado probabilidad de mutación (**P_m**).

Dado que cada esquema cuenta con **o(H)** elementos fijos que no deben mutar, la probabilidad de que un determinado esquema sobreviva tras la mutación puede expresarse como:

$$P_m(H) = (1 - P_m)^{o(H)}$$

Dado que la probabilidad de mutación suele ser muy inferior a la unidad ($P_m \ll 1$), la expresión anterior puede tomar la forma:

$$P_m(H) \approx 1 - P_m \cdot o(H)$$

Combinando las expresiones obtenidas para el cruce y la mutación podemos estimar la capacidad de un esquema para sobrevivir a la aplicación de los operadores genéticos, es decir **k_s**:

$$248 \quad k_s \geq \left(1 - P_c \frac{\delta(H)}{k-1}\right) (1 - P_m \cdot o(H)) \approx 1 - P_c \frac{\delta(H)}{k-1} - P_m \cdot o(H)$$

Conocidos los factores k_g y k_s , ya es posible estimar el número de cadenas representadas por un esquema H que existirán en la siguiente generación de un algoritmo genético básico:

$$m(H, g + 1) = m(H, g) k_g k_s \geq m(H, g) \frac{\mu(H)}{\bar{\mu}} \left[1 - P_c \frac{\delta(H)}{k - 1} - P_m \cdot o(H) \right]$$

donde:

$m(H, g)$ es el número de cadenas de una población representadas por un determinado esquema H en la generación g

$\mu(H)$ es la adaptación media de las cadenas representadas por H en la generación g .

$\bar{\mu}$ es la adaptación media de todas las cadenas presentes en la población en la generación g .

P_c es la probabilidad de cruzamiento empleada en el algoritmo

$\delta(H)$ es la longitud del esquema H

k es la longitud de las cadenas que componen la población

P_m es la probabilidad de mutación empleada en el algoritmo

$o(H)$ es el orden del esquema H

Esta expresión constituye el Teorema Fundamental de los Algoritmos Genéticos, que podría enunciarse diciendo, que tras la actuación de los operadores genéticos básicos sobre una población de cadenas en una generación g , el número de cadenas representadas por un esquema determinado (H) esperado en la generación $g+1$, viene dado por la expresión anterior.

A partir de lo expuesto pueden extraerse las siguientes conclusiones válidas en la práctica [Pérez, 04]:

La evolución de la presencia de un esquema en la población, es una progresión geométrica que depende del grado de adaptación de las cadenas representadas por el esquema (k_g), y de la longitud y del orden del mismo (k_s). Los esquemas con una adaptación relativa superior a la media ($k_g > 1$) evolucionarán aumentando su presencia en la población, disminuyendo la de los esquemas menos adaptados. Asimismo, los esquemas más cortos y de menor orden, harán que k_s se aproxime a 1, aumentando las probabilidades de supervivencia.

La selección permite incrementar la presencia de esquemas bien adaptados en la población, reduciendo la presencia de los menos válidos. La selección no provoca la aparición de nuevos esquemas en la población.

El operador cruce permite el intercambio de información entre individuos. La información con más probabilidad de compartirse es la que se presenta en forma de esquemas cortos y de bajo orden. Este operador puede provocar la aparición de nuevos esquemas en la población. Es el operador fundamental de los algoritmos genéticos.

El operador mutación introduce variabilidad en la población. Puede provocar la aparición de nuevos esquemas y la desaparición de otros. Puede considerarse un operador secundario con respecto al cruce.

Los algoritmos genéticos exploran el espacio de soluciones mediante la yuxtaposición de esquemas bien adaptados, cortos y de bajo orden. A este tipo de esquemas se les denomina **bloques constructivos** [Srinivas et al., 94b; Pérez, 04].

6.4.3 El paralelismo implícito de los algoritmos genéticos

Como se ha indicado en el apartado anterior, cada cadena de una población de P cadenas de longitud k , puede ser representada por 2^k esquemas. Para que una cadena sea representada por un esquema, basta con que en cada componente el esquema tenga el mismo alelo que la cadena o bien un símbolo # (Figura 6.5).

En una población, cuyos elementos pueden tomar a valores diferentes, existen entre a^k y $P \cdot a^k$ esquemas distintos. Algunos de estos esquemas (sobre todo los bloques constructivos) serán procesados de modo útil, aumentando su presencia y sobreviviendo a la aplicación de los operadores genéticos.

Holland fue capaz de determinar, asumiendo una serie de hipótesis generales [Goldberg, 89], que aunque en principio un algoritmo genético procesa sólo P cadenas en cada generación, se obtiene información útil de al menos P^3 esquemas, y por lo tanto de las cadenas por ellos representadas. Es decir, en el proceso evolutivo secuencial se estudian en cada paso P cadenas, pero simultánea y paralelamente se estudian P^3 esquemas.

Esta propiedad de búsqueda en paralelo, denominada paralelismo implícito, es la que proporciona mayor robustez a los algoritmos genéticos en comparación con

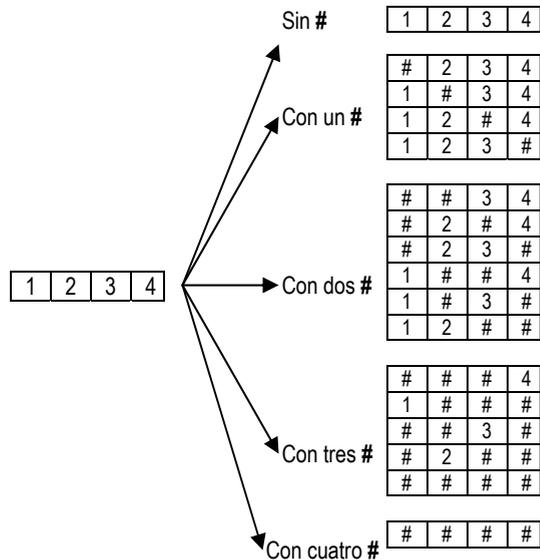


Figura 6.5: Los dieciséis esquemas representativos de una cadena de longitud cuatro.

otras técnicas de búsqueda ciega.

El planteamiento seguido por Holland para llegar a esta conclusión (según [Santamarina, 95]) es el siguiente:

Dada una población de P cadenas sometidas a un SGA, es posible determinar la longitud de los esquemas $\delta(H)$ cuyo porcentaje de supervivencia sea uno concreto, por ejemplo, del 40%, mediante la expresión:

$$1 - P_c \frac{\delta(H)}{k-1} - P_m \cdot o(H) = 0,4$$

Llamando k_p a dicha longitud, es posible afirmar que aquellos esquemas cuya longitud $\delta(H)$ sea menor o igual que k_p , tendrán un porcentaje de supervivencia mayor o igual a 40%, puesto que los esquemas de menor longitud tendrán mayores posibilidades de sobrevivir. A partir de esta premisa, Holland plantea la cuestión de determinar cuántos de esos esquemas con $\delta(H) \leq k_p$, son realmente procesados cada generación en una población de P cadenas.

Para poder establecer un estimador del límite inferior de la cantidad de esquemas procesados, Holland estudió el orden de los esquemas como característica que le sirviera para diferenciarlos y cuantiarlos. En primer lugar estableció el límite superior como:

$$P \cdot 2^{k_p+1} (k - (k_p+1) + 1)$$

El número de esquemas de longitud $\delta(H) \leq k_p$ sigue una distribución binomial, por lo que la mitad de ellos poseerán un orden inferior a $(k_p+1)/2$ y la otra mitad superior. Llamando P_p al número de estos últimos, es posible determinar que:

$$P_p = \frac{P \cdot 2^{k_p+1} \cdot (k - (k_p+1) + 1)}{2} = P \cdot 2^{k_p} \cdot (k - (k_p+1) + 1)$$

Así, P_p es un estimador que proporciona un límite inferior del número de esquemas de longitud $\delta(H) \leq k_p$ que se procesan en una población de P cadenas. Es un límite inferior dado que sólo considera aquellos esquemas cuyo orden es superior a $(k_p+1)/2$. Si se da a P un valor adecuado, $P = 2^{k_p/2}$, se obtiene que:

$$P_p = (k - (k_p+1) + 1) \cdot P^3$$

indicador que depende del tamaño de la población al cubo.

6.4.4 Limitaciones del algoritmo genético básico y de su base teórica

El algoritmo genético básico (SGA), sobre el que se asienta el desarrollo del teorema de Holland y la hipótesis de los bloques constructivos, posee limitaciones evidentes. Estas limitaciones son debidas fundamentalmente, a que la codificación de los individuos de la población debe realizarse empleando un alfabeto de signos

binario, a que no contempla la inclusión de restricciones en la búsqueda, y a que el algoritmo es absolutamente ciego, sin poseer ningún tipo de información o conocimiento específico del problema.

El SCA es un método ineficiente de resolución de problemas. Aunque es muy general y capaz de afrontar de forma eficaz una gran diversidad de problemas, como contrapartida es poco eficiente en la resolución de los mismos. Esta ineficiencia proviene fundamentalmente de la falta de conocimiento específico del problema que se resuelve.

Por otra parte, esta opacidad provoca que en algunos casos no se cumpla la hipótesis de los bloques constructivos, ocurriendo que combinaciones de bloques constructivos de elevada aptitud, generen individuos de baja calidad. Esto puede provocar la *desorientación* del algoritmo, dado que la única información que guía la búsqueda es precisamente la obtenida de la aptitud de los individuos generados. Este problema puede solucionarse proporcionando al algoritmo alguna información de calidad que colabore en el guiado de la búsqueda.

El factor que más influye en el incumplimiento de la hipótesis de los bloques constructivos, es la definición de la función de aptitud. El SGA funciona recombinao esquemas cortos y de bajo orden, si la definición de la función de aptitud provoca que la solución óptima pueda ser representada por esquemas de ese tipo, el SGA será capaz de localizarla. Sin embargo, si la definición de la función provoca que los esquemas cortos de bajo orden no sean representativos de la cadena óptima, el SGA será incapaz de localizar dicha solución. A este tipo de funciones se les denomina *desorientadas (deceptive functions)* [Goldberg, 89]. Este fenómeno se ve incrementado cuando existe una fuerte interrelación entre dos o más genes, provocando que la contribución de un gen a la aptitud de un individuo dependa de los valores que adopten esos otros genes. A este fenómeno se le denomina *epistasia*⁵¹, y provoca que sea difícil la generación de bloques constructivos apropiados [Pérez, 04].

Como se ha indicado en el apartado anterior el cruce en un SGA es monopunto; se realiza escogiendo una posición (punto de cruzamiento) e intercambiando entre las cadenas progenitoras las subcadenas que quedan a cada lado del punto de cruzamiento. La selección de este tipo de cruce es coherente con la hipótesis de los bloques constructivos, dado que permite una alta conservación de los esquemas al mantener en la descendencia elementos consecutivos de los padres. Sin embargo, la afirmación de Holland de que éste es el tipo de cruce que ofrece mejores resultados no ha podido ser probado en la literatura. Más aún, determinados experimentos han concluido que el cruce uniforme (selección de un bit de cada padre con igual probabilidad) ofrece mejores resultados que el cruce monopunto [Syswerda, 89], lo cual parece contradecir la hipótesis de los bloques constructivos .

Otro de los problemas del algoritmo genético básico, es la alta probabilidad de

⁵¹ El empleo del término *epistasia* es debido a la analogía del fenómeno con el que ocurre en la naturaleza. La epistasia es la interacción entre los productos de dos genes situados en dos loci diferentes, en la que un gen impide la expresión fenotípica del otro.

que se produzca una convergencia prematura de la población hacia un óptimo local. La aparición en fases evolutivas tempranas de individuos significativamente más aptos que el resto de la población (superindividuos), puede provocar una evolución en avalancha de los mismos. Los individuos significativamente más aptos serán favorecidos en la selección, aumentando su presencia en la población. Dado que el tamaño de la población es finito disminuye la diversidad. Esto puede repetirse durante varias generaciones, dominando completamente la población estos superindividuos. Bajo estas circunstancias, los procedimientos de cruce estandarizados no son capaces de generar individuos que mejoren la aptitud de sus padres. Más bien, los operadores de cruce se limitan a regenerar a los progenitores actuales. El proceso de optimización queda, en estas circunstancias, en manos de la mutación bit a bit [Fogel et al., 94].

La convergencia prematura puede ocurrir además por otro motivo. Dada la imperfección del proceso de muestreo, ante poblaciones pequeñas formadas por individuos con aptitudes parecidas, un individuo puede verse favorecido por la selección en sucesivas ocasiones. Esto puede dar lugar a que dicho individuo acabe dominando la población y provocando la convergencia prematura. Este fenómeno, conocido como *deriva genética* es más probable en poblaciones pequeñas, con poca diversidad de aptitudes entre los individuos que la forman [Pérez, 04].

Estos inconvenientes y limitaciones del SGA pueden solventarse introduciendo modificaciones en el algoritmo básico. Las variaciones más comunes buscan introducir conocimiento específico del problema a resolver. De esta manera el algoritmo obtenido perderá parte de su generalidad; será válido para resolver un número limitado de problemas, ganando a cambio eficiencia en la resolución de los mismos. Esto puede lograrse de diversas maneras: utilizando codificaciones de las soluciones adaptadas al problema, proporcionando mecanismos de tratamiento de individuos no factibles, introduciendo restricciones a las soluciones, construyendo nuevos operadores genéticos u operadores adaptados al problema, implementando sistemas de adaptación automática de parámetros en función de la evolución de la población o, en los casos extremos, creando algoritmos híbridos con otras técnicas heurísticas o metaheurísticas.

6.5. Codificación de las soluciones

Como se ha visto, de manera estricta, la codificación de las soluciones en un algoritmo genético debe realizarse de forma binaria. Aunque sobre esto existe una cierta discusión en la bibliografía, en principio el rendimiento del algoritmo es mayor cuando los genes pueden adoptar un número de valores (alelos) reducido [Holland, 75], dado que de esta manera existe una mayor variedad de esquemas en la población para una longitud dada. Llevando esta premisa al extremo la codificación ideal constará de sólo dos alelos (0,1). Además, este tipo de representaciones facilita la aplicación de los operadores genéticos básicos, sobre todo en el caso de la mutación.

Goldberg enunció dos principios fundamentales que debe cumplir una codificación [Goldberg, 89]:

Principio de los bloques constructivos con significado: Las características de los individuos relevantes en la aptitud de las soluciones, o lo que es lo mismo, las zonas del espacio de búsqueda más adecuadas para la obtención de las mejores soluciones, deben poder expresarse mediante esquemas cortos y de bajo orden, es decir, mediante bloques constructivos que expresen esas características.

Principio del alfabeto de símbolos mínimo: El conjunto de elementos escogidos para la codificación de las soluciones, debe ser el más pequeño posible, asegurando la adecuada representación del problema original.

Se considera que una codificación representa de manera adecuada un problema cuando posee estas cinco propiedades [Pérez, 04]:

Compleitud: Cualquier solución del problema debe poder ser representada mediante esa codificación.

Coherencia: Cualquier cadena formada mediante esa codificación debe representar una solución al problema.

Uniformidad: Todas las soluciones deben poder ser representadas por un número igual de codificaciones, evitando que unas lo estén más o menos que otras. Puede exigirse una relación biunívoca entre el espacio de las cadenas y el espacio de las soluciones: cada cadena representa una y sólo una solución, y cada solución es representada por una y sólo una cadena.

Localidad: Debe existir proporcionalidad entre las variaciones de las codificaciones y las variaciones de los individuos representados. Si se producen pequeños cambios en las cadenas, deben producirse pequeños cambios en las soluciones, asimismo, grandes cambios en las cadenas darán lugar a importantes cambios en las soluciones.

Sencillez: La codificación y descodificación de los individuos debe ser un proceso sencillo.

La codificación binaria no resulta adecuada para la mayoría de problemas de búsqueda, puesto que no siempre es posible encontrar una codificación que dé significación a cada uno de los elementos que forma la cadena. En la práctica, lograr una codificación binaria perfecta que posea las cinco características anteriores resulta imposible. Por otra parte, en caso de que se lograra dicha codificación binaria perfecta, sería muy difícil que cumpliera el principio de los bloques constructivos con significado y evitara la aparición de epistasis (ver 6.4.4). Éste es el caso de gran parte de los problemas de ingeniería en los que se requiere una elevada precisión numérica. La representación binaria puede, en estos casos, originar individuos de gran tamaño que requieren grandes capacidades de cómputo y almacenamiento, y que no permitan la aparición de esquemas significativos, cortos y de bajo orden. Por otra parte, individuos representados por cadenas extremadamente largas, hacen aumentar el tamaño del espacio de posibles soluciones, lo que según Zbignew

Michalewicz [Michalewicz, 92] hace disminuir el rendimiento de los algoritmos genéticos.

Este autor propuso una representación alternativa (matrices, listas, árboles, vectores de reales...) más cercana al problema y de mayor significación. Estas modificaciones proporcionan cierto conocimiento específico al algoritmo, que aunque disminuyen su generalidad respecto a los algoritmos genéticos, aumentan su eficiencia en la consideración de restricciones importantes y en la resolución de problemas de optimización numérica. Por otra parte, como apunta Davis en [Davis, 91], los parámetros de los problemas son en la mayor parte de los casos numéricos, y representarlos directamente en formato entero o real en lugar de binario, hace más fácil comprender e implementar el problema, y dar un sentido a los operadores genéticos adaptándolos al problema en cuestión.

Como ya se indicó en el capítulo anterior, algunos autores proponen que los algoritmos que emplean estas codificaciones de mayor significación, y que poseen cierto conocimiento específico del problema, sean una categoría particular dentro de la computación evolutiva que denominan *programas de evolución* [Michalewicz, 92; Pérez, 04; Romero et al., 04], sin embargo, la mayor parte coincide en incluirlos como una variante de los algoritmos genéticos [Spears et al., 93; Fogel, 94; Santamarina, 95].

La codificación no-binaria parece ofrecer resultados, que en muchos casos, superan los obtenidos mediante codificaciones binarias. La explicación a este fenómeno no es sencilla. Michalewicz indica que la introducción de conocimiento específico del problema suple la disminución de paralelismo. En otros casos se ha reinterpretado el concepto de esquema para explicar esta circunstancia [Antonisse, 89; Radcliffe, 91a; Radcliffe, 91b]. Goldberg presentó una teoría para tratar de explicar porqué representaciones de alta cardinalidad ofrecen tan buenos resultados [Goldberg, 91]. Esta teoría, llamada *teoría de los alfabetos virtuales*, explica que el conjunto de alelos que son empleados en la codificación de los individuos converge en las primeras iteraciones a un conjunto más pequeño, reduciendo el número de alelos efectivos y disminuyendo así la cardinalidad del conjunto.

6.6. Creación de la población inicial

De forma general esta población inicial es generada de manera aleatoria, aunque en algunos casos se realiza mediante el uso de técnicas heurísticas. Es conveniente que esta población sea lo más variada posible, conteniendo individuos de características muy diferentes. Por otra parte, debe tratarse de que el número de cadenas que representan individuos no factibles sea lo más reducido posible.

En problemas muy restringidos puede resultar difícil localizar una cantidad suficiente de individuos factibles como para completar una población inicial de determinado tamaño. Por otra parte, emplear tamaños pequeños de población suele concentrar la búsqueda del algoritmo en zonas pequeñas del espacio de soluciones

[Brad et al., 96], y hace disminuir la diversidad. Este problema puede resolverse empleando tamaños de población variable. En este tipo de estrategias el tamaño de la población va aumentando o disminuyendo en función del grado de convergencia de la población. Así, es posible emplear un tamaño pequeño para la población inicial que facilite localizar suficientes individuos factibles y, posteriormente aumentar el tamaño. El tamaño de población inconstante es empleado también en ciertas variantes de los algoritmos genéticos que limitan el tiempo de supervivencia de los individuos introduciendo el concepto de 'edad' del mismo (este tema se tratará en 6.8.1.4).

La velocidad de convergencia del algoritmo puede depender en gran medida de la población inicial escogida. Una población inicial poco variada puede dar lugar a fenómenos de deriva genética, y una en la que un individuo es especialmente bueno (superindividuo) puede provocar la convergencia prematura hacia óptimos locales (ver 6.4.4).

6.7. La función de evaluación y la función de aptitud

Para poder evolucionar hacia poblaciones cada vez más adaptadas al entorno es necesario conocer el grado de aptitud de los individuos, es decir, tiene que poderse evaluar cada individuo y ser comparado con el resto de la población. El mecanismo de selección posterior dependerá de la medición de la aptitud de los individuos. En este sentido cabe distinguir entre función de evaluación y función de aptitud.

El resultado de la **función de evaluación** es lo que se persigue maximizar (o minimizar). Es en sí el objeto del problema planteado. Sin embargo, en ocasiones no es posible o conveniente emplear dicha función para evaluar los individuos en un algoritmo genético.

Puede no ser sencillo expresar de manera numérica el objetivo perseguido en la resolución del problema, y en caso de conseguirlo, la expresión de la función puede ser excesivamente compleja y difícil de implementar informáticamente. Entre los cálculos realizados por un ordenador para la ejecución del algoritmo, aquellos destinados a evaluar los individuos son, con diferencia, los que más tiempo de proceso requieren. Así pues, debe tratarse de simplificar en lo posible la expresión de la función de evaluación. Es interesante destacar, que los algoritmos genéticos obtienen buenos resultados con funciones de aptitud que son simplificaciones de las de evaluación. Es decir, son suficientemente insensibles al error como para permitir utilizar expresiones simplificadas mediante, por ejemplo, la linealización.

Inconvenientes añadidos al empleo de una función de evaluación pura en el algoritmo, son la necesidad de que ésta deba devolver siempre valores positivos y que, en algunos casos, se debe minimizar el valor obtenido en lugar de maximizarlo. La necesidad de que los valores devueltos por la función sean positivos, es debida a que ésta es una de las hipótesis de partida sobre las que se asienta el teorema de Holland.

Por lo tanto, se somete a la función de evaluación a una serie de transformaciones que facilitan su uso en el algoritmo. Las más habituales son el desplazamiento y el escalado.

6.7.1 Desplazamiento y escalado

Para la evaluación de los individuos se emplea la **función de aptitud** (fitness), que es una función derivada de la función de evaluación mediante los mecanismos de desplazamiento y escalado entre otros. El **desplazamiento** permite obtener funciones de aptitud cuyo conjunto imagen sea siempre positivo. El procedimiento de desplazamiento más empleado es [Pérez, 04]:

$$F_a(\mathbf{x}) = F - F_e(\mathbf{x}) \quad ; \quad \forall \mathbf{x} \in P$$

donde:

\mathbf{x} es un individuo de la población P ;

F_a es la función de aptitud;

F_e es la función de evaluación;

F es una cota superior de los posibles valores de F_e para cualquier individuo y en cualquier generación.

Dado que es posible que a priori no se conozca una cota superior de las posibles evaluaciones, en ocasiones se emplea para F el mayor valor obtenido hasta el momento. Esta adaptación dinámica debe realizarse con la frecuencia suficiente para evitar la aparición de deriva genética (ver 6.4.4).

El escalado pretende adaptar la presión selectiva a la fase de evolución del algoritmo. En las fases iniciales la función debe ser subescalada para evitar que la aparición de superindividuos provoque la convergencia prematura (ver 6.4.4). Es decir, que las diferencias de valoración deben minimizarse, para evitar que individuos excepcionalmente buenos dominen completamente la población. En fases posteriores, cuando la población prácticamente ha convergido, es necesaria una valoración que incremente las diferencias de aptitud, para acentuar las características que hacen mejores a unos individuos que a otros. Se evita de esta forma, que la uniformidad de la población desemboque en una evolución errática. Forrest en 1985 [Goldberg, 89] y posteriormente Srinivas [Srinivas et al., 94b] realizan una recopilación de los métodos de escalado más habituales.

6.7.1.1 El escalado lineal

El escalado lineal calcula la aptitud a partir de la función de evaluación mediante la siguiente expresión:

$$F_a(\mathbf{x}) = a \cdot F_e(\mathbf{x}) + b$$

donde:

a y b son constantes que se recalculan en cada generación.

El objetivo del escalado lineal es que las diferencias de aptitud entre los individuos sean menores en las primeras etapas de evolución (subescalado), y mayores en etapas tardías (sobrescalado). De esta manera se pretende evitar la dominación de la población por superindividuos en etapas tempranas y la deriva genética en las tardías.

Para lograr el objetivo, los parámetros **a** y **b** deben calcularse cumpliendo dos condiciones. La primera es que los valores medios de las funciones de evaluación y aptitud deben coincidir, lo cual se traduce en que:

$$b \equiv (1 - a) \cdot \bar{F}_e$$

donde:

\bar{F}_e es el valor medio de la función de evaluación en la población.

La segunda condición pretende controlar el rango de valores entre la aptitud del mejor individuo y la aptitud media. Esta condición se expresa mediante:

$$\max(Fa(x))_{\forall x \in P} \equiv C \cdot \bar{F}_e$$

donde **C** es un parámetro de control que suele tomar valores entre 1,5 y 2. A partir de esta expresión es posible determinar el valor **a**.

La aplicación de esta condición puede hacer aparecer individuos con aptitudes negativas. En algunos casos este problema se resuelve eliminando de la competición a dichos individuos. En otros, se sustituye la segunda condición por:

$$\min(Fa(x))_{\forall x \in P} \equiv 0$$

6.7.1.2 El truncado σ

Esta forma de escalado aplica la transformación:

$$Fa(x) \equiv Fe(x) - \bar{F}_e + c \cdot \sigma$$

σ es la desviación típica de los valores de la función de evaluación de la población, y **c** es una constante que suele tomar valores entre 1 y 3. La aparición de individuos con aptitudes negativas se soluciona asignándoles discrecionalmente un valor nulo.

De la misma forma que el escalado lineal, la aplicación del truncado σ evita la sobreinfluencia de los superindividuos al comienzo del proceso evolutivo, y aumenta la selectividad en fases de convergencia de la población.

6.7.1.3 El escalado potencial o ley potencial del escalado

El escalado potencial eleva el valor de la función de evaluación a una potencia **k** cercana a uno. Aunque su valor depende en gran medida del problema a resolver,

$$Fa(x) \equiv Fe(x)^k$$

un valor típico es 1,005.

6.8. Los operadores genéticos

Es lógico, y así sucede en la naturaleza, que para que las poblaciones evolucionen hacia una mayor adaptación a su entorno, los individuos de cada generación deban ser sustituidos por otros que recojan aquellas características exitosas de sus progenitores. No obstante, esto no es suficiente si se pretende mejorar la adaptación de la especie. Se hace necesario que los nuevos individuos aporten características genéticas novedosas, obtenidas de la combinación de la carga genética de sus progenitores, o de la aparición de cambios aleatorios en su codificación genética. Esta tarea es asumida en los algoritmos genéticos por los operadores genéticos.

Existe una gran diversidad de operadores genéticos, resultantes en la mayor parte de adaptaciones al problema particular que se trata de resolver. Sin embargo, los tres operadores básicos característicos de los algoritmos genéticos son: la selección, el cruce y la mutación. Cada uno de ellos desempeña un papel fundamental en la mejora de la aptitud de las poblaciones; el operador selección es análogo a los procesos competitivos para lograr la supervivencia y el apareamiento; el cruce es análogo a la combinación de las cargas genéticas de los individuos que se aparean y reproducen; y la mutación simula las alteraciones que por diversas causas se producen en el código genético de algunos individuos.

6.8.1 El proceso de selección y reemplazo

En la naturaleza los individuos mejor adaptados al medio tienen más probabilidades de reproducirse y de sobrevivir durante varias generaciones. De esta manera mantienen y diseminan en la población las estructuras genéticas que desarrollan fenotipos exitosos. Los individuos menos aptos encuentran más dificultades para reproducirse y su esperanza de vida es menor. A este proceso se le denomina Selección Natural⁵² y permite que cada generación mejore su adaptabilidad con respecto a las generaciones precedentes, dando lugar a la evolución de las especies.

En la analogía con la Naturaleza planteada en la estructura y principios de funcionamiento de los algoritmos genéticos, dicho proceso de Selección Natural se realiza mediante dos procedimientos: la *selección* propiamente dicha y el *reemplazo*.

El proceso de selección elige un subconjunto de la población formado por aquellos individuos que conformarán, por diversas vías, la siguiente generación. Los procesos en los que interviene la selección son: la generación de la población de

⁵² La teoría de la Selección Natural fue desarrollada por Charles Darwin y fue publicada en 1859 en el libro "*El Origen de las Especies*". Sin embargo, ya en 1858 se hizo pública en un documento presentado al mismo tiempo que Alfred Russel Wallace, quien había llegado de manera independiente a plantear la misma teoría.

criadores, la selección de los supervivientes y, en caso de que se emplee una estrategia elitista, la selección de la élite.

Aunque existen múltiples variantes, en el Algoritmo Genético Básico (ver 6.4.2) el proceso de selección comienza escogiendo a los individuos de la población que servirán de *criadores*. De entre estos individuos (que forman una población auxiliar o intermedia) se selecciona a los que efectivamente se reproducirán. Este conjunto de operaciones es la *Selección* propiamente dicha. El proceso de escoger aquellos individuos de entre la población intermedia y los descendientes que formarán la nueva generación por sustitución de la antigua, se denomina *Reemplazo*.

En los apartados siguientes se realiza un recorrido, necesariamente incompleto, por diferentes tipos de procesos de selección y reemplazo. Una más exhaustiva enumeración puede encontrarse en [Goldberg, 89; Chambers, 95a; Chambers, 95b; Chambers, 99].

6.8.1.1 Tipos de procesos de selección

La selección puede llevarse a cabo por **muestreo directo**, es decir, escogiendo a los individuos en base a una regla fija (los n mejores, los n peores, ...). Este tipo de muestreo es muy poco empleado, puesto que su carácter determinista contradice la filosofía inherente a los algoritmos genéticos. Su uso fundamental se centra en la selección de la élite en las estrategias elitistas.

Los muestreos aleatorios son los más empleados, pudiéndose encontrar en la literatura abundantes planteamientos [Schell, 98]. El **muestreo aleatorio simple** asigna la misma probabilidad de selección a cada uno de los individuos, mientras que el **muestro estocástico** asigna la probabilidad de selección en base a la aptitud de los individuos. A mayor aptitud, mayor probabilidad de resultar escogido. Algunas variantes introducen en el muestreo estocástico ciertas peculiaridades [Pérez, 04]: el **muestreo diferenciado**, en el que cada individuo sólo puede ser seleccionado una vez, el **muestreo conservador**, en el que se otorga alguna probabilidad de ser escogido a todos los individuos (no existe la probabilidad nula), y el **muestro excluyente**, en el que algunos individuos son excluidos a priori del proceso selectivo. El **muestreo por valor esperado** asigna un contador a cada individuo inicializado a un valor determinado. Cada vez que un individuo es seleccionado para reproducirse se decrementa su contador, siendo excluido de posteriores muestreos cuando su contador llega a cero. Al procedimiento de selección que emplea este tipo de muestreo se le denomina **selección por contadores**.

Los mecanismos de muestreo estocástico más habituales son: el sorteo, muestreo por restos, por torneos y por ruleta, siendo éste último el más empleado. El muestreo **universal** o **por ruleta** (*roulette wheel selection*) [Goldberg, 89] se lleva a cabo asignando a cada individuo una probabilidad que podría ser representada por un sector de una ruleta (de ahí el nombre del método de muestreo). A mayor adaptación del individuo, mayor es el sector que le corresponde en la ruleta y, por tanto, mayor probabilidad de resultar escogido. Aunque existen varios procedimientos de cálculo de las probabilidades de cada individuo, el más habitual

es el siguiente:

Sea x_i un individuo perteneciente a una población de p individuos. Sea $\mu(x_i)$ la aptitud de x_i obtenida mediante la correspondiente función de aptitud. La probabilidad de selección de x_i se calcula mediante la expresión:

$$P(x_i) = \frac{\mu(x_i)}{\sum_{j=1}^p \mu(x_j)}$$

Una vez conocidas las probabilidades de cada individuo, estos se ordenan de mayor a menor probabilidad. Una vez ordenados se calculan las probabilidades acumuladas de cada uno, como la suma de la probabilidad propia y la de todos los que le preceden en esa ordenación.

$$P_{\text{acum}}(x_i) = \sum_{j=1}^i P(x_j)$$

De esta manera se obtienen una serie de intervalos consecutivos, comprendidos entre 0 y 1, cuyo tamaño es proporcional a la aptitud de cada individuo. Para seleccionar un individuo se genera un número aleatorio entre 0 y 1 (en la analogía se hace girar la ruleta) y se selecciona al individuo cuyo intervalo contiene dicho número aleatorio. Esto se apreciará más claramente mediante un ejemplo.

Sea una población de 4 individuos $\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ cuyas aptitudes son 2, 10, 3, y 9 respectivamente. La suma de las aptitudes de la población es 24, por lo que las probabilidades de cada individuo son 0,083, 0,416, 0,125 y 0,375 respectivamente. La ordenación de los individuos según probabilidad decreciente proporciona la secuencia $\{x_2, x_4, x_3, x_1\}$. Las probabilidades acumuladas de dicha secuencia serán 0,416, 0,791, 0,916 y 1 respectivamente. Al generar un número aleatorio a entre 0 y 1, será seleccionado el individuo que cumpla el siguiente criterio:

x_2 si $a \in [0, 0,416]$;

x_4 si $a \in] 0,416, 0,791]$;

x_3 si $a \in] 0,791, 0,916]$;

x_1 si $a \in] 0,916, 1]$;

Como puede apreciarse, el tamaño del intervalo es mayor cuanto mayor sea la aptitud del individuo. Análogamente, el sector de la ruleta correspondiente a cada individuo aumenta con la aptitud del mismo (Figura 6.6).

Esta forma de selección es la más empleada puesto que sigue la filosofía de los algoritmos genéticos: los individuos mejor adaptados tienen más probabilidades de ser seleccionados, sin embargo, dado que es un número aleatorio el que decide la selección, todos los individuos tienen alguna probabilidad de ser seleccionados, incluso los peor adaptados. Esto que en principio puede parecer no deseable,

introduce variabilidad en la población, mantiene ciertas características de los individuos que, en el futuro, combinadas con las de otros elementos de la población, pueden resultar exitosas, y es un factor más para evitar la convergencia prematura del algoritmo.

La selección por ruleta tal y como se ha expuesto en los párrafos anteriores, puede presentar problemas cuando uno o varios individuos presentan aptitudes muy diferentes a las del resto de la población. En esos casos, los superindividuos acaparan la mayor parte de la probabilidad de selección, teniendo el resto de la población pocas posibilidades de ser seleccionado. Si en la población de 4 individuos del ejemplo anterior, la aptitud de x_2 fuera 50, este individuo ocuparía el 85% de la ruleta, quedando un 15% para el resto de la población.

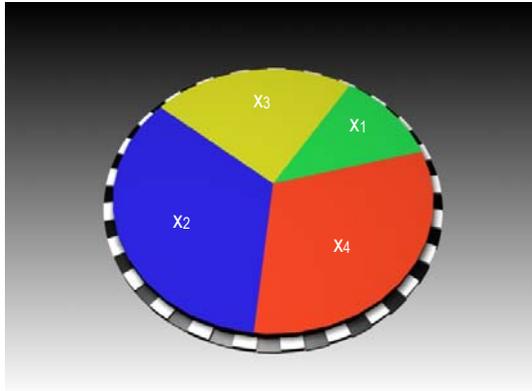


Figura 6.6: Selección por Ruleta.

El **Rank Selection** (selección por clasificación), es una forma alternativa de selección que permite solucionar ese problema. En este caso, una vez calculadas las aptitudes de los individuos de la población, se ordenan éstos de menor a mayor calificación. Se otorga a cada individuo una puntuación igual a la posición que ocupa en esa clasificación: uno al primero, dos al segundo, ..., y p al último; siendo p el tamaño de la población. Por último, se calculan las probabilidades de selección de la misma forma que en la selección por ruleta, empleando las puntuaciones asignadas en la clasificación en lugar de las aptitudes.

Este procedimiento permite que todos los individuos de la población mantengan alguna probabilidad de ser seleccionados, y evita la convergencia prematura por las elevadas probabilidades de selección de los superindividuos. Como contrapartida, este sistema de selección ralentiza la convergencia, dado que las probabilidades de selección de los buenos individuos no diferirán mucho de las del resto, pudiendo desembocar en deriva genética de la población (ver 6.4.4).

Como ejemplo supongamos una población de cinco individuos $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5\}$, cuyas aptitudes son, respectivamente: 30, 0,5, 290, 34 y 5,5. Si se emplea la selección por ruleta sin ranking, las probabilidades de selección de cada individuo son, respectivamente: 0,083, 0,001, 0,805, 0,094 y 0,015. En la Figura 6.7 (a) puede observarse que mientras que la probabilidad de selección del individuo x_3 es muy elevada, el individuo x_2 tiene una probabilidad prácticamente nula de ser escogido. Las probabilidades de x_1 , x_4 y x_5 son también pequeñas en comparación con la del superindividuo x_3 .

Aplicando Rank Selection las probabilidades de selección pasan a ser 0,200, 0,066, 0,333, 0,266 y 0,133 respectivamente. En la Figura 6.7 (b) puede observarse el reparto de probabilidades. Todos los individuos tienen probabilidad de ser escogidos, aunque las diferencias de probabilidad entre los individuos más y menos aptos han disminuido.

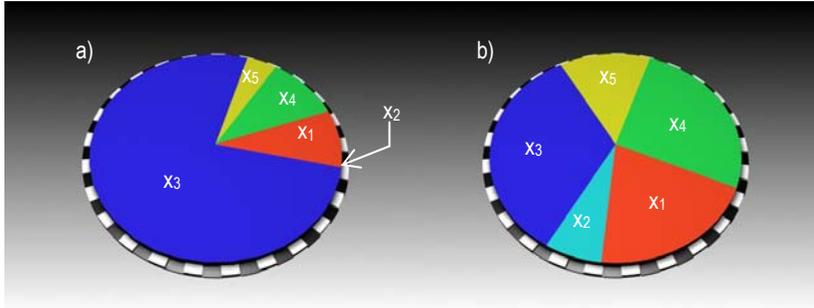


Figura 6.7: Probabilidades de selección con (a) y sin (b) Rank Selection.

6.8.1.2 Procesos de reemplazo

El proceso de reemplazo no es más que la selección de los individuos que formarán la nueva generación por sustitución de los de la anterior. Esta diferenciación entre selección y reemplazo tiene sentido en los algoritmos que mantienen una población intermedia auxiliar entre generaciones, de la que se extrae los individuos de la nueva generación. Ejemplo de esto es el SGA, en el que dicha población auxiliar está formada por individuos seleccionados de la población (criadores), de la que a su vez se selecciona a los reproductores. El proceso de reemplazo selecciona a los individuos que sustituirán a los de la población anterior, de entre los de la población auxiliar y los descendientes de los reproductores (Figura 6.8).

El reemplazo puede llevarse a cabo de diferentes maneras. El más inmediato es que los descendientes sustituyan directamente a sus progenitores sin ninguna consideración previa. Este tipo de reemplazo es denominado **al vuelo** o **inmediato**. En otros casos los descendientes sustituyen a aquellos individuos de la población de criadores a los que más se asemejan, método denominado reemplazo por **factor de llenado**. El reemplazo **por inclusión** selecciona la nueva población de entre los progenitores y los descendientes. Por último, el reemplazo por **inserción** puede llevarse a cabo de dos maneras. Si el número de descendientes es suficientemente grande (mayor que el tamaño de la población), se conforma la nueva generación mediante la selección únicamente de descendientes, lo que provoca que un individuo no pueda subsistir más de una generación. Si el número de descendientes es inferior al tamaño de la población, se incluyen estos en la nueva generación, y se completa ésta con los mejores individuos de la población auxiliar.

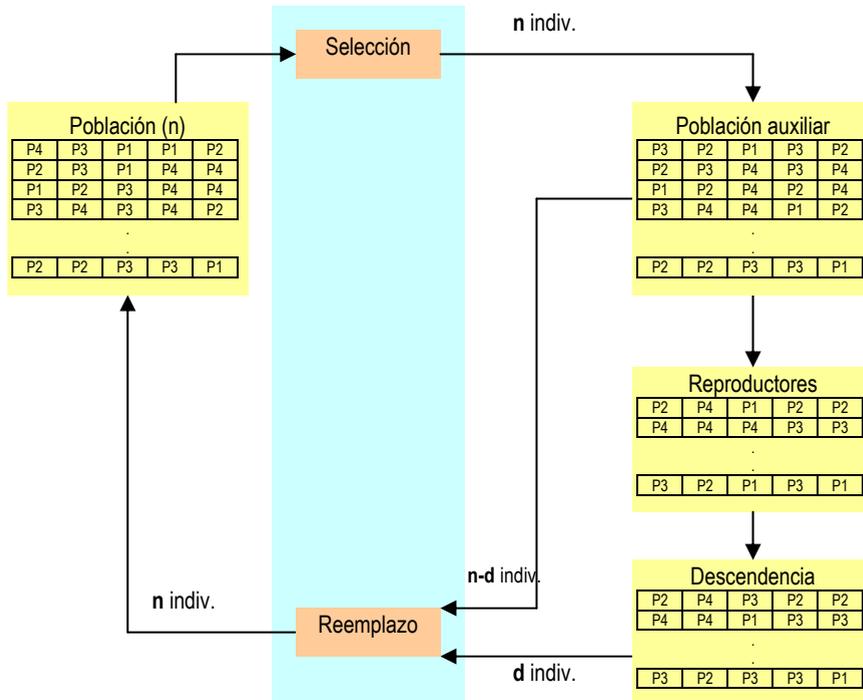


Figura 6.8: Proceso de selección-reemplazo en un SGA (adaptado de [Pérez, 04]).

6.8.1.2.1 Estrategias elitistas

Se denomina élite de la población al individuo o grupo de individuos más destacable por su aptitud. Dado que el procedimiento de selección habitualmente empleado por los algoritmos genéticos implica cierto grado de aleatoriedad, no es posible garantizar que la élite sobreviva a la siguiente generación, y ni siquiera que sea seleccionada como reproductora. Así pues, es posible que las características deseables presentes en la élite desaparezcan de la población. Para evitar esto, las estrategias elitistas vinculan el tiempo de supervivencia de los individuos con su valor como solución al problema planteado.

El empleo de estrategias elitistas implica la selección del mejor o mejores individuos de la población, y su introducción de manera directa en la siguiente generación. Posteriormente, la selección de los criadores se realiza sobre los restantes miembros de la población y, a partir de estos, se genera el resto de la nueva generación (Figura 6.9).

El empleo de estrategias elitistas permite una exploración más profusa del espacio de soluciones en el entorno de la élite, pudiendo compararse con una intensificación local de la búsqueda, es decir, tienen tendencia a hacer la búsqueda más explotadora que exploradora. Su empleo mejora la convergencia del algoritmo,

asegurando ésta teóricamente bajo ciertas condiciones muy generales. En caso de funciones de evaluación fuertemente multimodales (con muchos óptimos locales) su eficacia disminuye aumentando el riesgo de convergencia prematura.

El tamaño de la élite es un parámetro fundamental en la obtención de buenos resultados con esta estrategia. Es habitual emplear un tamaño de 1 ó 2 individuos élite por cada 50 individuos en la población; su empleo en poblaciones pequeñas puede resultar en convergencia prematura debido a la rápida disminución de la diversidad. Es recomendable, además, que las probabilidades de cruzamiento y mutación sean suficientemente grandes para evitar dicha convergencia prematura.

El uso de estrategias elitistas se considera imprescindible por ejemplo, cuando se emplean los algoritmos genéticos para la optimización de funciones en las que se pretende encontrar un óptimo global [De Jong, 93].

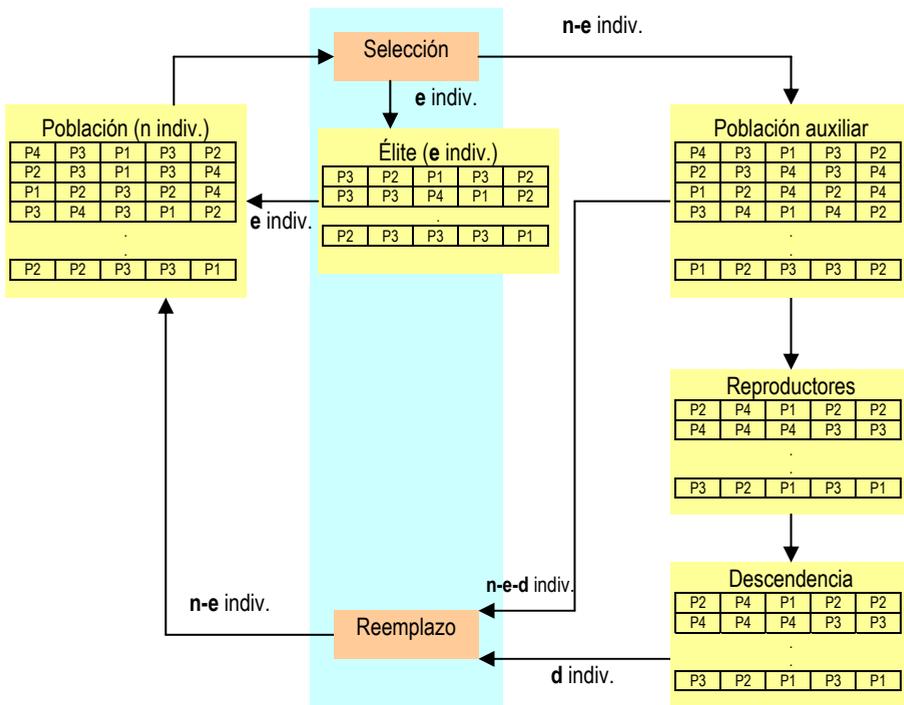


Figura 6.9: Esquema de la aplicación de una estrategia elitista.

6.8.1.3 Algoritmos generacionales y de estado estacionario

El modelo de algoritmo visto hasta el momento realiza, en cada generación, un reemplazamiento total de la población (sin menoscabo de que determinados individuos sobrevivan de la generación anterior). Existe una clara diferenciación entre generaciones, pudiendo determinar dónde acaba una y comienza la siguiente. A este tipo de algoritmos se les denomina **generacionales**.

Como alternativa, los **algoritmos genéticos de estado estacionario**, realizan un reemplazo paulatino de los individuos. En estos, no se mantiene una población intermedia o auxiliar como tal. Se selecciona una cantidad pequeña de progenitores directamente de la población (no mayor de un 10% del número de individuos), los cuáles se cruzarán dando lugar a una descendencia que sustituirá, por reemplazo directo, a individuos de la población generalmente seleccionados mediante sorteo inverso. No se produce una sustitución completa de la población; se reemplaza constantemente una pequeña cantidad de individuos.

Los algoritmos genéticos de estado estacionario fueron propuestos de manera simultánea e independiente por Whitley y Syswerda [Whitley, 88; Syswerda, 89], existiendo diferentes variaciones de estos algoritmos, fundamentalmente en la forma de realizar el reemplazo [Syswerda, 91].

Este tipo de algoritmos poseen la cualidad de mantener mejor la diversidad en la población, dado que conviven simultáneamente individuos de 'generaciones diferentes'. No es posible determinar donde acaba una generación y donde empieza la siguiente, se realiza un reemplazo paulatino que hace convivir a individuos de diferente antigüedad. Algunos estudios han probado de manera empírica, que los algoritmos genéticos de estado estacionario pueden resultar superiores a los generacionales en la resolución de determinados problemas, si se introduce en ellos un adecuado mecanismo de control de la población [Davis, 91].

Según Pérez en [Pérez, 04], los algoritmos de estado estacionario presentan las siguientes ventajas sobre los generacionales:

- Mayor insensibilidad a los errores de muestreo, que permite una asignación más precisa de las probabilidades de reproducción en función de la aptitud de los individuos.
- El método de reemplazo conlleva, de manera implícita, una estrategia elitista que hace perdurar a los individuos más aptos.
- Menor riesgo de convergencia prematura.
- Mantienen las condiciones del Teorema de Holland.

6.8.1.4 La edad de los individuos

El contenido de este punto no trata en sí sobre un tipo concreto de mecanismo de selección o reemplazo, si no, más bien, de una modificación en la estructura del algoritmo que llega a hacer innecesario la introducción de procesos selectivos; de ahí su consideración en este punto del trabajo.

En 1994, Arabas y sus colaboradores [Arabas et al., 94] hicieron más completa la analogía con la naturaleza en la que se basa la computación evolutiva, introduciendo el concepto de *edad* de los individuos. Evidentemente, en la naturaleza los seres vivos no viven de manera indefinida⁵³, la esperanza de vida de cada especie oscila

⁵³ Se ha informado de la existencia de semillas viables después de más de 1000 años de

en un intervalo de tiempo característico de dicha especie⁵⁴. Dentro del ese intervalo, cada individuo de la especie podrá subsistir más o menos tiempo en función de su capacidad de supervivencia en el entorno, pero acabará finalmente desapareciendo y siendo substituido por otro individuo.

Trasladando esta idea a la computación evolutiva, Arabas propuso asignar a cada individuo, en el momento de su creación, una duración dependiente de su grado de aptitud. Además, se le asigna un contador inicializado a 0 que aumenta conforme transcurren las generaciones. El valor de ese contador es la *edad* del individuo. Cuando la edad sobrepasa la duración asignada al individuo éste es eliminado de la población.

El proceso general puede observar se en la Figura 6.10. Definida una población inicial **P** de un tamaño determinado **p**, se asigna a cada individuo un contador con valor 0. Se evalúa la población para obtener la aptitud de cada individuo y, de manera proporcional a dicha aptitud, se asigna una duración a cada individuo.

De esta población inicial se seleccionan los individuos que se reproducirán. Este proceso no es en sí una selección propiamente dicha dado que se realiza de manera aleatoria. Todos los individuos tienen la misma probabilidad de ser escogidos. El número de individuos que se reproducirán y por lo tanto el tamaño de la descendencia, se obtiene generalmente mediante la expresión:

$$D(t) = \rho \cdot p(t)$$

que indica que el tamaño de la descendencia es función del tamaño de la población (que variará para cada generación). ρ es un parámetro que suele tomar un valor cercano a 0,4. Seleccionados los reproductores se crea la descendencia mediante cruce y se aplica a ésta el operador mutación. La descendencia es añadida sin más a la población y evaluada para obtener la duración de cada individuo.

Los contadores se incrementan una unidad y se comprueba si algún individuo ha superado su esperanza de vida. Si es así, estos individuos son eliminados de la población y el proceso vuelve a repetirse.

enterramiento en tumbas del antiguo Egipto; por otra parte, determinadas células cancerosas pueden considerarse inmortales gracias a la enzima telomerasa. La duda consiste en si las semillas o las células cancerosas pueden englobarse en lo que genéricamente se denomina 'seres vivos'.

⁵⁴ En este sentido existe gran variedad: desde los pocos días de esperanza de vida de la *Drosophila Melanogaster* (mosca del vinagre), hasta la gran longevidad de determinados árboles (*Sequoia sempervirens* 1000, *Sequoiadendron giganteum* 2500 y *Pinus aristata* 3000 años).

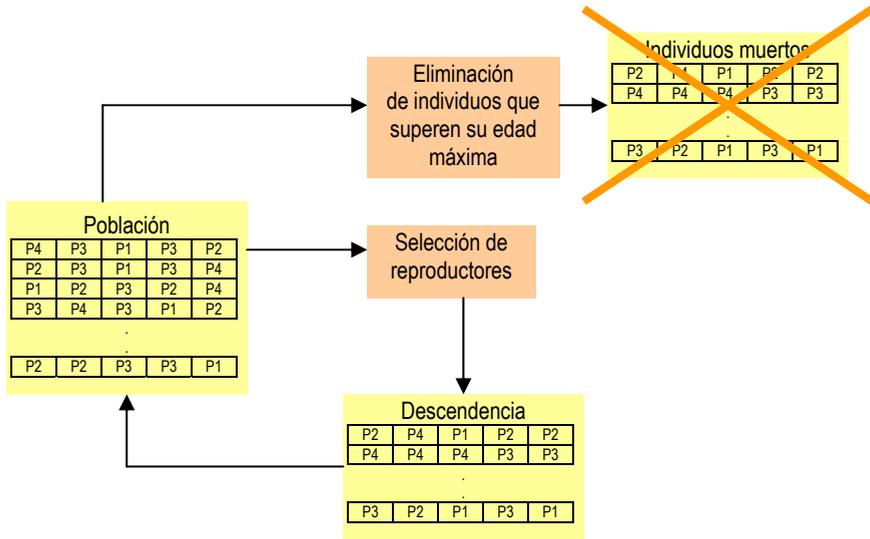


Figura 6.10: Esquema de un algoritmo genético con edades.

Como ya se ha indicado, el tamaño de la población es variable, dado que el número de descendientes que se incorporan a la población en cada generación, no coincide necesariamente con el número de individuos eliminados por haber alcanzado su esperanza de vida. Esto proporciona un eficiente mecanismo de autorregulación del tamaño de la población, parámetro éste fundamental para evitar la convergencia prematura y mantener la diversidad.

El tamaño de la población de este tipo de algoritmos presenta una evolución característica. Inicialmente existe mucha diversidad y la población crece. Cuando se localiza una buena solución el algoritmo converge y la población comienza a disminuir. Cada vez que se localiza un nuevo mejor resultado se produce un aumento brusco del tamaño de la población que poco a poco vuelve a disminuir.

Quizá el punto más crítico en la implantación de esta versión del algoritmo sea la asignación de la duración a cada individuo. Como ya se ha dicho, no existe un mecanismo de selección propiamente, puesto que los individuos se escogen de manera aleatoria; es la duración asignada a cada individuo la que determinará el tiempo que permanecerá en la población, y por tanto la mayor o menor posibilidad de ser escogido como reproductor. Así pues, el criterio para asignar la duración debe ser elegido cuidadosamente. En principio es necesario que los individuos más aptos posean duraciones mayores que los menos aptos, pero no es recomendable que exista una proporcionalidad directa entre aptitud y duración, puesto que esto podría causar el descontrol del tamaño de la población.

6.8.2 Operadores genéticos; efecto de los operadores.

Como se indicó en el apartado 6.8, en la naturaleza existen dos fuentes de variabilidad genética entre individuos de diferentes generaciones: la combinación de

información genética procedente de dos individuos durante la reproducción, y la alteración aleatoria de genes debida a mutaciones. El operador selección por sí mismo no introduce variabilidad en la población, si no que más bien hace aumentar la presencia de los individuos mejor dotados en detrimento de la diversidad. La tarea de combinación de la información de diferentes individuos es asumida en los algoritmos genéticos por el operador cruce, y la variación aleatoria de la misma por el operador mutación.

El cruce es el operador por excelencia de los algoritmos genéticos [Holland, 75; Davis, 91]. Mediante este operador se consigue el intercambio de información genética entre individuos, mecanismo que combinado con la acción del operador selección, provoca la transmisión y combinación en las nuevas generaciones, de aquellos genotipos que se han expresado en fenotipos exitosos. A priori es imposible saber si las nuevas estructuras generadas poseerán una aptitud mayor que sus progenitores, pero la acción combinada de la selección y el cruce hace posible a la larga, identificar los bloques constructivos o grupos de genes que suponen características deseables en los individuos. El operador cruce produce la convergencia hacia las mejores combinaciones de la carga genética ya presentes en la población.

Los algoritmos genéticos son capaces de explorar y explotar el espacio de soluciones. Por explotar se entiende realizar una búsqueda exhaustiva en una zona restringida del espacio. Esta tarea se realiza mediante el operador cruce, que actúa como un intensificador de la búsqueda en la zona del espacio de soluciones actualmente ocupada por la población. El efecto exploratorio, por el que se prospectan zonas del espacio alejadas de las soluciones presentes en la población, es asumido por el operador mutación. Como se representa gráficamente en la Figura 6.11, mientras la población converge hacia un óptimo local, esa zona del espacio de soluciones es estudiada, posteriormente, el operador mutación hace posible el salto hacia otros lugares inexplorados.

La mutación, salvo en algunas variantes, suele estar presente en casi todas las implementaciones de los algoritmos genéticos. Es frecuente considerarlo un operador secundario frente al cruce, introducido para asegurar que todos los alelos posibles entran alguna vez en la población, sin embargo, algunos autores discrepan otorgando a la mutación un papel preponderante [Hinterding et al., 95]. Este operador introduce la variabilidad genética aleatoria que contrarresta el efecto uniformizador del operador selección, y evita la convergencia hacia el primer óptimo local encontrado por el algoritmo. Por tanto, la mutación asume tareas diversificadoras de la población, y permite trasladar la búsqueda hacia zonas alejadas del espacio de soluciones (Figura 6.11).

Ajustando las probabilidades de cruce (P_c) y de mutación (P_m), es posible controlar el grado en el que actúa cada uno de los operadores genéticos. La probabilidad de cruce suele fijarse en el intervalo [0.6, 0.95] y la de mutación en valores mucho más bajos, menores de 0,1. Esta diferencia refleja, según algunos autores [Fogel et al., 94], la preponderancia del operador cruce frente a la mutación en los algoritmos genéticos.

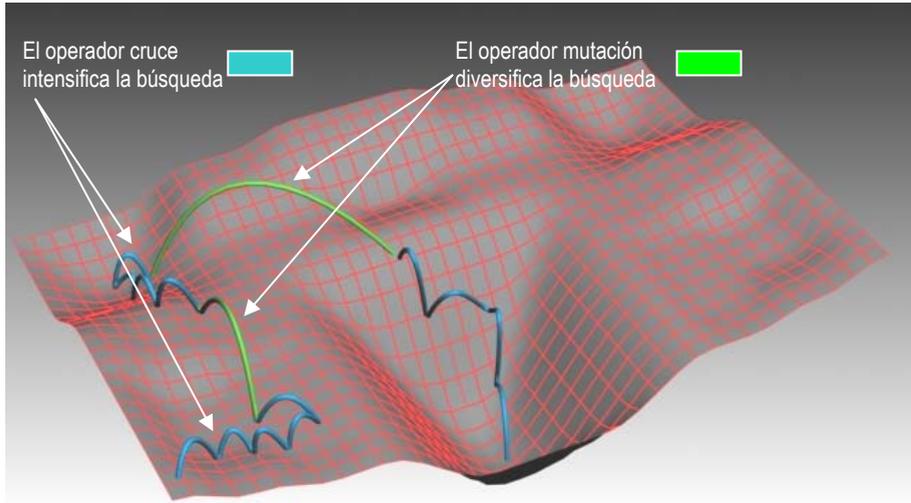


Figura 6.11: Efectos intensificadores y diversificadores de los operadores cruce y mutación.

En realidad la controversia sobre la importancia relativa entre estos dos operadores no ha sido zanjada. Los resultados empíricos muestran que para determinadas funciones objetivo, emplear sólo el operador mutación (sin cruce) es suficiente para obtener muy aceptables resultados. Sin embargo, para funciones objetivos en las que se produce un alto grado de epistasis (ver 6.4.4), el uso del cruce es absolutamente indispensable [Srinivas et al., 94b].

6.8.2.1 El operador cruce

Puede abordarse el estudio del operador cruce desde una doble perspectiva: la *idea* y el *mecanismo* [Jones, 95]. La idea ya ha sido expuesta: esperar que los bloques constructivos de dos individuos se combinen en un descendiente, dando lugar a un individuo más apto que los progenitores. El mecanismo es el proceso por el que se lleva a la práctica la idea, la forma de implementar el cruce.

Existe una gran variedad de mecanismos, y a ellos se ha dedicado una gran cantidad de literatura. Desde la forma original y más simple (el cruce monopunto para cadenas binarias), los mecanismos de cruce han evolucionado buscando, en unos casos una mayor eficiencia, y en otros, adaptarse al tipo de codificación o al problema a resolver. A continuación se exponen algunos de los mecanismos de cruce más habituales.

6.8.2.1.1 Cruce monopunto

Es el mecanismo más sencillo y el empleado en el algoritmo genético básico. En esta técnica, seleccionadas dos cadenas **a** y **b** de la población, de longitud **l**, que actuarán como progenitores, se escoge de manera aleatoria un escalar $k \in [1, l[$.

Este valor es el denominado *punto de cruce*. Conocido éste se generan dos soluciones “hijas” formadas de la siguiente manera: la primera poseerá los k primeros genes de a y el resto de b , la otra solución hija se formará de manera inversa: con los k primeros genes de b y los restantes de a .

Como se indicó en 6.4.4, el funcionamiento de este tipo de cruce es coherente con la hipótesis de los bloques constructivos, dado que permite una alta conservación de los esquemas. Al mantener en la descendencia elementos consecutivos de los padres, se mantienen los esquemas de poca longitud. Sin embargo, esquemas de longitud elevada como el de la Figura 6.12, suponen un grave problema para este tipo de cruce. Sea cual sea el punto de cruce seleccionado, este esquema resultará roto y será imposible de transmitir a la descendencia. Así pues, existirán características de los padres que será imposible transmitir a la descendencia. Para solucionar este inconveniente se desarrolló el cruce bipunto.

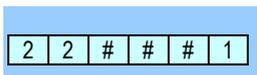


Figura 6.12: Ejemplo de esquema no heredable mediante cruce monopunto.

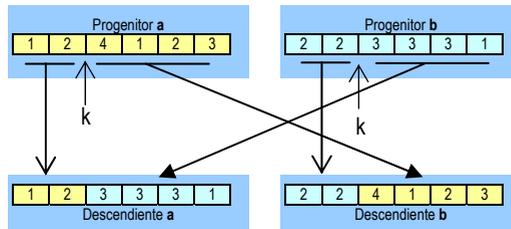


Figura 6.13: Cruce monopunto.

6.8.2.1.2 Cruce bipunto

En esta técnica, seleccionadas dos cadenas a y b de la población, de longitud I , que actuarán como progenitores, se escogen de manera aleatoria dos escalares k_1 y k_2 cumpliendo que $1 \leq k_1 < k_2 \leq I$. Conocidos los dos puntos de cruce, se generan dos soluciones “hijas” combinando los genes de a y b . El primer descendiente poseerá los k_1 primeros genes de a , los k_1+1 a k_2 genes siguientes de b , y los restantes, de k_2+1 a I serán de nuevo los genes correspondientes de a . El segundo descendiente se forma de manera análoga inversa.

Puede comprobarse que el esquema representado en la Figura 6.12 es ahora heredable por la descendencia. Sin embargo, es posible localizar ahora combinaciones de genes que no podrían ser transmitidos a la descendencia mediante un cruce bipunto.

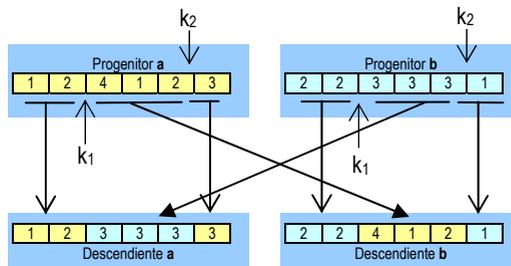


Figura 6.14: Cruce bipunto.

Esto da lugar a generalizar este proceso en los cruces multipunto.

6.8.2.1.3 Cruce multipunto

No son más que la generalización de los cruces antes mencionados. Se escogen ahora t puntos de cruce para obtener la descendencia por combinación alternada de los genes de los progenitores. El cruce monopunto y el bipunto son cruces multipunto con $t=1$ y $t=2$.

La mejora en la capacidad de proceso de los esquemas que puede proporcionar aumentar el valor de t , se contrarresta con el aumento del tiempo de cálculo necesario para generar la descendencia. Además, De Jong, ya en 1975 (como se indica en [Goldberg, 89]) concluyó tras una serie de experimentos, que introducir un número excesivo de puntos de corte reduce la eficacia del algoritmo, al producir la ruptura de la mayor parte de los esquemas. Elevar el valor de t supone realizar una búsqueda más exploratoria que explotadora.

6.8.2.1.4 Cruce segmentado

Consiste en un cruce multipunto en el que el número de puntos de cruce es variable. En lugar de definir un valor concreto se define una probabilidad de que al llegar a cierto elemento de la cadena durante la reproducción, se introduzca o no un punto de cruce. A dicha probabilidad se le denomina *probabilidad de segmentación*. Por ejemplo; un valor de la probabilidad de segmentación de 0,15 indica que en promedio, el número de puntos de cruce en cada proceso reproductivo será 0,15 · l (siendo l la longitud de las cadenas), aunque no necesariamente tomará dicho valor.

6.8.2.1.5 Cruce uniforme

El cruce uniforme se lleva a cabo generando una *máscara de cruce*. Esto no es más que una cadena de la misma longitud que las que se pretende cruzar, poblada aleatoriamente de ceros y unos. La generación de la descendencia es guiada por esa máscara. Uno de los hijos adoptará el valor de los genes del progenitor **a** en las posiciones en las que la máscara contenga un uno, y los de **b** en aquellas posiciones en las que en la máscara haya un cero (Figura 6.15). El segundo hijo adoptará en cada posición los valores del progenitor contrario al del primer hijo.

El cruce uniforme realiza el intercambio de genes más que de grupos de genes, lo cual parece contradecir la hipótesis de los bloques constructivos. Lo que se realiza es el intercambio de atributos específicos independientemente de la posición que ocupen en la cadena. Esto puede resultar deseable en determinados tipos de problemas, y compensar la destrucción de esquemas que provoca su empleo.

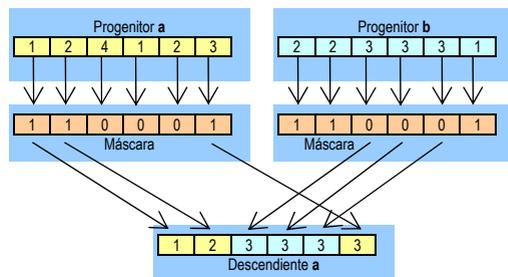


Figura 6.15: Generación de uno de los descendientes en un cruce uniforme.

Como se indicó en 6.4.4, determinados experimentos han concluido que el cruce uniforme ofrece mejores resultados que el cruce monopunto en determinadas tipologías de problemas [Syswerda, 89], sin embargo su uso debe adoptarse con precaución y cuando haya motivos fundados para hacerlo.

6.8.2.1.6 Partially matched crossover (PMX) y cruce por orden

El primer tipo de cruce, descrito por Goldberg [Goldberg, 85; Goldberg, 89], es adecuado para los problemas de orden como el del viajante de comercio. En estos problemas el valor de los genes es fijo y las soluciones son permutaciones de los elementos del alfabeto. La aptitud del individuo depende del orden en el que aparecen los genes en la cadena. En el caso del problema del viajante de comercio, los cromosomas tendrían tantos genes como ciudades se deben recorrer. Cada gen representa una ciudad, y el orden en el que aparecen en el cromosoma indica el orden en el que serán visitadas las ciudades. La aplicación de los operadores de cruce expuestos en los apartados anteriores generarían, con gran probabilidad, individuos no factibles. En el cruce PMX no se cruzan los valores de los genes si no, más bien, la posición que ocupan en la cadena.

Un tipo de cruce muy parecido descrito por Davis [Davis, 85], y aplicable al mismo tipo de problemas es el cruce por orden. La diferencia fundamental entre estos dos tipos de cruce y los expuestos anteriormente, es que estos incorporan conocimiento específico del problema a resolver. Esta adaptación del operador al problema permite convertirlos en operadores cerrados, es decir, operadores cuya aplicación producirá siempre individuos factibles. De esta manera los algoritmos son “menos” ciegos y resultan más eficientes en la resolución del problema concreto, pero, como contrapartida, pierden generalidad y reducen su ámbito de aplicación.

6.8.2.1.7 Cruce sobre alfabetos de alta cardinalidad

Como se expuso en 6.5, la codificación de los individuos mediante alfabetos no binarios se ha extendido y obtenido buenos resultados, que superan en muchos casos a las codificaciones de dos alelos. Entre estas codificaciones es de uso común el empleo de números enteros [Bramlette, 91] y números reales [Janikow et al., 91], que permiten la creación de operadores genéticos con cierto conocimiento del problema.

Surge así una gran variedad de operadores adaptados al problema a resolver, que actúan sobre individuos representados por cadenas en las que cada posición es un gen que puede adoptar valores enteros o reales. Ejemplos de operadores cruce de este estilo son el **average crossover**, que obtiene los genes del nuevo individuo como la media aritmética de los valores de los genes de los progenitores; el **geometric mean crossover**, que opera de forma similar pero empleando en este caso la media geométrica; o el **extensión crossover**, que obtiene la diferencia entre los valores de los genes de los progenitores, y se la suma al valor mayor o se la resta al menor.

6.8.2.1.8 Mecanismos adicionales a los operadores de cruce

Los diferentes tipos de cruces expuestos pueden modificarse introduciendo mecanismos que permitan aumentar su rendimiento.

Puede considerarse la cadena cromosómica como una **estructura anular**, en la que el primer y el último gen resultan adyacentes. Otros sistemas desordenan aleatoriamente las posiciones de los genes de ambos progenitores antes de realizar el cruce, volviendo a ordenarlos realizado éste; este procedimiento es denominado **cruce con barajado**. Prohibir la aplicación de la mutación sobre los individuos generados por los cruces es otra alternativa denominada **cruce solitario**.

Un proceso más elaborado es el **cruce con adaptación**. En estos, la asignación de los puntos de cruce no se realiza de manera aleatoria, si no que sigue un proceso evolutivo análogo al del propio algoritmo. Los puntos de cruce que generan buena descendencia prosperan, los que no, desaparecen.

6.8.2.1.9 Comparaciones de los diferentes tipos de cruce

Eshelman en 1989 [Eshelman et al., 89], realizó un exhaustivo trabajo de comparación entre diferentes tipologías de cruce, tanto teórica como experimentalmente. Se analizaron las desviaciones posicionales y distributivas de los cruces monopunto, bipunto, multipunto y uniforme entre otros. No fue posible extraer una conclusión respecto a qué técnica superaba en eficiencia a las demás. Las diferencias más grandes apreciadas entre los diferentes tipos de cruces no superaba el 20%.

Como ya se ha indicado, De Jong [Goldberg, 89] fue muy crítico con los cruces multipunto, proponiendo el bipunto como el más eficiente. No obstante, cuando la población ha convergido mucho este tipo de cruce pierde su capacidad para incentivar la exploración del entorno del espacio de soluciones, dado que los segmentos procedentes de los progenitores tienen una alta probabilidad de ser parecidos. El mismo autor propuso una modificación al cruce bipunto en la que, si los segmentos a cruzar para generar la descendencia son parecidos, se escogen dos nuevos puntos de cruce.

Posteriormente, el mismo De Jong y sus colaboradores [De Jong et al., 90], concluyen que el cruce bipunto tiene un buen comportamiento para tamaños de población grande, pero que para tamaños de población pequeños, el efecto de ruptura de esquemas producido por el cruce uniforme resulta beneficioso.

Parece pues, que no es posible afirmar taxativamente qué tipo de cruce es mejor. Simplemente se puede realizar alguna recomendación en función del tipo de problema a resolver. Sin embargo, dados los resultados de Eshelman, no parece que la elección del tipo de cruce sea una decisión crítica a la hora de implementar el algoritmo; no afectará a la eficacia aunque puede que sí afecte a la eficiencia del mismo.

6.8.2.2 El operador mutación

En la naturaleza, la mutación es la alteración al azar del material genético (ADN en las células, y ADN y ARN en los virus), debida a errores en la transmisión durante la división celular, a radiaciones de ciertos tipos o a ciertas sustancias químicas denominadas agentes mutágenos. Salvo raras excepciones, las mutaciones suponen deficiencias en los individuos que las sufren y pueden llegar a ser letales. Sin embargo, comportan beneficios para la especie, ya que aportan variabilidad genética a la población que será el desencadenante de la selección natural.

Las mutaciones naturales pueden ser de tres tipos: *génicas*: alteraciones de la secuencia de nucleótidos de un gen, *cromosómicas*: alteraciones de la secuencia de genes de un cromosoma, y *genómicas*: alteraciones en el número de cromosomas. La analogía de la mutación en los algoritmos genéticos es implementada a través del operador mutación, que por su forma habitual de actuar puede considerarse como una mutación cromosómica.

La mutación se aplica sobre los individuos generados por el operador cruce. Aunque existen diversas variantes, la forma habitual de implementar el operador es la siguiente: para cada uno de los elementos de la cadena a mutar se escoge un número aleatorio comprendido entre 0 y 1. Si el valor obtenido es inferior a la probabilidad de mutación (P_m) se produce el cambio del valor de ese elemento por otro alelo. Es decir, la probabilidad de que un elemento concreto mute es igual a P_m , que suele adoptar valores muy pequeños.

Suponiendo una representación binaria, un elemento puede tomar dos valores (0 y 1). En algunos casos la mutación se realiza cambiando el valor del elemento, es decir; si es cero se transforma en uno y viceversa. En otros casos se prefiere escoger aleatoriamente el valor que adoptará el elemento de la cadena, independientemente del valor inicial; en estos casos, la probabilidad de que el gen inicialmente seleccionado para mutar mute realmente es del 50%, dado que puede ser seleccionado de nuevo el valor original. De manera práctica, la aplicación de una u otra variante del operador no influye más que en la probabilidad de mutación efectiva.

La representación mediante alfabetos binarios de los individuos implica que cada gen (representante de una característica), debe ser codificado en varios elementos de la cadena si posee más de dos alelos posibles. La mutación, tal y como se ha definido, afecta a elementos de la cadena, a bits, más que a genes propiamente dichos. Algunas variantes de la mutación (*mutación sobre genes*), actúa sobre cada gen en lugar de sobre cada elemento de la cadena. En estos casos se escoge un alelo del gen, y se sustituyen los elementos que representan dicho gen por los correspondientes al nuevo alelo.

6.8.2.2.1 Mutación sobre alfabetos de alta cardinalidad

De la misma forma que ocurre con el operador cruce (ver 6.8.2.1.7), la codificación de los individuos mediante alfabetos no binarios, ha hecho surgir una

gran variedad de operadores adaptados al problema a resolver, que actúan sobre individuos representados por cadenas en las que cada posición es un gen que puede adoptar valores enteros o reales.

Ejemplos de operadores mutación de este estilo son el **random replacement**, que obtiene los genes a mutar del nuevo individuo de manera aleatoria; **creep mutation**, que añade o sustrae un valor pequeño aleatorio al valor del gen a mutar; o **geometric creep mutation**, que obtiene los nuevos valores multiplicando los antiguos por un número aleatorio cercano a la unidad.

En los dos últimos tipos de operadores los números aleatorios pueden generarse siguiendo distribuciones no necesariamente uniformes, como la exponencial, la normal o la binomial.

6.8.2.2.2 Mutaciones por intercambio de posición

Este tipo de mutación es adecuado para los problemas de orden como el del viajante de comercio o el de la rotación de puestos de trabajo. Como se indicó para el caso de la mutación, en estos problemas el valor de los genes es fijo y las soluciones son permutaciones de los elementos del alfabeto. La aptitud del individuo depende del orden en el que aparecen los genes en la cadena. En el caso del problema del viajante de comercio, los cromosomas tendrían tantos genes como ciudades se deben recorrer. Cada gen representa una ciudad, y el orden en el que aparecen en el cromosoma indica el orden en el que serán visitadas las ciudades. En la mutación por intercambio de posición no se modifica el valor de los genes, dado que con gran probabilidad se generarían individuos no factibles al repetirse elementos en la cadena, si no que se intercambia la posición de los genes dos a dos. De esta manera se generan individuos factibles, dado que no aparecen ciudades repetidas y todas las ciudades están representadas en cada solución. El operador así definido es cerrado, siempre da lugar a individuos factibles si se parte de individuos factibles.

6.8.2.2.3 Mutaciones no uniformes

La probabilidad de mutación (P_m) es el valor que establece con qué probabilidad mutará cada uno de los elementos de una cadena. Este valor es idéntico para cada uno de los componentes o para cada uno de los genes de la misma.

La mutación no uniforme, introducida por Michalewicz, asigna probabilidades de mutación diferentes a cada elemento o gen que conforma el individuo. De esta manera se pueden establecer probabilidades adaptadas al significado de cada gen, proporcionando al algoritmo conocimiento específico del problema a resolver. Puede consultarse [Michalewicz, 92] para obtener información sobre diversos modos de asignar estas probabilidades

6.8.2.3 El operador inversión

A diferencia de los operadores cruce y mutación, la inversión no es un operador

que caracterice de una manera tan marcada a los algoritmos genéticos. Su presencia suele darse, fundamentalmente, en algoritmos que emplean codificaciones binarias, como mecanismo para escapar de situaciones en las que se ha bloqueado el mecanismo de generación de bloques constructivos.

Como se expuso al tratar la hipótesis de los bloques constructivos (ver 6.4.2), el orden de los genes en el cromosoma es crítico para la constitución de dichos bloques. Se hace necesario para lograr el éxito en la búsqueda, que las regiones del espacio en las que se localizan soluciones de gran aptitud, puedan ser representadas por esquemas cortos y compactos. La ordenación seleccionada para codificar soluciones a un problema (el orden de los componentes que codifican los genes en el cromosoma), puede no resultar conveniente e impedir que se logre crear bloques constructivos adecuados, haciendo que el algoritmo sea incapaz de trasladar la búsqueda a las zonas más aptas del espacio de soluciones. Estas situaciones suelen desembocar en la imposibilidad de converger y en la desorientación.

Este inconveniente puede ser resuelto introduciendo en el proceso de optimización, no sólo el fenotipo de los individuos (lo que representan las estructuras), si no también el genotipo (las propias estructuras), es decir: buscar el orden de los componentes de la cadena que permita construir bloques constructivos de alto significado y con mayor potencial evolutivo [Goldberg, 89].

Uno de los mecanismos que permite hacer evolucionar las estructuras de codificación es la inversión [Holland, 75]. Este operador actúa seleccionando aleatoriamente dos puntos de la cadena e invirtiendo el orden de los elementos existentes entre ambos. Se hace necesario que el algoritmo recuerde el significado original de cada uno de los elementos de la cadena durante los diferentes cambios de orden; esto puede hacerse mediante el etiquetado de los elementos (ver Figura 6.16). Cabe destacar que el proceso de inversión no modifica al individuo que representa el cromosoma, sino la forma en que dicho individuo es codificado⁵⁵.

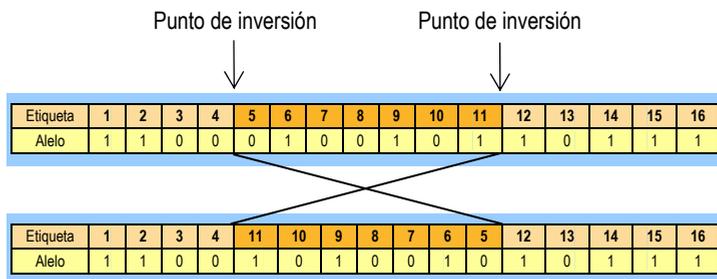


Figura 6.16: Actuación del operador inversión.

⁵⁵ En la naturaleza existe un mecanismo análogo por el que se modifica la estructura cromosómica, denominado evolución cariotípica. Puede decirse que la evolución cariotípica permite a las especies adoptar configuraciones cromosómicas que permitan una rápida adaptación a cambios bruscos en el entorno.

6.9. Estrategias frente a los individuos no factibles

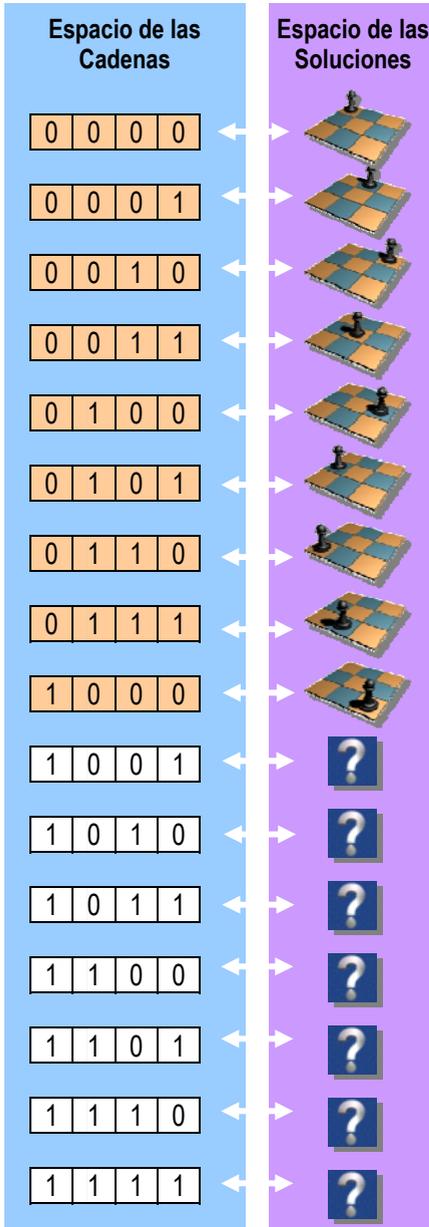


Figura 6.17: Cadenas representativas de individuos no factibles.

El algoritmo genético básico, tal y como fue definido en 6.4.2, es un método de búsqueda irrestrictiva. No es posible establecer límites o restricciones a la búsqueda puesto que no existen mecanismos para ello. Además del problema funcional que esto supone, representa, como ahora se verá, un grave problema operativo, que se da en los algoritmos que emplean codificaciones sobre un superconjunto del dominio del problema.

Como ejemplo considérese el algoritmo genético básico, en el que la codificación empleada para representar a los individuos (de longitud l) es binaria. El conjunto de las cadenas de longitud l que pueden formarse con dicho alfabeto, es casi siempre mayor que el número de posibles individuos que representan soluciones al problema. Esto es, es posible formar cadenas que no representan individuos factibles que requerirán algún tipo de tratamiento.

Como ejemplo supongamos que un gen debe presentar 9 posibles alternativas; será necesario emplear 4 bits para codificar el gen. Sin embargo mediante 4 bits es posible codificar 16 alternativas, resultando que 7 cadenas no representan una alternativa válida.

Una adecuada codificación debe lograr que el espacio de

posibles cadenas no sea mucho más grande que el espacio de soluciones, dado que de ser así se empleará gran cantidad de recursos en el tratamiento de las infactibilidades. Sin embargo, la elección de la forma de codificar los individuos es en gran medida discrecional, y es imposible lograr hacer coincidir ambos espacios.

Cualquier tipo de técnica empleada para tratar los individuos no factibles que aparecen en la población durante la evolución, pasará necesariamente por incorporar, de manera directa o indirecta, conocimiento específico del problema. A continuación se expondrán las estrategias más habituales [De Jong, 85; Pérez, 04].

6.9.1 Descarte o penalización

La forma más inmediata de tratar los individuos no factibles es descartándolos (en un proceso también denominado filtrado); es decir, los individuos se generan sin un mecanismo que garantice su factibilidad, eliminando de la población los no factibles a posteriori. Por ejemplo, si el resultado del cruce de dos individuos produce un individuo no factible, éste simplemente se descarta. El descarte no es más que un caso extremo del sistema de penalización que a continuación se describe.

El sistema de penalización consiste en penalizar a los individuos no factibles. Esto se lleva a cabo modificando el valor de su función de aptitud de manera conveniente (aumentando o disminuyendo su valor según el problema sea a maximizar o a minimizar) de forma tal que se disminuya su probabilidad de supervivencia y reproducción. Es conveniente que el grado de penalización sea proporcional a la “cantidad de infactibilidad”, es decir, a lo apartada que esté una solución de la zona de soluciones factibles, sin embargo esto no es siempre fácil de medir, optándose entonces por penalizar en la misma medida a todas las soluciones no factibles.⁵⁶

La intensidad de las penalizaciones influirá de manera decisiva en la evolución del algoritmo. Penalizaciones muy severas en problemas muy restringidos provocarán que se dispare el tiempo empleado en el procesamiento de las no factibilidades. Por otra parte, una solución factible poseerá una aptitud mucho mayor que las infactibles, por lo que la aparición de un individuo válido provocará que éste domine inmediatamente la población, y se produzca una convergencia prematura. Esto va en contra de la misma filosofía de las penalizaciones, que pretende alcanzar buenas soluciones factibles a través de soluciones infactibles intermedias que posean esquemas deseables⁵⁷. De la misma forma, penalizaciones demasiado someras pueden provocar que la búsqueda se centre en zonas del espacio donde se concentren soluciones no factibles, dado que a pesar de la penalización impuesta, su aptitud supera a la de individuos factibles.

⁵⁶ Algunas propuestas actúan de manera inversa; en lugar de penalizar las soluciones infactibles se sobrevalora la aptitud de los individuos factibles. A este tipo de técnica se le denomina, *gratificación*.

⁵⁷ Puede establecerse cierta analogía entre este mecanismo, y la oscilación estratégica empleada en los algoritmos tabú descrita en el capítulo anterior.

6.9.1.1 Funciones de penalización adaptativas

El problema de establecer de manera adecuada el nivel de penalización, se complica aún más si se considera que es conveniente que las penalizaciones actúen más intensamente en las fases finales de la evolución que en las iniciales. En el inicio, la búsqueda debe estar poco restringida, dificultando paulatinamente la aparición de individuos infactibles conforme el algoritmo comienza a converger hacia buenas soluciones.

Este problema puede abordarse mediante el empleo de penalizaciones adaptadas al estado de la búsqueda, conocidas como penalizaciones adaptativas (*adaptive penalties*). Ejemplo de éstas son: la descrita en [Michalewicz, 92], que endurece las penalizaciones con el avance de la evolución, la de Farley [Reeves, 94a], basada en una analogía con el método de relajación lagrangiana, o el empleo de heurísticas en la determinación de la intensidad de las penalizaciones como proponen Klinciewicz y Luss [Reeves, 94a].

6.9.2 Reparación

Como se ha indicado en el apartado anterior, las técnicas de penalización desaprovechan la información contenida en los individuos no factibles. El algoritmo, por tanto, pierde eficiencia y capacidad exploratoria. Una alternativa a los mecanismos de penalización, consiste en permitir la generación de individuos no factibles, sometiéndolos posteriormente a un proceso de reparación que los devuelve a la zona de factibilidad.

Dos son los grandes inconvenientes de estas técnicas: por un lado la imposibilidad de encontrar un mecanismo lo suficientemente general, lo que obliga a desarrollar técnicas específicas para cada problema y, por otra parte, el gran consumo de recursos computacionales que conllevan dichos mecanismos.

El *remapping* es una de estas técnicas de reparación que actúa recodificando los individuos no factibles. Considérese el caso del apartado previo en el que un gen debe presentar 9 posibles alternativas, lo que hace necesario emplear 4 bits para codificarlo. El problema que surge es que mediante 4 bits es posible codificar 16 alternativas, resultando que 7 cadenas no representan una posibilidad válida (véase la Figura 6.17). El *remapping fijo* soluciona las infactibilidades asignando a cada cadena infactible un individuo, aun a costa de que un individuo pueda ser representado por más de una cadena. En el ejemplo de la Figura 6.18, ocho individuos están representados por dos cadenas y dos individuos únicamente por una.

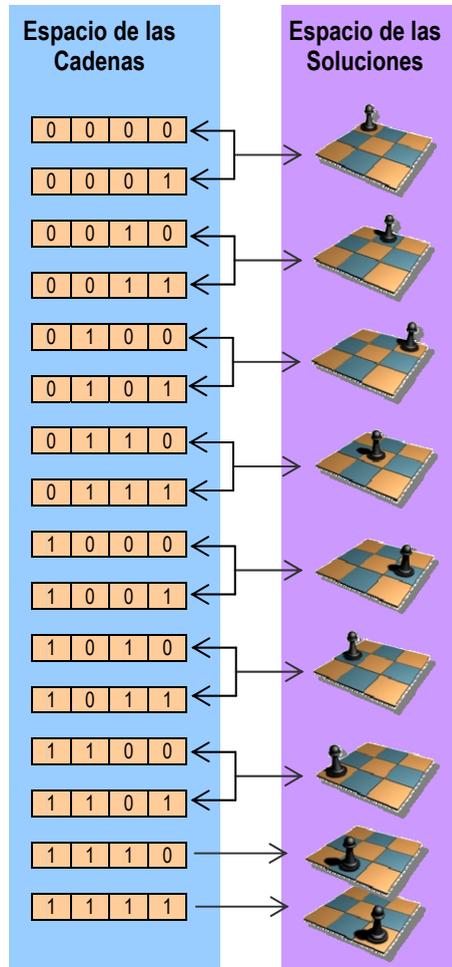


Figura 6.18: Resolución de infactibilidades mediante remapping fijo.

Mediante esta técnica cada cadena representa a un individuo factible, sin embargo, la posibilidad de los individuos representados por más de una cadena de

aparecer y mantenerse en la población son mayores que la de los representados por una única cadena. Esto introduce desviaciones artificiales en la evolución de la población favorables a los individuos hiperrepresentados.

Como alternativa al remapping fijo, el *remapping aleatorio* actúa asignando al azar un individuo factible a las cadenas que representan individuos no factibles. Esto es: cuando aparece en la población una cadena que representa una infactibilidad, ésta es sustituida por cualquier cadena que represente a un individuo factible. Aunque este sistema elimina las desviaciones provocadas por el remapping fijo, deviene en una pérdida de la información transmitida entre padres e hijos durante el proceso reproductivo.

El *remapping probabilístico* es un sistema híbrido entre los dos anteriores. Cada posible valor de un gen (no únicamente los que están en exceso), es redirigido de manera probabilística a uno de dos posibles individuos factibles. De esta manera cada individuo tiene las mismas posibilidades de representación.

6.9.3 Codificación cerrada

Como se indicó en 6.5, las condiciones que debería cumplir un sistema de codificación óptimo son:

Compleitud: Cualquier solución del problema debe poder ser representada mediante esa codificación.

Coherencia: Cualquier cadena formada mediante esa codificación debe representar una solución al problema.

Uniformidad: Todas las soluciones deben poder ser representadas por un número igual de codificaciones, evitando que unas lo estén más o menos que otras. Puede exigirse una relación biunívoca entre el espacio de las cadenas y el espacio de las soluciones: cada cadena representa una y sólo una solución, y cada solución es representada por una y sólo una cadena.

Localidad: Debe existir proporcionalidad entre las variaciones de las codificaciones y las variaciones de los individuos representados. Si se producen pequeños cambios en las cadenas, deben producirse pequeños cambios en las soluciones, asimismo, grandes cambios en las cadenas darán lugar a importantes cambios en las soluciones.

Sencillez: La codificación y descodificación de los individuos debe ser un proceso sencillo.

Si se logra una codificación que cumpla las condiciones de coherencia y uniformidad, se habrá logrado solucionar el problema de las infactibilidades. Hablando más propiamente, el problema no aparecerá, por lo que no es exacto hablar de una técnica para tratar los individuos no factibles, sino para evitar su aparición.

Se trata de adoptar una codificación que impida la aparición de individuos no factibles, es decir, que el conjunto de las posibles cadenas sea igual al dominio del

problema, y no un superconjunto del mismo. De esta manera, cualquier cadena generada representará un individuo factible. Se hace necesario, además, que los operadores genéticos sean cerrados, es decir, que de su aplicación se obtengan siempre individuos factibles.

Este sistema presenta inconvenientes similares a las técnicas de reparación: por un lado la imposibilidad de encontrar un mecanismo lo suficientemente general, lo que obliga a desarrollar técnicas específicas para cada problema y, por otra parte, el gran consumo de recursos computacionales que conllevan estos mecanismos.

6.10. Parametrización de los algoritmos genéticos

Siguiendo la imagen que plantean Srinivas y Patnaik [Srinivas et al., 94b], puede visualizarse el funcionamiento de los algoritmos genéticos, como una combinación equilibrada de exploración de nuevas zonas del espacio de soluciones y explotación de las zonas ya conocidas ... *“This balance, which critically controls the performance of the genetics algorithms, is determined by the right choice of control parameters: the crossover and mutation rates and the population size”*.

Estos autores apuntan lo que ya se ha comentado en apartados anteriores:

Aumentar la probabilidad de cruzamiento incrementa la recombinación de bloques constructivos y como contrapartida aumenta la rotura de cadenas de calidad. Incrementar la probabilidad de mutación aleatoriza la búsqueda, pero permite la reintroducción en la población de material genético desaparecido durante la evolución. Aumentar el tamaño de la población aumenta la diversidad y reduce la probabilidad de convergencia hacia óptimos locales, sin embargo, incrementa el tiempo de evolución necesario para converger hacia zonas óptimas del espacio de búsqueda.

La selección adecuada de los parámetros descritos no es una tarea trivial. Existen interacciones evidentes entre la actuación de los operadores genéticos y el tamaño de la población, que convierten a la parametrización en un complejo problema de optimización no lineal. Los parámetros adecuados dependen además fuertemente del tipo de función de aptitud empleada y, por tanto, del problema a resolver.

En [Srinivas et al., 94b] se indica que, aunque el tema de la adecuada parametrización de los algoritmos genéticos está lejos de ser resuelto, existen dos enfoques, expresados mediante dos sets de parámetros, que proporcionan, de manera general, buenos resultados. El primero, propuesto por De Jong y Spears [De Jong et al., 90] emplea tamaños de población grandes (100 individuos) y probabilidades bajas de cruzamiento y mutación ($P_c=0,6$, $P_m=0,001$). El segundo, sugerido en [Grefenstette, 86], propone tamaños de población menores (del orden de 30 individuos), con mayor actividad de los operadores genéticos ($P_c=0,9$, $P_m=0,01$).

El primer enfoque disminuye la actividad de los operadores manteniendo la diversidad gracias a una gran población. El segundo actúa a la inversa, una población pequeña que evita la convergencia prematura por la actuación intensiva de los operadores genéticos. Ambas orientaciones proporcionan un papel preponderante a la actividad del operador cruce frente a la mutación.

Un estudio de la variación del rendimiento de los algoritmos en función de la parametrización establecida, puede encontrarse en [Digalakis et al., 00]. En este trabajo, se mide el rendimiento de los algoritmos en la optimización de 14 funciones referencia (*benchmark*) variando el tamaño de la población, el modo de realizar el reemplazo, la probabilidad de cruce y mutación, el tipo de selección, etc.

6.10.1.1 Meta-algoritmos genéticos para la determinación de parámetros de ejecución

Además de la parametrización adaptativa, que será tratada en el apartado siguiente, existen técnicas más o menos complejas que tratan de determinar los parámetros más adecuados para la resolución de un problema. En este sentido cabe destacar el empleo de meta-algoritmos genéticos [Grefenstette, 86].

Un meta-algoritmo genético es un algoritmo genético en el que cada individuo de la población es a su vez un algoritmo genético (ver Figura 6.19). Cada uno de estos individuos resuelve el mismo problema empleando parámetros diferentes. La bondad de las soluciones obtenidas por los individuos y la rapidez de convergencia mide la aptitud de cada uno. Los parámetros de ejecución evolucionan generación tras generación, hasta lograr converger a los parámetros “óptimos” de ejecución.

Evidentemente, este proceso es intensivo en el uso de recursos computacionales, teniendo sentido emplearlo únicamente cuando los resultados a obtener puedan ser reutilizados en múltiples ocasiones (resolución de muchos problemas similares bajo condiciones parecidas).

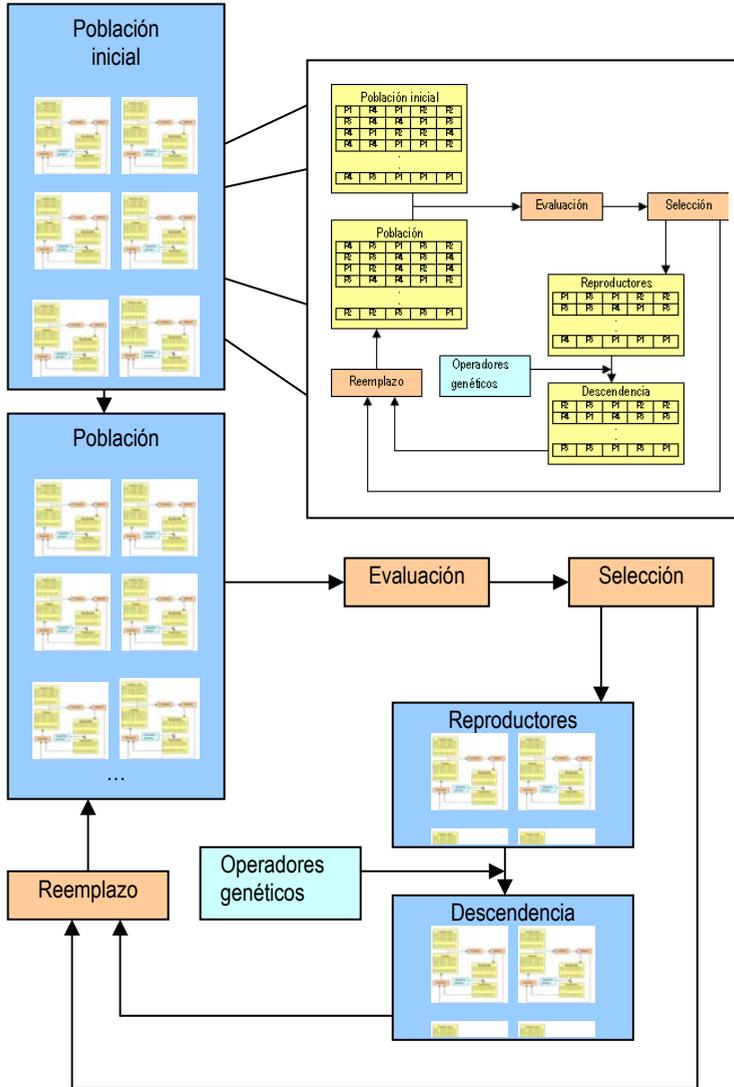


Figura 6.19: Meta-algoritmo genético. Los individuos de la población son, algoritmos genéticos.

6.10.2 Parametrización adaptativa

Los valores óptimos de los parámetros del algoritmo varían durante la evolución de la población. Mientras que inicialmente puede ser deseable una elevada tasa de mutación, por ejemplo, puede preferirse que ésta disminuya cuando el algoritmo se

encuentre cercano a converger a un óptimo ⁵⁸. Frente a la búsqueda a priori y fijación de los parámetros que controlan la evolución del algoritmo, existe la alternativa de emplear parámetros variables en función de las circunstancias evolutivas. Es lo que se denomina parametrización adaptativa. En 6.8.1.4 ya se expuso una técnica de reemplazo generacional (edad de los individuos), que hace que el tamaño de la población varíe en función del grado de convergencia del algoritmo. En [Srinivas et al., 94a] se encuentra una relación de técnicas que emplean este concepto de parámetro adaptable.

Ya en 1985, Davis [Davis, 85] introduce variaciones en las probabilidades de mutación y cruce en problemas de secuenciación de la producción. El sistema planteado hace variar de manera lineal las probabilidades, aumentando la de mutación y disminuyendo la de cruce, conforme avanza la evolución.

Aunque estrictamente no es un caso de parametrización adaptativa, en 1897 Schaffer y Morishima [Schaffer et al., 87] proponen un sistema de cruzamiento en el que la distribución de los puntos de cruce depende de la calidad de los individuos obtenidos. Esta información es codificada en una subcadena añadida a la cadena que representa a los individuos y participa de los operadores genéticos.

Davis [Davis, 89; Davis, 91] propone un mecanismo en el que la probabilidad de actuación de un operador depende de la aptitud de las cadenas creadas por dicho operador. Las probabilidades son modificadas periódicamente, basándose en el rendimiento que ofrece la actuación de los operadores durante un periodo. Esta técnica es empleada habitualmente en los algoritmos de estado estacionario (ver 6.8.1.3) y parece proporcionar buenos resultados.

En [Fogarty, 89] y en [Whitley et al., 90] se introducen probabilidades de mutación adaptativas. En el primero se demuestra que la disminución exponencial de la probabilidad de mutación con las generaciones, produce buenos resultados en aplicaciones específicas con codificaciones enteras. En el segundo, la probabilidad de mutación depende de la distancia de Hamming⁵⁹ entre individuos. La diversidad en la población se asegura dado que la aparición de individuos similares provoca un aumento de la probabilidad de mutación y por tanto la reintroducción en la población de código genético perdido durante la evolución.

En [Srinivas et al., 94a] se propone un sistema adaptativo, en el que las probabilidades de mutación y cruce son calculadas y adaptadas para cada individuo concreto, en función de su aptitud. Esta propuesta es conceptualmente similar a la de Whitley, sin embargo, mientras aquella está enfocada a los algoritmos de estado

⁵⁸ Existe una importante discusión en la bibliografía sobre la conveniencia de disminuir o aumentar la probabilidad de mutación durante la evolución. Ackley, Brammlette, Fogarty o Michalewicz, por ejemplo, defienden que ésta debe disminuir, aunque no ofrecen un motivo razonado para ello, basándose en la evidencia de sus experimentos. Puede aducirse que la mutación actúa como la temperatura en los algoritmos de recocido simulado, debiendo disminuir para favorecer la convergencia.

⁵⁹ La distancia de Hamming se calcula midiendo el número de bits distintos entre dos cadenas. En este contexto, trata de medir la diferencia entre dos individuos mediante la medición de las diferencias de las cadenas que los representan.

estacionario la de Srinivas se centra en los algoritmos generacionales.

6.11. Hibridación de los algoritmos genéticos

Como ya se ha indicado anteriormente, los algoritmos genéticos son métodos débiles de búsqueda. La ventaja que supone su generalidad, y el que no necesiten apenas más información sobre el problema a resolver, que una manera de medir la bondad de las soluciones obtenida, tiene como contrapartida su ineficiencia y la imposibilidad del tratamiento de excepciones, como por ejemplo las infactibilidades. Así, cuando los algoritmos genéticos ortodoxamente definidos se emplean en la resolución de problemas con restricciones complejas (por ejemplo en ingeniería), pueden no ofrecer resultados mucho mejores que una búsqueda meramente aleatoria.

“Traditional genetic algorithm, although robust, are generally not the most successful optimization algorithm on any particular domain”⁶⁰ [Davis, 91].

Se ha indicado también que la forma de mejorar la eficiencia de los algoritmos genéticos es la incorporación al mismo de conocimiento específico del problema a resolver, aun a costa de que se pierda generalidad, robustez y el respaldo de la base teórica sobre la que se asientan. A pesar de esto último, en la realidad, la resolución de cualquier tipo de problema con una mínima dificultad mediante algoritmos genéticos se lleva a cabo necesariamente introduciendo este conocimiento. La incorporación del conocimiento puede realizarse de forma directa en el propio algoritmo (es el caso del empleo de codificaciones no binarias o los programas de evolución [Michalewicz, 92]), o bien agregando al algoritmo procesos ajenos a su estructura básica. A este último caso se le denomina hibridación, y a los algoritmos así surgidos, algoritmos genéticos híbridos.

De manera general estos procesos añadidos suelen ser empleados en reforzar la búsqueda local del algoritmo. La estructura general del mismo realiza la búsqueda global, intensificándose la exploración en zonas específicas prometedoras empleando, por ejemplo, técnicas de escalada.

La hibridación suele implementarse de manera modular, y la ejecución puede ser paralela o secuencial [Pérez, 04]. En la ejecución **secuencial**, se realiza una búsqueda global sobre el espacio de soluciones para, en una segunda etapa, intensificar la búsqueda en los alrededores de las buenas soluciones localizadas. En la ejecución **paralela**, diversos módulos realizan búsquedas locales de manera simultánea, existiendo un procesador central encargado de recoger las soluciones obtenidas por estas búsquedas locales, y hacer evolucionar la población global.

Para la búsqueda local debe seleccionarse el procedimiento más adecuado al caso (según Davis, un algoritmo híbrido nunca será peor que el procedimiento con el que se hibrida el algoritmo genético). Si existe la posibilidad, se emplea alguna

⁶⁰ “Los algoritmos genéticos tradicionales, aunque robustos, no son, generalmente, el algoritmo de optimización más exitoso en ningún ámbito particular”.

heurística de búsqueda local, en caso contrario puede emplearse otro tipo de técnicas. Se usa con frecuencia el Hill-Climbing⁶¹, llegando en casos a someter a cada individuo de la población inicial, y a cada nuevo individuo creado, a dicho proceso.

Una implementación tradicional de los algoritmos híbridos, introduce la búsqueda local en el proceso de reproducción, tratando de mejorar localmente los individuos obtenidos del cruzamiento [Davis, 91]. Si se encuentra una mejora, ese nuevo individuo se introduce en la población. Algunos autores critican esta forma de actuar, dado que el cambio en el código heredado de los padres supone también la pérdida de los esquemas heredados. Esto provoca la imposibilidad de una adecuada búsqueda paralela y hace perder su sentido al algoritmo.

En [Misevicius et al., 02] se presenta una técnica basada en la reconstrucción de soluciones mediante un procedimiento de mutación, que son sometidas posteriormente a un proceso de mejora. El mismo Misevicius presenta en [Misevicius, 03] una nueva heurística cuya base es un algoritmo genético que emplea el principio de "*ruin & recreate*". Se basa en modificar (destruir/arruinar) de manera significativa las soluciones, para reconstruirlas posteriormente mediante una búsqueda local, realizando el proceso repetidas veces. El procedimiento suele obtener buenos resultados en los problemas de optimización complejos, muy restringidos, con funciones objetivo complicadas.

Una técnica genética de búsqueda local de especial interés es la **emulación del gradiente** [Goldberg, 89], que permite reemplazar los procedimientos tradicionales de escalada por otros que actúan directamente sobre la codificación de los individuos. Se puede obtener una información parecida a la del gradiente conmutando los valores de los bits de un individuo. El procedimiento a seguir (como se ofrece en [Pérez, 04]) comienza seleccionando uno o más de los mejores individuos de la población. Se procede a conmutar uno por uno y sucesivamente todos los bits de los individuos interesados y a evaluar los resultados obtenidos. Se sustituyen en la población los individuos originales por los más aptos obtenidos en este proceso, continuando con la búsqueda genética.

⁶¹ Estrategia de optimización local que sigue la dirección de mayor pendiente (positiva o negativa según el caso). Es muy útil si se posee una función heurística adecuada. Debido a su bajo coste computacional es muy empleada en optimización.

Puede consultarse una relación y comparación de algoritmos híbridos en

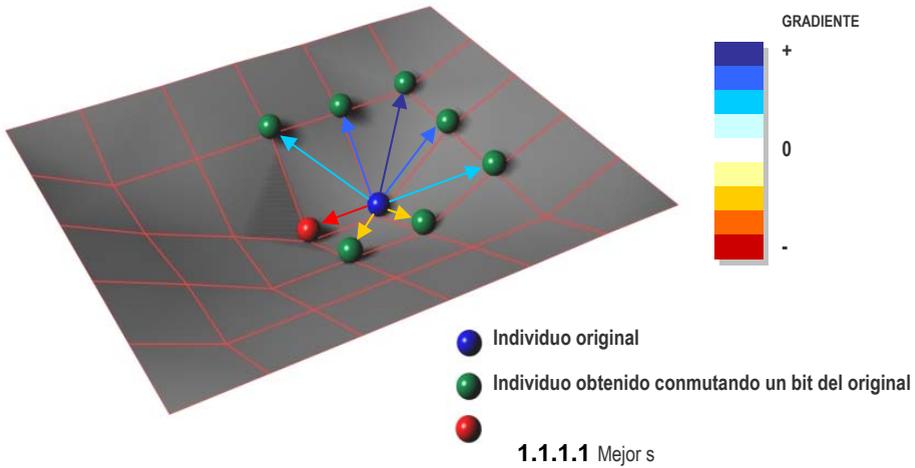


Figura 6.20: Emulación del gradiente. El individuo original es sustituido por aquel que, obtenido variando el valor de un bit, proporcione un mayor descenso (ascenso) de la aptitud. [Maniezzo et al., 95] y en [Taillard et al., 01].

6.11.1 Combinación de metaheurísticas en algoritmos híbridos

Los algoritmos híbridos fruto de la combinación de diferentes metaheurísticas, se encuentran entre las técnicas de resolución de problemas que con más frecuencia aparecen en la literatura reciente [Loiola et al., 04]. Las diferentes combinaciones tratan de aprovechar las cualidades particulares de las diferentes metaheurísticas para obtener algoritmos eficientes en la resolución de problemas específicos. Se trata de aprovechar las cualidades de cada uno, compensando mutuamente sus debilidades, combinando de manera adecuada los elementos clave de las dos técnicas.

Por ejemplo, la oscilación estratégica propia de la búsqueda tabú (ver capítulo anterior), puede ser controlada por un algoritmo genético que cree un grado suficiente de diversidad que permita una transición efectiva entre las zonas de factibilidad y no factibilidad; el empleo de estructuras de memoria típicas de los algoritmos de búsqueda tabú a los algoritmos genéticos, permite controlar el “historial” de los individuos de la población y, por ejemplo, hacer que estos sepan reaccionar de manera adecuada y adaptarse a situaciones conocidas.

6.12. Algoritmos genéticos aplicados al problema de la rotación de puestos

Los algoritmos genéticos han sido aplicados en un reducido número de propuestas al problema de la generación de agendas de rotación de puestos de

trabajo [Carnahan et al., 00; Nanthavanij et al., 01; Kullpattaranirun et al., 05]⁶².

La investigación más relevante es la realizada por Carnahan en [Carnahan et al., 00]. La importancia de dicha propuesta radica en su carácter novedoso, al combinar la utilización de algoritmos genéticos con criterios ergonómicos para la optimización de las rotaciones. En el estudio se propone la utilización de un algoritmo genético para la obtención de agendas de rotación que minimicen la exposición de los trabajadores a lesiones de espalda por manipulación manual de cargas, evaluando dicha exposición mediante el método *Job Severity Index* (JSI). En un estudio anterior del mismo autor [Carnahan et al., 98], puede consultarse la aplicación de un algoritmo genético para la optimización del problema de diseño de tareas de manipulación manual de cargas. Más recientemente en [Carnahan et al., 01] se propone la utilización de un algoritmo genético al problema del balanceo de líneas de producción, incluyéndose en el algoritmo además de las consideraciones tradicionales de precedencia de tareas y tiempos de ciclo, las demandas físicas de las tareas. Los estudios referidos confirman la autoridad de Carnahan en la utilización de los algoritmos genéticos como herramienta de resolución de diferentes problemas de optimización, entre ellos el de la generación de agendas de rotación.

Otros autores que aplican algoritmos genéticos para la obtención de soluciones al problema de las agendas de rotación son Nanthavanij y Kullpattaranirun [Nanthavanij et al., 01; Kullpattaranirun et al., 05]. Dichos autores proponen su utilización para la búsqueda de soluciones que reduzcan la exposición diaria al ruido de los trabajadores. En [Nanthavanij et al., 99] se desarrollan modelos matemáticos para la asignación óptima de los trabajadores a puestos que minimicen su exposición diaria al ruido. Sin embargo, [Kullpattaranirun et al., 05] señala su limitación para solucionar problemas de más de 5 trabajadores, proponiendo la utilización de los algoritmos genéticos como alternativa de optimización. En [Kullpattaranirun et al., 05] se describe un algoritmo genético basado en el presentado con anterioridad en [Nanthavanij et al., 01]. El estudio define nuevas heurísticas de mejora de los operadores tradicionales utilizados por los algoritmos genéticos (cruce y mutación). Este procedimiento obtiene mejores soluciones que las alcanzadas con la propuesta inicial del algoritmo [Nanthavanij et al., 01].

6.12.1 La propuesta de Carnahan

En [Carnahan et al., 00] se propone la aplicación de un algoritmo genético al diseño de agendas de rotación de puestos de trabajo bajo criterios ergonómicos. El objetivo del estudio es el desarrollo de un método que incorpore criterios de seguridad en el algoritmo con el fin de reducir las lesiones potenciales de espalda. El autor argumenta que en ocasiones se utiliza la rotación de puestos de trabajo como método para reducir la exposición del trabajador debida al riesgo por manejo manual de cargas. Sin embargo, señala que el desarrollo efectivo de dichas agendas de

⁶² Carnahan describe su algoritmo genético para la generación de agendas de rotación que minimicen la exposición de los trabajadores a lesiones de espalda en dos publicaciones [Carnahan et al., 99; Carnahan et al., 00]. En el presente trabajo se describe la propuesta más reciente y extensa del algoritmo genético publicada en [Carnahan et al., 00].

rotación puede ser complejo incluso en instalaciones de tamaño reducido. Ante dicha problemática Carnahan propone explotar la efectividad de optimización de los algoritmos genéticos.

Para la evaluación de la exposición de los trabajadores a lesiones de espalda Carnahan utiliza el método de evaluación *Job Severity Index* (JSI) descrito en [Liles, 86]. El resultado del método JSI es sensible a la capacidad del individuo para realizar la tarea de levantamiento, así como al peso del objeto levantado y a la distancia horizontal a la que se encuentra el objeto en el inicio del levantamiento. El índice JSI resulta de dividir el peso levantado por el trabajador entre su capacidad. Así pues, el valor del índice JSI es directamente proporcional al riesgo de lesión de espalda: cuanto mayor es el índice mayor es el riesgo. Los estudios realizados por [Ayoub et al., 83] y [Liles et al., 84] indicaron que valores del índice con puntuaciones superiores a 1,5 estaban asociados a trabajos con una mayor incidencia de las lesiones de espalda, mientras que los valores del índice JSI inferiores a 1,5 estaban relacionados con trabajos con menor riesgo de dolencias.

El estudio aplica dos métodos para la generación de agendas de rotación. En primer lugar, se generan agendas mediante Programación Entera, considerado el método tradicional de resolución de problemas de rotación de puestos de trabajo [Carnahan et al., 00], para tamaños de problemas reducidos. Posteriormente se propone un algoritmo genético considerado por el autor más sensible a la naturaleza dinámica del problema de las rotaciones.

6.12.1.1 Un algoritmo genético para el diseño de agendas de rotación que minimicen el riesgo por manipulación de cargas

A continuación se describe brevemente el algoritmo propuesto en [Carnahan et al., 00] para la obtención de soluciones al problema de las rotaciones de puestos de trabajo. El algoritmo propuesto se basa en el método general descrito con anterioridad por [Davis, 91].

Etapa 1: creación del entorno de las soluciones

En la primera etapa del algoritmo se define el entorno de las soluciones. El entorno en el que la solución existe se caracteriza por ser dinámico, al depender de las características de las sub-tareas que forman las cuatro tareas principales de levantamiento consideradas. En la Tabla 6.1 se muestra un ejemplo con el desglose de sub-tareas de una tarea A.

En el algoritmo se contempla la variación en el tiempo de tres parámetros del levantamiento, en concreto: del peso del objeto levantado, del ratio de las repeticiones del levantamiento (levantamientos/minuto), y de la distancia horizontal del objeto a los tobillos al inicio del levantamiento. El algoritmo genético genera aleatoriamente los valores de dichos parámetros asumiendo una distribución uniforme.

TAREA A	Periodo	FKA	SOA	KSA
Peso objetivo (Kg.)	8:00 - 12:00	35-37	23-27	18-22
	13:00 - 17:00	25-37	27-31	13-16
Ratio de repeticiones (levantamiento/minuto)	8:00 - 11:00	0.1-2.0	7.0-11.0	2.0-6.0
	11:00 - 14:00	1.0-3.0	3.0-6.0	5.0-8.0
	14:00 - 15:00	0.1-1.0	4.0-7.0	2.0-4.0
Distancia (cm.)	8:00 - 12:00	30-40	15-20	20-27
	13:00 - 17:00	18-20	17-22	10-20

Sub-tareas:
 FK_A = levantamiento desde el suelo hasta la altura de los nudillos.
 SO_A = levantamiento desde la altura de los hombros hasta una altura por encima de la cabeza.
 KS_A = levantamiento desde la altura de los nudillos hasta la altura de los hombros.

Tabla 6.1: Descripción de sub-tareas de una tarea A (fuente [Carnahan et al., 00]).

Etapa 2: creación de la solución inicial

En esta segunda etapa del algoritmo genético se genera la población de soluciones iniciales, en concreto el algoritmo genético obtiene 195 soluciones iniciales para la rotación de puestos.

La generación inicial exige la asignación de una de las cuatro tareas de levantamiento consideradas a un único trabajador en cada uno de los ocho periodos de trabajo. Cada solución se representa como una matriz de dimensión 1 x 32 caracteres (Figura 6.21). La matriz se divide en 8 secciones correspondientes a cada uno de los periodos de rotación. Dentro de cada sección hay cuatro subdivisiones correspondientes a las asignaciones de tarea a los empleados de tipo 1 a 4 respectivamente.



Figura 6.21: Matriz de 32 caracteres para representar una agenda de rotación de puestos (fuente [Carnahan et al., 00]).

El algoritmo diferencia entre 4 tipos de trabajadores con el objetivo de generar agendas de rotación que considere la diversidad de la población trabajadora. La Tabla 6.2 muestra los 4 tipos de empleados de la célula de fabricación.

En la solución de rotación que ilustra la Figura 6.21, el periodo comprendido entre las 8 y las 9 de la mañana contiene: un trabajador perteneciente al percentil 50 de hombres realizando la tarea D, una trabajadora mujer del percentil 90 realizando la tarea A, un trabajador del percentil 25 realizando la tarea C, una trabajadora mujer del percentil 50 realizando la tarea B. Con el fin de reflejar las restricciones de la celda de producción cada hora contiene las tareas A, B, C, D en una secuencia específica.

Empleado	Género	Capacidad de
1	Hombre	Percentil 50
2	Mujer	Percentil 90
3	Hombre	Percentil 25
4	Mujer	Percentil 50

Tabla 6.2: Género y capacidad de los empleados en la célula de fabricación (fuente [Carnahan et al., 00]).

Para completar la segunda etapa del algoritmo de creación inicial de soluciones, se asigna una *Etiqueta Genética*, un entero entre 1 y 3 generada aleatoriamente a cada una de las 195 soluciones. Cada etiqueta representa una de las tres posibles “*especies*” potenciales de soluciones que serán consideradas posteriormente en la etapa de evaluación de los individuos en la *función de aptitud (fitness)*.

Etapa 3: evaluación y selección

En la tercera etapa del algoritmo se evalúa la aptitud (*fitness*) de cada solución.

En el contexto del problema de la generación de agendas de rotación de puestos, la aptitud de las soluciones se basa en el riesgo potencial de lesiones de espalda obtenida para los 4 tipos de trabajadores definidos.

Cada solución posee tres niveles de aptitud. A continuación se describen los tres niveles de aptitud utilizados en el algoritmo.

- *Aptitud estandarizada (Standardized fitness)*:

En este tipo de evaluación se obtiene un índice, aplicando el método *Job Severity Index (JSI)*, para cada uno de los 4 tipos de empleados considerados en la agenda de rotación. Debido a la variabilidad de la tarea, el valor del índice JSI fluctuará en la evaluación. Dicha problemática se resuelve mediante un procedimiento de estandarización de la aptitud.

El primer paso de estandarización de la aptitud consiste en calcular la aptitud estandarizada para cada tipo de empleado cogiendo una muestra de 10 medidas JSI. Cada medida JSI es el resultado de la variación aleatoria de las características de la tarea de levantamiento.

Posteriormente se calcula la distancia euclídea entre cada uno de los índices seleccionados para la muestra y una constante de 1,5 para cada tipo de trabajador (1,5 corresponde con el valor de corte establecido por el método JSI para minimizar la probabilidad de lesiones de espalda). Finalmente la distancia euclídea es escalada entre 0 y 1.0, de manera que el valor 1.0 indica un valor muy cercano a 1.5.

A continuación se muestra la ecuación utilizada para la estandarización de la aptitud de cada trabajador.

$$JSI - Diff_i = \frac{1}{1 + \sum_{k=1}^{10} (1.5 - JSI_k)^2}$$

donde:

JSI_k es el valor JSI para la muestra K del trabajador i.

$JSI-Diff_i$ es la aptitud estandarizada para cada trabajador i.

El segundo paso para la estandarización consiste en calcular la aptitud o *fitness* entre los cuatro tipos de empleados con el objetivo de obtener una medida única para la aptitud de la agenda de rotación. Para ello se obtiene la distancia euclídea entre el valor estandarizado de la aptitud de los cuatro tipos de trabajadores y una constante de valor 1. Posteriormente la medida obtenida se escala entre 0 y 1, donde 0 indica que la agenda de rotación contiene asignaciones de empleados con valores JSI altos, mientras que un 1 indica que la rotación contiene medidas del índice JSI cercanas al 1,5 para todos los trabajadores implicados. A continuación se muestra la ecuación de escalado descrita.

$$Aptitud\ estandarizada = \frac{1}{1 + \sum_{i=1}^4 (1.0 - JSI - Diff_i)^2}$$

- *Aptitud de las especies (species fitness):*

Este segundo tipo de evaluación consiste en la división de los valores estandarizados obtenidos para cada solución individual entre el número total de soluciones etiquetadas con la misma marca o *etiqueta genética*.

Un incremento en el número de soluciones con la misma *etiqueta genética* supondrá un decremento lineal de la aptitud individual de cada una de las soluciones etiquetadas con dicha marca. Este procedimiento permite al algoritmo la búsqueda en paralelo de múltiples soluciones [Spears, 94].

- *Aptitud relativa (relative fitness):*

Es el resultado de la división de la *aptitud de las especies* para una solución entre la suma total de las *aptitudes de las especies* de las 195 soluciones.

La selección se realiza mediante un procedimiento estocástico de selección basado en la aptitud de los individuos con sustitución (selección por ruleta, ver punto 6.8.1.1) [Goldberg, 89]. Para ello se emplea la *aptitud relativa* de cada solución. Mediante este procedimiento de selección, las agendas de rotación con mayor aptitud tienen mayor probabilidad de ser seleccionadas y sobrevivir en la siguiente generación.

Etapa 4: reproducción

- *Cruce*

En esta fase del algoritmo genético se seleccionan aleatoriamente dos individuos, agendas de rotación, para aplicar un operador de **cruce**. El procedimiento de cruce consiste en combinar y/o reemplazar la asignación de tareas de las dos soluciones seleccionadas aleatoriamente para obtener dos soluciones descendientes o hijas. La siguiente figura ilustra el procedimiento de cruce.

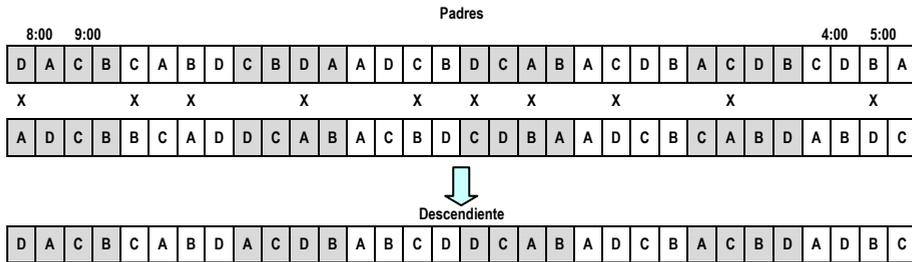


Figura 6.22: Reproducción en la que dos soluciones generan una solución descendiente (X= posición de cruce seleccionada aleatoriamente entre los dos padres) (fuente [Carnahan et al., 00]).

El operador de cruce seleccionado produce descendientes con secuencias (asignación de tareas) con características de los dos padres. Este mecanismo se utiliza para generar dos agendas de rotación que reemplacen a los padres en la población en la siguiente generación.

- **Mutación**

En el procedimiento de mutación definido en el algoritmo, los individuos de la población que experimentarán dicha mutación son seleccionados aleatoriamente. El operador de mutación consiste en la selección aleatoria de dos asignaciones de tareas al trabajador en un determinado periodo de tiempo que intercambian su posición. Al igual que en el cruce, en la mutación, los individuos mutados reemplazan a los individuos originales.

En una ejecución del algoritmo genético, las etapas 3 y 4 se ejecutan de forma cíclica. Cada ciclo representa a una generación. Así pues, 10 ejecuciones del algoritmo genético permiten obtener 300 generaciones por ejecución. Dentro de cada generación se obtienen 3 agendas de rotación. Cada una de ellas representa la puntuación de la aptitud estándar más alta de cada especie.

6.12.1.1.1 Comparación del algoritmo genético y los modelos propuestos de Programación Entera.

La robustez de las soluciones propuestas por el algoritmo genético desarrollado en [Carnahan et al., 00] se argumenta mediante su comparación con las soluciones óptimas encontrada mediante Programación Entera, reduciendo el numero de variables de decisión a un total de 128 (4 grupos de capacidades x 4 tareas de levantamiento x 8 periodos de tiempo).

El objetivo de los modelos de Programación Entera planteados, es encontrar los valores de las 128 variables de decisión que minimizan el valor máximo JSI para los 4 grupos de capacidades definidos o tipos de empleados (ver Tabla 6.2).

La formulación general de programación entera desarrollado en [Carnahan et al., 00] para el problema de la rotación de puestos de trabajo se detalla a continuación:

Minimizar: JSI

Sujeto a:

(Conjunto de restricciones 1) $\sum_{i=1}^4 X_{ijt} = 1 \quad \forall j = 1,2,3,4 \quad \forall t = 1,2,\dots,8$

(Conjunto de restricciones 2) $\sum_{j=1}^4 X_{ijt} = 1 \quad \forall i = 1,2,3,4 \quad \forall t = 1,2,\dots,8$

(Conjunto de restricciones 3) $\sum_{j=1}^4 \sum_{t=1}^8 c_{ijt} X_{ijt} \leq \text{JSI} \quad \forall i = 1,2,3,4$

$X_{ijt} \in (0,1) \quad C_{ijt} \in \mathfrak{R}$

donde:

$$X_{ijt} = \begin{cases} 1 & \text{si el trabajador } i \text{ realiza la tarea } j \text{ durante del periodo } j \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

C_{ijt} = coste en términos JSI de que el trabajador i realice la tarea j en el periodo t .

Figura 6.23: Modelo general de programación entera (fuente [Carnahan et al., 00])

Una limitación del modelo de Programación Entera subrayada por Carnahan es su diseño para optimizar problemas de tipo determinista, donde la información es conocida con certeza. Sin embargo, el problema de la generación de agendas de rotación, tal y como se plantea en [Carnahan et al., 00], no posee dicha característica de certeza, ya que los pesos de los objetos, las distancias de la caga y el ratio (levantamientos/minuto) varían aleatoriamente, tal y como se indicó en la propuesta del algoritmo genético (ver 6.12.1.1). Con el objetivo de solventar este problema se propone la adopción de valores esperados para cada una de características cambiantes de las tareas. Esto permite el desarrollo de los coeficientes necesarios para la Programación Entera. En base a las consideraciones expuestas, en el estudio se aplican 5 variaciones de Programación Entera que son resueltas utilizando el software CPLEX (ILOG INC., Cambridge, MA) bajo el sistema operativo UNIX. Cada una de las variaciones de Programación Entera aplicadas obtiene una solución única al problema de la rotación de puestos planteado. La Tabla 6.3 muestra la comparación entre las soluciones obtenidas mediante Programación Entera y las obtenidas con el algoritmo genético propuesto. Los valores mínimos JSI se obtienen por los métodos de Programación Entera (valores en negrita en la Tabla 6.3). Sin embargo, el estudio basa la robustez de las soluciones proporcionadas por el algoritmo genético, en que los valores máximos JSI están próximos a los valores óptimos obtenidos en los cuatro escenarios considerados.

Método de búsqueda	Escenarios de trabajo			
	Percentil 50	Percentil 75	Percentil 90	Percentil 100
VAR50	1.54	1.91	2.17	2.36
VAR75	1.62	1.82	2.06	2.24
VAR90	1.70	1.88	2.00	2.16
VAR100	1.77	1.92	2.02	2.12
VARWT-AVG	1.59	1.85	2.02	2.15
GA	1.58	1.85	2.05	2.21

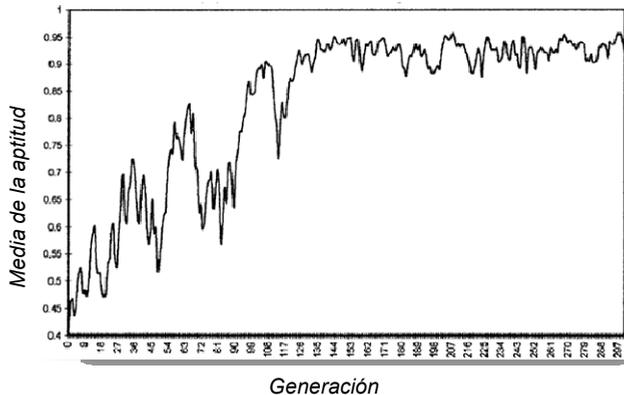
Tabla 6.3: Valores máximos del índice JSI obtenidos por los métodos de Programación entera y con el algoritmo genético.

En el método de búsqueda referido como VAR50 en la Tabla 6.3, el valor del coste JSI (variable c_{ijt}) se obtiene variando las características del levantamiento (peso, distancia horizontal y ratio (levantamientos/minuto)) con valores aptos para el percentil 50 de los trabajadores. De igual manera se obtienen los valores de c_{ijt} para los métodos VAR75, VAR90 y VAR100, variando las características del levantamiento para los percentiles 75, 90 y 100 respectivamente. Por último, el método VARWT-AVG trata de obtener la agenda de rotación que minimice el máximo JSI bajo todas características de las tareas definidas en los demás métodos.

6.12.1.1.2 Rendimiento del algoritmo genético

El algoritmo genético es capaz de generar agendas de rotación con altas aptitudes bajo condiciones de variación aleatoria de determinadas características de la tarea de levantamiento. Esta circunstancia pone de manifiesto la capacidad del algoritmo para diseñar soluciones sin necesidad de tratarse de trabajos de características estáticas, apoyando así uno de los argumentos utilizados para justificar la utilización de este tipo de técnica de optimización frente a la Programación Entera.

La Figura 6.24 ilustra la capacidad del algoritmo genético para encontrar mejores soluciones, con mejores aptitudes medias, a medida que genera sub-poblaciones, quedando patente la capacidad de este tipo de metaheurística para encontrar soluciones cada vez mejores.



La Figura 6.24: Mejora de la aptitud de las sub-poblaciones a los largo de las generaciones (fuente [Carnahan et al., 00])

La siguiente Tabla 6.4 muestra un ejemplo de agenda de rotación con alto grado de aptitud obtenida por el algoritmo genético propuesto por Carnahan.

Periodo	Percentil 50 hombres	Percentil 90 mujeres	Percentil 25 hombres	Percentil 50 mujeres
8:00 - 9:00	Tarea C	Tarea A	Tarea D	Tarea B
9:00 - 10:00	Tarea C	Tarea A	Tarea D	Tarea B
10:00 - 11:00	Tarea A	Tarea B	Tarea C	Tarea D
11:00 - 12:00	Tarea D	Tarea B	Tarea C	Tarea A
13:00 - 14:00	Tarea C	Tarea A	Tarea D	Tarea B
14:00 - 15:00	Tarea C	Tarea A	Tarea D	Tarea B
15:00 - 16:00	Tarea C	Tarea A	Tarea D	Tarea B
16:00 - 17:00	Tarea D	Tarea C	Tarea B	Tarea A
Media JSI	1.54	1.53	1.49	1.49
SD JSI	0.05	0.05	0.07	0.05

Tabla 6.4: Ejemplo de agenda de rotación con alto grado de aptitud generaciones (fuente [Carnahan et al., 00]).

En 10 ejecuciones el algoritmo genético es capaz de evaluar 1.194.662 agendas de rotación, lo cual supone el 0,001% del número total de soluciones posibles.

Los tiempos de CPU requeridos para la obtención de las agendas de rotación por Programación Entera, a pesar del tamaño reducido del problema resuelto (128 variables de decisión y 68 restricciones) resultan significativamente mayores que los tiempos requeridos por el algoritmo genético. Además, los tiempos de CPU requeridos por la Programación Entera aumentan considerablemente con el tamaño del problema, frente al incremento aproximadamente lineal que presenta el consumo de CPU del algoritmo genético ante el aumento del número de tareas y trabajadores [Carnahan et al., 00]. A medida que aumenta el tamaño del problema el tiempo requerido para la formulación de modelos de Programación Entera, así como el tiempo de respuesta para la obtención de la solución, resulta excesivo para los ingenieros que deben aplicarlo en situaciones reales (por ejemplo para problemas con 8 grupos de capacidades y 8 tareas de levantamiento el tiempo de proceso es superior a 48 horas).

6.12.1.1.3 Limitaciones y alcance de la propuesta

Aunque los resultados expuestos en [Carnahan et al., 00] sugieren que la aplicación de los algoritmos genéticos al problema de la generación de agendas de rotación puede resultar beneficiosa para procesos de diseño ergonómico, se señalan una serie de limitaciones que se detallan a continuación.

El modelo considera que todos los trabajadores trabajan 8 horas 5 días a la semana. El modelo puede no ser adecuado en situaciones en las que los días de trabajo por semana cambien según los trabajadores, o en las que el número de trabajadores varíe.

Otra limitación del modelo es que se considera únicamente el riesgo por lesiones de espalda, al incluir en la medida de aptitud el índice JSI. Sin embargo, no se incluyen otros factores importantes de riesgo, como por ejemplo, los que afectan a las extremidades superiores, entre los que destacan los movimientos repetitivos.

Otro aspecto a subrayar es que el modelo considera que todos los trabajadores

reciben el mismo sueldo independientemente de la tarea realizada. Si dicha circunstancia no es cierta, el modelo puede generar agendas de rotación con retribuciones inadecuadas según los grupos de trabajadores.

El modelo asume que no existe correlación entre los parámetros de la tarea, lo cual puede derivar en una infravaloración o sobrevaloración del valor JSI asociado a cada rotación.

Finalmente, la implementación del algoritmo puede suponer un coste adicional para los empresarios ya que son necesarios controles periódicos de los empleados implicados en las rotaciones.

La principal ventaja de la utilización del algoritmo genético para la generación de agendas de rotación bajo criterios de seguridad, frente a otros métodos de optimización (ver punto 6.12.1.1.1), es su capacidad para dotar al planificador de una variedad de buenas soluciones para ser explotadas en el rediseño, seguro, de procesos.

Otro valor añadido del algoritmo genético es su carácter adaptativo, lo que permite al modelo adaptarse a posibles cambios de personal (se señala como posibilidad la sustitución de los grupos de capacidades/género por capacidades de levantamiento individuales).

6.12.1.2 Aplicación de los Algoritmos Genéticos al problema del diseño de tareas de levantamiento manual de cargas

Carnahan propone otra aplicación de los algoritmo genético en el ámbito de la ergonomía en [Carnahan et al., 98]. En dicho estudio se utiliza un algoritmo genético para el diseño de tareas de levantamiento manual de cargas considerando las restricciones impuestas por el lugar de trabajo. El algoritmo genético planteado se fundamenta en el método general propuesto por [Davis, 91].

El modelo resultante de la combinación de un algoritmo genético con la Ecuación Revisada de NIOSH [Waters et al., 93] (ver capítulo 4), proporciona una población de soluciones que representan múltiples grupos de parámetros de levantamiento adaptados al conjunto de requerimientos de productividad, impuestos por el sistema productivo, y de seguridad, fijados por los ergonomistas.

La propuesta de recomendaciones flexibles a los trabajadores como resultado de múltiples soluciones de diseño, se plantea como una estrategia acertada de intervención ergonómica [Carnahan et al., 98]. Sin embargo, se señala el problema de no considerar un gran número de soluciones desconocidas potencialmente útiles. Existen otras técnicas, como la Programación Lineal, que es capaz de encontrar múltiples óptimos cuando la función objetivo a optimizar es una suma lineal de variables de decisión. Sin embargo, para el problema planteado en [Carnahan et al., 98], la aplicación de este tipo de técnicas no es posible, puesto que los parámetros de la tarea tienen un efecto multiplicativo, que determina el índice de levantamiento definido por el método NIOSH que ha sido incluido en la función objetivo. Se plantea por tanto, la utilización de los Algoritmos Genéticos como método alternativo para la

obtención de dichas soluciones.

6.12.2 La propuesta de Nantahvanij y Kullpattaranirun

Los autores Nantahvanij y Kullpattaranirun han investigado conjuntamente sobre la aplicación de algoritmos genéticos al problema de la rotación de trabajadores entre puestos de trabajo. En su primera propuesta [Nanthavanij et al., 01], plantean un algoritmo genético para la asignación de los trabajadores a puestos de trabajo con el objetivo de minimizar su exposición diaria al ruido, posteriormente, en [Kullpattaranirun et al., 05], en base al algoritmo genético inicial, desarrollan nuevas heurísticas de cruce y mutación, el algoritmo resultante es presentado como algoritmo genético heurístico (*Heuristic Genetic Algorithm*).

6.12.2.1 Aplicación de un algoritmo genético para la generación de rotaciones que reduzcan la exposición diaria al ruido.

La exposición diaria a niveles altos de ruido en el lugar de trabajo, es considerada causa de pérdida de audición entre la población activa [Nanthavanij et al., 01]. Como consecuencia, las regulaciones sobre seguridad y salud laboral establecen límites de exposición al ruido, considerando tanto el nivel de ruido como la duración de la exposición. Por ejemplo, el organismo OSHA (Occupational Safety and Health Administration, 1993, E.E.U.U.) establece un límite permitido de 90 dBA para periodos de 8 horas.

En la actualidad, una de las técnicas más recomendadas para reducir la exposición al ruido diaria de los trabajadores es la rotación de puesto de trabajo [Nanthavanij et al., 01]. Sin embargo, la búsqueda de rotaciones óptimas que minimicen la exposición al ruido, resulta complicada, sobre todo cuando se implica a un número elevado de trabajadores en la rotación. En [Nanthavanij et al., 99] puede consultarse una propuesta de modelo matemático para determinar la asignación óptima diaria de trabajadores a puestos que minimiza su exposición al ruido, si bien, su aplicación resulta óptima sólo para problemas pequeños. Los algoritmos genéticos se plantean como alternativa para resolver problemas de mayor tamaño.

A continuación se describe esquemáticamente el algoritmo genético clásico propuesto por los autores Nantahvanij y Kullpattaranirun en [Nanthavanij et al., 01].

Paso 1: Inicialización.

Generación aleatoria de n cromosomas que forman la población inicial.

Paso 2: Evaluación.

Evaluación de la aptitud (*fitness*) de los n cromosomas y definición de su probabilidad de selección en base a sus valores de aptitud.

Paso 3: Selección.

Selección de la nueva población utilizando la técnica de la ruleta (ver 6.8.1.1). El tamaño de la población es n .

Paso 4: Cruce

Selección aleatoria de los padres y cruce de los padres para generar el nuevo descendiente. Se utiliza el operador de cruce clásico denominado PMX (*partially matched crossover* ver 6.8.2.1.6).

Paso 4: Mutación

Selección aleatoria de los cromosomas a mutar. Se utiliza el operador *mutación por inserción* [Goldberg, 89] .

Paso 4: Reemplazamiento

Sustitución de las soluciones seleccionadas como padres por sus soluciones descendientes (en el cruce y la mutación).

El procedimiento se repite hasta que se alcanza la condición de parada.

Los operadores de cruce y mutación utilizados por el algoritmo genético pueden generar soluciones “ilegales” si existen restricciones respecto a la asignación de trabajadores a máquinas. Por ejemplo, soluciones donde un trabajador es asignado a un puesto que no puede atender. Con el fin de “legalizar” dichas soluciones se define un procedimiento de *reparación*.

6.12.2.1.1 Representación y aptitud de las soluciones

Cada cromosoma representa un conjunto de asignaciones de trabajadores a puestos para m trabajadores, durante p periodos. La cadena de cromosoma consiste en $m \cdot p$ genes, agrupados en p segmentos. El primer segmento indica las asignaciones en el periodo 1, el segundo segmento indica las asignaciones en el periodo 2, etc. Cada gen representa a un trabajador y el valor asignado al gen indica el puesto al que el trabajador es asignado. En caso de que el número de trabajadores sea mayor que el número de puestos ($m > n$), el trabajador inactivo será asignado a un puesto de trabajo ficticio, con valor 0 como peso de ruido. Con este tipo de representación del cromosoma es posible codificar asignaciones tanto balanceadas ($m = n$) como no balanceadas ($m < n$).

Idealmente, la mejor solución es aquella en que todos los trabajadores reciben el mismo nivel de ruido. Esta solución existe sólo cuando $m = n = p$, de lo contrario al menos un trabajador recibirá un nivel de ruido más alto que el resto. La solución óptima es, por tanto, el conjunto de asignaciones en la cual el máximo nivel de exposición se minimiza. Es posible utilizar la varianza de la información de exposición al ruido para determinar la aptitud del cromosoma (solución). Así la aptitud de un cromosoma o solución $V(C_s)$ puede determinarse como:

$$V(C_s) = \left[\sum_{i=1}^m \frac{(W_i - \bar{W})^2}{m-1} \right]^{-1}$$

donde:

W_i es el nivel medio exposición al ruido para todos los trabajadores m .

C_s es el cromosoma número s de la población.

El valor de la exposición diaria al ruido se mide en términos de valores medios ponderados en el tiempo, en concreto para 8 horas (TWA). A partir del nivel sonoro medio en una estación de trabajo (TWA) y la duración de la tarea (en horas) (D_T), es posible derivar W_i correspondiente al valor medio de exposición sonora que recibe un trabajador i ponderado en el tiempo (8 horas). Para desarrollar la fórmula de cálculo de W_i se asume que la jornada de trabajo se divide en p periodos iguales. Además se considera que el límite del nivel sonoro permitido es de 90 dBA para jornadas de 8 horas. A continuación se muestra la fórmula utilizada para W_i bajo las condiciones señaladas.

$$W_i = 16.61 \left[\log_{10} \left\{ \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^p \frac{1}{p} 2^{\frac{\bar{L}_j - 90}{5}} x_{ijk} \right\} \right] + 90 \quad i = 1, \dots, m$$

donde:

\bar{L}_j es el nivel sonoro (en dBA) medido en la estación j .

m es el número de trabajadores.

n es el número de estaciones de trabajo.

p número de periodo de trabajo por jornada.

W_i valor medio de exposición sonora que recibe un trabajador i ponderado en el tiempo o TWA en 8 h.

x_{ijk} es 1 si el trabajador i es asignado a la estación j durante un periodo de trabajo k .

En el algoritmo genético propuesto los cromosomas con valores más altos de aptitud tendrán más probabilidades de sobrevivir, al haberse definido un criterio de selección proporcional a la aptitud.

6.12.2.1.2 Modificación del procedimiento heurístico de Cruce y Mutación.

La eficiencia del algoritmo genético para converger a la solución óptima depende de la mejora de las soluciones cuando se pasa de una generación a la siguiente. Dicha mejora de las soluciones entre generaciones depende del rendimiento de los operadores de cruce y mutación aplicados en cada generación. En [Kullpattaranirun et al., 05] se proponen nuevos procedimientos heurísticos de cruce y mutación para mejorar el rendimiento del AG convencional expuesto inicialmente en [Nanthavanij et al., 01]. A continuación se detallan las heurísticas planteadas.

Cruce Heurístico (Heuristic Crossover)

El procedimiento heurístico de cruce se desarrolla a partir del operador de cruce clásico PMX (ver 6.8.2.1.6). El nuevo operador consta de dos etapas: cruce y mejora.

En la etapa de cruce, después de intercambiar los segmentos de los cromosomas padres para generar a los descendientes, el segmento intercambiado (que representa el periodo de trabajo), en el que se encuentra la posición de corte, se vacía para ambos descendientes, es decir, se eliminan todas las asignaciones de los trabajadores en dicho periodo. Posteriormente se ordenan los trabajadores en orden descendiente según la suma de los pesos del ruido correspondientes al resto de periodos.

El intento de mejora, en el periodo vaciado, comienza con el objetivo de asignar

a los trabajadores con mayor sumatorio de pesos de ruido a las estaciones con menor peso de ruido de entre aquellas que pueden atender, es decir, sin restricción en la asignación del trabajador al puesto. La etapa de mejora utiliza cambios sistemáticos de trabajadores para disminuir el mayor sumatorio de pesos de ruido. Para problemas con restricciones en las asignaciones de trabajadores a puestos, las reasignaciones deben cumplir dichas restricciones, de manera que ningún trabajador sea asignado a una estación de trabajo que no puede ocupar.

Mutación Heurística (Heuristic Mutation)

El procedimiento heurístico de mutación es similar al definido para el cruce, dicho procedimiento se divide en dos etapas mutación y mejora.

En la fase de mutación, todos los genes (trabajadores) en el segmento (periodo) seleccionado para la mutación son reasignados. En primer lugar se obtiene la suma de los pesos de los ruidos de los periodos restantes para cada trabajador. Posteriormente, se ordenan los trabajadores en orden descendiente en base a dichos valores. En la fase de mejora el trabajador con mayor suma de ruido es asignado al puesto con menor valor de ruido sin restricciones para él. Dicha operación se repite hasta que el cromosoma es nuevamente completado. Al igual que en el cruce, para problemas con restricciones los autores describen una serie de pasos que garantizan que cada trabajador ocupa sólo puestos en los que puede estar. La descripción detallada puede consultarse en [Kullpattaranirun et al., 05].

6.12.2.1.3 Comparación entre el algoritmo genético convencional y el algoritmo genético heurístico

En este punto se realizan dos comparaciones del algoritmo genético convencional [Nanthavanij et al., 01] con el algoritmo genético heurístico [Nanthavanij et al., 01]. En primer lugar se comparan las soluciones obtenidas con el algoritmo genético convencional cuando se aplica a problemas de asignación de puestos sin restricciones. Los indicadores de rendimiento definidos para la comparación son: (1) *el nivel máximo de exposición al ruido*, (2) *la varianza de las exposiciones al ruido*, (3) *el tiempo de computación*, y (4) *el número de generaciones que el AG requiere para alcanzar la solución óptima*.

La segunda comparación se realiza entre las soluciones obtenidas con los algoritmos para problemas con restricciones en la asignación.

6.12.2.1.4 Problemas de asignación sin restricciones

La Tabla 6.1 muestra los 6 tipos de problemas analizados. Los problemas del 1 al 3 corresponden a problemas de asignación balanceados, es decir, con el mismo número de trabajadores que de estaciones de trabajo, mientras que los problemas del 4 al 6 corresponden a problemas de asignación no balanceados.

Nº	Trabajadores (m)	Estaciones (n)	Nivel de ruido en la estación de trabajo Si (dBa)
Problema 1	5	5	80,83,87,90,93
Problema 2	10	10	75,77,80,81,83,85,87,90,93,95
Problema 3	20	20	73,74,75,77,78,79,80,82,83,84,85,87,88,89,90,92,93,94,95,96
Problema 4	5	4	80,87,90,93
Problema 5	10	8	75,77,80,83,85,87,90,95
Problema 6	20	16	73,74,75,78,79,80,83,84,85,87,88,89,90,93,94,95

Tabla 6.5: Problemas de asignación sin restricciones (fuente [Kullpattaranirun et al., 05]).

En la Tabla 6.6 y Tabla 6.7 se muestran dos ejemplos de soluciones generadas con cada algoritmo. Se observa que la varianza de la solución del algoritmo genético heurístico es menor que la del algoritmo genético convencional, así como su máximo nivel de ruido (88.05 dBA).

Trabajador	Periodo								TWA Nivel de exposición (8h.)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Trabajador 1	S5	S2	S2	S5	S2	S1	S4	S3	88.02
Trabajador 2	S4	S1	S5	S1	S3	S5	S3	S1	88.05
Trabajador 3	S3	S3	S1	S4	S4	S3	S5	S2	88.07
Trabajador 4	S1	S4	S4	S3	S5	S2	S1	S4	87.99
Trabajador 5	S2	S5	S3	S2	S1	S4	S2	S5	88.02

Tabla 6.6 Algoritmo genético convencional: Asignaciones diarias para 5 trabajadores, 5 estaciones y 8 periodos (problema 5-5-8) (fuente [Kullpattaranirun et al., 05]).

Trabajador	Periodo								TWA Nivel de exposición (8h.)
	1	2	3	4	5	6	7	8	
Trabajador 1	S5	S2	S2	S3	S4	S5	S2	S1	88.02
Trabajador 2	S3	S3	S5	S1	S5	S1	S1	S4	88.05
Trabajador 3	S2	S1	S4	S2	S2	S3	S5	S5	88.02
Trabajador 4	S4	S4	S3	S4	S3	S2	S4	S2	88.02
Trabajador 5	S1	S5	S1	S5	S1	S4	S3	S3	88.05

Tabla 6.7 Algoritmo genético heurístico: Asignaciones diarias para 5 trabajadores, 5 estaciones y 8 periodos (problema 5-5-8) (fuente [Kullpattaranirun et al., 05]).

Tras realizar 30 ejecuciones de 6 problemas analizados (Tabla 6.5) se observa que el algoritmo genético heurístico obtiene mejores resultados para todos los indicadores de rendimiento definidos. Aunque la mejora no resulta significativa en el caso del máximo nivel de ruido, si lo es para la varianza, el tiempo de computación, y el número de generaciones. Las diferencias en los indicadores de rendimiento aumentan a medida que aumenta el número de periodos considerados, así como el tiempo de computación y el número de generaciones requerido.

Un análisis estadístico de las diferencias entre las medias de los tiempos de computación y la media del número de generaciones del algoritmo genético convencional y el algoritmo genético heurístico, pone de manifiesto diferencias significativas en todas las pruebas, con excepción de las medias de los tiempos de computación de los problemas 5-5-2 (problema de asignación balanceado con 5

trabajadores 5 puestos y 2 periodos) y 5-4-2. (problema de asignación no balanceado con 5 trabajadores 4 puestos y 2 periodos).

Finalmente, en base a los resultados obtenidos los autores Nanthavanij y Kullpattaranirun se concluye que el algoritmo genético heurístico obtiene mejores resultados que el algoritmo genético convencional para problemas de asignación sin restricciones. La Tabla 6.8 muestra un ejemplo de los valores de los indicadores de rendimiento de ambos algoritmos.

Índice de rendimiento	Periodo					
	2		4		8	
	C	H	C	H	C	H
Nivel máximo de exposición al ruido (dBA)	89,1	89,1	88,26	88,26	88,05	88,05
Varianza de los datos de exposición al ruido	1,088	1,088	0,351	0,351	2,66x10 ⁻⁴	2,66x10 ⁻⁴
Tiempo de computación medio (seg.)	0,20	0,23	1,23	0,5	728,66	86,56
Número medio de generaciones	2,2	1	24,53	1	17187,4	1220,53

Tabla 6.8: Indicadores de rendimiento para un problema sin restricciones balanceado para 5 trabajadores y 5 estaciones (C= AG convencional, H= AG heurístico) (fuente [Kullpattaranirun et al., 05]).

6.12.2.1.5 Problemas de asignación con restricciones

La comparación de los resultados de los algoritmos para problemas con restricciones se realiza a partir de dos problemas de asignación. El primer problema considera 10 trabajadores, 10 estaciones y 4 periodos de tiempo (problema de asignación balanceada), mientras que el segundo corresponde a la evaluación de 10 trabajadores, 10 estaciones y 4 periodos (problema de asignación no balanceada). En ambos casos los niveles de ruido en las estaciones 1 a 10 son de 79, 81, 85, 89, 95, 87, 83, 81, 86, y 93 dBA, respectivamente.

A continuación se muestra un ejemplo de asignaciones generadas con cada algoritmo para un problema 10-10-4.

Trabajador	Periodo				TWA 8 horas Nivel de exposición diaria
	1	2	3	4	
Trabajador 1	S7	S5	S7	S7	88,25
Trabajador 2	S10	S1	S4	S1	87,48
Trabajador 3	S3	S3	S3	S5	89,04
Trabajador 4	S5	S2	S2	S3	88,10
Trabajador 5	S1	S10	S1	S10	88,97
Trabajador 6	S4	S6	S8	S4	87,13
Trabajador 7	S2	S9	S10	S2	87,07
Trabajador 8	S9	S4	S9	S9	86,87
Trabajador 9	S6	S7	S6	S6	86,19
Trabajador 10	S8	S8	S5	S8	87,58

Tabla 6.9: Ejemplo de asignación para un problema balanceado con restricciones 10-10-4

generada con el AG convencional (fuente [Kullpattaranirun et al., 05]).

Trabajador	Periodo				TWA 8 horas Nivel de exposición diaria
	1	2	3	4	
Trabajador 1	S7	S7	S5	S1	87,87
Trabajador 2	S1	S4	S10	S8	87,66
Trabajador 3	S3	S5	S3	S3	89,04
Trabajador 4	S5	S2	S7	S2	87,81
Trabajador 5	S10	S1	S1	S10	88,97
Trabajador 6	S4	S6	S4	S7	87,37
Trabajador 7	S2	S10	S2	S9	87,07
Trabajador 8	S9	S9	S9	S4	86,87
Trabajador 9	S6	S3	S6	S6	86,55
Trabajador 10	S8	S8	S8	S5	87,58

Tabla 6.10: Ejemplo de asignación para un problema balanceado con restricciones 10-10-4 generada con el AG heurístico (fuente [Kullpattaranirun et al., 05]).

Para la comparación del rendimiento de los algoritmos en problemas de asignación con restricciones, se definen únicamente dos indicadores, correspondientes (1) al tiempo de computación y (2) al número de generaciones. Para ambos problemas ejemplo (10-10-4 y 10-8-4) se obtiene un valor medio de tiempo de computación y de número de generaciones menor con el algoritmo genético heurístico que con el algoritmo genético convencional.

Finalmente se concluye que el algoritmo genético heurístico también ofrece mejor rendimiento que el algoritmo genético convencional para problemas con restricciones. La siguiente tabla muestra la comparación de los indicadores de rendimiento considerados.

Índice de rendimiento	Periodo			
	Problema 10-10-4 (balanceado)		Problema 10-8-4 (no balanceado)	
	C	H	C	H
Media del tiempo de computación (seg.)	1051,43	104,21	185,1	24,7
Número medio de generaciones para resolver el problema	1187,41	183,86	166,28	6,7

Tabla 6.11: Indicadores de rendimiento para problemas con restricciones (C= AG convencional, H= AG heurístico) (adaptado de [Kullpattaranirun et al., 05]).

6.12.2.1.6 Conclusiones de la propuesta

El algoritmo genético heurístico [Kullpattaranirun et al., 05] propuesto como mejora del algoritmo genético convencional, desarrollado con anterioridad en [Nanthavanij et al., 01], obtiene mejores resultados respecto al tiempo de computación y número de generaciones necesario para resolver problemas de asignación, resultando más eficiente independientemente del tamaño del problema y

de la existencia o no de restricciones.

Finalmente, ambas versiones de algoritmos genéticos resultan herramientas eficaces y eficientes para la obtención de agendas de rotación que reduzcan la exposición diaria al ruido de los trabajadores.

7

Metodología propuesta

7. METODOLOGÍA PROPUESTA

7.1. Introducción

Si un programa de rotaciones no está bien diseñado puede provocar un empeoramiento de las condiciones laborales de los trabajadores implicados [Putz-Anderson, 88]. Existen algunas aproximaciones metodológicas al problema en la bibliografía que tratan de apoyar al planificador en el diseño de un buen plan de rotaciones. Sin embargo, se trata de propuestas para casos específicos o que consideran el problema de forma parcial. Por ejemplo, en [Carnahan et al., 00; Tharmmaphornphilas et al., 07] se realiza la asignación de los trabajadores a los puestos en cada rotación empleando un único criterio que considera el levantamiento de cargas mediante el empleo del método JSI (Job Severity Index). Por su parte [Nanthavanij et al., 01; Tharmmaphornphila et al., 03; Kullpattaranirun et al., 05; Yaoyuenyong et al., 06] plantean metodologías para la obtención de agendas de rotación que reduzcan la exposición diaria al ruido de los trabajadores mediante la rotación, mientras que [Seçkiner et al., 07a; Seçkiner et al., 07b] desarrolla algoritmos para el diseño de agendas de rotación que minimicen la carga de trabajo de cada trabajador. Resulta evidente que la consideración de un único criterio a la hora de generar las agendas de rotación puede resultar en la obtención de soluciones que, aunque minimicen el factor de riesgo considerado, resulten perjudiciales en lo referente al resto de factores de riesgo ergonómico. En los trabajos citados anteriormente todos los autores consideran la elaboración de una metodología con carácter multicriterio en sus líneas futuras de investigación. Sin embargo, dicha metodología no ha sido todavía desarrollada. No existe un procedimiento sistemático que el ergónomo pueda emplear para la implementación de planes de rotación con garantías de éxito, que considere todos los aspectos que pueden influir en su bondad ergonómica.

En el presente capítulo, se presenta una metodología que permite al planificador generar y evaluar agendas de rotación que consideren múltiples factores que pueden influir en una correcta asignación de los trabajadores a los puestos, así como las restricciones que aseguran la viabilidad práctica de los resultados obtenidos. De esta forma se persigue maximizar los beneficios derivados de la aplicación de ésta técnica, tales como: prevenir las lesiones músculo-esqueléticas [Paul, 99; Triggs et al., 00; Rissen et al., 02; Frazer et al., 03; Vézina, 04; Frazer, 04; Wells, 04a; Kuijer et al., 05], mejorar las condiciones psicosociales de los trabajadores [Christmansson et al., 99; Triggs et al., 00; Rissen et al., 02; Oullet et al., 03; St-Vincent et al., 03; Vézina, 04; Eriksson et al., 06; Aptel et al., 08], facilitar la formación de los trabajadores [Eriksson et al., 06], facilitar la incorporación de trabajadores en proceso de rehabilitación [Richard et al., 03; Vézina, 04] y aumentar la productividad y los beneficios económicos derivados de la implantación de un plan de rotaciones [Miller et al., 74; Van Velzer et al., 92; Cosgel et al., 99; Kogi et al., 03; Nembhard et al., 07].

Los objetivos fundamentales perseguidos en la elaboración de la metodología propuesta han sido:

1. *Dotar al planificador de una herramienta de obtención sistemática de agendas de rotación.*

La metodología plantea un método secuencial de obtención de la agenda de rotación estructurado en las siguientes fases:

Fase 1: detección de la necesidad.

Fase 2: obtención del apoyo de la dirección y de los trabajadores.

Fase 3: selección de puestos a rotar.

Fase 4: selección de trabajadores a rotar.

Fase 5: elección de los criterios para la generación de la agenda de rotación.

Fase 6: definición y valoración de indicadores o ítems.

Fase 7: definición y valoración de capacidades requeridas en los puestos y limitadas en los trabajadores.

Fase 8: recopilación de asignaciones vetadas y preferencias de los trabajadores.

Fase 9: determinación del número y duración de las rotaciones y pausas.

Fase 10: cálculo de agendas de rotación mediante la aplicación de un AG.

Fase 11: implantación y seguimiento de la agenda de rotación.

2. *Permitir al planificador explorar de forma rápida y eficaz un conjunto de agendas de rotación que tratan de optimizar múltiples criterios al tiempo que cumplen con ciertas restricciones.*

Tal y como se indicó con anterioridad (Capítulo 5), el problema de la de la generación de agendas de rotación pertenece a la categoría de problema de optimización combinatoria [Papadimitriou et al., 82], en concreto al grupo de los denominados *Timetabling and Scheduling Problems* o Problemas de Horarios y Secuenciación. El problema de la generación de agendas de rotación es complejo debido a que el espacio de soluciones es grande. Incluso para problemas de tamaño pequeño, no es posible enumerar todas las posibles soluciones en un tiempo aceptable, por tanto, se hace necesario desarrollar metodologías para la generación de agendas de rotación que incluyan procedimientos heurísticos o metaheurísticos [Tharmmaphornphilas et al., 07]. Diversos autores han propuesto metodologías que utilizan diferentes técnicas heurísticas y metaheurísticas para la generación de agendas de rotación [Carnahan et al., 00; Nanthavanij et al., 01; Kullpattaranirun et al., 05;

Yaoyuenyong et al., 06; Tharmmaphornphilas et al., 07; Seçkiner et al., 07a; Seçkiner et al., 07b] (ver capítulos 5 y 6). Sin embargo, dichos estudios centran el diseño de las agendas de rotación en un determinado criterio de optimización, como la minimización del riesgo por levantamiento de cargas [Carnahan et al., 00; Tharmmaphornphilas et al., 07], la disminución de la exposición al ruido de los trabajadores [Nanthavanij et al., 01; Kullpattaranirun et al., 05; Yaoyuenyong et al., 06] o el balanceo de la carga de la trabajo entre los trabajadores [Seçkiner et al., 07a; Seçkiner et al., 07b]. Una de las características a destacar de la metodología que se propone, es que permite al planificador de la agenda de rotación determinar qué factor o factores de riesgo desea considerar durante la búsqueda de soluciones. Se trata, por tanto, de una herramienta multicriterio y flexible, no sujeta a la consideración de un único factor de riesgo, tal y como ocurre con las propuestas anteriormente citadas.

La efectividad de los algoritmos genéticos es ampliamente reconocida para la resolución de problemas de optimización combinatoria [Diego-Mas, 06], efectividad que, sin embargo, ha sido escasamente explotada en el ámbito de la generación de agendas de rotación [Carnahan et al., 00; Nanthavanij et al., 01; Kullpattaranirun et al., 05]. La propuesta de [Carnahan et al., 00] se centra en la aplicación de un AG para la obtención de agendas de rotación que reduzcan las lesiones potenciales de espalda por levantamientos de cargas. Por su parte [Nanthavanij et al., 01; Kullpattaranirun et al., 05] estudian la aplicación de los algoritmos genéticos para la obtención de agendas de rotación que reduzcan la exposición al ruido diario de los trabajadores. La metodología que se propone desarrolla un AG que permite al planificador obtener agendas de rotación que, simultáneamente, tratan de optimizar múltiples criterios, buscan la máxima diversificación de las tareas a realizar durante la jornada, tienen en cuenta las discapacidades permanentes o temporales de los trabajadores, consideran las preferencias de éstos y cumplen con las restricciones de asignación impuestas por el planificador.

3. *Ofrecer al planificador una herramienta para la generación de agendas de rotación encaminada a prevenir los trastornos músculo-esqueléticos (TME).*

Tal y como se deriva de la revisión bibliográfica realizada, existen múltiples factores de riesgo relacionados con los TME (ver Capítulo 3). Según afirma [Li et al., 99], idealmente, en la evaluación de los riesgos asociados con los TME, todos los posibles factores de riesgo deberían ser considerados. El enfoque multicriterio aportado por la metodología pretende dar respuesta a la necesidad de generar agendas de rotación que consideren, simultáneamente, múltiples factores (levantamiento de cargas, repetitividad, factores psicosociales, etc.).

Es importante remarcar que, a pesar de la capacidad de optimización multicriterio de la metodología que se propone, considerar múltiples factores de riesgo al mismo tiempo resulta problemático. Esto es debido a que se conoce poco sobre la importancia relativa de cada factor y sobre sus interacciones [Winkel et al., 92]. Además, generalmente, no existe homogeneidad en cuanto a las escalas de medida utilizadas para cuantificar los diferentes factores de

riesgo.

4. *Permitir al planificador considerar las preferencias de los trabajadores para el diseño de las agendas de rotación.*

Algunos investigadores sugieren la importancia de la participación de los trabajadores en el diseño de las rotaciones [Ellis, 99; Oullet et al., 03; Vézina, 04]. Por ello, se ha incluido en la metodología la posibilidad de que los propios trabajadores manifiesten sus reticencias a ocupar determinados puestos. De esta forma se logra que participen en el diseño de la agenda de rotación. Dicha participación de los trabajadores, junto con los efectos positivos derivados de la variación de la tarea desarrollada, como el aumento de la satisfacción, o la disminución de la monotonía y el aburrimiento [Huang, 99; Triggs et al., 00; Rissen et al., 02], contribuyen a mejorar las condiciones psicosociales del entorno de trabajo. Esto, por otra parte, también parece influir sobre la salud músculo-esquelética [Winkel et al., 92; Bongers et al., 93; Leino et al., 95; Bernard, 97; Carayon et al., 99; Bongers, 01; Devereux et al., 02; Smith et al., 04; Devereux et al., 04; Flaspöler et al., 05; European Agency for Safety and Health at Work, 05; Smith et al., 06b; Menzel, 07].

El AG desarrollado para la obtención de agendas de rotación penaliza las asignaciones de trabajadores a puestos que no desean ocupar. Las soluciones que presentan dichas asignaciones indeseadas son consideradas menos aptas que las que no las incluyen.

5. *Facilitar la obtención de agendas de rotación que permitan la incorporación de trabajadores con discapacidades temporales o permanentes.*

La metodología que se propone permite considerar en el proceso de obtención de la agenda de rotación las posibles limitaciones de los trabajadores para exponerse a determinados factores de riesgo. El algoritmo desarrollado para la búsqueda de soluciones tendrá en cuenta dichas limitaciones a la hora de determinar las asignaciones más adecuadas de los trabajadores a los puestos, es decir, seleccionará aquellas que menos expongan a los trabajadores a los riesgos para los cuales son más sensibles. De esta forma es posible la incorporación al plan de rotaciones de trabajadores en proceso de rehabilitación, o con historiales médicos de lesiones que les hacen especialmente vulnerables ante determinados factores de riesgo.

La metodología también contempla la posibilidad de que existan trabajadores con limitaciones totales que les impidan ocupar ciertos puestos. En tales casos, el planificador puede vetar las asignaciones de éstos trabajadores a los puestos que precisen de la capacidad en la que se encuentran limitados. No obstante, esta posibilidad debe ser aplicada con cuidado, puesto que, como afirma [Aptel et al., 08] tales decisiones pueden provocar rigidez en el sistema y limitar los beneficios esperados para todos los empleados.

6. *Obtener agendas de rotación que cumplan con restricciones derivadas de la organización del trabajo.*

La metodología permite al planificador vetar asignaciones de trabajadores a puestos inadecuadas debido a limitaciones impuestas por la propia organización del trabajo, como por ejemplo: vetar la asignación de trabajadores a puestos de menor categoría laboral que la suya, evitar que trabajadores no formados ocupen puestos para los que no están debidamente preparados, etc.

En el presente capítulo, en primer lugar, se realiza una descripción global de la metodología. Posteriormente se detallan las distintas fases en las que se estructura la metodología, desde la fase inicial de detección de la necesidad de implantar un sistema de rotaciones, hasta la fase final de implantación de la agenda de rotación obtenida y su seguimiento. Por otra parte, se describe detalladamente el AG propuesto en la metodología como herramienta para la generación de la agenda de rotación.

7.2. Descripción general de la metodología propuesta

La metodología que se propone comienza con la detección de la necesidad de implantar un plan de rotaciones. En esta fase se deberán identificar los problemas existentes en la organización y analizar si son o no susceptibles de solución mediante un sistema de rotaciones.

Una vez que la organización ha decidido implantar un plan de rotaciones y como paso previo a toda actuación, será fundamental asegurar el apoyo de la dirección y de los trabajadores frente al cambio organizativo que representa el nuevo sistema de trabajo.

Conseguido el apoyo de la dirección y de los trabajadores, se deben seleccionar los puestos que serán incluidos en el sistema de rotaciones. La metodología, en base a la revisión bibliográfica realizada, sugiere una serie de criterios que tratan de guiar al planificador en ésta tarea.

Al igual que son seleccionados los puestos a rotar, será necesario seleccionar los trabajadores más idóneos para la realización de las rotaciones. Nuevamente, la metodología sugiere una serie de consideraciones que se deberían tenerse presentes a la hora de incluir a trabajadores en el plan de rotaciones, también fruto de la revisión bibliográfica efectuada.

Seleccionados los puestos y los trabajadores a rotar se deberá proceder a la elección de los criterios de diseño para la generación del plan de rotaciones. Los criterios deberán tratar de solucionar los problemas que motivaron la implantación del plan de rotaciones, detectados en la fase inicial de la metodología, tales como: una incidencia elevada de TME, la existencia de puestos de riesgo elevado que no es posible rediseñar, la escasa satisfacción de los trabajadores, etc. A partir de los problemas identificados se deberá determinar cuáles son los factores de riesgo susceptibles de provocar dichos problemas. Los factores de riesgo identificados deberán traducirse en criterios para el diseño de la agenda de rotación. Además, se deberá determinar la forma de medición de dichos factores de riesgo. En función de la forma de medición seleccionada, se determinarán indicadores o ítems,

definiéndose un ítem por cada valor cuantitativo resultante de la medición. Por ejemplo, la presencia del factor de riesgo “levantamiento de cargas” en los puestos podría dar lugar al criterio de diseño “disminución de la exposición al levantamiento de cargas”. Dicho factor de riesgo podría medirse con el método NIOSH. Éste método aplicado a la evaluación ergonómica de un puesto proporciona un único valor cuantitativo (Índice de Levantamiento) que daría lugar a un único ítem o indicador. En otro caso, el criterio de diseño “disminución de la repetitividad de movimientos”, establecido en base a la existencia de una elevada repetitividad en los puestos, y la elección del conteo de movimientos como método para evaluar la repetitividad en los distintos grupos musculares, daría lugar a tantos indicadores o ítems como grupos musculares y tipos de movimientos se analizaran (brazo-flexión, brazo-extensión, cuello-extensión, cuello-flexión, tronco torsión, etc.). La metodología permite la consideración simultánea de diferentes factores de riesgo, es decir, es posible definir múltiples criterios para el diseño de la agenda de rotación. En tal caso, las escalas de los métodos de medición seleccionadas deberán ser homogéneas. Además, es posible establecer prioridades de optimización entre factores de riesgo (por ejemplo, priorizar la disminución de la repetitividad frente a la carga postural), e incluso entre indicadores o ítems (por ejemplo, considerar más perjudicial la extensión de cuello que la flexión de cuello).

Tras la fase de identificación de indicadores o ítems, éstos deberán ser valorados o medidos para todos los puestos seleccionados para la rotación. En principio se considerará que todos los trabajadores están sanos y por tanto se exponen al riesgo representado por los ítems de igual manera, sin embargo, la metodología contempla la posibilidad de que algún trabajador posea limitaciones individuales que provoquen que, ante el mismo nivel de riesgo, su probabilidad de lesión sea mayor. Por ello, se deberá revisar dicha circunstancia bajo supervisión médica, y deberá quedar reflejada mediante la valoración para cada trabajador de los ítems definidos. Dichos valores de los ítems para los trabajadores, junto con su valoración en relación a los puestos, serán posteriormente utilizados para determinar las asignaciones trabajador-puesto más adecuadas: aquellas que minimizan bien la presencia de los factores de riesgo identificados, bien los posibles efectos de éstos.

Definidos los ítems y finalizada su valoración, se deberá determinar el conjunto de capacidades necesarias para ocupar un puesto. No poseer las capacidades necesarias puede limitar la asignación de determinados puestos a ciertos trabajadores. Por ejemplo: la capacidad de ver de lejos puede ser necesaria en algunos puestos, mientras que en otros puede no suponer un problema tener limitada dicha capacidad. Las capacidades deberán valorarse en relación a los puestos y a los trabajadores, según sean requeridas o no en los primeros y se encuentren limitadas o no en los segundos.

Seguidamente se deberán recopilar las preferencias de los trabajadores respecto a la ocupación de los puestos. Por último, se establecerá el conjunto de asignaciones trabajador-puesto vetadas por el planificador. Dichas restricciones pueden obedecer a prescripciones médicas para determinados individuos (embarazadas), a la falta de formación de algunos trabajadores, a restricciones

salariales, etc.

A continuación se deberá establecer el número y duración de las rotaciones y las pausas de recuperación de los trabajadores que será inicialmente empleado para la generación de la agenda de rotación. Posteriormente, la variación de los valores inicialmente establecidos para el número de rotaciones, su duración, el número de pausas y su duración y distribución, permitirá al planificador alcanzar la solución que mejor cumpla con los objetivos ergonómicos y las limitaciones organizativas. En esta fase los resultados de la revisión bibliográfica realizada son utilizados para asesorar al planificador sobre las duraciones iniciales de las rotaciones y las pausas.

Posteriormente, los puestos y trabajadores seleccionados, las valoraciones de los ítems para los puestos y los trabajadores, las capacidades de los trabajadores, las preferencias y los vetos, y el número y duración de las rotaciones y las pausas, serán *inputs* de un AG que permitirá la obtención de las agendas de rotación. La bondad de las agendas de rotación será evaluada por el AG en función de los criterios que finalmente se hayan definido y de las restricciones derivadas de las capacidades, preferencias y vetos. Todo ello determinará las asignaciones de los trabajadores a los puestos más adecuadas en cada rotación. Tras su ejecución, el AG proporcionará como solución la mejor agenda de rotación encontrada en un tiempo limitado de cálculo que cumpla con las restricciones impuestas y optimice los criterios establecidos. En este punto se podrán analizar variaciones de la distribución y duración de las rotaciones y las pausas, que permitan mejorar los resultados obtenidos y sean compatibles con las restricciones de la organización.

Obtenida la agenda de rotación se deberá proceder a su implantación. En ésta fase se abordarán cuestiones como: la necesidad de comunicación con los trabajadores y con la organización, la importancia de la formación previa de los trabajadores, la importancia de la coordinación con el responsable de producción, la necesidad de realizar periodos de prueba, la generación de recursos que faciliten las rotaciones y su seguimiento, etc.

Durante la implantación del sistema de rotaciones, así como después de ésta, será necesario recopilar información periódica sobre el funcionamiento del nuevo sistema de trabajo y sus efectos sobre la salud de los trabajadores. Dicha información permitirá, a corto plazo, corregir errores en el diseño de la agenda de rotación o en su implementación y, a largo plazo, obtener conclusiones sobre los resultados de la mejora ergonómica lograda.

A continuación se muestra el diagrama de flujo correspondiente a las fases de la metodología propuesta.

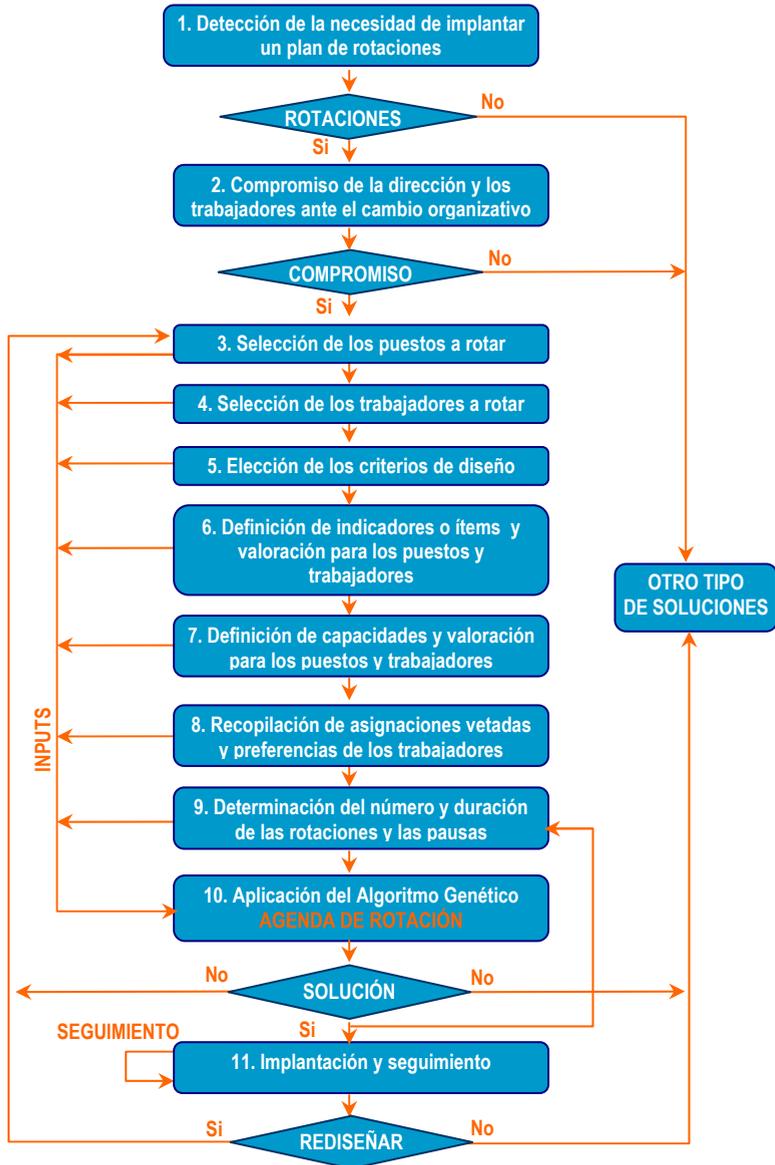


Figura 7.1: Esquema general de la metodología propuesta para la generación de agendas de rotación.

7.3. Fase 1: detección de la necesidad

La aplicación de la metodología comienza con la detección de la necesidad de implantar un plan de rotaciones por parte de la organización como solución a determinados problemas detectados.

En esta fase se deberá sopesar la conveniencia o no de implantar un sistema de rotaciones. Para ello, se deberán analizar las circunstancias concretas de la organización que pueden, a priori, y en base a los estudios actuales, no hacer recomendable la implantación de éste tipo de técnica.

Los principales problemas que pueden impulsar la adopción de un plan de rotaciones son:

1. La existencia de puestos cuyo nivel de riesgo no es posible mejorar mediante intervenciones ergonómicas.

Si se detectase en la organización la existencia de puestos críticos asociados con una elevada tasa de TME, cuya mejora ergonómica no fuera posible debido a limitaciones técnicas, económicas, o derivadas del propio sistema productivo, la adopción de un sistema de rotaciones, permitiría disminuir el tiempo de exposición de los trabajadores asignados permanentemente a dichos puestos críticos. La rotación podría suponer, en tal caso, una estrategia preventiva alternativa al coste en equipamiento y rediseño de los puestos [Kogi et al., 03].

Ante éste tipo de decisiones, es importante remarcar que el Instituto Nacional de Salud y Seguridad Ocupacional de Estado Unidos (*NIOSH, National Institute for Occupational Safety and Health*) (ver 2.6.3) recomienda que la rotación no sea una solución permanente para la prevención de los riesgos músculo-esqueléticos. Así pues, en ningún caso la rotación debería eliminar la necesidad futura de mejora de los puestos con elevado riesgo, incluso en situaciones en las que se compruebe que, efectivamente, la rotación repercute positivamente sobre la disminución de las lesiones músculo-esqueléticas de los trabajadores.

A la hora de adoptar un plan de rotaciones como alternativa al rediseño de determinados puestos con altos niveles de riesgo, es importante tener presente que dicha actuación puede suponer que se retrase el comienzo de la lesión o que se exponga a más trabajadores al riesgo de desarrollar TME [Vézina, 04] si el nivel de riesgo es muy elevado. Aunque los trabajadores sean asignados a dicho tipo de puestos puntualmente y durante rotaciones de corta duración, la exposición puede ser suficiente como para que se produzcan lesiones músculo-esqueléticas [Frazer et al., 03].

Frente a este tipo de problemática, se considera relevante considerar el esquema de [Winkel et al., 92], que indica que la exposición al riesgo del trabajador depende de la amplitud del riesgo, de la frecuencia del riesgo y de su duración. Si la amplitud del riesgo de los puestos fuera excesiva, podría ocurrir que la disminución de la duración de la exposición mediante las rotaciones no fuera suficiente como para prevenir el riesgo de lesión en los trabajadores. En tal caso, no sería recomendable incluir dichos puestos críticos en el plan de rotaciones.

Es fundamental tener presente, frente a la decisión de adoptar un plan de rotaciones con el objetivo de prevenir las lesiones provocadas por puestos críticos, que dicha técnica no hace desaparecer el riesgo intrínseco de los puestos, si no que permite “distribuir” o “equilibrar” el riesgo entre varios trabajadores. Por ello, si todos

los puestos seleccionados para rotar presentasen elevados niveles de riesgo, el resultado obtenido con la rotación podría suponer, nuevamente, una elevada exposición al riesgo de lesión de los trabajadores. En otro caso, podría ocurrir que los puestos a rotar seleccionados expusieran al trabajador a riesgos elevados de distinto tipo, y la disminución de la duración de la exposición a cada factor de riesgo fuera suficiente para reducir el peligro de lesión debida a un riesgo concreto. No obstante, en tal caso, habría que considerar el peligro debido a la exposición combinada a diferentes factores de riesgo.

2. La elevada presencia de TME entre los trabajadores.

Tal y como se deriva de la revisión bibliográfica realizada (ver capítulo 2), la rotación de puestos es una estrategia recomendada por numerosos autores para la prevención de los TME. Sin embargo, será necesario considerar ciertos requisitos que parecen influir sobre los resultados preventivos de dicha técnica.

- Es recomendable la reducción previa del nivel de riesgo presente en los puestos a rotar.

Un análisis ergonómico de los puestos a rotar permitirá determinar los factores de riesgo relacionados con los TME presentes en ellos. En base a la información obtenida, se deberán rediseñar los puestos para disminuir el nivel de riesgo hasta situarlo en niveles aceptables de exposición.

Si existieran puestos críticos para los que no es posible disminuir el riesgo, se deberán tener presentes las consideraciones expuestas en el apartado anterior, relativas a la inclusión en las rotaciones de puestos con elevado nivel de riesgo.

- Es necesaria la existencia de puestos que permitan introducir variación en el nivel o magnitud del riesgo y diversidad en el tipo de riesgo al que se exponen los trabajadores al rotar.

Los puestos incluidos en la rotación deben permitir la variación del nivel de riesgo al que se exponen los trabajadores al rotar. De este modo, las rotaciones en las que el trabajador ocupe un puesto de menor riesgo pueden actuar como periodos de recuperación de la fatiga acumulada al haber ocupado puestos de mayor riesgo. Por otra parte, la diversidad en el tipo de riesgo al que se expone el trabajador al rotar, permitirá disminuir el tiempo de exposición al factor o factores de riesgo presentes en cada puesto, actuando sobre el efecto nocivo derivado de la exposición prolongada a dicho factor o factores de riesgo.

Es necesario que los puestos entre los que se rotará permitan el empleo de diferentes grupos de tendones-músculos permitiendo la recuperación y el descanso [Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 09].

Por tanto, se deberá analizar si los puestos existentes en la organización, susceptibles de selección para la rotación, son diversos respecto a los niveles de riesgo a los que exponen a los trabajadores, y si la alternancia entre ellos permite la variación de los grupos musculares y tendones empleados. Además, se deberá

comprobar si son diversos en los tipos de factores de riesgo presentes, y si la combinación de los factores de riesgo identificados en ellos puede suponer un nuevo elemento de riesgo que disminuya el posible efecto positivo de la rotación derivado de la reducción del tiempo de exposición.

3. Problemas psicosociales

Los trabajadores polivalentes capaces de ocupar diferentes puestos, según [Thomas et al., 94], experimentan una sensación de satisfacción por el trabajo ligada al desarrollo de sus habilidades, a la carencia de monotonía y a una sensación de mayor responsabilidad. Por tanto, las características de los puestos presentes en la organización deberán permitir dotar a la agenda de rotación de variación en la actividad mental desarrollada con el objetivo de mejorar la salud psicosocial de los trabajadores.

Además, se deberá tener presente la necesidad de formar a los trabajadores en las nuevas habilidades, para lo cual la organización deberá comprometerse a proporcionar tiempo y recursos formativos. De otro modo, el nuevo sistema de trabajo puede causar estrés en los trabajadores ante la perspectiva de enfrentarse a tareas y responsabilidades nuevas para las que no se consideran preparados, provocando actitudes de resistencia al cambio e incluso el aumento de las lesiones músculo-esqueléticas [Bernard, 97].

4. Absentismo laboral

El absentismo laboral puede estar relacionado con la presencia de TME, así como con factores psicosociales como el estrés, la insatisfacción, la monotonía, etc. La rotación bajo criterios ergonómicos puede contribuir, tal y como se ha indicado con anterioridad, a mejorar la salud músculo-esquelética de los trabajadores, a disminuir la monotonía y a aumentar la satisfacción ante el trabajo, contribuyendo de esta forma a reducir una elevada tasa de absentismo laboral [Triggs et al., 00].

Además, dado que la rotación contribuye a incrementar la polivalencia de los trabajadores, en periodos especiales (vacacionales, aumentos de la demanda), o ante la existencia de una elevada tasa de absentismo, la existencia de rotaciones permitirá aumentar la flexibilidad de la organización ante variaciones en los recursos humanos disponibles, mediante la obtención de una nueva agenda de rotación optimizada para los trabajadores polivalentes disponibles.

7.4. Fase 2: obtención del apoyo de la dirección y de los trabajadores

Para implantar un sistema de rotaciones es fundamental conseguir el apoyo de la dirección de la organización y de los trabajadores. Introducir dicho mecanismo organizativo con una escasa disposición de los trabajadores podría motivar la aparición de síntomas de estrés en contradicción con los objetivos perseguidos [Thomas et al., 94].

Implantar un plan de rotaciones supone un cambio en la organización del trabajo

y, por tanto, se deberá hacer frente a diferentes obstáculos, bien de carácter económico, como el coste necesario para formar a los empleados en los diferentes puestos y el coste derivado de los periodos de prueba, bien de tipo organizativo, como los acuerdos necesarios con los sindicatos, la resistencia de los empleados al cambio, la existencia de diferentes escalas salariales, la integración de trabajadores con distintas capacidades, la selección de los puestos a rotar (complicada sobre todo si es escasa su diversidad), la resistencia de los trabajadores con antigüedad para aprender nuevos tipos de trabajos, la negativa de los operarios de las máquinas a ceder su puesto a otros trabajadores, problemas prácticos derivados del traslado físico desde un puesto de trabajo a otro, la formación y el entrenamiento de los trabajadores para que ocupen nuevos puestos, la dificultad de determinar los trabajos adecuados a incluir en la rotación, etc. Así pues, frente a dichos problemas potenciales, se deberá conseguir el apoyo explícito de la dirección y los trabajadores antes de iniciar cualquier tipo de actuación.

La dirección y los trabajadores deben mostrarse convencidos de la bondad de la nueva organización y motivados frente a los beneficios esperados. Para ello se deberá informar adecuadamente a la dirección y a los trabajadores de los compromisos que deberán suscribir ante la implantación de un plan de rotaciones. La dirección deberá comprometerse económicamente con el proyecto, facilitando la disponibilidad de los trabajadores para adquirir formación y para participar en periodos de pruebas. Por su parte, los trabajadores deberán comprometerse a formarse y a cumplir con las responsabilidades derivadas de la nueva organización del trabajo (intercambios rápidos, evitar retrasos en la producción que repercutan en el siguiente trabajador, etc.). También será de gran importancia su participación en el diseño del plan de rotaciones.

El soporte estratégico y moral ante el cambio por parte de la dirección será fundamental, sobre todo, en procesos largos en los cuales los resultados del esfuerzo económico y humano no son inmediatos [Oncins de Frutos M. et al., 08], como es el caso de las rotaciones.

7.4.1 Creación del equipo de seguimiento

En esta fase es recomendable la creación de un equipo de seguimiento [Oncins de Frutos M. et al., 08], con el objetivo de que apoye y controle el proceso de cambio. En dicho equipo todas las partes relacionadas con las rotaciones, directa o indirectamente, deberán estar representadas: los trabajadores, la dirección, los sindicatos, los ergónomos y el equipo médico. De ésta forma se facilitará la comunicación y la participación entre las partes, elementos fundamentales para el éxito de la implantación. El equipo de seguimiento deberá ocuparse de: establecer las vías para la toma de decisiones consensuadas, transmitir la información relativa al proyecto entre los diferentes ámbitos de la organización, facilitar la comunicación entre los diferentes niveles, resolver conflictos, etc.

Para la implantación de las rotaciones se recomienda, además de la creación de un equipo de seguimiento, el nombramiento de una persona que lidere el cambio, por ejemplo, el responsable de producción. La persona seleccionada debe tener

capacidad y posibilidad real de comunicación con los trabajadores y debe ser capaz de fomentar su participación y compromiso con el cambio.

7.5. Fase 3: selección de los puestos a rotar

Conseguido el apoyo de los trabajadores y de los responsables de la organización será necesario seleccionar los puestos que se incluirán en el plan de rotaciones.

En la presente metodología se propone el siguiente procedimiento sistemático para la selección de los puestos a rotar:

En primer lugar se deberá llevar a cabo la evaluación ergonómica de todos los puestos que, a priori, se desea incluir en el plan de rotaciones. A partir de la información obtenida sobre los riesgos presentes en los puestos y su magnitud, el planificador deberá determinar qué puestos son apropiados para ser incluidos en el plan de rotaciones.

A continuación se describe el proceso de selección de los puestos en función del nivel de riesgo presente en ellos. Dicho proceso deberá realizarse para cada tipo de riesgo identificado y valorado.

- *Para puestos con nivel de riesgo alto:*

Se deberá determinar si es posible introducir soluciones ergonómicas que reduzcan el nivel de riesgo y lo sitúen en niveles aceptables. Si no fueran posibles dichas soluciones, se deberá evaluar si la disminución del tiempo de exposición es suficiente para reducir el riesgo, y en tal caso, cuál debería ser dicho tiempo máximo de exposición. Además, se deberá determinar si dicho tiempo supone duraciones de las rotaciones factibles. Por tanto, la inclusión de tales puestos quedará supeditada al intervalo de rotación que se adopte (Fase 9). Así pues, en el proceso de establecimiento del intervalo de rotación se deberán tener muy presentes los tiempos máximos de exposición obtenidos. Dichos tiempos también deberán considerarse, junto con el intervalo de rotación adoptado, para la fijación del valor del parámetro t_{\max} definido en el AG propuesto. Dicho parámetro permite limitar el tiempo máximo de permanencia continuada en un puesto.

Respecto a los puestos en los cuales se identifiquen sobreesfuerzos, en base a los resultados obtenidos por [Frazer et al., 03], se recomienda que no sean seleccionados para la rotación. Además, en tales casos, se deberá alertar a la dirección sobre el peligro detectado y la necesidad urgente del rediseño de los mismos.

- *Para puestos con nivel de riesgo medio:*

Estos puestos podrán ser incluidos en el plan de rotaciones, si bien, se recomienda llevar a cabo medidas ergonómicas previas que reduzcan el riesgo.

- *Para puestos con nivel de riesgo bajo:*

Para puestos con nivel de riesgo bajo, siempre que sea posible, se introducirán medidas ergonómicas de mejora, dado que se considera que dicha acción debe estar siempre presente aunque el riesgo detectado sea bajo. Estos puestos podrán ser incluidos en la rotación para facilitar la recuperación de la fatiga acumulada por los trabajadores debida a la ocupación de puestos más exigentes.

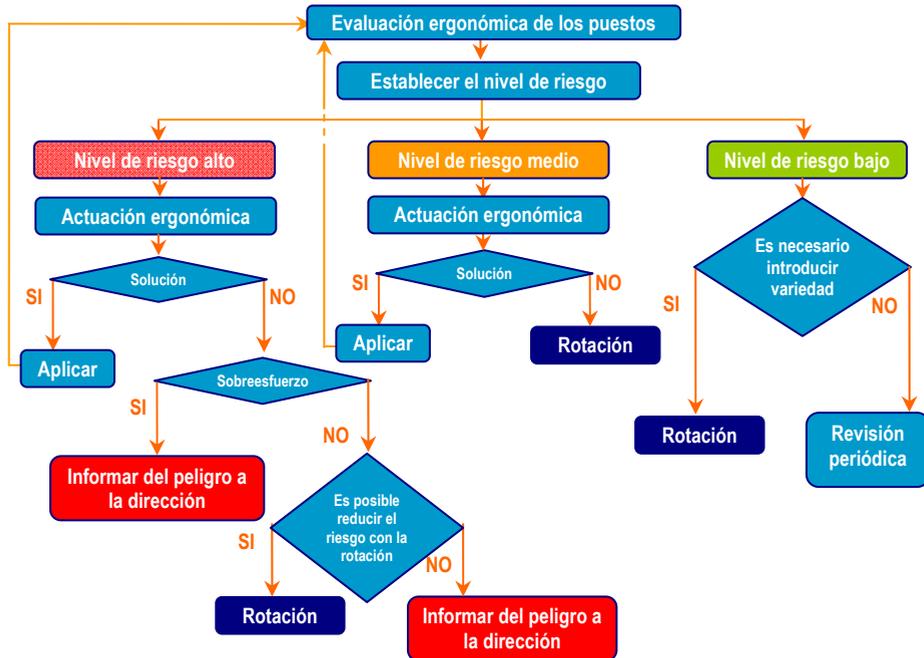


Figura 7.2: Esquema para la selección de los puestos a rotar.

El procedimiento descrito proporciona los puestos susceptibles de ser incluidos en el plan de rotaciones en función del nivel de riesgo presente en ellos, sin embargo, será necesario tener presente otros criterios de selección para la elección final de los puestos, tales como:

- Incluir puestos que permitan la variedad y la diversidad en el tipo de exposición del trabajador.

La variación de tareas permite disminuir la fatiga y el riesgo de aparición de TME siempre y cuando la alternancia de actividades suponga un cambio efectivo de los grupos musculares implicados [Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 09].

La variación en el nivel de riesgo de los puestos permitirá que la rotación entre puestos de mayor exigencia a puestos de menos exigencia, actúe como mecanismo de recuperación de la fatiga acumulada por el trabajador. Por otra

parte, la diversidad en el tipo de exposición de los puestos en rotación, actuará sobre el efecto nocivo de la exposición prolongada a un mismo factor de riesgo. Por último, la diversidad en la actividad mental exigida en los puestos favorecerá el aumento de la satisfacción en el trabajo y la disminución de la monotonía [Triggs et al., 00].

También se deberá tener presente que, si uno de los motivos impulsores de la adopción del plan de rotaciones es la existencia de puestos con elevado nivel de riesgo cuyo rediseño no es posible, se deberán seleccionar otros puestos que conlleven menor exigencia para los trabajadores, con el objetivo de permitir la obtención de agendas que traten de disminuir la exposición al riesgo total entre ellos.

- Incluir puestos cuyo nivel de riesgo no exponga a los trabajadores a picos de esfuerzo, que aunque de corta duración, sea suficiente para lesionarlos.

[Kuijjer et al., 05] subraya la limitación de la rotación como mecanismo de prevención de los TME ante la existencia de picos de carga mecánica en los puestos, debido a que dicha técnica sólo actúa sobre la carga mecánica acumulada. Así pues, cuando los sobreesfuerzos son considerados la causa principal de lesión, por encima de la acumulación de fatiga, la efectividad de la rotación puede ser menor de lo esperado.

Así pues, ante la presencia de puestos críticos, se recomienda comprobar que el nivel de riesgo de los puestos no sea tan elevado como para que la reducción del tiempo de exposición mediante la rotación no sea suficiente como para prevenir la lesión. Para ello, será necesaria una exhaustiva evaluación ergonómica previa a la inclusión de los puestos críticos en un plan de rotaciones. Además, se debería analizar el posible efecto negativo de la exposición combinada a diferentes factores de riesgo derivada de la alternancia entre puestos críticos de diferentes características.

- Incluir puestos cuya separación física no obstaculice el intercambio tras cada rotación.

Es un error común que la alternancia entre puestos esté relacionada únicamente con el orden de las estaciones de trabajo a lo largo de la línea de producción con el objetivo de reducir el tiempo necesario para los intercambios. Dicho criterio de rotación, basado en la proximidad de los puestos, puede resultar contrario a la recomendación de introducir variedad y diversidad en las tareas realizadas por el trabajador para prevenir los TME y mejorar las condiciones psicosociales, sobre todo si a lo largo de la línea se disponen puestos adyacentes en los que se realiza la misma tarea [Falardeau et al., 03b].

Por otro lado, si el intercambio entre puestos supone un largo recorrido para el trabajador, y el ritmo de trabajo está marcado por la cadena de producción o por máquinas, la recuperación de retrasos puede resultarle muy costosa [Vézina, 04], exponiendo a este a un riesgo mayor al inicialmente esperado por características intrínsecas del puesto.

- Incluir puestos de categoría laboral y salarial similares.

La inclusión de puestos con diferente categoría laboral y salarial en el plan de rotaciones puede suponer un obstáculo para el éxito de la implantación del plan de rotaciones, debido a la resistencia de los sindicatos a que los trabajadores ocupen puestos cuya categoría laboral y salarial no les corresponde.

En base a las consideraciones expuestas, se recomienda que los puestos seleccionados para ser incluidos en el plan de rotaciones cumplan con la siguientes características: que sean variados en el tipo de actividad física y psíquica requerida y en el nivel de esfuerzo exigido al trabajador, que no supongan sobreesfuerzos, que estén situados en el mismo área de trabajo, sin obstáculos entre ellos, y que pertenezcan a la misma categoría laboral y salarial.

7.5.1 Número de puestos a rotar

Además de los criterios mencionados para la selección de puestos, será necesario determinar el número de puestos que se incluirán en el plan de rotaciones. En la revisión bibliográfica realizada se observó que dicha cuestión resulta compleja y está fuertemente sujeta a las características específicas de cada implantación. Sin embargo, existen una serie de consideraciones que es importante tener presente a la hora de determinar el número de puestos a seleccionar:

Un número elevado de puestos en un plan de rotaciones supone un número elevado de trabajadores implicados, si se parte de la premisa de que ninguna estación de trabajo puede quedar desatendida. La organización de un grupo numeroso de trabajadores puede complicar la implantación del plan de rotaciones. Los intercambios pueden suponer un exceso de movimiento en la zona de trabajo, provocando incluso choques físicos entre los trabajadores. Ello requerirá un mayor esfuerzo del planificador en el control sistemático de los intercambios, con el objetivo de evitar retrasos en la producción que pueden tener efectos adversos sobre los resultados económicos, la salud de los trabajadores y las relaciones interpersonales. Además, un mayor número de empleados puede aumentar la dificultad de llegar a acuerdos con los sindicatos. Por otra parte, la participación de los trabajadores en el diseño del plan de rotaciones resultará más complicada con grupos numerosos, sobre todo si se trata de atender sus preferencias en el diseño del plan de rotaciones. La integración de trabajadores con distintas capacidades, edades o sexos también resultará más costosa cuanto mayor sea el número de trabajadores implicados en la rotación.

Si son numerosos los puestos entre los que se rota será necesario un período mayor de formación de los trabajadores, ya que deberán adquirir un mayor número de habilidades que, si por el contrario, el plan de rotaciones incluye un número reducido de puestos. Es decir, la inversión en formación será directamente proporcional al número y variedad de puestos a ocupar.

Por otra parte, un número de puestos reducido supondrá menor posibilidad de introducir variedad y diversidad en el tipo y nivel de exposición del trabajador, así

como en la actividad mental desarrollada.

Tal y como se extrae del presente apartado, determinar, a priori, un número de puestos que logre obtener un plan de rotaciones beneficioso resulta complejo. Dicha dificultad radica en que la bondad del plan de rotaciones no depende únicamente del número de puestos en rotación, sino también, de sus características intrínsecas y del efecto sobre los trabajadores de su combinación al rotar. Las consideraciones expuestas sobre el número y características de los puestos a rotar deben interpretarse como una guía para el planificador en la fase de selección inicial de puestos. Dicha selección estará sujeta a correcciones que podrán introducirse, bien en la fase de optimización o aplicación del AG para la obtención de agendas de rotación, o bien, tras la implantación del plan de rotaciones en base al *feedback* obtenido.

7.6. Fase 4: selección de los trabajadores a rotar

Para que la rotación tenga un efecto positivo sobre la salud de los trabajadores se deberán considerar ciertos criterios para la selección de aquellos que participarán en el plan de rotaciones:

- El trabajador debe mostrar buena disposición ante el cambio.

Para que la rotación tenga un efecto positivo en la reducción de los TME se requiere de la buena voluntad y participación de los trabajadores, tanto para su formación en nuevas habilidades, como en la configuración del sistema de rotaciones [Ellis, 99; Vézina, 03]. Una escasa disposición de los trabajadores podría generarles síntomas de estrés [Thomas et al., 94] perjudiciales para la salud mental y física del trabajador. Además, podría provocar resistencia al cambio dificultando, o incluso impidiendo tanto el proceso de implantación de las rotaciones como su correcto funcionamiento posterior.

- El trabajador debe tener capacidad formativa.

La formación de los trabajadores seleccionados para rotar es un elemento clave para la implantación exitosa de un sistema de rotaciones [Vézina, 04]. Su formación debe interpretarse, no sólo como adquisición de nuevos conocimientos, sino como herramienta facilitadora del cambio [Oncins de Frutos M. et al., 08].

Los trabajadores que se seleccionen deberán poseer capacidad para la adquisición de nuevas habilidades, sentido de la responsabilidad ante dicha formación, motivación ante los nuevos conocimientos, y un nivel de conocimientos previos acorde con las nuevas exigencias formativas.

- El trabajador debe estar dispuesto a renunciar, en caso necesario, a las ventajas derivadas de su antigüedad.

La resistencia de los trabajadores con cierta antigüedad a cambiar su estación de trabajo por otras menos ventajosas puede ser un problema frente a la rotación [Vézina, 04].

- El nivel salarial del trabajador debe ser acorde a los puestos entre los que rotará.

[Hazzard et al., 92; Triggs et al., 00; Jorgensen et al., 05; Davis et al., 05] señalan como posible problema derivado de la implantación de un plan de rotaciones la existencia de diferentes escalas salariales entre los empleados seleccionados para rotar. Dicha circunstancia puede dar lugar a que trabajadores con menor salario ocupen los mismos puestos, y en definitiva realicen la misma actividad diaria, que trabajadores con un mayor salario. Dicho problema puede resolverse bien mediante acuerdos sindicales previos, o mediante la selección de trabajadores con categoría laboral acorde a los puestos seleccionados para la rotación.

Si por limitaciones en la organización no pudiera seleccionarse trabajadores de categoría laboral coherente con los puestos a rotar, la metodología que se propone, mediante un sistema de veto de asignaciones, podría, en último caso, limitar las asignaciones de trabajadores a puestos con distinta categoría laboral a la suya. Sin embargo, dicho control introduciría rigidez en el sistema de rotaciones y podría perjudicar la optimización de los criterios ergonómicos deseados.

- El estado de salud de los trabajadores debe ser apto.

En el empleo de la rotación como medio para la prevención de los TME es importante considerar que existen factores de riesgo relacionados con las características individuales del trabajador (factores individuales de riesgo), como: su historial médico [Dempsey et al., 97], la obesidad [Hrubec et al., 75; Werner et al., 94; Kortt et al., 02; Woolf et al., 06; Shiri et al., 08] o el tabaquismo [Goldberg et al., 00; Vieira et al., 08; Wai et al., 08].

Según [Kuijjer et al., 05], el efecto de la selección de trabajadores no sanos puede dificultar la evaluación de la efectividad de la rotación en la práctica. Dicho autor afirma que la efectividad de la rotación debe ser estudiada entre empleados relativamente jóvenes y de reciente incorporación, así como en trabajos cuidadosamente seleccionados.

Si debido a limitaciones de la organización no fuera posible incluir únicamente trabajadores sanos en el plan de rotaciones, sin historial médico de lesiones anterior a las rotaciones, se deberá tener presente para el diseño de la agenda de rotación el estado de salud real de los trabajadores, tal y como sostiene [Aptel et al., 08], aunque dicha consideración complique claramente la construcción de agendas de rotación. En la metodología que se propone las limitaciones de los trabajadores son adecuadamente recopiladas y consideradas para la obtención de la agenda de rotación (ver 7.9).

En conclusión, los trabajadores a incluir en el plan de rotaciones deberían ser preferiblemente voluntarios, cuya categoría laboral coincida con la de los puestos seleccionados para rotar, salvo acuerdo explícitos con los sindicatos, y por tanto, adecuadamente formados para desarrollar todas las tareas requeridas en dichos

puestos. En cuanto al estado de salud de los trabajadores deberá ser el equipo médico de la organización el que determine si un trabajador es considerado apto o no para ocupar determinado puesto. En principio todos los trabajadores seleccionados para rotar deberán ser aptos para ocupar todos los puestos incluidos en el plan de rotaciones, sin embargo, el empleo de vetos en las asignaciones o en el tiempo de ocupación de un mismo puesto, puede emplearse como mecanismo de inclusión de trabajadores limitados en el plan de rotaciones, si bien, dicha inclusión puede suponer una mayor rigidez en las asignaciones para el resto de trabajadores y disminuir los efectos beneficiosos esperados para ellos.

7.7. Fase 5: elección de los criterios de generación de las agenda de rotación

En esta fase se deberán seleccionar los criterios que se desea considerar para la generación de las agendas de rotación.

A partir de los problemas identificados en la fase inicial, que motivaron la adopción del plan de rotaciones, se deben determinar los posibles factores de riesgo causantes de dichos problemas, y en función de dichos factores de riesgo presentes en los puestos, se deberán definir los criterios de diseño encaminados a solucionar los problemas existentes.

Así pues, frente al problema de una elevada tasa de TME, los criterios de diseño que se establezcan deberán estar encaminados a la disminución de los factores de riesgo relacionados con los TME presentes en los puestos.

Por ejemplo, si en los puestos seleccionados para la rotación se detectasen uno o varios de los siguientes factores de riesgo asociados con los TME:

- repetitividad
 - en los miembros superiores (brazos, codo)
 - en el cuello/hombros
 - en las manos/dedos
 - de torsión de tronco/espalda
- levantamientos continuados de carga
- posturas forzadas
- vibraciones
- nivel de ruido por encima del recomendado
- presencia de factores psicosociales negativos como excesiva monotonía, estrés, apremio de tiempo, elevada complejidad, elevada atención, etc.

La presencia de dichos factores de riesgo, daría lugar a criterios para la generación de agendas de rotación como:

- la disminución de la repetitividad
 - en los miembros superiores (brazos, codo)
 - en el cuello/hombros
 - en las manos/dedos
 - de torsión de tronco/espalda
- la disminución de los levantamientos continuados de carga
- la reducción del tiempo de exposición a posturas forzadas
- la disminución de la exposición a las vibraciones
- la disminución de la exposición a niveles de ruido por encima del recomendado
- la disminución de la monotonía, del estrés, del apremio de tiempo, de la exposición a una elevada complejidad, de la exposición a una elevada atención, etc.

El planificador podrá establecer simultáneamente más de un criterio de diseño de la agenda de rotación. En tal caso, se deberá cuantificar la importancia relativa de cada criterio mediante un coeficiente de ponderación (C_j en Ecuación 4).

7.8. Fase 6: definición y valoración de indicadores o ítems

Una vez que el planificador ha establecido los criterios que desea considerar en la generación de la agenda de rotación, en base a los factores de riesgo causantes de los problemas detectados, se deberán obtener valores cuantitativos, relacionados con cada criterio, que permitan determinar si una agenda de rotación cumple con dichos criterios en mayor o menor medida que otra, y por tanto, contribuye adecuadamente a la solución del problema o problemas existentes. En la presente metodología a dichos valores cuantitativos se les denomina **ítems**.

Se define **ítem** como un *indicador cuantitativo que permite valorar la bondad de una asignación de un trabajador a un puesto en relación a un criterio de diseño*.

Para cada criterio se podrán definir tantos ítems como el planificador considere necesario.

Debido a la forma en que los ítems son utilizados en el AG de cálculo de soluciones, se establece que los valores que éstos pueden adoptar sean positivos y mayores o iguales a la unidad en el caso de los puestos, y mayores o iguales a 0 en el caso de los trabajadores. Además, sus valores serán proporcionales al nivel de riesgo de los puestos valorados y proporcionales a las limitaciones de los trabajadores para ser sometidos al factor de riesgo correspondiente.

La bondad de una agenda de rotación dependerá, lógicamente, de la bondad de las asignaciones puesto-trabajador. En relación a los puestos, los ítems deberán medir la presencia de los factores de riesgo relacionados con el objeto del criterio

de diseño. Respecto a los trabajadores, deberán cuantificar la sensibilidad de éstos ante dichos factores de riesgo. En principio, la valoración de los ítems para los trabajadores debería ser igual a 0, ya que en condiciones ideales del entorno de trabajo, todos los trabajadores deberían estar sanos y sin limitaciones para el desarrollo de su actividad laboral. Sin embargo, la metodología permite contemplar la existencia de trabajadores especialmente sensibles a ciertos riesgos, que presenten, por ejemplo, un historial de lesiones músculo-esqueléticas que aumente su vulnerabilidad frente a los TME. En conclusión, un mismo ítem tendrá dos interpretaciones según se valore para los puestos (presencia de los factores de riesgo) o para los trabajadores (sensibilidad a los factores de riesgo).

Los valores iniciales de los ítems de los trabajadores son posteriormente variados en el proceso de obtención de la agenda de rotación mediante el AG desarrollado. Dicha variación supone el incremento de los valores iniciales de los ítems de los trabajadores en función de los puestos a los que han sido asignados en cada rotación. El algoritmo desarrollado considera el historial de puestos recorridos por un trabajador en las rotaciones precedentes para determinar la asignación trabajador-puesto más beneficiosa en la siguiente rotación. Dicho mecanismo de variación de los ítems de los trabajadores tiene como objetivo actuar sobre el efecto nocivo de la exposición prolongada de los trabajadores a un mismo factor de riesgo, y reducir la acumulación de fatiga por el empleo continuado de los mismos grupos musculares.

Por ejemplo, supongamos que el criterio de diseño seleccionado es “la disminución de la repetitividad en las manos/dedos”, y que se ha decidido aplicar el método *Job Strain Index* (JSI) (ver Capítulo 4) para medir la presencia de repetitividad en los puestos. Dado que el método JSI proporciona un único valor (*Strain Index*) como resultado de la evaluación, éste tipo de medición daría lugar a un único ítem para el criterio. Si en lugar del método JSI, se decidiera medir la repetitividad en las manos/dedos en función del número de movimientos por minuto de: flexión, extensión, pronación o supinación y desviación radial/cubital, dicho tipo de medición daría lugar a 4 ítems para el mismo criterio.

Cada ítem definido deberá cuantificarse para los puestos, así en el ejemplo basado en el método JSI, se deberá evaluar cada puesto mediante el método para obtener su correspondiente valoración del ítem. Posteriormente, se deberá asignar una puntuación al ítem para cada trabajador directamente proporcional a su limitación para realizar movimientos repetitivos con la mano/dedos. Valorados los ítems, al combinar la valoración del ítem del puesto con la del trabajador (en la presente metodología dicha combinación se representa mediante la multiplicación de ítems), se obtendrá mayor puntuación para aquellas asignaciones menos convenientes de trabajadores a puestos.

7.8.1 Métodos de evaluación para la medición de los factores de riesgo

Tal y como se ha indicado en el apartado anterior, en función de los problemas detectados se deberán definir unos criterios de diseño cuyo cumplimiento vendrá determinado por valores cuantitativos o ítems. Dichos ítems deberán medir factores

de riesgo causantes del problema detectado que se desea solucionar.

En el presente apartado se pretende orientar al planificador sobre posibles métodos de medición de los diferentes factores de riesgo presentes en los puestos. Los resultados cuantitativos de los métodos permitirán la definición de los ítems necesarios para la aplicación de la metodología.

Es importante remarcar que los métodos propuestos son orientativos y que el planificador, en cualquier caso, podrá optar por el empleo de otros métodos de medición cuando así lo considere oportuno, si bien, se aconseja que los métodos finalmente seleccionados estén debidamente contrastados por la comunidad científica.

Se recomienda, en función de los factores de riesgo que se desee cuantificar, el empleo de los siguientes métodos de evaluación ergonómica (descritos en el capítulo 4):

- El método NIOSH y/o Tablas de Snook y Ciriello para la evaluación de puestos con manipulación manual de cargas:
- El método RULA y/o método OWAS para la evaluación de puestos con carga postural:
- El método JSI (Job Strain Index), el método OCRA, el método Sue Rodgers y el cálculo de la frecuencia de movimientos por minuto [Diego-Mas et al., 09] (ver Tabla 7.1 y Tabla 7.2), para la evaluación de puestos con movimientos repetitivos.

Clasificación de Movimientos		
Brazos/Codos	Brazo	Abducción de brazo
		Extensión de brazo
		Flexión de brazo
	Codo	Flexión de codo
Cuello/Hombros	Cuello	Extensión de cuello
		Flexión de cuello
		Giro de cuello
		Lateralización de cuello
	Hombros	Elevación de hombros
Manos/Dedos	Dedos	Pinzar con los dedos
	Manos	Flexión de manos
		Extensión de manos
		Pronación/Supinación de manos
		Desviación Radial/Cubital de manos
		Flexión de tronco
Tronco/Espalda	Rotación de tronco	
	Extensión de tronco	
	Lateralización de tronco	
	Flexión de tronco	

Tabla 7.1: Clasificación de movimientos según la zona del cuerpo [Diego-Mas et al., 09].

Frecuencia del movimiento por minuto	Calificación del movimiento	Nivel de riesgo
>8	Muy frecuente	3
3-7	Frecuencia media	2
1-2	Poco frecuente	1
0	Nunca	0

Tabla 7.2: Valoración del riesgo del factor repetitividad en función de la frecuencia de movimientos por minuto [Diego-Mas et al., 09].

- El método LEST para la evaluación global de los puestos así como de los factores psicosociales.
- El método ISTAS21 para la evaluación de los factores psicosociales [Moncada et al., 02].

Los criterios aplicados para la recomendación de los métodos de evaluación ergonómica mencionados son: la sencillez, el aval científico de sus resultados y su alto nivel de utilización por los profesionales de la ergonomía [Asensio-Cuesta et al., 08]. Otras técnicas más complejas, o que requieren conocimientos más específicos o instrumentos de medida no siempre al alcance de los ergónomos, son por ejemplo: la medición del consumo de oxígeno, de la frecuencia cardíaca, de la fuerza soportada por el disco intervertebral L5/S1 (unión lumbosacral), del consumo metabólico, el uso de electromiógrafos (EMG), etc.

7.9. Fase 7: definición y valoración de capacidades

En este punto se deberán definir el conjunto de capacidades físicas y psíquicas del trabajador que se desea considerar en el diseño de la agenda de rotación. Cada una de las capacidades que se definan dará lugar a un ítem que deberá ser valorado en relación a los trabajadores y los puestos. Se deberá indicar para cada trabajador si posee limitada dicha capacidad o no, y para cada puesto, si es necesario utilizar dicha capacidad o no.

Mediante la valoración de las capacidades para los puestos y los trabajadores se podrán evitar asignaciones trabajador-puesto en las que el trabajador posea una limitación física o psíquica que le impida realizar la tarea exigida.

A continuación se muestra un ejemplo de definición de capacidades y su valoración. El punto indica, para el trabajador, que está limitado en la capacidad, y para el puesto, que dicha capacidad es necesaria para ocupar el puesto.

Capacidades Globales	Trabajador 1	Puesto 1
Estar de pie.	•	•
Estar sentado.		
Andar.	•	•
Subir (escaleras, pendientes).	•	
Trepar (con brazos y piernas).	•	
Coordinar movimientos.	•	
Ejercer fuerza estando quieto	•	•

(levantar/empujar/tirar).		
Ejercer fuerza desplazándose (transportar, empujar, tirar).	•	•
Conducir vehículos.		
Trabajar en altura.		
Utilizar equipos de protección personal.		
Permanecer en espacios confinado/restringido.		

Tabla 7.3: Ejemplo de valoración de las capacidades globales.

En el ejemplo de la Tabla 7.3 se observa que el trabajador 1 está gravemente limitado, no pudiendo estar de pie, andar, subir, trepar, coordinar movimientos o ejercer fuerzas. Respecto al puesto 1 éste requiere que el trabajador pueda estar de pie, andar y ejercer fuerza. Así pues, el trabajador 1 no deberá ser asignado al puesto 1, ya que no puede estar de pie, ni andar, ni ejercer fuerza y dichas actividades son requeridas en el puesto.

7.10. Fase 8: recopilación de asignaciones vetadas y preferencias de los trabajadores

A partir del cruce de la información recopilada en la fase anterior, relativa a las capacidades limitadas en los trabajadores y a las capacidades requeridas en los puestos, se determinarán las asignaciones que deben ser vetadas. Además de dichas restricciones de asignación puede ocurrir que no sea conveniente la asignación de determinados trabajadores a puestos concretos debido a: la falta de capacitación del trabajador para desempeñar la tarea requerida en el puesto, la prescripción médica, las preferencias personales del trabajador, las restricciones organizativas, etc. Dichas circunstancias deberán registrarse para que sean tenidas en consideración durante el proceso de obtención de la agenda de rotación.

Es importante remarcar que el veto de asignaciones en base a las preferencias de los trabajadores o a las restricciones organizativas puede provocar rigidez en el sistema y disminuir su eficiencia para la solución de problemas músculo-esqueléticos. Además, en ningún caso puede suponer que determinados puesto considerados críticos queden desatendidos porque ningún trabajador desee ocuparlos.

La Tabla 7.4 muestra un ejemplo de asignaciones no deseadas para 3 trabajadores y 3 puestos.

	Puesto 1	Puesto 2	Puesto 3
Trabajador 1	•	•	
Trabajador 2			•
Trabajador 3		•	

Tabla 7.4: Ejemplo de asignaciones vetadas para 3 trabajadores y 3 puestos.

En el ejemplo de la Tabla 7.4 el trabajador 1 no debería ser asignado al puesto 1 ni al puesto 2, el trabajador 2 no debería ocupar el puesto 2 y por último, el

trabajador 3 no debería asignarse al puesto 3.

De ésta forma la metodología propuesta tiene en cuenta no sólo las limitaciones físicas y psíquicas de los trabajadores mediante los ítems de capacidades, sino que además, incluye la posibilidad de restringir asignaciones trabajador-puesto que garanticen la salud de los trabajadores que por prescripción médica no deban realizar ciertas tareas (por ejemplo, no permitir la asignación de trabajadoras embarazadas a puestos que requieran la manipulación manual de cargas). Además, se permite la incorporación progresiva de trabajadores en proceso de rehabilitación al sistema de rotaciones, evitando su asignación a determinados puestos. Si bien, dicha circunstancia puede provocar que el sistema de rotaciones sea más rígido y limite los beneficios esperados para todos los trabajadores, al tiempo que puede crear sentimientos de exclusión para los trabajadores para los que se reservan estaciones de trabajo consideradas menos exigentes por el resto de trabajadores [Aptel et al., 08].

Por otra parte, la incorporación de la posibilidad de que los trabajadores participen en el diseño de la agenda de rotación indicando aquellos puestos que no desean ocupar, puede repercutir positivamente según [Ellis, 99; Oullet et al., 03; Vézina, 04] en el objetivo de disminuir los TME. Por el contrario, tal y como se ha indicado con anterioridad (ver punto 3.10), una escasa participación de los trabajadores podría generarles síntomas de estrés contrarios a los objetivos iniciales de mejora de su salud.

Como se observó en la revisión de la bibliografía, la formación adecuada de los trabajadores es fundamental para el éxito de la implantación de un sistema de rotaciones. Mediante las asignaciones no deseadas es posible, también, realizar dicha formación de forma gradual, de manera que si el trabajador no ha sido formado todavía en la tarea requerida en un puesto, dicha circunstancia no evite la participación del trabajador en las rotaciones dado que podrá ser asignado al resto de estaciones de trabajo. De ésta forma se evitará que el trabajador se exponga al estrés derivado de asignaciones a puestos para los que considera que no está preparado.

7.11. Fase 9: determinación del número y duración de las rotaciones y las pausas

En la mayoría de los planes de rotación, el número y la duración de las rotaciones y pausas suele estar ligado a la duración de la jornada laboral y a las pausas oficiales de descanso. Ello se debe a que generalmente es la opinión de los supervisores, por ejemplo de los ingenieros de producción, y no la de los ergonomistas, la que más se considera para el diseño de la rotación [Jorgensen et al., 05]. Es decir, prevalecen los criterios organizativos y productivos frente a los ergonómicos.

En la presente metodología, a la hora de determinar los intervalos de rotación, se recomienda tener presente las siguientes consideraciones:

Si bien basar los intervalos de rotación en las pausas de descanso existentes evita la pérdida de tiempo debida al intercambio y facilita la organización de las rotaciones, dicho criterio puede repercutir negativamente en la acumulación excesiva de fatiga en los trabajadores. Los intervalos de rotación deberán permitir introducir variedad y diversidad en la exposición biomecánica, especialmente para trabajos caracterizados por el mantenimiento de posturas estáticas o por la repetitividad de las operaciones [Mathiassen, 06].

Un elemento importante que se debería considerar a la hora de determinar los intervalos de rotación más adecuados, es el tiempo de recuperación necesario para que el trabajador logre disminuir la fatiga acumulada en el puesto, y con ello, el riesgo de lesión músculo-esquelética. Dicho tiempo de recuperación dependerá de los factores de riesgo presentes en cada puesto. [Mathiassen, 06] señala que la recuperación apropiada de los músculos es de importancia crucial para evitar la aparición de lesiones músculo-esqueléticas. Según afirma [Rundcrantz et al., 91] las pausas en el trabajo disminuyen la probabilidad de sufrir dolor músculo-esquelético.

A continuación se enumeran una serie de recomendaciones sobre los periodos de recuperación necesarios en función del factor de riesgo presente en los puestos:

- En el caso de que predominen puestos que conlleven repetitividad de movimientos de los miembros superiores:

Ante el predominio de puestos que conlleven trabajos repetitivos, se recomienda realizar rotaciones con elevada frecuencia entre puestos que supongan el empleo de diferentes grupos musculares y articulaciones. Por ejemplo [Vézina, 04], recomienda rotaciones cada 2 horas, 1 hora, e incluso cada 15 minutos si es posible la realización rápida de los intercambios

Por su parte [Colombini et al., 02] indica que los periodos de trabajo repetitivo, sin periodos de recuperación o cambio a tareas que permitan el descanso total de los grupos musculares empleados anteriormente, no debería ser superior a 60 minutos. En base a dicha afirmación [Colombini et al., 02] recomienda una relación óptima entre trabajo y recuperación de 5:1, es decir, 50 minutos de ocupación de puestos con repetitividad y 10 de pausa o cambio a otro puesto sin repetitividad. Así pues, ante situaciones en que la mayoría de los puestos conlleven repetitividad de los miembros superiores, parece recomendable que la duración de las rotaciones sea como máximo de 1 hora.

- Si los puestos predominantes exigen manipulación manual de cargas:

Si los puestos exigen levantamiento de cargas, [Tharmmaphornphilas et al., 04], tras el desarrollo de un método cuantitativo para el establecimiento óptimo de los intervalos de rotación, concluye que los intervalos de rotación de aproximadamente 2 horas parecen adecuados. Además, según dicho autor, es un intervalo de rotación frecuente en la realidad. Sin embargo, es importante tener presente que el riesgo debido a un levantamiento no sólo es función de la duración de la tarea, sino que también depende de otros factores como: el peso de la carga levantada, la posición de levantamiento y el agarre de la carga

[Waters et al., 93]. Por tanto, la reducción del tiempo continuado en un puesto con levantamiento manual de carga mediante la rotación a otros puestos más ligeros, puede no ser suficiente para que el riesgo debido al levantamiento se reduzca y se sitúe en niveles aceptables. Así pues, será necesario un análisis exhaustivo de los puestos que conlleven levantamiento de cargas, para determinar, en cada caso, qué periodo de recuperación, o qué medidas correctoras, son necesarias para obtener un riesgo tolerable para el trabajador. Para dicho análisis puede resultar de gran utilidad el empleo del método de evaluación ergonómica NIOSH (ver capítulo 4).

- Si los puestos predominantes poseen las siguientes características: exigen estar sentado o de pie en el mismo lugar; en ellos se realiza escasa actividad física con todo el cuerpo; se realizan pocos movimientos de cabeza, cuello y hombros; se realiza poca fuerza con la/s mano/s; las manos están fijas en tareas manuales y los ojos están fijos en el resultado de la tarea. Ejemplos de este tipo de puestos son: el trabajo con pantallas de visualización de datos, trabajo en una caja de supermercado, ensamblado de productos pequeños y ligeros, trabajo con microscopios, etc.:

La falta de actividad física puede afectar negativamente a la salud músculo-esquelética [Bernard, 97], por ejemplo, el trabajo con pantallas de visualización de datos expone al trabajador a una carga estática, que aunque de baja intensidad, puede provocarle trastornos músculo-esqueléticos en el área del cuello y los hombros [Visser, 04]. Ante este tipo de problemas músculo-esqueléticos [Commissaris et al., 07], se recomienda las siguientes estrategias preventivas en el lugar de trabajo:

- Para jornadas de 8 horas, se recomienda limitar el tiempo de permanencia continua de pie a 1 hora, y el tiempo de permanencia continua sentado a 2 horas, con un tiempo total en dicha posición no superior a las 4 horas. Dicha recomendación está basada en la norma ISO 11226 [International Organization for Standardization, 00].
- En jornadas de 8 horas el trabajador debería tener un periodo de recuperación de al menos 7,5 minutos por la mañana, y al menos 10 minutos por la tarde, después de cada turno de trabajo de cómo mucho 1 hora y media. En este caso se considera recuperación tanto el descanso total como el cambio a una tarea que permita la relajación del area del cuello-hombros.
- Las micropausas, por ejemplo, de 30 segundos cada 20 minutos, también limitan la acumulación de fatiga en cuello y hombros [McLean et al., 01].

Dado que las recomendaciones sobre la frecuencia y duración de los tiempos de recuperación está estrechamente ligada al tipo de tarea realizada en el puesto, y ante la existencia de rotaciones entre puestos con características diversas, cabría la posibilidad de establecer la duración de la rotación y las pausas en base a los puestos más críticos. De esta forma los trabajadores asignados a puestos críticos

pueden recuperarse adecuadamente de la fatiga acumulada, aunque suponga un tiempo de recuperación mayor que el, a priori, necesario para el resto de trabajadores asignados a puestos menos exigentes.

Es importante remarcar que si como resultado de la fase de selección de los puestos a rotar se decidió incluir puestos con niveles de riesgo alto, bajo el supuesto de la disminución de dichos riesgos mediante la reducción del tiempo de exposición, dicha circunstancia deberá tenerse muy presente a la hora de determinar la duración de las rotaciones. El análisis previamente realizado, en la fase de selección de puestos, sobre el tiempo máximo de exposición en los puestos críticos, deberá emplearse en la presente fase para la determinación de la duración de las rotaciones, a priori, más adecuada. Además, dichos tiempos también deberán considerarse para la fijación del valor del parámetro t_{max} definido en el AG propuesto. De este modo se garantiza el cumplimiento con los tiempos máximos de exposición en el proceso de cálculo de la agenda de rotación. Así, por ejemplo, para un puesto crítico con tiempo máximo de exposición continuada de 1 hora, si se define un intervalo de rotación de 1 hora, t_{max} se fijará en 1. Si por el contrario el tiempo máximo de exposición son 2 horas, t_{max} será igual a 2. Si finalmente el intervalo de rotación adoptado no cumpliera con el tiempo máximo de exposición de determinados puestos con niveles de riesgo alto, dichos puestos deberán ser excluidos del plan de rotaciones.

Respecto al número de rotaciones de la agenda de rotación, éste dependerá, lógicamente, de la duración de los intervalos de rotación definidos y de la duración de la jornada laboral.

El AG propuesto en la metodología, permite al planificador generar agendas de rotación con diferente número y duración de las rotaciones, y con distintas duraciones y momentos de pausa, es decir, de periodos sin ocupación de puesto. De ésta forma el planificador puede comparar los resultados obtenidos y decidir qué solución cumple mejor con el compromiso entre los objetivos ergonómicos perseguidos y las limitaciones organizativas existentes.

7.12. Fase 10: cálculo de agendas de rotación mediante la aplicación de un AG

La información recopilada en las fases anteriores relativa a los puestos, los trabajadores, la duración y número de las rotaciones y pausas, los criterios de diseño, los ítems, las limitaciones de los trabajadores, sus preferencias y las restricciones organizativas (vetos de asignación), será utilizada como *inputs* de un AG cuyo objetivo es obtener una agenda de rotación que optimice, en un tiempo limitado de cálculo, el cumplimiento de los criterios de diseño establecidos, al tiempo que cumple con las restricciones recopiladas relativas a las capacidades, preferencias y vetos.

Es importante remarcar que para la aplicación correcta del AG que a continuación se describe, será necesaria una fase experimental previa destinada a determinar los valores de los parámetros del AG que mejores soluciones o agendas

de rotación proporcionan la adecuación de estos parámetros será función del número de puestos, trabajadores, rotaciones y vetos de cada problema en estudio. A dicha experimentación se la denomina “parametrización” (ver Capítulo 6).

En el presente apartado se describe el AG desarrollado como herramienta para la generación y evaluación de las agendas de rotación en base a los criterios de diseño definidos por el planificador.

7.12.1 Definición del problema

El problema consiste en la asignación de n trabajadores a n puestos en m rotaciones o periodos, al tiempo que se cumplen un conjunto de restricciones de asignación. Las restricciones de asignación están relacionadas con las limitaciones en las capacidades de los trabajadores y con asignaciones no deseadas o vetadas.

En la presente metodología se asume que el número de trabajadores y puestos es el mismo (n), es decir, que se trata siempre de asignaciones balanceadas y no existen trabajadores o puestos inactivos durante las rotaciones.

7.12.2 Descripción del AG

El AG propuesto se inicia, como en el resto de las técnicas de computación evolutiva, generando un conjunto de soluciones al problema de manera aleatoria. Cada solución es evaluada para determinar su ajuste a los requerimientos del problema y para garantizar que se trata de una solución factible.

En el AG se define la probabilidad de cruce (P_c), como la proporción de la siguiente generación que estará constituida por individuos que son el resultado del cruce de dos miembros de la generación anterior [Diego-Mas, 06]. Así pues, si $P_c = 0,6$ el 60% de la nueva generación será generado mediante cruce. Para ello se seleccionan $0,5 \cdot n \cdot P_c$ parejas de individuos de la población. Cada pareja se cruza dando lugar a dos nuevos individuos que pasan directamente a la nueva generación.

Se escogió emplear una estrategia elitista en el AG que será justificada en apartados posteriores. Por ello, una cierta cantidad de individuos ($le1$ o Intensidad del elitismo) se conserva de generación en generación. El resto de la nueva generación lo formarán $n \cdot (1 - P_c) - le1$ individuos (supervivientes), más $n \cdot P_c$ individuos (descendientes) procedentes de la reproducción.

Sobre los individuos que conformarán la nueva generación actúa el operador mutación. La probabilidad de mutación (P_m) se entiende tal y como se define en [Diego-Mas, 06]. P_m corresponde a la proporción de individuos que se verá afectada por la mutación. Así pues, si $P_m = 0,3$, el 30% de la población recién creada se someterá al operador mutación. Relacionado con el operador de mutación se ha definido un nuevo parámetro denominado intensidad de la mutación (im) que determinará el grado de alteración o mutación de los individuos seleccionados. Los individuos que mutarán se seleccionan de manera totalmente aleatoria de entre los obtenidos en los procesos anteriores: los supervivientes, los descendientes y la élite.

Si la generación actual es múltiplo de un parámetro **g**, el AG ejecuta un procedimiento de búsqueda local. Si como resultado de dicha búsqueda local se encuentran individuos mejores (de mayor aptitud) que el mejor individuo encontrado hasta el momento, éste será sustituido por el mejor localizado en la búsqueda local.

La nueva generación así creada será de nuevo evaluada y sometida a los operadores genéticos dando lugar a otra generación. Este procedimiento se repite hasta que se realice un número prefijado de iteraciones (**Gen**). El parámetro **Gen** determina, por tanto, el criterio de finalización del algoritmo.

Esta descripción genérica del AG propuesto se completa detallando en los siguientes apartados: la forma de codificar las soluciones o agendas de rotación, la forma de generar la población inicial de agendas de rotación, la forma de evaluar las soluciones, el método de aplicación de penalizaciones, la forma de selección de los individuos, el proceso de reemplazo de los individuos entre generaciones, los operadores genéticos (cruce y mutación), la estrategia elitista empleada y el procedimiento de búsqueda local.

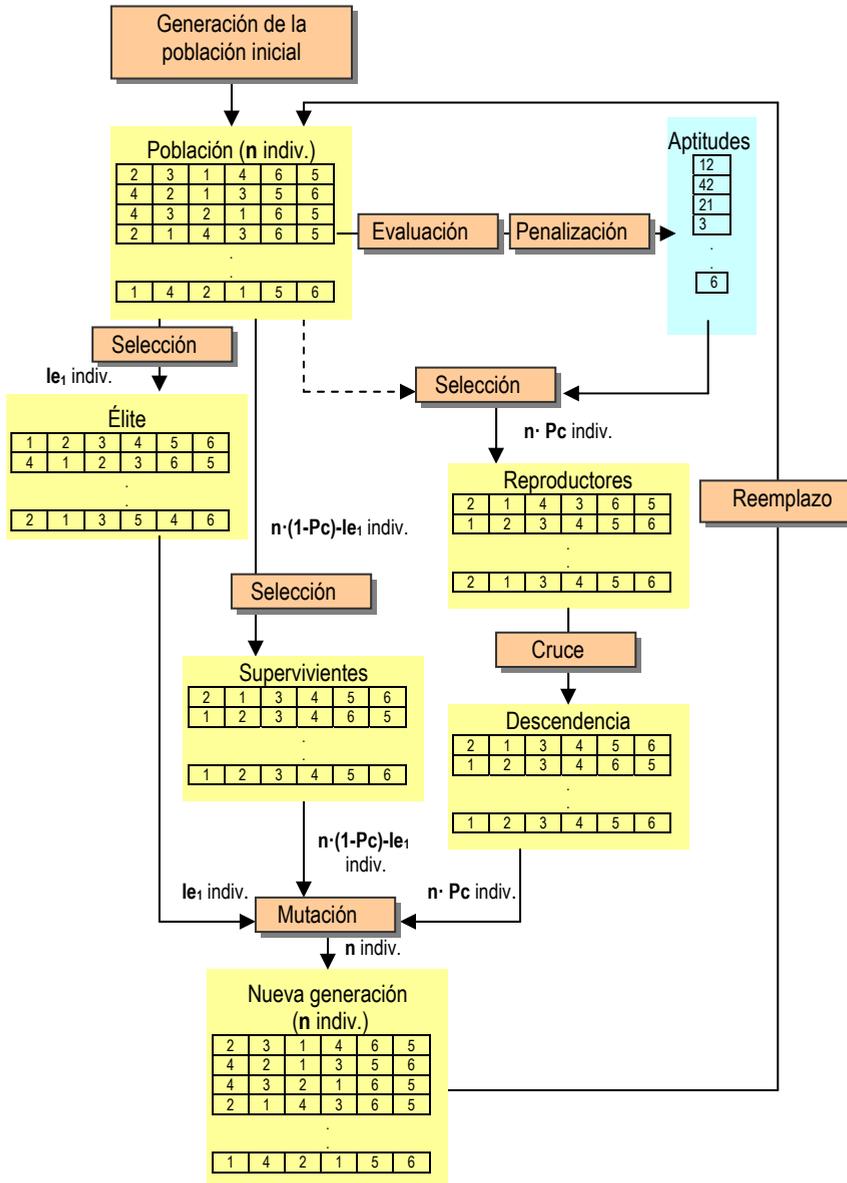


Figura 7.3: Diagrama general de flujo del AG.

7.12.3 Codificación de las agendas de rotación

Cada individuo o solución, representa una agenda de rotación y se codifica mediante una matriz de tamaño $n_{wor} \times n_{rot}$, siendo n_{wor} el número de trabajadores participantes (que coincide con el número de puestos a rotar n), y n_{rot} el número de

rotaciones a considerar. A cada celda de la matriz se le asigna un valor que representa un puesto de trabajo.

En el ejemplo de la Figura 7.4, el trabajador 1 ocuparía el puesto 12 en la primera rotación, el 3 en la segunda, el 7 en la tercera y el 14 en la cuarta.

	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4
Trabajador 1	Puesto 12	Puesto 3	Puesto 7	Puesto 14
Trabajador 2	Puesto 1	Puesto 7	Puesto 13	Puesto 6
...
Trabajador 18	Puesto 5	Puesto 2	Puesto 8	Puesto 6

Figura 7.4: Codificación de una solución para $n_{rot}=4$ y $n_{wor}=18$.

Esta codificación cumple cuatro de las cinco propiedades recomendables para un sistema de simbolización [Pérez, 04]:

- **Compleitud:** cualquier agenda de rotación puede ser representada mediante esta codificación.
- **Uniformidad:** todas las soluciones pueden ser representadas por un número igual de codificaciones, evitando que unas lo estén más o menos que otras.
- **Sencillez:** la codificación y decodificación de las soluciones es un mecanismo relativamente sencillo.
- **Localidad:** existe proporcionalidad entre las variaciones de las codificaciones y las variaciones de los individuos representados; si se producen pequeños cambios en las matrices, se producen pequeños cambios en las soluciones. Asimismo, grandes cambios en las matrices da lugar a importantes cambios en las soluciones.

Hay una propiedad recomendada que no se cumple en el sistema de codificación:

- **Coherencia:** un sistema de codificación con esta propiedad hace corresponder a cualquier matriz que se pueda componer una solución.

En la codificación empleada existen matrices que representan individuos no factibles. En la Figura 7.5 se muestra un ejemplo de matriz que representa una solución no factible. En dicha solución durante la rotación 1 ambos trabajadores estarían asignados al puesto 1, quedando el puesto 2 desatendido, mientras que en la rotación 2 sería el puesto 1 el que quedaría desatendido y el puesto 2 estaría ocupado por dos trabajadores.

	Rotación 1	Rotación 2
Trabajador 1	Puesto 1	Puesto 2
Trabajador 2	Puesto 1	Puesto 2

Figura 7.5: Ejemplo de matriz no factible para $n_{rot}=2$ y $n_{wor}=2$.

El problema de la **incoherencia** no es atípico tal y como señala [Diego-Mas, 06]. La mayor parte de las codificaciones empleadas en la bibliografía son incoherentes. El empleo de códigos no binarios que pretenden representar estructuras complejas como las agendas de rotación provoca que la ordenación de los cromosomas deba cumplir ciertas reglas (como que en la misma columna o rotación no se repitan puestos). Si éstas no se cumplen se da lugar a estructuras incoherentes que no representan individuos factibles. La manera de afrontar dicha problemática en la metodología propuesta consiste en:

- Garantizar que la población inicial generada aleatoriamente no permite que en ninguna solución o agenda de rotación se repitan puestos en una columna o rotación, con lo que se obtienen sólo individuos factibles.
- Definir operadores genéticos de cruce y mutación cerrados, es decir, que generen únicamente soluciones factibles.

7.12.4 Formación de la población inicial de soluciones

El algoritmo comienza generando una población inicial de individuos que representan diferentes soluciones al problema. Cada individuo se codifica tal y como se ha descrito en el punto anterior mediante una matriz de tamaño $n_{\text{wor}} \times n_{\text{rot}}$. A cada celda de esta matriz se le asigna un puesto de trabajo de manera aleatoria, considerando que los puestos no deben repetirse en la misma columna. De ésta forma se garantiza que las soluciones o agendas de rotación representan soluciones factibles.

El número de individuos que conforman la población (n_i) dependerá de las características del problema, habiendo obtenido resultados satisfactorios con una población de 50 individuos para el caso de 18 puestos y cuatro rotaciones. La población se codifica mediante un vector de n_i individuos (Figura 7.6).

		Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	...	Rotación n_{rot}
Solución 1	Trabajador 1				...	
	Trabajador 2				...	
	Trabajador n_{wor}				...	
...						
Solución n_i	Trabajador 1				...	
	Trabajador 2				...	
	Trabajador n_{wor}				...	

Figura 7.6: Codificación de la población de soluciones con n_i individuos.

A continuación se muestra el pseudocódigo (Figura 7.7) para generar una población inicial de n_i individuos, para un problema con n_{wor} trabajadores, n_{rot} rotaciones y n_p puestos, donde $n_{\text{wor}} = n_p$.

```

comienzo
creación de  $n_i$  matrices de de  $n_{wor} \times n_{rot}$ 
inicialización de las matrices a 0
 $n_{rot}$  = número de rotaciones
 $n_{wor}$  = número de trabajadores
 $n_p$  = número de puestos
L = crear lista de puestos de longitud ( $n_p$ )
Rellenar la lista L con los  $n_p$  puestos
Para  $i=1$  hasta  $n_i$ 
{
  Para  $r=1$  hasta  $n_{rot}$ 
  {
     $L_r=L$  //  $L_r$  es la lista de puesto por asignar en la rotación  $r$ 
    Para  $t=1$  hasta  $n_{wor}$ 
    Seleccionar aleatoriamente un puesto  $p$  de la lista  $L_r$ 
    Asignar  $M_i[t,r]=p$  //  $M_i$  es la matriz que representa la solución  $i$ 
    Borrar  $p$  de  $L_r$ 
  }
}
}
fin

```

Figura 7.7: Pseudocódigo para la generación de la población inicial de soluciones factibles.

7.12.5 Evaluación de la adaptación de los individuos de la población al medio

Cada uno de los individuos que componen la población debe ser evaluado para determinar la calidad de la solución que representa. Dado el carácter multicriterio del problema se emplea una función evaluadora resultante de la agregación de cada uno de los criterios mediante un modelo aditivo (suma ponderada). A cada criterio contemplado en la evaluación, se le asigna un coeficiente de ponderación (C_j) que indica la importancia relativa que se le otorga frente al resto de criterios.

La evaluación de una solución se lleva a cabo en dos fases: en la primera se calcula el valor de los ítems de cada trabajador en función de los puestos ocupados en las rotaciones previas, para considerar el efecto acumulativo de las diversas tareas realizadas hasta el momento. En la segunda fase se calcula la bondad de la solución, empleando para ello el valor de los ítems de los trabajadores obtenidos en la fase anterior.

7.12.5.1 Fase 1: actualización del valor de los ítems de los trabajadores

En la primera fase el valor inicial de los ítems de cada trabajador se modifica para obtener un valor diferente para cada rotación, de manera que refleje los efectos de las tareas realizadas en las rotaciones precedentes (los valores de los ítems de los puestos se mantendrán constantes para todas las rotaciones). Así, si un trabajador ocupa en una rotación un puesto con un valor elevado en un determinado ítem, el ítem análogo del trabajador, que indica la conveniencia de ocupar dicho puesto, será modificado para que disminuya la probabilidad de asignarle en una rotación posterior una tarea de similares características. La modificación del ítem del

trabajador será mayor cuanto más duración tenga la tarea considerada, y su efecto irá disminuyendo conforme más tiempo haya transcurrido desde la finalización de la misma, aumentando paulatinamente la probabilidad de ocupar un puesto similar.

Sea una agenda de rotación en que un trabajador x va a ocupar un determinado puesto en la rotación r , y bien conocidos los puestos ocupados por dicho trabajador en las rotaciones anteriores a r . Sea w^x_j el valor de los ítems del trabajador x al comienzo de su jornada (donde j toma valores entre 1 y el número de ítems considerado n_{it}), sea $a^x(k)$ el puesto asignado al trabajador x en la rotación k , y sea $p_j(a^x(k))$ el valor del ítem j del puesto asignado al trabajador x en la rotación k . El proceso consiste en calcular $w^x_j(r)$ (el valor de cada uno de los j ítems del trabajador x en la rotación r) en función del valor de los ítems de los puestos ocupados anteriormente $p_j(a_x(k))$. Este cálculo se lleva a cabo mediante la Ecuación 2.

$$w^x_j(r) = w^x_j + \frac{1}{f_{red}} * \sum_{\substack{k=1 \\ p_j(a^x(k)) > tre}}^{r-1} \frac{p_j(a^x(k)) * t_k}{d_k}$$

Ecuación 2: Cálculo del ítem j de un trabajador x para la rotación r

donde:

$$d_k = \begin{cases} p_{k,r} + \sum_{g=k+1}^{r-1} t_g & ; k < r-1 \\ 1 & ; k = r-1 \end{cases}$$

Ecuación 3: Cálculo del tiempo transcurrido desde el fin de la rotación k y el comienzo de la rotación actual r , incluidas las pausas.

d_k es el tiempo desde el fin de la rotación k y el comienzo de la actual rotación r , incluyendo pausas entre ellas $p_{k,r}$.

$w^x_j(r)$ es el valor del ítem j para el trabajador x en la rotación r .

w^x_j es el valor original del ítem j para el trabajador x .

$a^x(k)$ es el puesto asignado al trabajador x en la rotación k .

$p_j(a^x(k))$ es el valor del ítem j en el puesto asignado al trabajador x en la rotación k .

tre es el valor umbral (threshold) de los ítems de los puestos por debajo del cual se considera que no provocan fatiga.

t_k es la duración de la rotación k .

f_{red} es el factor de reducción o importancia del historial previo de rotaciones.

$p_{k,r}$ duración de las pausas entre la rotación k y la rotación r .

En la Ecuación 2 se incrementa el valor original del ítem del trabajador (w^x_j), en función de los ítems correspondientes de los puestos ocupados en rotaciones precedentes, si estos superan un determinado valor umbral (tre), la duración de cada rotación y el tiempo transcurrido desde la finalización de cada rotación hasta el comienzo de la actual (Ecuación 3). En la Ecuación 2 se calcula el ítem j de un trabajador x para la rotación r . Un mayor valor de un ítem de un trabajador indica

una menor conveniencia de realizar actividades de ese tipo. La fórmula de cálculo implica que el valor de un ítem del trabajador en la rotación actual, se ve afectado en mayor medida por los ítems de las tareas de rotaciones anteriores, cuanto mayor duración hayan tenido éstas y cuanto menos tiempo haya transcurrido desde su finalización. Si el valor del ítem del puesto no supera el valor umbral (**tre**) no afecta al ítem correspondiente del trabajador. El parámetro **tre** debe indicar el valor o umbral (*threshold*) de los ítems de los puestos por debajo del cual se considera que no provoca fatiga al trabajador, y no será causa de desordenes traumáticos acumulativos si es mantenido durante sucesivas rotaciones. En la fórmula empleada (Ecuación 2), t_k es la duración de la rotación k , d_k es el tiempo transcurrido desde la finalización de la rotación k hasta el comienzo de la actual incluyendo el tiempo correspondiente a las pausas realizadas entre ambas rotaciones ($p_{k,r}$), y f_{red} (factor de reducción) es un parámetro que define el grado en que el algoritmo considera que la tarea desarrollada en una rotación determinada, afecta al valor del ítem correspondiente del trabajador para rotaciones posteriores. Este cálculo se realizará para todos los ítems de cada trabajador en cada una de las rotaciones, obteniendo así los valores que serán empleados en la segunda fase de la evaluación.

Como ilustración del proceso de cálculo se plantea el siguiente ejemplo:

Un trabajador x en una planta de ensamblaje de automóviles rota a lo largo de su jornada laboral por 4 puestos. La duración de las rotaciones 1, 2, 3 y el almuerzo es de 1,15 (1 hora y 15 minutos). El almuerzo se realiza después de la rotación 2. La duración de la rotación 4 es de 0,5 (media hora).

Debido a que se trata de un entorno de trabajo caracterizado por una elevada repetitividad de movimientos, se ha decidido adoptar el criterio de diseño consistente en “la disminución de la repetitividad”. En base a dicho criterio se han definido 18 ítems (ver leyenda de la Figura 7.8), cada uno de los cuales está relacionado con un determinado movimiento asociado a una parte del cuerpo. El presente ejemplo ilustra los cálculos para uno de dichos ítems de movimiento, en concreto para el ítem denominado *extensión de brazo*.

Al puesto 1 se le asigna un valor del ítem de *extensión de brazo* de 2 y es ocupado por el trabajador x en la primera rotación. Al resto de puestos ocupados en las siguientes rotaciones por el trabajador se les asigna un valor del ítem de *extensión de brazo* de 1 debido a la escasa repetitividad registrada para dicho miembro. El valor umbral **tre** a partir del cual se considera que la ocupación del puesto provoca la acumulación de fatiga en el trabajador ha sido establecido por el staff médico de la planta en 1,5. Como consecuencia de dicha valoración de **tre**, sólo provocan fatiga acumulada valores del ítem de *extensión de brazo* mayores a 1,5, en el ejemplo sólo el puesto 1. El staff médico también ha establecido un valor del parámetro f_{red} de 3.

En base a la información descrita y aplicando la Ecuación 2 los valores del ítem *extensión de brazo* para el trabajador x en cada rotación serán:

$$w_{extension-brazo}^x(1) = 0$$

$$w^x_{\text{extension_brazo}}(2) = 0 + \frac{1}{3} * \frac{p_j(a^x(1)) * t_1}{d_1} = \frac{1}{3} * \frac{2 * 1,15}{1} = \frac{2,3}{3} = 0,76$$

Donde: $d_1 = 1$; $k = r - 1$; $l = 2 - 1$

$$w^x_{\text{extension_brazo}}(3) = 0 + \frac{1}{3} * \left[\frac{p_j(a^x(1)) * t_1}{d_1} \right] = \frac{1}{3} * \left[\frac{2 * 1,15}{2,3} \right] = 0,33$$

Donde: $d_1 = p_{1,3} + \sum_{g=1+1}^{3-1} t_g = 1,15 + t_2 = 2,3$

$$w^x_{\text{extension_brazo}}(4) = 0 + \frac{1}{3} * \left[\frac{p_j(a^x(1)) * t_1}{d_1} \right] = \frac{1}{3} * \left[\frac{2 * 1,15}{3,45} \right] = 0,22$$

Donde: $d_1 = p_{1,4} + \sum_{g=1+1}^{4-1} t_g = 1,15 + t_2 + t_3 = 1,15 + 1,15 + 1,15 = 3,45$

$$w^x_{\text{extension_brazo}}(5) = 0 + \frac{1}{3} * \left[\frac{p_j(a^x(1)) * t_1}{d_1} \right] = \frac{1}{3} * \left[\frac{2 * 1,15}{4,6} \right] = 0,16$$

Donde: $d_1 = p_{1,5} + \sum_{g=1+1}^{5-1} t_g = t_2 + t_3 + t_4 = 1,15 + 1,15 + 1,15 + 1,15 = 4,6$

La Figura 7.8 muestra gráficamente la evolución de los valores de los ítems del trabajador x. En dicha figura se observa la disminución a lo largo de las rotaciones de la fatiga acumulada durante la rotación 1, consecuencia de la ocupación de un puesto con elevada exigencia de extensión de brazo. Dicha disminución es el resultado de la asignación del trabajador x a puestos con menor exigencia de extensión de brazo (valor 1 del ítem correspondiente) en las rotaciones 2, 3, 4 y 5.

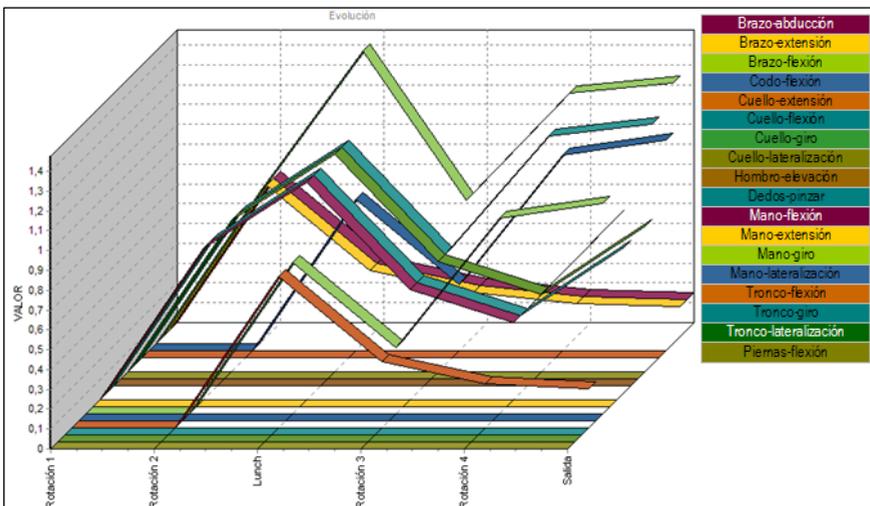


Figura 7.8: Ejemplo de evolución del valor de los ítems para un trabajador durante 4 rotaciones y una pausa para comer obtenidas mediante la Ecuación 2.

7.12.5.2 Fase 2: evaluación de la aptitud o fitness de cada individuo

En la segunda fase de la evaluación se obtiene el fitness (**E**) de cada uno de los n_i individuos de la población. Se evalúa el grado de adecuación de la asignación de cada trabajador a cada tarea en las diferentes rotaciones codificadas en los individuos. El grado de adecuación se obtiene multiplicando el valor de los ítems de los trabajadores por los correspondientes ítems de los puestos a que han sido asignados en cada rotación. Dado que los valores de los ítems del puesto son directamente proporcionales a la necesidad de realizar determinadas actividades en la tarea, y los del trabajador son inversamente proporcionales a la conveniencia de ser realizadas por dicho trabajador, la función evaluadora (Ecuación 4) proporcionará valores menores para los individuos que representen asignaciones más adecuadas. La función de evaluación considera, además, la duración de cada uno de los turnos (t_r), proporcionando valores más elevados cuanto mayor sea la duración del turno considerado. En esta función n_{wor} indica el número de trabajadores, n_{rot} el número de rotaciones y n_{it} el número de ítems considerados. C_j es un coeficiente que indica la importancia relativa del ítem j respecto del resto de ítems, es decir, la importancia relativa de cada criterio de diseño considerado.

$$E = \sum_{x=1}^{n_{wor}} \sum_{r=1}^{n_{rot}} \sum_{j=1}^{n_{it}} \left(C_j * w^x_j(r) * p_j(a^x(r)) * t_r \right)^u$$

Ecuación 4: Función de evaluación de la aptitud o fitness de una solución o agenda de rotación.

donde:

n_{wor} es el número de trabajadores.

n_{rot} es el número de rotaciones.

n_{it} número de ítems.

C_j es el coeficiente de importancia relativa del ítem j respecto al resto de ítems

$w^x_j(r)$ es el valor del ítem j para el trabajador x en la rotación r .

$a^x(k)$ es el puesto asignado al trabajador x en la rotación k .

$p_j(a^x(k))$ es el valor del ítem j en el puesto asignado al trabajador x en la rotación k .

t_r es la duración de la rotación r .

u es el exponente de uniformidad que evita asignaciones descompensadas.

Cada uno de los productos trabajador-puesto es elevado a un exponente u (uniformidad), que permite premiar las soluciones en las que la carga se reparte

uniformemente entre los trabajadores. Se pretende evitar asignaciones descompensadas, en las que existen trabajadores sobrecargados y trabajadores asignados a puestos muy ligeros en todas las rotaciones. Esto provoca que el aumento de E debido a los trabajadores sobrecargados se compense con los incrementos muy ligeros provocados por los trabajadores poco cargados. El exponente u debe adoptar un valor positivo mayor o igual que la unidad. De esta manera aumenta exponencialmente el incremento de E debido a los trabajadores sobrecargados, penalizando a los individuos que proponen soluciones descompensadas frente a los que codifican soluciones uniformes. Por otra parte, la asignación de trabajadores discapacitados, con un valor alto en un determinado ítem, a un puesto con requerimientos elevados en dicho ítem, hace aumentar exponencialmente el producto trabajador-puesto, resultando penalizados los individuos que realizan dichas asignaciones.

7.12.6 Aplicación de penalizaciones

Tal y como se deriva de la revisión bibliográfica realizada, uno de los beneficios asociados a la rotación de puestos es lograr una mayor motivación y satisfacción del trabajador al variar el contenido de las tareas a desarrollar. Además, según las recomendaciones realizadas por la [Occupational Safety and Health Administration (OSHA), 09] es necesario que los puestos entre los que se rota permitan la variación de los grupos de tendones-músculos empleados en la tarea, para facilitar la recuperación y el descanso de la fatiga acumulada. Por ello, es recomendable que un mismo trabajador no sea asignado sucesivas veces al mismo puesto o a puestos en los que el contenido de la tarea sea similar. Dada la forma de la función de evaluación (Ecuación 4), sería valorada positivamente una asignación en la que un trabajador con valores bajos en sus ítems, fuera asignado en rotaciones sucesivas a un mismo puesto que también posee valores bajos en sus ítems. Para lograr que individuos de la población que realicen este tipo de asignaciones posean pocas probabilidades de supervivencia en generaciones posteriores, se introduce una función de penalización que penaliza a dichos individuos. Para ello se define t_{\max} como el tiempo máximo de permanencia continuada de un trabajador en puestos del mismo tipo. Tras el proceso de evaluación antes descrito, se recorre la población analizando la asignación realizada por cada individuo. Si en algún caso un trabajador ocupa puestos del mismo tipo en más de una rotación consecutiva se calcula la duración total como la suma de la duración de cada una de dichas rotaciones. Si la duración total obtenida es superior a t_{\max} , se penaliza a dicho individuo incrementando el valor obtenido por la función de evaluación. De esta manera disminuye la probabilidad de que sobreviva en las siguientes generaciones.

Por otra parte, deben penalizarse las asignaciones de trabajadores con limitaciones en el desarrollo de alguna actividad a puestos en los que dicha actividad es necesaria. Para ello se analizan las asignaciones realizadas por los individuos de la población. Se comparan los valores de los ítems correspondientes a las capacidades necesarias en los puestos con los de los trabajadores que los ocupan. En caso de que un trabajador con limitación en un ítem concreto ocupe un puesto donde dicha capacidad es necesaria, se incrementa el valor obtenido por la función

de evaluación para el individuo que realiza dicha asignación, disminuyendo su probabilidad de supervivencia en generaciones futuras.

Puede ocurrir que no sea conveniente la asignación de determinados trabajadores a puestos concretos. Esto puede obedecer a diversos motivos, como la falta de capacitación para desempeñar la tarea requerida en el puesto por el trabajador, a diferencias salariales, la incorporación de individuos en fase de rehabilitación o con limitaciones médicas (embarazadas), etc. De manera similar al caso anterior, se penalizarán aquellos individuos (aumentando el valor dado por la función de evaluación), que realicen asignaciones no deseadas.

7.12.7 El proceso de Selección de individuos para la siguiente generación

Una vez han sido evaluados todos los individuos se seleccionan aquellos que sobrevivirán y pasarán a la siguiente generación ($n \cdot (1 - Pc) \cdot le1$) y los individuos que serán empleados como reproductores ($n \cdot Pc$) (Figura 7.3). Para ello se emplea un mecanismo de **selección por ruleta** [Goldberg, 89], en el que la probabilidad de que un individuo sea seleccionado está relacionada de manera inversa con el valor obtenido en su evaluación, puesto que lo que se desea es minimizar el valor de la función objetivo. De esta manera, los individuos que ofrecen mejores soluciones (menores valores en la función objetivo) tendrán una probabilidad mayor de ser seleccionados.

A continuación se describe de forma detallada el proceso de selección de los individuos para la siguiente generación a partir de los valores de aptitud obtenidos para los individuos de la generación actual. Sea x_i un individuo perteneciente a una población de m individuos. Sea $\mu(x_i)$ la aptitud de x_i obtenida mediante la función de aptitud definida (Ecuación 4). Dada la definición de la función de aptitud E , un mayor valor de $\mu(x_i)$ indica una menor adaptación al entorno del individuo x_i , así pues se procede estableciendo las probabilidades de selección inversamente proporcionales al valor de $\mu(x_i)$.

Se calcula inicialmente el valor del potencial más elevado μ_{max} (el del individuo peor adaptado) mediante:

$$\mu_{max} = \max\{\mu(x_i)\}_{i=1\dots m}$$

Conocido el valor μ_{max} se aplica la transformación:

$$\mu(x_i) = \mu_{max} - \mu(x_i)$$

de tal manera que ahora los valores de $\mu(x_i)$ son mayores para los individuos más adaptados y menores para los menos aptos, tomando la aptitud del individuo peor el valor 0. Se asignan ahora las probabilidades de selección de cada individuo como:

Conocidas las probabilidades de cada individuo, estos se ordenan de mayor a

$$P(x_i) = \frac{\mu(x_i)}{\sum_{j=1}^m \mu(x_j)}$$

menor probabilidad. Una vez ordenados se calculan las probabilidades acumuladas de cada uno como la suma de la probabilidad propia y la de todos los que le preceden en esa ordenación.

$$P_{acum}(x_i) = \sum_{j=1}^i P(x_j)$$

De esta manera se obtienen una serie de intervalos consecutivos, comprendidos entre 0 y 1, cuyo tamaño es proporcional a la aptitud de cada individuo (análogamente se le asignaría un determinado sector de la ruleta). Para la selección se genera un número aleatorio entre 0 y 1 y se recorre la lista ordenada de individuos. El escogido será el primer individuo cuya probabilidad acumulada sea superior al número aleatorio.

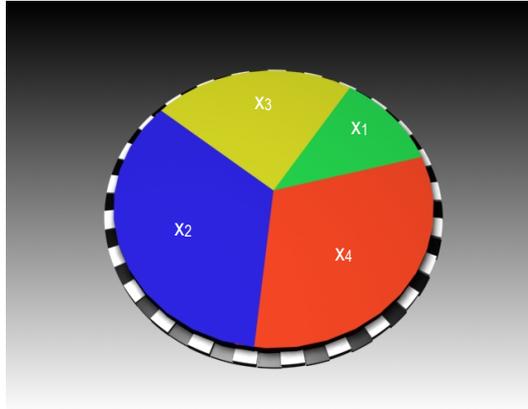


Figura 7.9: Analogía de la Selección por Ruleta.

Seguidamente se presenta un ejemplo de aplicación del método de selección por ruleta empleado por el algoritmo genético propuesto:

Sea una población de 4 individuos $\{x_1, x_2, x_3, x_4\}$ cuyas aptitudes son 2, 10, 3, y 9 respectivamente. El valor máximo es 10 (x_2), por lo que aplicando la transformación obtendríamos unos valores de 8 $\mu(x_1)$, 0 $\mu(x_2)$ (el peor individuo se elimina de la selección), 7 $\mu(x_3)$ y 1 $\mu(x_4)$. La suma de los valores transformados es 16, por lo que las probabilidades de cada individuos son 0,5000; 0; 0,4375 y 0,0625 respectivamente (la suma debe ser 1). La ordenación de las probabilidades de los individuo de mayor a menor proporciona la secuencia $\{P(x_1)=0,5; P(x_3)=0,4375; P(x_4)=0,0625; P(x_2)=0\}$. Las correspondientes probabilidades acumuladas serán 0,5, 0,9325, 1.

Al generar un número aleatorio a entre 0 y 1, será seleccionado el individuo que cumpla el siguiente criterio:

$$X_1 \text{ si } a \in [0, 0,5000];$$

$$X_3 \text{ si } a \in]0,5, 0,9325];$$

$$X_4 \text{ si } a \in] 0,9375, 1];$$

Como puede apreciarse, el tamaño del intervalo es mayor cuanto mayor sea la aptitud del individuo (o menor sea el valor de la aptitud E), en el ejemplo X_1 es el individuo más apto y por lo tanto su probabilidad de selección mayor.

7.12.8 El proceso de Reemplazo de individuos entre generaciones

De forma habitual en los algoritmos genéticos las poblaciones son reemplazadas totalmente por individuos seleccionados mediante el operador selección, o por aquéllos fruto de la reproducción y la mutación (algoritmos generacionales). Existe otro tipo de estrategia en la que se mantiene de generación en generación a los mejores individuos encontrados durante el proceso. A los algoritmos que hacen uso de esta estrategia se les denomina algoritmos estables porque tienden a alcanzar un estado estacionario o estable [Srinivas et al., 94a]. En el algoritmo que se propone, una cierta cantidad de individuos ($le1$) denominados élite se conservan de generación en generación. Dichos individuos corresponden a los mejores individuos encontrados hasta el momento. En el algoritmo propuesto $le1$ indica el número total de mejores individuos que pasan de generación en generación, e indica la intensidad del elitismo. Tras cada generación, si se encuentran individuos mejores que los encontrados hasta el momento, éstos sustituyen a los primeros.

El operador selección actúa tanto para escoger a los individuos reproductores como para seleccionar a los individuos supervivientes. El operador selección se aplica tantas veces como individuos deban ser seleccionados bien para la aplicación del operador de cruce, o bien como individuos supervivientes. El reemplazo de los individuos de una generación por los de la siguiente se realiza de manera directa. Los individuos hijos resultantes de la aplicación del operador cruce son siempre incluidos en la siguiente generación (reemplazo al vuelo o inmediato Figura 6.8). De esta forma se determinan $n \cdot Pc$ individuos de la población futura (siendo Pc la probabilidad de cruce).

El operador selección actúa nuevamente $n \cdot (1 - Pc) - le1$ veces para seleccionar otros tantos individuos que sobrevivirán a la generación actual pasando a la siguiente. Esta selección se realiza sobre todos los individuos de la población actual, incluyendo aquellos que ya fueron seleccionados como reproductores. Los individuos escogidos forman parte, de manera directa, de la nueva generación.

Por último, los $le1$ individuos que más han destacado por su gran aptitud (la élite) a los largo de las generaciones, son incluido de forma directa en la nueva generación. De esta forma se ha producido una nueva generación de n individuos ($[n \cdot (1 - Pc) - le1] + [le1] = n$).

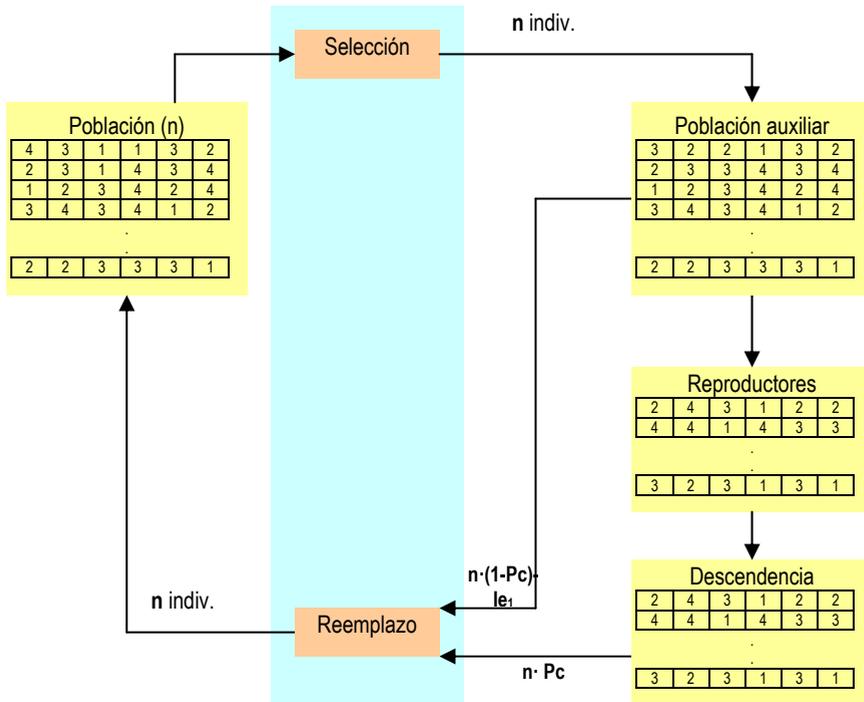


Figura 7.10: Proceso de reemplazo al vuelo o inmediato en el AG.

7.12.9 El proceso de Reproducción o Cruce.

En el proceso de reproducción se escogen parejas de individuos de entre los $n \cdot Pc$ individuos seleccionados mediante el método de la ruleta (ver 7.12.7). La reproducción se lleva a cabo mediante el operador **Cruce**, procedimiento a través del cual se generan dos nuevos individuos a partir de la combinación de las soluciones representadas por los individuos originales. Los individuos generados reemplazarán a los progenitores en la población y pasarán a la siguiente generación. El parámetro **Pc** (probabilidad de cruce), tal y como se indicó en la descripción general del AG (ver 7.12.2), determina el número de individuos de la siguiente generación que serán creados por cruzamiento.

La Figura 7.12 muestra el proceso de reproducción. Se elige el **punto de cruce** como un número aleatorio entre 1 y $n_{rot}-1$. Los descendientes son generados combinando las rotaciones que quedan a la izquierda y a la derecha del **punto de cruce** en cada uno de los padres. Esta forma de realizar el cruce garantiza que los descendientes representen **soluciones factibles**, dado que se evita que un mismo trabajador sea asignado a dos puestos diferentes en una misma rotación (o repetición del mismo valor en una columna).

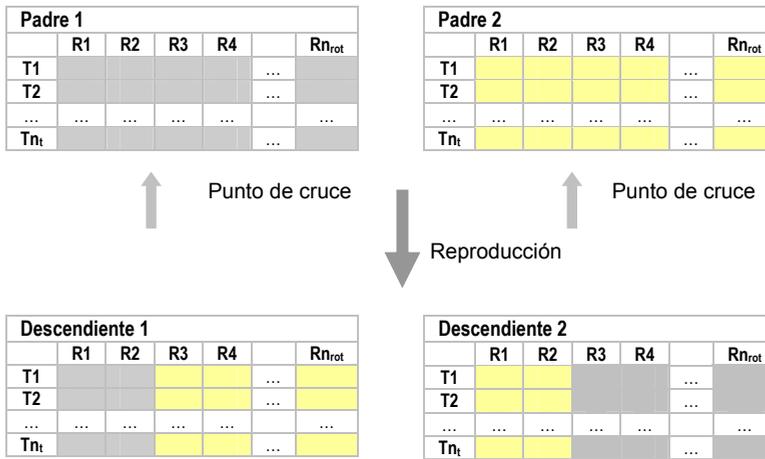


Figura 7.12: Generación de dos individuos a partir del cruce de dos progenitores.

7.12.10 El proceso de Mutación

El operador mutación se aplica a individuos seleccionados de manera aleatoria entre los individuos seleccionados como supervivientes ($n \cdot (1 - P_c) - I_e1$) y los individuos resultantes del cruce o descendientes ($n \cdot P_c$). También los individuos que forman el buffer de individuos élite son susceptibles de mutación (I_e1). El número de individuos que mutarán está determinado por el parámetro P_m (probabilidad de mutación). El proceso de mutación afecta cada vez a un único individuo y consiste en seleccionar de dicho individuo aleatoriamente una rotación y dos trabajadores, e intercambiar los puestos asignados a los trabajadores en dicha rotación (Figura 7.13). Para cada individuo este proceso se repite tantas veces como indique el parámetro im (**intensidad de mutación**). De esta manera, P_m define el número de individuos que mutan, e im la magnitud de la variación de cada individuo, es decir, cuantos trabajadores intercambian sus puestos en un individuo o agenda de rotación. Como en el caso del cruzamiento, el operador mutación es cerrado, dado que siempre produce individuos que representan soluciones **factibles**. Los individuos generados por mutación, sustituyen a los progenitores en la población.

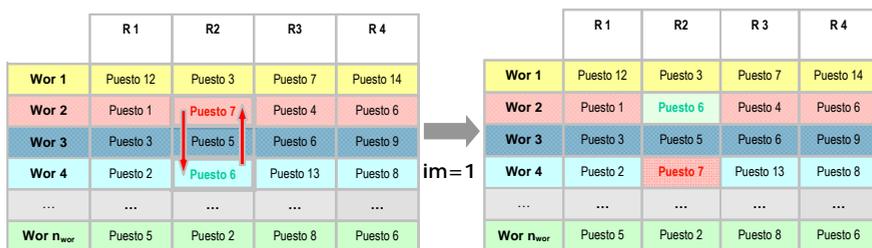


Figura 7.13: Ampliación del operador mutación a una solución con $im=1$.

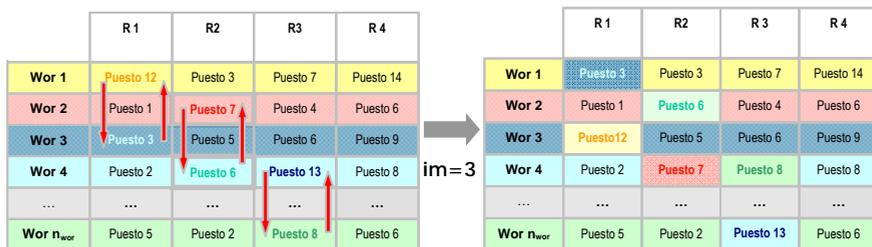


Figura 7.14: Ampliación del operador mutación a una solución con $im=3$.

7.12.11 Proceso de intensificación de la búsqueda

Se propone introducir durante la evolución del AG periodos de búsqueda en el entorno inmediato de la mejor solución encontrada hasta el momento, con el objetivo de localizar una mejor solución en el vecindario. La exploración del vecindario se realizará mediante variaciones de la codificación de la mejor solución actual (movimiento).

Un **movimiento** se define como el intercambio de los puestos asignados a dos trabajadores en una rotación dada. Éste tipo de intercambio garantiza la obtención de soluciones vecinas factibles. El procedimiento es similar al definido para la mutación.

	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4
Wor 1	Puesto 12	Puesto 3	Puesto 7	Puesto 14
Wor 2	Puesto 1	Puesto 7	Puesto 4	Puesto 6
Wor 3	Puesto 3	Puesto 5	Puesto 6	Puesto 9
Wor 4	Puesto 2	Puesto 6	Puesto 13	Puesto 8
...
Wor n _{wor}	Puesto 5	Puesto 2	Puesto 8	Puesto 6

	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4
Wor 1	Puesto 12	Puesto 7	Puesto 7	Puesto 14
Wor 2	Puesto 1	Puesto 3	Puesto 4	Puesto 6
Wor 3	Puesto 3	Puesto 5	Puesto 6	Puesto 9
Wor 4	Puesto 2	Puesto 6	Puesto 13	Puesto 8
...
Wor n _{wor}	Puesto 5	Puesto 2	Puesto 8	Puesto 6

	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4
Wor 1	Puesto 12	Puesto 3	Puesto 7	Puesto 14
Wor 2	Puesto 1	Puesto 7	Puesto 4	Puesto 6
Wor 3	Puesto 3	Puesto 5	Puesto 6	Puesto 9
Wor 4	Puesto 2	Puesto 6	Puesto 13	Puesto 8
...
Wor n _{wor}	Puesto 5	Puesto 2	Puesto 8	Puesto 6

	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4
Wor 1	Puesto 12	Puesto 5	Puesto 7	Puesto 14
Wor 2	Puesto 1	Puesto 7	Puesto 4	Puesto 6
Wor 3	Puesto 3	Puesto 3	Puesto 6	Puesto 9
Wor 4	Puesto 2	Puesto 6	Puesto 13	Puesto 8
...
Wor n _{wor}	Puesto 5	Puesto 2	Puesto 8	Puesto 6

Figura 7.15: Movimientos para la obtención de soluciones vecinas a partir de una solución actual.

Las posiciones del espacio accesibles mediante un movimiento formarán el entorno de la solución actual. Con el objetivo de controlar la intensidad de la exploración del vecindario de la solución actual, se propone el parámetro **vs (valor superior)**. Así pues, un puesto **p** asignado a un trabajador **x** en la rotación **r**, se intercambiará con otro puesto **q** asignado a otro trabajador **y** en la misma rotación **r**, sólo si el coste de la asignación del trabajador **x** al puesto **p** (Ecuación 5) es mayor que el valor del parámetro **vs**.

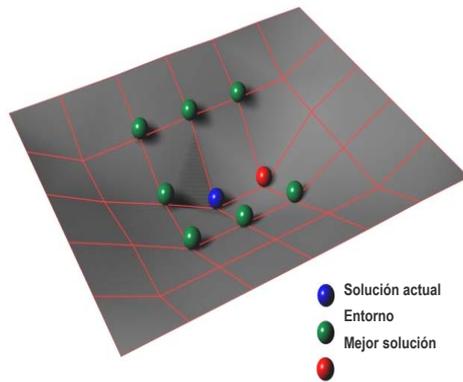


Figura 7.16: Entorno de una solución.

$$C(p(a^x(r))) = \sum_{j=1}^{n_{ij}} w^x_j(r) * p_j(a^x(r)) * t_r$$

Ecuación 5: Coste de las asignaciones de un trabajador (x) en una rotación (r).

donde:

$$C(p(a^x(r)))$$

es el coste de asignación de un trabajador x a un puesto p en la rotación r .

n_{it} número de ítems.

$w^x_j(r)$ es el valor del ítem j para el trabajador x en la rotación r .

$a^x(r)$ son las asignaciones al trabajador x en la rotación r .

$p_j(a^x(r))$ es el valor del ítem j en el puesto asignado al trabajador x en la rotación r

t_r es la duración de la rotación r .

Para decidir el momento de la evaluación del AG en el que se realizará una intensificación de la búsqueda local se define el parámetro g . Dicho parámetro indica el número de generaciones que deben transcurrir para que se realice una etapa de intensificación. Cuando se cumple la condición, el AG recorre el vecindario de la mejor solución encontrada hasta el momento. Si se encuentra alguna solución mejor ésta sustituye a la anterior. El método basado en la intensificación de la búsqueda cada cierto número de generaciones (g), pretende preservar los esquemas de alta calidad localizados por el AG, frente a otras estrategias más intensivas como por ejemplo la introducción de la búsqueda local en cada generación [Davis, 91; Muhlenbein, 91].

A continuación se muestra en pseudocódigo el procedimiento de intensificación de la búsqueda para el caso genérico de un problema con n_r rotaciones, n_{wor} trabajadores, n_{it} ítems.

```

Comienzo
para r:=1 hasta  $n_r$  hacer
{
  mejor_valor :=evaluar(mejorind); //mejorind es el mejor individuo actual
  para x:=1 hasta  $n_{wor}$  hacer
  {
    Para j=1 hasta  $n_{it}$  hacer
    {
      coste=coste +  $w^x_j(r) * p_j(a^x(r)) * t_r$  // Ecuación 5
    }
    si coste> vs entonces
    {
      para y=1 hasta  $n_{wor}$  hacer
      {
        si x<> y entonces
        {
          ind_vecino:= mejorind(  $a^x(r) \leftrightarrow a^y(r)$  )
          //intercambio del puesto del trabajador x con el trabajador y en la rotación r
          valor_vecino:= evaluar (ind_vecino)
          si valor_vecino < mejor_valor entonces
            mejorind := ind_vecino
        }
      }
    }
  }
}
fin

```

Figura 7.17: Procedimiento de intensificación local de la búsqueda.

Finalmente, la Figura 7.18 muestra el esquema correspondiente al AG propuesto tras la incorporación del proceso de intensificación de la búsqueda. A éste tipo de algoritmos se les denomina también Algoritmos Híbridos, al combinar las características de los algoritmos genéticos con heurísticas de búsqueda local (ver 6.11).

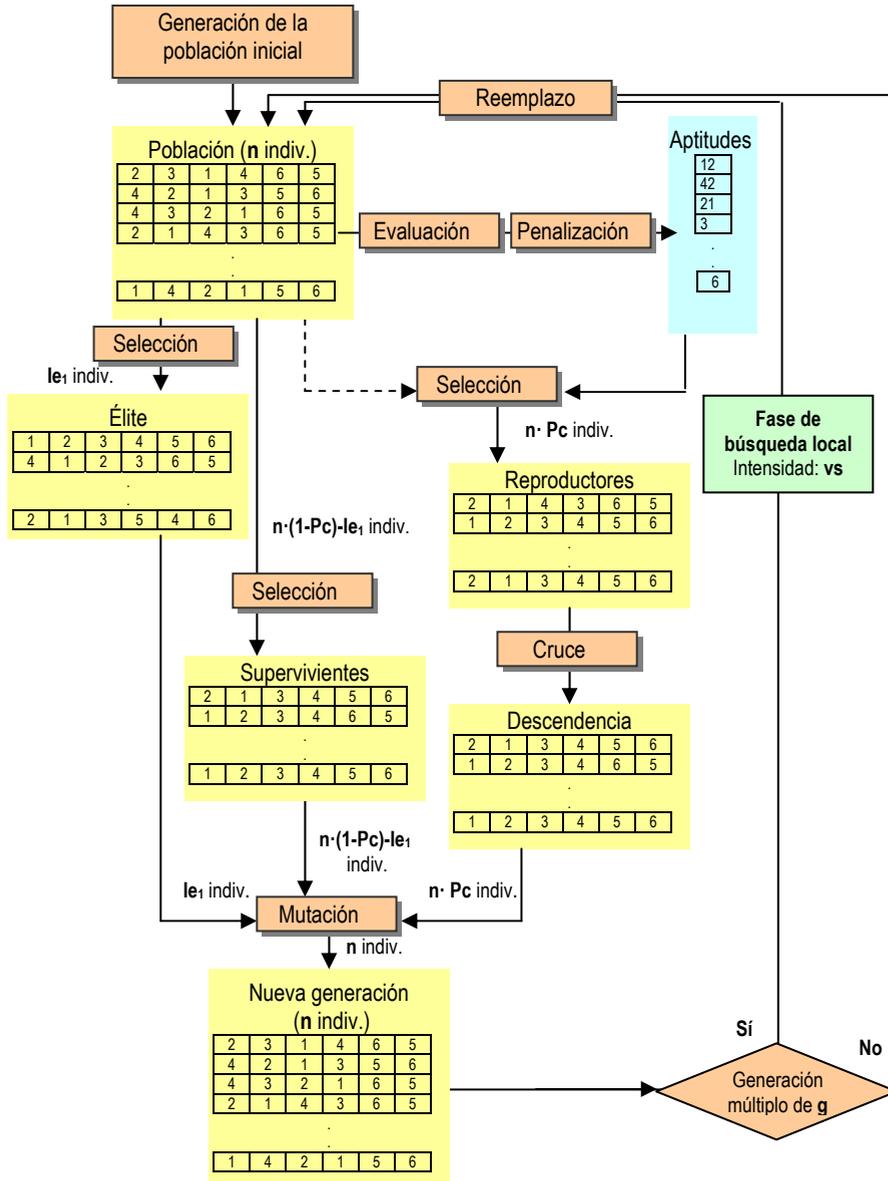


Figura 7.18: Diagrama general del flujo del AG con fase de búsqueda local.

7.13. Fase 11: Implantación de la agenda de rotación y seguimiento

Obtenida la agenda de rotación mediante la aplicación del AG, será necesario ponerla en explotación, es decir, llevar a cabo su implantación en la organización. Para ello se recomienda que el planificador considere aspectos como:

- La necesidad de **comunicación** con los trabajadores y responsables de la organización.

Se deberá informar a los responsables de la organización y a los trabajadores sobre cuáles son las características de la solución a implantar, qué puestos y qué trabajadores estarán afectados por el cambio, cuál será el nuevo sistema de trabajo, etc. Dicha comunicación se podrá realizar mediante: paneles, documentación impresa, intranet, reuniones, etc., Durante la implantación y durante el seguimiento posterior será fundamental la comunicación con los trabajadores y con la organización, de esta forma se reduce la intranquilidad de los implicados. La comunicación eficaz permitirá detectar necesidades y problemas para, si fuera necesario, modificar los inputs y los criterios de diseño utilizados para la generación de la agenda de rotación, adaptándolos a las nuevas circunstancias.

- La importancia de la **formación** de los trabajadores.

El planificador deberá asegurarse de que los trabajadores están adecuadamente formados para las tareas de los puestos a los que van a ser asignados. En otro caso se deberá formar a los trabajadores antes de poner la agenda de rotación en explotación. Además, dicha formación no deberá limitarse a los conocimientos necesarios en los puestos entre los que se rota, sino que se deberá formar a los trabajadores en el nuevo sistema de trabajo basado en las rotaciones, actuando la formación como herramienta facilitadora del cambio.

- La **coordinación** con el responsable de producción.

Si el planificador de la agenda de rotación no es el responsable de la producción, éste deberá informar a dicho responsable con el objetivo de consensuar aspectos como: los periodos de prueba de la agenda de rotación, los trabajadores y puestos afectados, los tiempos de rotación y las pausas, los recorridos de los intercambios entre puestos, etc.

- La necesidad de realizar **periodos de entrenamiento**.

Se recomienda que se lleven a cabo periodos de entrenamiento del plan de rotaciones como parte de la formación de los trabajadores en el nuevo sistema de trabajo. Los periodos de prueba permiten a los trabajadores conocer los puestos a los que han sido asignados, y actúan como fase de entrenamiento de los intercambios. Además, permite anticiparse a posibles problemas derivados de la implantación: identificar problemas en los intercambios, retrasos, problemas derivados de la falta de formación de los trabajadores, rechazos de los trabajadores, molestias músculo-esqueléticas a corto plazo, etc.

- La **generación de recursos** que faciliten las rotaciones y su seguimiento.

Se recomienda dotar a los trabajadores y a los responsables de producción de instrumentos que les faciliten la realización de las rotaciones,

con información sobre: la secuencia de la rotación, los tiempos de intercambio y pausas, el camino físico de los intercambios entre puestos, etc. De esta forma se facilita la coordinación y se previenen dificultades organizativas.

También resultará de gran ayuda la creación de documentos para el control efectivo o auditoría del cumplimiento con el plan de rotaciones implantado, con el objetivo de detectar posibles irregularidades que puedan influir negativamente sobre los resultados relativos a la influencia de la rotación sobre la salud de los trabajadores. Dichos documentos deberán incluir información sobre: los puestos que realmente han ocupados los trabajadores durante cada jornada, el tiempo de permanencia, las incidencias que han provocado las modificaciones en el plan de rotación previsto, etc.



Figura 7.19: Ejemplo de formato de ficha elaborado por el departamento de ergonomía de Ford (España) [Sánchez-Fajardo, 05].

7.13.1 Definición de indicadores para el análisis de los resultados de la implantación

Para realizar el seguimiento de los resultados de la implantación del plan de rotaciones será necesario establecer indicadores que deberán ser monitorizados continuamente. Los periodos de control deberán ser más frecuentes durante la implantación y se podrán espaciar a medida que se confirme la estabilidad del sistema.

Los indicadores deberán definirse en función de los objetivos marcados mediante los criterios de diseño de la agenda de rotación. Dichos indicadores deberán valorar en qué medida los criterios de diseño elegidos son correctos y logran solucionar los problemas que motivaron la implantación del plan de rotaciones. Los resultados obtenidos orientarán al planificador sobre la necesidad de rediseñar la agenda de rotación y podrán guiar las acciones correctivas necesarias. También, en caso de resultados adversos, pueden suponer el rechazo de la rotación como solución a los problemas existentes en la organización.

Dada la trascendencia de los resultados proporcionados por los indicadores, se recomienda que sean definidos y monitorizados por profesionales médicos, bien pertenecientes al staff médico de la organización, bien pertenecientes a la mutua subcontratada.

Es importante remarcar que aunque los indicadores deberán medir el cumplimiento de los criterios de diseño establecidos, y por tanto la mejora o resolución de los problemas inicialmente detectados, dicho objetivo no puede ser el único que influya en la definición de los indicadores, ya que puede ocurrir que un plan de rotaciones corrija los problemas detectados, al tiempo que las nuevas condiciones de trabajo causan nuevos problemas de salud entre los trabajadores. Dicha circunstancia deberá poder ser registrada por los indicadores que se definan. [Aptel et al., 08] afirma que la complejidad de los TME hace necesario que los indicadores que se establezcan no se limiten a medir únicamente el efecto de la rotación sobre los TME, si no que será necesario que los indicadores sean numerosos y que consideren diferentes elementos del contexto así como sus posibles interacciones.

[Aptel et al., 08] propone indicadores de la salud músculo-esquelética como:

- el número de las lesiones músculo-esqueléticas
- las partes del cuerpo lesionadas
- el número de localizaciones de dolor en los trabajadores

También será útil establecer indicadores que recojan información sobre factores relacionados con los TME como:

- la relación de los TME con el género
- la relación de los TME con la edad
- la relación de los TME con el tabaquismo
- la relación de los TME con el frío y/o el calor

Además de los indicadores relativos a los TME, se considera de gran importancia la obtención de información sobre la salud psicosocial, no sólo por su propia relevancia, si no también, por su asociación con los TME [Bernard, 97]. Para la obtención de información sobre la salud psicosocial de los trabajadores podría emplearse el método de evaluación de factores psicosociales ISTAS 21 en su versión media (26 dimensiones, 95 preguntas) [Moncada et al., 02], destinada al uso

profesional. [Kuijjer et al., 05], por su parte, utiliza los 11 ítems propuestos en el cuestionario holandés VBBA (*Questionnaire on the Experience and Assessment of Work*, Cuestionario sobre las experiencias y apreciaciones del trabajo) [Van Veldhoven et al., 94] para la evaluación del efecto de las rotaciones sobre el tiempo de recuperación de los trabajadores. Un ejemplo de ítem de dicho cuestionario es: “Después del trabajo diario estoy demasiado cansado para realizar otras actividades (Yes/No)”. Las respuestas (valores 0,1) de los 11 ítems son sumados y transformados en porcentajes. Dichos ítems son evaluados por [Kuijjer et al., 05] antes y después de la implantación del plan de rotaciones, con el objetivo de comparar los resultados de la rotación sobre la capacidad de recuperación de los trabajadores.

También podrán establecerse indicadores de carácter económico o productivo que permitan determinar la influencia de las rotaciones sobre la obtención de beneficios y la productividad, sobre la calidad de los productos (un posible indicador podría ser la tasa de fallos), o la satisfacción de los clientes. Otro posible indicador de los efectos de la implantación del sistema de rotaciones podría ser la tasa de absentismo laboral o la tasa de rotación de los empleados a otras organizaciones.

La valoración de los indicadores deberá realizarse antes de la implantación de la agenda de rotación obtenida mediante la metodología propuesta. Dicha información deberá ser comparada con la que se obtenga, periódicamente, una vez que la agenda de rotación se encuentra en funcionamiento.

La obtención periódica de información sobre la salud física y mental de los trabajadores permitirá conocer la evolución de su salud a lo largo del tiempo. Sin embargo, únicamente tras un periodo prolongado, de alrededor de 2 años, se estará en disposición de obtener conclusiones sobre los resultados de la implantación de la agenda de rotación, con la excepción de que se produzcan resultados adversos repentinos que evidencien los efectos nocivos de las rotaciones para la salud de los trabajadores. Un periodo suficientemente largo de observación de la evolución de salud de los trabajadores que rotan, permitirá evitar conclusiones precipitadas en base a resultados influidos por factores ajenos a al propio plan de rotaciones.

El seguimiento debe concebirse como una fase continua de obtención de información sobre el funcionamiento y los efectos del plan de rotaciones en la salud de los trabajadores, información que deberá ser utilizada como feedback para el rediseño adecuado de la agenda de rotación implantada. El seguimiento será, por tanto, un mecanismo clave para la mejora continua de la agenda de rotación en explotación basado en la experiencia acumulada.

8

Validación de la metodología propuesta

8. VALIDACIÓN DE LA METODOLOGÍA PROPUESTA

8.1. Introducción

En el presente capítulo se probará la validez de la metodología propuesta como herramienta para la generación de agendas de rotación que consideren, simultáneamente, múltiples factores de riesgo ergonómico que pueden influir en una correcta asignación de los trabajadores a los puestos, al tiempo que las soluciones generadas cumplen con las restricciones que aseguran su viabilidad práctica.

Dado el carácter novedoso de la propuesta, no se han encontrado en la bibliografía metodologías cuyos resultados puedan ser comparados en términos cuantitativos con los resultados alcanzados mediante la aplicación de la aquí descrita. Por ello, se realizará una validación basada en el análisis de las características de las soluciones obtenidas al ser aplicada a un caso concreto.

Como paso preliminar a la fase de validación experimental de la metodología, se considera necesaria una adecuada selección de los parámetros definidos en el AG. Tal y como apuntan [Srinivas et al., 94a; Diego-Mas, 06], la selección correcta de los parámetros de un AG no es trivial, y es en sí un problema de optimización no lineal [Grefenstette, 86]. Además, los parámetros adecuados dependen fuertemente del tipo de función de aptitud empleada en el AG y de las características del caso al que se aplica. Por tanto, en la fase preliminar de “calibración” de los parámetros se pretende establecer, no valores óptimos, sino valores iniciales que permitan la validación de la metodología propuesta. Posteriores ejecuciones del AG, permitirán al planificador optimizar de forma gradual los parámetros del mismo.

El presente capítulo se estructura en cuatro apartados principales. En el primer apartado se describe el caso sobre el que se realizan los experimentos destinados a la parametrización del AG y a la validación experimental de la metodología. El segundo apartado incluye la fase preliminar de parametrización del AG. El tercer apartado corresponde a la validación experimental de la metodología mediante la resolución del problema planteado. Finalmente, en el cuarto apartado se aborda el análisis de los resultados obtenidos.

8.2. Descripción del caso de estudio

En el presente apartado se describen los resultados obtenidos con el seguimiento de las fases 1 a 9 de la metodología propuesta para el caso en estudio. El resultado del seguimiento de dichas fases dio lugar a los *inputs* necesarios para la ejecución del AG. Sin embargo, tal y como se ha apuntado, fue necesaria una fase previa a la aplicación del AG, la parametrización, en la que se establecieron los valores de los parámetros que, en base a la experimentación, mejores soluciones proporcionaban para el problema planteado.

8.2.1 Fase 1: detección de la necesidad

Una planta de ensamblaje de automóviles decidió implantar un sistema de rotaciones como solución al problema de la existencia de estaciones de trabajo con una elevada incidencia de TME entre los trabajadores que las ocupaban. Dichas estaciones presentaban una elevada repetitividad de movimientos y no era posible adoptar medidas ergonómicas correctivas. Dicha imposibilidad de rediseño se debía a la existencia de limitaciones impuestas por el sistema productivo, a la imposibilidad, por problemas técnicos, de realizar adaptaciones antropométricas en la maquinaria empleada, y a las restricciones económicas existentes en la organización.

8.2.2 Fase 2: obtención del apoyo de la dirección y de los trabajadores

La adopción del plan de rotaciones contó con el apoyo de la dirección, y fue enmarcado dentro de un Plan General de Mejora Ergonómica (PGME) de la planta. El objetivo de dicho PGME era reducir la tasa de TME y el absentismo laboral.

Para garantizar el compromiso de los trabajadores implicados en el nuevo plan de rotaciones se decidió seleccionar únicamente a trabajadores voluntarios.

Con el objetivo de gestionar la obtención y posterior implantación del plan de rotaciones, se creó un equipo de seguimiento constituido por: un representante sindical, un representante de los trabajadores implicados en las rotaciones, un representante de la dirección, el jefe de producción, un ergónomo y un médico. Además, el jefe de producción fue nombrado responsable de la motivación y comunicación con los trabajadores implicados.

8.2.3 Fase 3: selección de los puestos a rotar

Para la selección de los puestos a rotar se realizó una evaluación ergonómica de la repetitividad de movimientos de 18 puestos que, a priori, se desea incluir en el plan de rotaciones. El método de evaluación ergonómica aplicado y los resultados obtenidos se describen en el apartado 8.2.6. Como resultado de la evaluación ergonómica realizada se observó que ningún puesto suponía la exposición de los trabajadores a sobreesfuerzos. Además, se constató que existía variedad en los niveles de riesgo de los grupos musculares y movimientos evaluados entre la mayoría de los puestos, tal e ilustra la Figura 8.1. En los casos en los que se observó menor variedad, el nivel de riesgo persistente era bajo y, por tanto, se consideró que asignaciones consecutivas entre dichos puestos no resultaban perjudiciales.

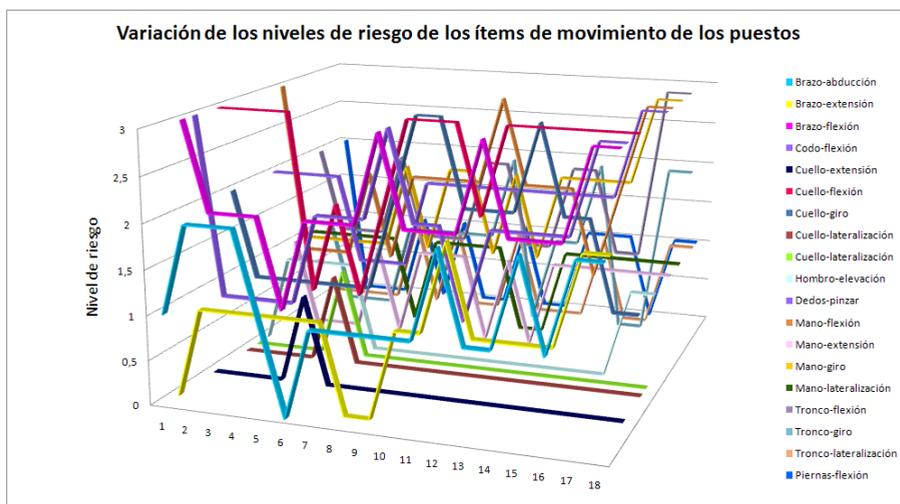


Figura 8.1: Variación de los niveles de riesgo de los ítems de movimiento de los puestos.

Finalmente se seleccionaron los 18 puestos de la planta de ensamblaje evaluados. Dichos puestos, además, pertenecían a la misma sección y categoría, y eran responsabilidad de la misma persona. Todos estaban localizados en la misma área, y suficientemente cercanos como para que el cambio de puesto en cada rotación no supusiera interrupciones en el proceso de fabricación. Los trabajadores que los ocupaban poseían un nivel de formación suficiente para desarrollar las actividades requeridas en cualquiera de ellos, sin necesidad de proporcionarles conocimientos suplementarios. Se seleccionaron puestos clasificados como de riesgo alto y medio sin posibilidad de rediseño. Además, se seleccionaron otros puestos, de la misma sección, con presencia de riesgo bajo. El propósito de dicha selección era introducir variación en la magnitud del riesgo mediante la rotación. Además, en los puestos seleccionados se realizaban actividades de carácter heterogéneo, característica necesaria para la introducción de variabilidad en la tarea y en el tipo de riesgo mediante la rotación.

8.2.4 Fase 4: selección de los trabajadores a rotar

Se eligieron trabajadores, de entre los que ocupaban los puestos seleccionados para rotar, que manifestaron su voluntad de participar en el plan de rotaciones. Todos los trabajadores seleccionados pertenecían a la misma categoría laboral. Además, se incluyeron en la selección a tres trabajadores con limitaciones en algunos movimientos y capacidades, con el objetivo de facilitar su integración en la organización.

8.2.5 Fase 5: elección de los criterios de generación de las agenda de rotación

Los problemas detectados en la planta y los criterios de diseño definidos para su

mejora fueron los siguientes:

- √ **Problema 1:** presencia de una elevada repetitividad de movimientos en los puestos:

Criterio de diseño 1: que los grupos musculares empleados en las tareas realizadas por el trabajador en las distintas rotaciones sean diferentes.

- √ **Problema 2:** existencia de una elevada monotonía de la actividad diaria de los trabajadores, falta de satisfacción de éstos y elevada tasa de absentismo:

Criterio de diseño 2: que el contenido de los trabajos a realizar suponga un cambio efectivo de actividad.

Criterio de diseño 3: que las preferencias de los trabajadores por determinados puestos sean tenidas en cuenta.

- √ **Problema 3:** necesidad de incorporación de trabajadores en periodo de rehabilitación o con limitaciones físicas o psíquicas:

Criterio de diseño 4: que las limitaciones de los trabajadores sean compatibles con los requerimientos de los puestos.

- √ **Problema 4:** rigidez en el sistema productivo:

Criterio de diseño 5: que las asignaciones que por motivos de organización no sean deseables sean vetadas.

8.2.6 Fase 6: definición y valoración de los indicadores o ítems

Para cuantificar en las agendas de rotación el grado de cumplimiento con el criterio de diseño relativo a la variación de la actividad de los grupos musculares (**criterio de diseño 1**), se definieron 19 indicadores o ítems, en lo sucesivo **ítems de movimiento**. Cada ítem de movimiento identificaba un determinado grupo muscular y un tipo de movimiento asociado.

Los ítems de movimiento fueron agrupados en 4 grupos musculares (Brazos/Codos, Cuello/Hombros, Manos/Dedos, Tronco/Espalda) (ver Tabla 8.1). Dicha agrupación se basó en la propuesta por el método de evaluación Sue Rodgers (ver punto 4.4.3) [Rodgers, 86b; Rodgers, 92], exceptuando el grupo Tobillos/Pies/Dedos. La exclusión de éste último grupo se debió a criterios de optimización de cálculo y se fundamentó en la escasa bibliografía existente sobre los TME localizados en los tobillos, pies y dedos.

Se utilizó el conteo de movimientos para determinar el nivel de repetitividad de cada grupo muscular y movimiento en cada puesto. Para ello se observaron varios ciclos de trabajo de cada puesto, calculando la frecuencia media por minuto de cada movimiento, asignado las puntuaciones según la Tabla 8.2.

Ítems de movimiento		
Brazos/Codos	Brazo	Abducción de brazo
		Extensión de brazo
	Codo	Flexión de brazo
Cuello/Hombros	Cuello	Flexión de codo
		Extensión de cuello
		Flexión de cuello
		Giro de cuello
Hombros	Hombros	Lateralización de cuello
		Elevación de hombros
Manos/Dedos	Dedos	Pinzar con los dedos
	Manos	Flexión de manos
		Extensión de manos
		Pronación/Supinación de manos
		Desviación Radial/Cubital de manos
Tronco/Espalda		Flexión de tronco
		Rotación de tronco
		Extensión de tronco
		Lateralización de tronco
		Flexión de tronco

Tabla 8.1: ítems de movimiento para cuantificar el cumplimiento del criterio de diseño 1.

8.2.6.1 Valoración de los ítems de movimiento para los puestos

La valoración de los ítems de movimiento para los puestos se realizó en base a las puntuaciones mostradas en la Tabla 8.2. Las puntuaciones eran mayores cuanto mayor era la frecuencia del movimiento en el grupo muscular representado por el ítem.

Frecuencia del movimiento por minuto	Calificación del movimiento	Nivel de riesgo
>8	Muy frecuente	3
3-7	Frecuencia media	2
1-2	Poco frecuente	1
0	Nunca	0

Tabla 8.2: Puntuación asignada a los movimientos requeridos en un puesto según su frecuencia.

A continuación se muestra las puntuaciones que se obtuvieron para los 19 ítems de movimiento en relación a los 18 puestos seleccionados para la rotación.

Ítem	Puesto																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Brazo-abducción	1	2	2	2	1	0	1	1	1	1	1	2	1	1	2	1	2	2
Brazo-extensión	0	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	2	1	1	1	1	2	2
Brazo-flexión	3	2	2	2	1	2	2	2	3	2	2	2	3	2	2	2	3	3
Codo-flexión	3	1	1	1	1	2	2	2	3	2	2	1	2	2	2	2	3	3
Cuello-extensión	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cuello-flexión	3	3	3	3	1	2	1	2	3	3	3	2	3	3	3	3	3	3
Cuello-giro	2	1	1	1	1	1	1	2	3	3	2	2	2	3	2	2	1	1
Cuello-lateralización	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Hombro-elevación	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
Dedos-pinzar	2	2	2	2	1	1	1	2	2	2	2	2	2	2	2	2	3	3
Mano-flexión	3	1	1	1	2	1	2	2	2	2	3	2	2	2	1	2	3	3
Mano-extensión	1	0	0	0	1	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1
Mano-giro	1	1	1	1	1	2	1	2	2	1	2	1	2	2	2	2	3	3
Mano-lateralización	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	1	1	1	1
Tronco-flexión	2	1	1	1	2	1	1	1	2	2	1	1	2	2	1	1	3	3
Tronco-giro	1	0	0	0	1	1	1	1	1	2	0	1	1	2	0	0	2	2
Tronco-lateralización	0	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1
Piernas-flexión	2	0	0	0	1	0	1	0	0	1	0	0	1	1	1	0	1	1

Tabla 8.3: Valoración de los ítems de movimientos para los 18 puestos seleccionados para la rotación.

8.2.6.2 Valoración de los ítems de movimiento para los trabajadores

La valoración de los ítems de movimiento para los trabajadores se realizó en base a descripciones cualitativas. Dichas descripciones expresaban sus capacidades para realizar diferentes tipos de movimientos con los 4 grupos musculares considerados. La Tabla 8.4 muestra las puntuaciones que fueron asignadas a los trabajador según su capacidad de movimiento.

A los ítems de movimiento se les asignaron valores entre 0 y 3, siendo la puntuación inversamente proporcional a la capacidad del trabajador de realizar el movimiento asociado con cada ítem. Así, durante la valoración de un determinado ítem, éste se valoró con un 0, si el trabajador no poseía limitación en el movimiento que representa, y con un 1 si la limitación era baja. Por otro lado, si la limitación era alta se le asignó un 2. Finalmente, si el trabajador no podía realizar el movimiento se indicó con una puntuación máxima de 3.

Capacidad de realizar el movimiento	Puntuación
No puede	3
Limitación alta	2
Limitación baja	1
Normal	0

Tabla 8.4: Puntuación de los ítems de movimiento según la capacidad del trabajador de realizar el movimiento.

A continuación se muestran las puntuaciones que fueron asignadas a los 18

trabajadores seleccionados para rotar para cada uno de los 19 ítems de movimiento.

Ítem	Trabajador																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Brazo-abducción	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Brazo-extensión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Brazo-flexión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo-flexión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cuello-extensión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
Cuello-flexión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Cuello-giro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Cuello-lateralización	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0
Hombro-elevación	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0
Dedos-pinzar	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mano-flexión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mano-extensión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mano-giro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Mano-lateralización	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tronco-flexión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	0	0	0
Tronco-giro	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	2	0	0	0	0
Tronco-lateralización	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	1	0	0	0	0
Piernas-flexión	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	0	0

Tabla 8.5: Valoración de los ítems de movimientos para los 18 trabajadores seleccionados para la rotación.

Sólo los trabajadores 12, 14 y 15 presentaban algún tipo de problema que les dificultaba, en diferente medida, algunos de los movimientos. En ninguno de los tres casos el equipo médico de la planta consideró que dichas dificultades supusieran la imposibilidad de realizar algún tipo de trabajo, siempre y cuando se minimizara la ejecución de dicho movimientos.

8.2.7 Fase 7: definición y valoración de capacidades

El equipo médico de la planta definió 27 ítems asociados a las capacidades de los trabajadores. Dichos ítems de capacidades fueron agrupadas en tres categorías: Capacidades Globales (Tabla 8.6), Capacidades Psíquicas (Tabla 8.7) y Capacidades de Comunicación (Tabla 8.8). Los ítems de capacidades pretendían cuantificar el criterio de diseño correspondiente a *“que las limitaciones de los trabajadores sean compatibles con los requerimientos de los puestos” (criterio de diseño 4)*.

En los ítems del grupo Capacidades Globales se incluyeron ítems que valoraban las actividades generales necesarias para desarrollar las tareas requeridas en los puestos.

Capacidades Globales (Ítem globales)
Estar de pie.
Estar sentado.
Andar.
Subir (escaleras, pendientes).
Trepar (con brazos y piernas).
Coordinar movimientos.
Ejercer fuerza estando quieto (levantar/empujar/tirar).
Ejercer fuerza desplazándose (transportar, empujar, tirar).
Conducir vehículos.
Trabajar en altura.
Utilizar equipos de protección personal.
Permanecer en espacios confinado/restringido.

Tabla 8.6: Ítems de capacidades correspondientes al grupo Capacidades Globales.

Capacidades Psíquicas (ítems psíquicos)
Razonar / tomar decisiones complejas.
Responsabilidad.
Cooperación/trabajo con otros.
Atención/Concentración.
Iniciativa/Autonomía.

Tabla 8.7: Ítems de capacidades correspondientes a las Capacidades Psíquicas.

Capacidades de Comunicación (ítems de comunicación)
Ver de lejos.
Ver colores.
Oír.
Localizar la dirección del sonido.
Sensibilidad táctil.
Oler/Saborear.
Escribir.
Hablar.
Usar un teclado.
Usar un ratón.

Tabla 8.8: Ítems de capacidades del grupo Capacidades de Comunicación.

8.2.7.1 Valoración de los ítems correspondientes a las Capacidades Globales, Psíquicas y de Comunicación para los puestos

La valoración de los ítems de las Capacidades Globales, Psíquicas y de Comunicación de los puestos se realizó indicando para cada capacidad (o ítem) si era necesaria, o no, para desarrollar adecuadamente las tareas requeridas en cada puesto.

La Tabla 8.9 muestra las puntuaciones que fueron empleadas para valorar las Capacidades para los puestos.

Capacidad Global, Psíquica o de Comunicación	Puntuación	Representación gráfica
Necesaria	1	•
No necesaria	0	

Tabla 8.9: Tabla de puntuación de los ítems correspondientes a las Capacidades Globales, Psíquicas y de Comunicación de los puestos.

A continuación se muestra el resultado que se obtuvo de la valoración de los 27 ítems correspondientes a las Capacidades para los 18 puestos.

		Puesto																		
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	
C. globales	Permanecer de pie	•					•	•	•	•	•		•	•		•	•	•	•	
	Subir (escaleras, pendientes).	•					•													
	Trepar (con brazos y piernas)						•													
	Coordinar movimientos	•				•	•	•	•	•	•			•		•	•	•	•	
	Ejercer fuerza estando quieto (levantar/empujar/tirar)	•				•	•	•	•	•	•		•	•			•	•	•	
	Ejercer fuerza desplazándose (transportar, empujar, tirar)	•					•													
	Conducir vehículos					•														
	Trabajar en altura						•													
C. psíquicas	Razonar / tomar decisiones complejas	•	•	•	•	•						•					•	•	•	
	Responsabilidad Iniciativa/Autonomía	•	•	•	•	•	•					•					•	•	•	
C. comunicación	Ver de lejos	•				•	•	•	•	•	•								•	•
	Oír	•				•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•	•
	Localizar la dirección del sonido	•				•	•												•	•
	Escribir		•	•	•						•						•	•		
	Usar un teclado		•	•	•															
Usar un ratón		•	•	•																

Tabla 8.10: Valoración de los ítems de Capacidades para los 18 puestos.

8.2.7.2 Valoración de los ítems correspondientes a las Capacidades Globales, Psíquicas y de Comunicación para los trabajadores

Los ítems correspondientes a las Capacidades Globales, Psíquicas y de Comunicación para los trabajadores fueron valorados indicando, para cada uno de ellos, si poseía limitación, o no, en dicha capacidad. La Tabla 8.11 muestra el sistema de puntuación y la representación gráfica que fue aplicada.

Capacidad Global, Psíquica o de Comunicación	Puntuación	Representación gráfica
Sin limitación	0	
Limitación alta	1	•

Tabla 8.11: Tabla de puntuación de los ítems correspondientes a las Capacidades de los trabajadores.

A continuación se muestra la valoración que se realizó de los 27 ítems correspondientes a las Capacidades para los 18 trabajadores seleccionados.

		Trabajador																	
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
C. globales	Permanecer de pie												•						
	Subir (escaleras, pendientes).												•		•	•			
	Trepar (con brazos y piernas)												•		•	•			
	Coordinar movimientos												•						
	Ejercer fuerza estando quieto (levantar/empujar/tirar)												•						
	Ejercer fuerza desplazándose (transportar, empujar, tirar)												•		•	•			
	Conducir vehículos												•	•	•				
	Trabajar en altura												•		•	•			
C. psíquicas	Razonar / tomar decisiones complejas																		
	Responsabilidad Iniciativa/Autonomía																		
C. comunicación	Ver de lejos													•					
	Oír																		
	Localizar la dirección del sonido																		
	Escribir																		
	Usar un teclado Usar un ratón																		

Tabla 8.12: Valoración de los ítems de capacidades para los 18 trabajadores.

Sólo los trabajadores 12, 13, 14 y 15 presentaban limitaciones en algunas capacidades. Por ejemplo, tal y como se observa en la Tabla 8.12, el trabajador 13 tenía ciertos problemas de visión lejana que hacían recomendable que no condujera vehículos.

8.2.8 Fase 8: Recopilación de asignaciones vetadas y preferencias de los trabajadores

La Tabla 8.14 contiene para cada uno de los 18 trabajadores a qué puestos preferían no ser asignados. La recopilación de dichas preferencias pretendían

cuantificar el criterio de diseño correspondiente a “que las preferencias de los trabajadores por determinados puestos sean tenidas en cuenta” (criterio de diseño 3). La puntuación que se adoptó para indicar dichas preferencias de los trabajadores se indica en la siguiente tabla.

Asignación	Puntuación	Representación gráfica
Deseada	0	
No deseada	1	•

Tabla 8.13: Tabla de puntuación de las asignaciones no deseadas.

	Puesto																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Trabajador 1		•	•	•														
Trabajador 2						•												
Trabajador 3		•	•	•		•												
Trabajador 4									•	•			•					
Trabajador 5						•			•	•			•					
Trabajador 6																		
Trabajador 7		•	•	•													•	•
Trabajador 8																		
Trabajador 9																		
Trabajador 10									•	•			•				•	•
Trabajador 11																		
Trabajador 12	•					•	•		•	•			•			•		
Trabajador 13	•				•	•				•							•	
Trabajador 14	•					•			•	•			•					
Trabajador 15	•					•												
Trabajador 16													•				•	•
Trabajador 17																		
Trabajador 18		•	•	•		•												

Tabla 8.14: Asignaciones a puestos no deseadas por los 18 trabajadores.

Parte de las restricciones del problema se obtuvieron del cruce de la información sobre las limitaciones en las capacidades de los trabajadores (Tabla 8.10) con la recopilada acerca de las capacidades requeridas en los puestos (Tabla 8.12). A dichas restricciones se les sumaron las derivadas de las preferencias de los trabajadores (Tabla 8.14) y de las limitaciones impuestas por la organización (resto de penalizaciones de la Tabla 8.15). Las asignaciones que finalmente se decidió penalizar se muestran en la Tabla 8.15.

	Puesto																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Trabajador 1		•	•	•														
Trabajador 2						•												
Trabajador 3		•	•	•		•												
Trabajador 4									•	•			•					
Trabajador 5						•			•	•			•					
Trabajador 6																		
Trabajador 7		•	•	•													•	•
Trabajador 8																		
Trabajador 9																		
Trabajador 10									•	•			•				•	•
Trabajador 11																		
Trabajador 12	•				•	•	•	•	•	•		•	•		•	•	•	•
Trabajador 13	•				•	•	•		•	•							•	•
Trabajador 14	•				•	•			•	•			•					
Trabajador 15	•					•												
Trabajador 16													•				•	•
Trabajador 17																		
Trabajador 18		•	•	•		•												

Tabla 8.15: Asignaciones vetadas.

8.2.9 Análisis de las valoraciones de los puestos y trabajadores

Tras la valoración de los ítems de movimiento para los puestos y los trabajadores, se comprobó que el ítem *extensión del tronco* obtenía la misma valoración para todos los puestos y para todos los trabajadores, por lo que se decidió excluirlo del proceso de cálculo. Como resultado de dicha eliminación, el número total de ítems de movimiento finalmente considerado como *inputs* del AG pasó a ser de 17. De los ítems de 'Capacidades' se decidió eliminar aquéllos en los que todos los trabajadores habían obtenido la calificación de 'Sin limitación', en concreto los ítems correspondientes a: *estar sentado*, *andar*, *utilizar equipos de protección personal*, *permanecer en espacios confinados/restringidos*, *cooperación/trabajo con otros*, *atención/concentración*, *ver colores*, *sensibilidad táctil*, *oler/saborear y hablar*.

En relación a la consecución del criterio de diseño relativo a "que el contenido de los trabajos a realizar suponga un cambio efectivo de actividad" (**criterio de diseño 2**), se decidió penalizar asignaciones consecutivas del mismo trabajador al mismo puesto. La penalización debía aplicarse cuando se superara un tiempo máximo de permanencia en el mismo puesto superior a 2 horas. Dicho valor fue indicado en el parámetro del AG t_{\max} (ver Tabla 8.16). De éste modo se pretendía favorecer la ocupación de puestos diferentes con la rotación.

8.2.10 Fase 9: determinación del número y duración de las rotaciones y las pausas

La duración de la jornada laboral era de siete horas, con una única pausa de dos horas a mediodía para el almuerzo. El planificador, en base a las restricciones impuestas por el sistema productivo y la organización, decidió establecer tres rotaciones de dos horas de duración y una rotación final de una hora, haciendo coincidir el comienzo de la tercera rotación con el final de la pausa establecida para el almuerzo de 2 horas.



Figura 8.2: Duración y distribución de las rotaciones y las pausas.

8.3. Fase 10: cálculo de agendas de rotación mediante la aplicación del AG

Como fase previa a la aplicación del AG para la obtención de agendas de rotación sobre las que validar la metodología propuesta fue necesario determinar los valores de los parámetros con los que era posible obtener mejores soluciones para el problema planteado.

Tras la **fase de parametrización** del AG, y en base a los resultados obtenidos con la experimentación, se realizó un análisis para validar la eficacia del AG para obtener agendas de rotación que cumplieran con los criterios de diseño del problema propuesto y con las restricciones impuestas.

Establecidos los parámetros del AG, se comprobó la efectividad del **parámetro de uniformidad (u)** para equilibrar las asignaciones de los trabajadores a los puestos, es decir, para obtener soluciones donde las aportaciones de las asignaciones de los trabajadores a la aptitud de la solución estuvieran balanceadas. Y por consiguiente, de este modo, se evitara la existencia de trabajadores asignados a puestos exigentes en todas las rotaciones, así como la existencia de trabajadores asignados siempre a puestos ligeros.

Debido a la gran cantidad de **preferencias** recopiladas en el problema propuesto, inicialmente se decidió no considerarlas en los experimentos de la fase de parametrización del algoritmo. Posteriormente, se llevó a cabo el estudio del efecto de la inclusión de dichas preferencias sobre la aptitud de las soluciones alcanzadas.

Por último, se realizó una variación del **número, duración y distribución de las pausas** definidas en el problema planteado, con el objetivo de analizar el efecto de dicha variación sobre la bondad de las soluciones proporcionadas por el AG.

8.3.1 Parametrización del AG

El número de parámetros que determinan el funcionamiento del AG propuesto es elevado, dado que a los parámetros habituales de cualquier algoritmo de este tipo (número de generaciones, individuos de la población, probabilidad de cruce y mutación) se añaden parámetros específicos de la metodología propuesta (intensidad de la mutación, valor superior, número de generaciones entre búsquedas locales, etc.).

Como se ha indicado (ver capítulo 6), la selección correcta de los valores de los parámetros del AG es compleja, ya que existen interacciones evidentes entre los distintos parámetros, por ejemplo, entre la actuación de los operadores genéticos y el tamaño de la población [Diego-Mas, 06], que convierten la parametrización en un complicado problema de optimización no lineal [Grefenstette, 86]. Además, los parámetros dependen fuertemente del tipo de función de aptitud empleada y del tamaño y características del problema. Por ello, fue necesario plantear la determinación empírica de los parámetros de ejecución para el problema planteado.

Dada la complejidad del problema de la parametrización, no se trató de obtener valores óptimos de los parámetros, sino órdenes de magnitud, intervalos de variación a partir de los cuales realizar los ajustes necesarios en cada problema.

8.3.2 Parámetros del AG dependientes de las especificaciones del problema o *inputs*

En el presente apartado se recopilan los *inputs* derivados de las especificaciones del problema descritas en las fases precedentes.

El número de trabajadores (n_{wor}) y puestos que fueron seleccionados para rotar fue 18. El número de rotaciones se estableció en 4 (n_{rot}), con duraciones de 2 horas las 3 primeras rotaciones (t_1 , t_2 , t_3) y de 1 hora la última rotación (t_4), habiendo tras la segunda rotación (t_2) una pausa para el almuerzo de 2 horas (p_1).

El número de ítems de movimiento que se definieron fueron 17 (n_{it}), ya que, tal y como se ha indicado (ver 8.2.9), aunque se definieron inicialmente 18 ítems de movimiento (ver 8.2.6), el ítem de *extensión de tronco* obtuvo la misma puntuación para todos los trabajadores y se eliminó del proceso de optimización.

El equipo médico de la planta consideró que todos los ítems de movimiento tenían la misma importancia. Dicha circunstancia quedó reflejada en la asignación de un valor de 1 a los coeficientes de ponderación de los ítems (C_i) para cada ítem de movimiento (ver Tabla 8.16). Dicho equipo médico también decidió que un trabajador acumulaba fatiga en un puesto si éste superaba la puntuación de 1 en cada ítem (parámetro *tre* del AG). Por último, se fijó, en base a las puntuaciones determinadas para los ítems de movimiento, un valor inicial del parámetro f_{red} (factor de reducción) de 3. Cabe recordar que dicho parámetro indica en qué medida el AG considera que la tarea desarrollada en los puestos precedentes afecta al trabajador y por tanto a la fatiga acumulada. Valores elevados del parámetro suponen una menor influencia del historial previo de puestos ocupados y viceversa.

La Tabla 8.16 muestra los parámetros para la ejecución del AG que fueron obtenidos en base a las especificaciones del problema. Además de dichos parámetros, el AG debía tener presente para la aplicación de penalizaciones (ver 7.14.4) las asignaciones vetadas recopiladas en la Fase 9. No obstante, tal y como se ha indicado, los vetos correspondientes a las preferencias de los trabajadores no fueron considerados en la fase de parametrización, realizándose un análisis posterior. En el apartado 8.3.7 se analiza el efecto de la inclusión de las preferencias sobre la bondad de las soluciones alcanzadas por el AG. Finalmente, la Tabla 8.17 contiene las asignaciones no deseadas que fueron aplicadas en la fase de parametrización.

Acronimo	Nombre del parámetro	Valor
n_{wor}	Número de trabajadores y puestos	18
n_{rot}	Número de rotaciones	4
n_{it}	Número de ítems considerados en la fórmula de evaluación	18
$C_1...C_{18}$	Coefficientes de ponderación de los ítems	1
f_{red}	Factor de reducción	3
tre	Valor umbral	1
t_1	Duración de la Rotación 1	2 horas
t_2	Duración de la Rotación 2	2 horas
t_3	Duración de la Rotación 3	2 horas
t_4	Duración de la Rotación 4	1 hora
p_1	Duración de la pausa 1 (almuerzo)	2 horas
t_{max}	Tiempo máximo consecutivo de permanencia en puestos similares	2 horas

Tabla 8.16: Parámetros del AG derivados de las especificaciones del problema.

	Puesto																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Trabajador 1																		
Trabajador 2																		
Trabajador 3																		
Trabajador 4																		
Trabajador 5																		
Trabajador 6																		
Trabajador 7																		
Trabajador 8																		
Trabajador 9																		
Trabajador 10																		
Trabajador 11																		
Trabajador 12	•				•	•	•	•	•	•		•	•		•	•	•	•
Trabajador 13	•				•	•	•		•	•							•	•
Trabajador 14	•				•	•												
Trabajador 15	•					•												
Trabajador 16																		
Trabajador 17																		
Trabajador 18																		

Tabla 8.17: Asignaciones vetadas correspondientes a las limitaciones de los trabajadores empleadas en la parametrización del AG.

8.3.3 Parámetros del AG determinados experimentalmente

Los parámetros correspondientes al número de individuos de cada población (n_i), la probabilidad de cruce (p_c) y la probabilidad de mutación (p_m), constituyen los parámetros básicos comunes a los algoritmos genéticos. Para el establecimiento del rango de variación del parámetro n_i se decidió probar el enfoque propuesto por [Grefenstette, 86], que tamaños de población del orden de 30 individuos, y valores próximos a la propuesta de [De Jong et al., 90], que recomienda valores mayores. Para ello, se varió el parámetro n_i en 20, 50 y 80 individuos. Respecto al parámetro probabilidad de cruce (p_c), dado que el AG propuesto emplea la definición de cruce que propone [Diego-Mas, 06], se estableció su variación en 0,90; 0,6 y 0,3, con el objetivo de comprobar el efecto de probabilidades de cruce elevadas y bajas. Respecto al parámetro probabilidad de mutación (p_m), que indica el número de individuos que mutarán, se decidió su variación entre los valores 0,1; 0,3 y 0,5, con el objetivo de analizar el efecto de mutaciones elevadas y bajas en los resultados alcanzados por el AG. Para el parámetro i_m (intensidad de mutación) se decidió probar su efecto haciendo variar su valor entre 1 y 2.

Respecto al parámetro correspondiente al número de generaciones (**Gen**), se optó por realizar 10 ejecuciones del AG con un número elevado de generaciones (10000). Posteriormente, se fijó dicho parámetro en función de las generaciones en las que aparecieron las mejores soluciones alcanzadas en las 10 ejecuciones.

Los parámetros definidos en el AG para la aplicación del proceso de optimización local, **g** (periodo de intensificación de la búsqueda) y **vs** (valor superior), también se probaron a partir de la parametrización correspondiente a la mejor solución encontrada en los experimentos precedentes. El objetivo de dicha prueba fue analizar si la realización de búsquedas locales proporcionaba mejores soluciones que la mejor solución alcanzada sin búsqueda local. Para ello, se estableció un valor de **vs** = 2 y periodos de intensificación (**g**) de 150 y 300.

Acrónimo	Nombre del parámetro	Rango de variación
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	10000
n_i	Individuos en cada generación	20, 50 y 80
p_c	Probabilidad de cruce	0,3; 0,6 y 0,90
p_m	Probabilidad de mutación	0,1; 0,3 y 0,5
i_m	Intensidad de mutación	1 y 2
u	Exponente de la función de evaluación	1 y 2
	Estrategia elitista	Inactiva, Activa
le_1	Intensidad del elitismo	1
	Intensificación de la búsqueda	Inactiva, Activa
vs	Valor superior	2
g	Periodo de intensificación de la búsqueda	Inactivo, 10, 50 y 100

Tabla 8.18: Valores de experimentación de los parámetros del AG.

8.3.4 Descripción de los experimentos

Debido al carácter no determinista de las técnicas metaheurísticas, es un procedimiento habitual en la bibliografía que cada experimento sea realizado varias veces, obteniéndose conclusiones sobre los resultados medios obtenidos. Se evita de esta forma que dichas conclusiones obedezcan a resultados circunstanciales especialmente buenos, o substancialmente peores de lo habitual. La realización de varias ejecuciones aumenta la fiabilidad de los resultados, si bien, aumenta el tiempo global de cómputo. Así pues se decidió realizar para cada experimento un total de 10 ejecuciones.

A continuación se describen los experimentos planteados:

E₁: el objetivo del primer experimento era determinar el tiempo de cálculo o número de generaciones necesarias (**Gen**) para que el AG alcanzara una solución subóptima aceptable, sin que se registrase mejora de dicha solución tras un número elevado de generaciones posteriores. Para ello, se fijó el valor de **Gen** en 10000 generaciones. El resto de parámetros se estableció a los valores mostrados en la Tabla 8.19 en la columna **E₁**.

E₂: fijado el valor del parámetro **Gen** en 4000 generaciones, en base a los resultados obtenidos en **E₁**, se trató de validar que la disminución en el número de generaciones no empeoraba los resultados, logrando, simultáneamente, un menor tiempo de ejecución. El resto de parámetros se estableció a los valores mostrados en la Tabla 8.19 en la columna **E₂**.

E₃: fijado el valor del parámetro **Gen** en 4000 generaciones, en base a los resultados obtenidos en **E₂**, se pretendió comprobar el efecto de la disminución del tamaño de la población sobre los resultados proporcionado por el AG. Para ello, se redujo el parámetro n_i de 50 a 20. El resto de parámetros se establecieron a los valores mostrados en la Tabla 8.19 en la columna **E₃**.

E₄: el experimento trataba de comprobar el efecto del aumento del tamaño de la población sobre los resultados proporcionado por el AG. Para ello, se incrementó el valor del parámetro n_i de 50 a 80 individuos. El resto de parámetros se estableció a los valores mostrados en la Tabla 8.19 en la columna **E₄**.

E₅: en éste experimento, fijado el tamaño de la población (n_i) al valor que había proporcionado la mejor solución en los experimentos precedentes, se trató de comprobar el efecto de la disminución de la probabilidad de cruce de 0,6 a 0,3. El resto de parámetros se estableció a los valores mostrados en la Tabla 8.19 en la columna **E₅**.

E₆: en éste experimento se comprobó el efecto del aumento de la probabilidad de cruce de 0,6 a 0,90, manteniendo los parámetros fijados en la columna **E₅** de la Tabla 8.19.

E₇: en éste experimento, fijada la probabilidad de cruce p_c al valor que había proporcionado la mejor solución en los experimentos precedentes. Se trató de comprobar el efecto de la disminución de la probabilidad de mutación pasando de un

valor de 0,3 a 0,1. El valor de la intensidad de la mutación fue fijado en $i_m=1$. El resto de parámetros se estableció a los valores mostrados en la Tabla 8.20 en la columna **E₇**.

E₈: se trató de comprobar el efecto del aumento de la probabilidad de mutación p_m pasando de un valor de 0,3 a 0,5. El valor de la intensidad de la mutación fue fijado en $i_m=1$. El resto de parámetros se estableció a los valores mostrados en la Tabla 8.20 en la columna **E₈**.

E₉: fijado el parámetro p_m al valor con el cual se había obtenido la mejor solución en los experimentos precedentes, se pretendió comprobar el efecto del incremento de la intensificación de la mutación, pasando dicho parámetro de $i_m=1$ a $i_m=2$. El resto de parámetros se estableció a los valores mostrados en la Tabla 8.20 en la columna **E₉**.

E₁₀: en este experimento se pretendió comprobar el efecto de la intensificación local de la búsqueda en los alrededores de la élite o mejor solución encontrada hasta el momento. Para ello se fijó el valor del parámetro vs (valor superior) a 2, y se estableció el periodo de intensificación de la búsqueda en $g=300$. El resto de parámetros se fijó a los valores mostrados en la Tabla 8.20 la columna **E₁₀**.

E₁₁: manteniendo los valores indicados en la columna **E₁₁** de la Tabla 8.20, se comprobó el efecto del aumento de la frecuencia de las búsquedas locales. Para ello se disminuyó el valor de g a 150.

E₁₂: a partir de los parámetros correspondientes a la mejor solución encontrada en los experimentos precedentes, mostrados en la columna **E₁₂** de la Tabla 8.20, se comprobó el efecto de la aplicación de la estrategia elitista desactivando dicha opción. Para ello, la intensidad del elitismo se estableció en $le_1=0$.

Los parámetros que fueron establecidos para cada experimento de parametrización se muestran en la Tabla 8.19 y Tabla 8.20.

Acronimo	Nombre del parámetro	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	10000	4000	4000	4000	4000	4000
n_i	Individuos en cada generación	50	50	20	80	50	50
p_c	Probabilidad de cruce	0,6	0,6	0,6	0,6	0,3	0,90
p_m	Probabilidad de mutación	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
i_m	Intensidad de mutación	1	1	1	1	1	1
u	Exponente de la función de evaluación	1	1	1	1	1	1
	Estrategia elitista	Activa	Activa	Activa	Activa	Activa	Activa
le₁	Intensidad del elitismo	1	1	1	1	1	1
	Intensificación de la búsqueda	Inactiva	Inactiva	Inactiva	Inactiva	Inactiva	Inactiva
vs	Valor superior	-	-	-	-	-	-
g	Nº generación intensificación	-	-	-	-	-	-

Tabla 8.19: Parámetros empleados en los experimentos de parametrización E₁ a E₆.

Acronimo	Nombre del parámetro	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁	E ₁₂
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000	4000	4000	4000	4000	4000
n_i	Individuos en cada generación	50	50	50	50	50	50
p_c	Probabilidad de cruce	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6	0,6
p_m	Probabilidad de mutación	0,1	0,5	0,3	0,3	0,3	0,3
i_m	Intensidad de mutación	1	1	2	1	1	1
u	Exponente de la función de evaluación	1	1	1	1	1	1
	Estrategia elitista	Activa	Activa	Activa	Activa	Activa	Inactiva
le₁	Intensidad del elitismo	1	1	1	1	1	0
	Intensificación de la búsqueda	Inactiva	Inactiva	Inactiva	Activa	Activa	Inactiva
vs	Valor superior	-	-	-	2	2	-
g	Nº generación intensificación	-	-	-	300	150	-

Tabla 8.20: Parámetros empleados en los experimentos de parametrización E₇ a E₁₂.

8.3.5 Exposición y análisis de los resultados de los experimentos

Tras las 10 ejecuciones de cada experimento los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 8.21 y Tabla 8.22. De cada experimento para las 10 ejecuciones se recogieron la aptitud media, mínima y máxima. También se registró la generación en la que, en promedio, se había localizado la mejor solución (solución sub-óptima) en cada experimento, la Figura 8.3 muestra gráficamente dichos resultados. Además, se registró el valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución. Así como el valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución. Una exposición detallada de todos los resultados obtenidos puede consultarse en el ANEXO 1.

	E ₁	E ₂	E ₃	E ₄	E ₅	E ₆
Aptitud media	555,27	555,62	556	556,43	556	555,49
Aptitud máxima	556,44	557,29	557,86	558,9	558,27	557,9
Aptitud mínima	554,2	552,63	554,21	553,17	554,58	553,51
Generación promedio de la solución óptima media	5487	3008	3244	3426	3499	3281
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	30,85	30,86	30,89	30,91	30,89	30,86
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,41	6,65	6,587	6,85	6,72	6,9

Tabla 8.21: Resumen de los resultados de los experimentos E₁ al E₆.

	E ₇	E ₈	E ₉	E ₁₀	E ₁₁	E ₁₂
Aptitud media	555,39	555,62	556,07	555,45	555,24	584,68
Aptitud máxima	556,53	556,93	557,9	556,91	557,46	587,2
Aptitud mínima	553,77	554,22	552,97	554,21	553,28	581,69
Generación de la solución óptima media	3109	2896	3059	1780	1875	2060
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	30,85	30,87	30,89	30,86	30,85	32,48
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,65	6,60	6,39	6,79	6,52	8,72

Tabla 8.22: Resumen de los resultados de los experimentos E₇ al E₁₂.

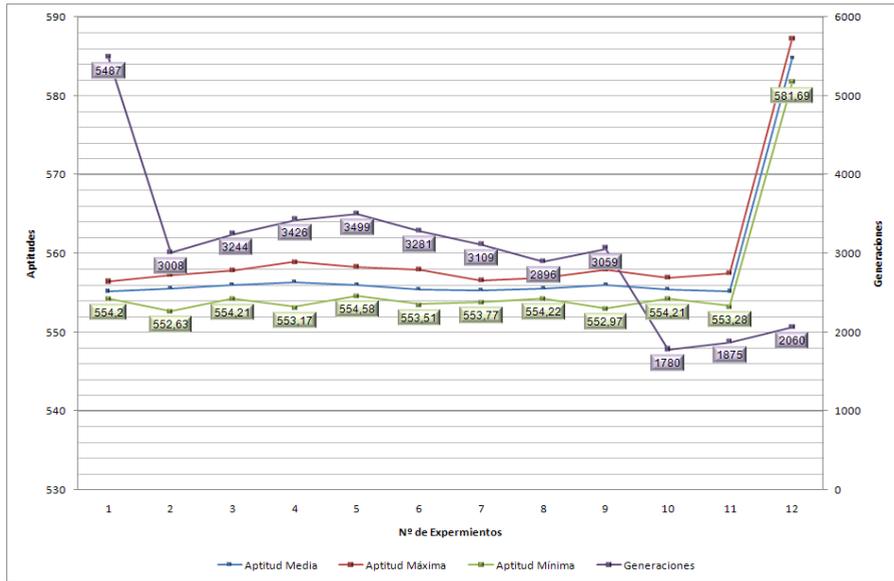


Figura 8.3: Valor de la aptitud media, máxima y mínima alcanzada en los experimentos E_1 al E_{12} y generación media de la mejor solución alcanzada.

En el experimento E_1 se constató que a partir de la generación 4000 no se producían mejoras significativas en la aptitud de las soluciones alcanzadas que compensaran un mayor tiempo de cálculo (Figura 8.5).

En el experimento E_1 , de media, se alcanzó la mejor solución en la generación 5487, siendo la generación más tardía en la que se logró una mejor solución la 9825, correspondiente a la ejecución nº 3 del experimento. En dicha ejecución, el valor de la aptitud obtenida fue de 556,44. Dicho valor correspondía al peor valor de las aptitudes alcanzadas en las 10 ejecuciones, siendo, además, superior al valor medio de las mejores aptitudes (555,27) obtenidas en las 10 ejecuciones. Por lo tanto, el mayor tiempo de cálculo no se reflejaba en una mejora de la aptitud.

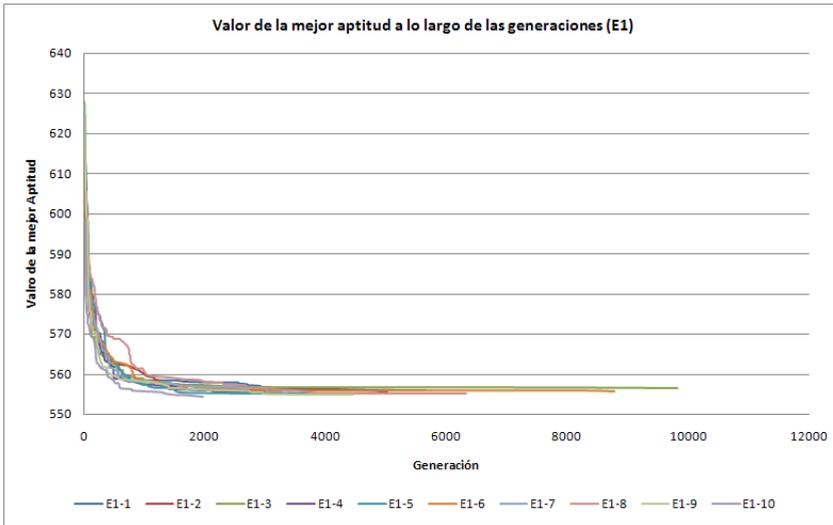


Figura 8.4: valor de la mejor aptitud a lo largo de las generaciones en el experimento E_1 .

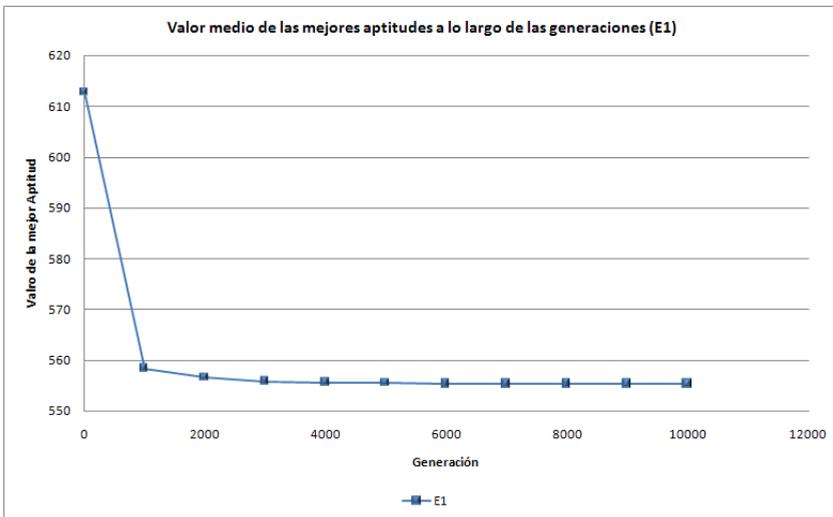


Figura 8.5: valor medio de las mejores aptitudes a lo largo de las generaciones en el experimento E_1 .

En el experimento E_2 se comprobó que la disminución del número de generaciones de 10000 a 4000 no suponía un empeoramiento de los resultados obtenidos. En dicho experimento se alcanzó una aptitud mínima de 552,63 (Figura 8.6), menor que la mejor encontrada en el experimento E_1 de 554,2. Dicho resultado permitió confirmar que la reducción del número de generaciones a 4000 no limitaba la capacidad del AG para alcanzar buenas soluciones. Además, el tiempo de

390

ejecución empleado en E_2 (21 minutos 35 segundos) fue sustancialmente menor que el empleado en la optimización del experimento E_1 (54 minutos 58 segundos), en un PC equipado con un procesador de 1,81Ghz y 1 GB de R.A.M.

En el experimento E_1 se obtuvieron 818 mejoras de la aptitud a lo largo de las generaciones de las 10 ejecuciones, y en el experimento E_2 , a pesar de reducirse el número de generaciones, se mejoró la aptitud 784 veces entre todas las generaciones de las 10 ejecuciones.

En base a los resultados obtenidos en el experimento E_2 , se decidió fijar el parámetro “número de generaciones” en 4000 para el resto de experimentos.

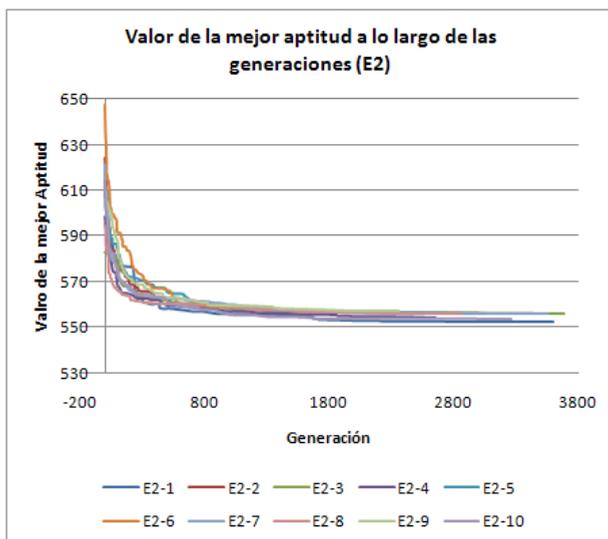


Figura 8.6: valor de la mejor aptitud a lo largo de las generaciones en el experimento E_2 .

Los resultados de los experimentos E_3 y E_4 , planteados para comprobar la influencia del número de individuos en la bondad de las soluciones obtenidas, revelaron que un menor número de individuos (20 en el experimento E_3) suponía una menor diversidad en la población y, por tanto, se alcanzaban peores resultados. En E_3 se obtuvo un valor de la mejor aptitud de 554,21, frente a la aptitud de 552,63 obtenida en E_2 , bajo las mismas condiciones de ejecución. Por otra parte, el aumento del número de individuos de 50 a 80 (E_4) supuso una mejora del resultado obtenido en el experimento E_3 (de 554,21 a 553,17). No obstante, no mejoró el resultado obtenido en el experimento E_2 (552,63). La interpretación de dicho resultado es complicada dado que la mayor diversidad genética debería significar una ventaja evolutiva, y por tanto, mejores aptitudes. Así pues, sería necesario analizar con mayor precisión si el resultado alcanzado es debido a la influencia de otros parámetros, como por ejemplo, operadores genéticos muy activos, para poder obtener conclusiones sobre el comportamiento del algoritmo frente a cambios en el tamaño de la población. Finalmente, se decidió fijar el número de individuos en 50. Dicho valor correspondía al utilizado en el experimento E_2 que había alcanzado la

mejor aptitud hasta el momento.

La variación de los valores de los operadores genéticos en los experimentos E_5 a E_9 puso de relieve que la disminución de la actuación del operador de cruce empeoraba los resultados obtenidos. Sin embargo, el mayor incremento probado (0,9) en el experimento E_6 , no permitió alcanzar una solución mejor que la obtenida con el experimento E_2 , con un valor de la probabilidad de cruce de 0,6. No obstante, sí se mejoró el resultado obtenido con una probabilidad de cruce baja (0,3) en el experimento E_5 .

Respecto a la variación del operador mutación, en el experimento E_8 , se observó que tanto el aumento como la disminución de la probabilidad de mutación, respecto al valor utilizado en el experimento E_2 , suponía el empeoramiento de los resultados obtenidos. Ello podría deberse a que un valor bajo de la probabilidad de mutación (0,1 en el experimento E_7) puede suponer introducir una escasa diversificación en la población, mientras que valores elevados de la probabilidad de mutación (0,5 en el experimento E_5) puede derivar en un comportamiento errático del algoritmo. Finalmente, el incremento de la intensidad de la mutación a 2 en el experimento E_9 , empeoró el resultado con respecto al obtenido con una intensidad de 1 en E_2 , bajo las mismas condiciones. Dicho experimento contribuyó a confirmar que el resto de condiciones de ejecución coincidentes con las del experimento E_2 , permitían al algoritmo alcanzar los mejores resultados, ya que se obtenía un valor de la aptitud cercano al alcanzado en E_2 y mejor que el obtenido en el resto de experimentos.

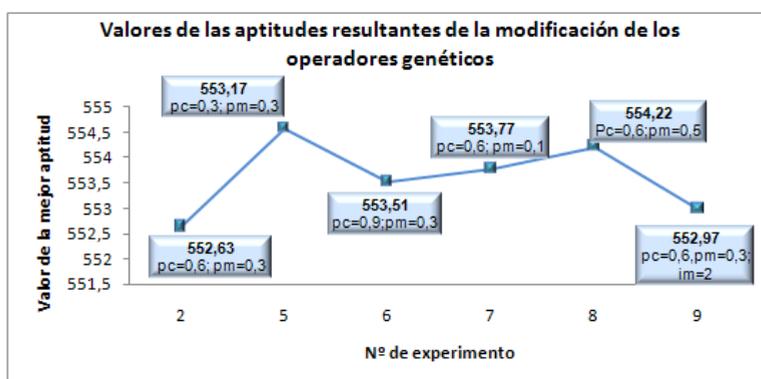


Figura 8.7: Variación de las mejores aptitudes al modificar los valores de los operadores genéticos.

Se consideró que los resultados obtenidos con la intensificación de la búsqueda en el entorno de la mejor solución en los experimentos E_{10} y E_{11} , no justificaba, en el problema propuesto, su aplicación, dado que los resultados alcanzados no mejoraban el valor de la aptitud obtenido en el experimento E_2 . Además, tampoco mejoraban sustancialmente el valor de la aptitud logrado en el resto de experimentos. Sin embargo, si se observó que en dichos experimentos (E_{10} y E_{11}) se reducía considerablemente la generación media en la que se alcanza la mejor solución. Dicha reducción indicaría que la aplicación de la búsqueda local hace al

algoritmo converger hacia un óptimo local con mayor rapidez, y por tanto, su aplicación y el reajuste del parámetro **Gen** permitirían obtener soluciones al problema, si bien no mejores, si en menor tiempo.

Por último, el experimento **E₁₂** dejó patente la efectividad de la estrategia elitista utilizada en el algoritmo. La inactividad de la estrategia elitista puso de relieve la sensibilidad del algoritmo a dicho parámetro. El resultado de la mejor aptitud obtenida sin estrategia elitista (581,69) fue significativamente mayor que el alcanzado en el resto de experimentos. Además, también aumentó, respecto al resto de experimentos, el valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución (32,48), y el valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución (8,72).

Tras los experimentos realizados se observó que el algoritmo resultaba, en general, poco sensible a pequeñas variaciones en los parámetros. Se puede obtener, por tanto, como primera conclusión, una elevada robustez del algoritmo frente a variaciones en los parámetros de ejecución. En todos los casos el algoritmo fue capaz de generar agendas de rotación sujetas a las restricciones impuestas por el problema planteado, si bien, fue la parametrización del experimento **E₂** la que permitió alcanzar la solución con la mejor aptitud de entre las alcanzadas en los 12 experimentos realizados. Por tanto, se decidió emplear dicha parametrización para la realización del resto de experimentos destinados a validar los resultados proporcionados por el AG (ver Tabla 8.23). Con todo, es necesario recordar que dicha parametrización es válida únicamente para el problema planteado. No obstante, la robustez del algoritmo permite aventurar que servirá también como primera aproximación en la búsqueda de la parametrización correcta de otros problemas.

Fijados los parámetros a los empleados en el **E₂**, y dado que en dicho experimento se había logrado la mejor aptitud hasta el momento, se decidió emplear sus resultados como referencia para valorar las soluciones de los experimentos siguientes.

Acrónimo	Nombre del parámetro	Valor
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
n_i	Individuos en cada generación	50
p_c	Probabilidad de cruce	0,6
p_m	Probabilidad de mutación	0,3
i_m	Intensidad de mutación	1
u	Exponente de la función de evaluación	1
	Estrategia elitista	Activa
le₁	Intensidad del elitismo	1
	Intensificación de la búsqueda	inactiva
vs	valor superior	-
g	Número de generación para la intensificación de la búsqueda	-

Tabla 8.23: Valores de los parámetros resultantes de la fase parametrización.

8.3.6 Efecto del parámetro de uniformidad (u) sobre los resultados del AG

A partir de los valores de los parámetros fijados en la fase de parametrización (Tabla 8.23) se analizó el efecto del **parámetro de uniformidad (u)** sobre los resultados proporcionados por el AG.

Para comprobar el efecto del parámetro de uniformidad se planteó el siguiente experimento:

E₁₃: a partir de los parámetros fijados en la fase de parametrización del AG, se comprobó el efecto del incremento del parámetro de uniformidad (u) a 2.

A continuación se muestra el resumen de los resultados obtenidos en el experimento **E₁₃**, y los obtenidos en el experimento **E₂** para facilitar su comparación:

Aptitud mínima	E ₁₃		E ₂
	($u=2$)	($u=1$)	
	1051,31	560,25	552,63
Generación de la solución óptima media	3257		3008
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	31,23		30,86
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	5,09		6,65

Tabla 8.24: Resumen de los resultados del experimento E₁₃ y E₂.

En la Tabla 8.25 es posible observar que, aunque la mejor aptitud alcanzada en el experimento **E₁₃** fue mayor que la obtenida en el **E₂**, el valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución fue menor (5,09) que la lograda en **E₂** (6,65). Dicho valor indicó una mayor uniformidad en los costes de las asignaciones de los trabajadores en las agendas generadas en **E₁₃**.

La Tabla 8.25 y Tabla 8.26 muestran las mejores soluciones alcanzadas en **E₂** y **E₁₃**. En la última columna de las tablas se indica la aportación de cada trabajador a la función objetivo o coste de las asignaciones. En la solución alcanzada en el experimento **E₂**, el valor de la aptitud de la solución (552,63) fue mejor que el logrado en el experimento **E₁₃** (560,25), sin embargo, el valor de la desviación típica de los costes de las asignaciones de los trabajadores fue, en el experimento **E₂** de 6,517, frente a un valor de la desviación típica de dichos costes en la solución del experimento **E₁₃** de 4,87. El menor valor de la desviación típica obtenida en el experimento **E₁₃** puso de relieve el efecto del parámetro de uniformidad. El incremento de la uniformidad ($u=2$) dio lugar a la obtención de una solución con un mayor equilibrio en los costes de las asignaciones de los trabajadores. Así, en la solución del experimento **E₂**, se observó que existía cierto desequilibrio entre los trabajadores en la asignación realizada, que afectaba especialmente a los trabajadores 10 y 14, con costes de asignación de 41,77 y 47,91 respectivamente. El caso extremo, fue la diferencia entre el trabajador 4, con un valor del coste de asignación de 21,17, y el trabajador 14, con un coste de asignación de 47,91, siendo

la diferencia entre ambos costes de asignación de 26,74. Mientras que en la solución correspondiente al experimento E_{13} el caso con mayor coste de asignación correspondió al trabajador 12, con un valor de 39,42, el coste de asignación mínimo la obtuvo el trabajador 18, con un valor de 19,66, siendo la diferencia entre ambos casos extremos de 19,76. Dicha diferencia resultó menor que la obtenida en la solución del experimento E_2 (26,74). La Figura 8.8 ilustra la mayor uniformidad en los costes de las asignaciones de la mejor solución lograda en el experimento E_{13} en comparación a la uniformidad obtenida en la mejor solución del experimento E_2 .

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación	
Trabajador 1	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 8	Puesto 13	24,95	
Trabajador 2	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 11	24,98	
Trabajador 3	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 17	Puesto 16	25,64	
Trabajador 4	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 4	Puesto 17	21,17	
Trabajador 5	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 18	26,43	
Trabajador 6	Puesto 12	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 10	26,91	
Trabajador 7	Puesto 9	Puesto 2	Puesto 9	Puesto 5	31,04	
Trabajador 8	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 3	Puesto 9	37,34	
Trabajador 9	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 13	Puesto 12	29,92	
Trabajador 10	Puesto 18	Puesto 16	Puesto 10	Puesto 3	41,77	
Trabajador 11	Puesto 16	Puesto 7	Puesto 18	Puesto 15	29,68	
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 2	39,42	
Trabajador 13	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 14	Puesto 4	32,6	
Trabajador 14	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 16	Puesto 7	47,91	
Trabajador 15	Puesto 4	Puesto 9	Puesto 12	Puesto 8	25,68	
Trabajador 16	Puesto 2	Puesto 17	Puesto 7	Puesto 14	26,02	
Trabajador 17	Puesto 8	Puesto 13	Puesto 2	Puesto 1	31,23	
Trabajador 18	Puesto 14	Puesto 4	Puesto 1	Puesto 6	29,93	
					Coste medio	30,70
					Desviación típica	6,52
					Aptitud	552,63

Tabla 8.25: Mejor agenda de rotación obtenida en la ejecución 1 del experimento E_2 .

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación	
Trabajador1	Puesto 15	Puesto 1	Puesto 5	Puesto 9	27,52	
Trabajador2	Puesto 13	Puesto 8	Puesto 4	Puesto 17	32,91	
Trabajador3	Puesto 9	Puesto 5	Puesto 15	Puesto 1	26,32	
Trabajador4	Puesto 3	Puesto 18	Puesto 9	Puesto 12	34,8	
Trabajador5	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 18	Puesto 2	29,58	
Trabajador6	Puesto 4	Puesto 14	Puesto 1	Puesto 6	27,8	
Trabajador7	Puesto 14	Puesto 7	Puesto 3	Puesto 18	25,46	
Trabajador8	Puesto 12	Puesto 13	Puesto 6	Puesto 14	27,41	
Trabajador9	Puesto 2	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 10	31,72	
Trabajador10	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 17	Puesto 5	35,95	
Trabajador11	Puesto 17	Puesto 2	Puesto 10	Puesto 8	36,98	
Trabajador12	Puesto 11	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 4	39,42	
Trabajador13	Puesto 16	Puesto 12	Puesto 13	Puesto 16	32,37	
Trabajador14	Puesto 7	Puesto 16	Puesto 7	Puesto 15	39,37	
Trabajador15	Puesto 8	Puesto 11	Puesto 2	Puesto 11	29,75	
Trabajador16	Puesto 18	Puesto 6	Puesto 12	Puesto 13	33,79	
Trabajador17	Puesto 1	Puesto 4	Puesto 14	Puesto 7	29,44	
Trabajador18	Puesto 5	Puesto 9	Puesto 16	Puesto 3	19,66	
					Coste medio	31,13
					Desviación típica	4,87
					Aptitud (u=2)	1051,31
					Aptitud (u=1)	560,25

Tabla 8.26: Mejor agenda de rotación obtenida en la ejecución 7 del experimento E_{13} .

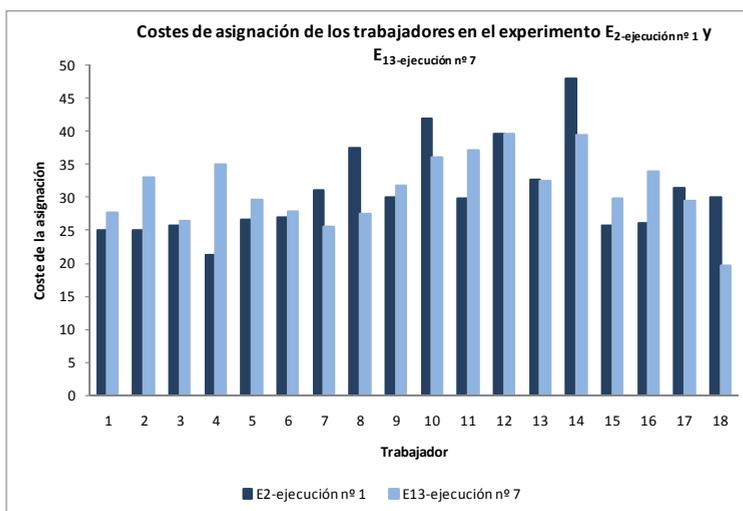


Figura 8.8: Costes de las asignaciones de los trabajadores a los puestos de las mejores soluciones obtenidas en E_2 y E_{13} .

Tras el análisis de los resultados obtenidos fue posible confirmar la efectividad del parámetro de uniformidad (u) para la obtención de soluciones en las que se

lograba un mayor equilibrio en los costes de asignación de los trabajadores. Es decir, el aumento de dicho parámetro permitía alcanzar soluciones con valores de la aptitud aceptables, no alejados de la mejor solución lograda hasta el momento (E_2), en las que se evitaba la existencia de trabajadores sobrecargados frente a trabajadores asignados a puestos considerados ligeros en todas las rotaciones.

8.3.7 Efecto de la consideración de las preferencias de los trabajadores

A continuación se trató de determinar si la consideración de las preferencias de los trabajadores provocaba una excesiva restricción del problema, y por tanto, o bien el AG no era capaz de localizar soluciones o éstas eran significativamente peores. Para ello se propuso el siguiente experimento:

E_{14} : fijados los parámetros a los valores establecidos en la fase de parametrización (Tabla 8.23), se pretendía determinar el efecto de la inclusión de las preferencias de los trabajadores como restricciones del problema, al tiempo que se mantenían las restricciones derivadas de las limitaciones en las capacidades de éstos. La Tabla 8.15 contiene todas las asignaciones vetadas que fueron aplicadas en el experimento.

La Tabla 8.22 muestra el resumen de los resultados obtenidos en el experimento E_{14} . En el ANEXO 1 se puede consultar con mayor detalle los resultados de las 10 ejecuciones del AG para dicho experimento. La mejor aptitud alcanzada con el cumplimiento de las restricciones de preferencias y capacidades fue de 554,72, frente a la aptitud 552,63 correspondiente a la mejor solución alcanzada en la fase de parametrización (E_2). La diferencia entre ambas aptitudes es pequeña (2,09), de lo cual se deduce que la inclusión de las preferencias, en el caso en estudio, no impide que el AG alcance buenas soluciones. Así pues, la bondad de las soluciones alcanzadas no se ve significativamente mermada por el aumento de las restricciones del problema. Respecto al valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución, la diferencia entre ambos experimentos fue reducida (0,09), así como la diferencia en el valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución (0,28), siendo menor en el experimento E_{14} . Dichas diferencias indicaron que la inclusión de las preferencias de los trabajadores no empeoraba significativamente el balanceo de las asignaciones entre los trabajadores. Además, el tiempo de cálculo empleado en las 10 ejecuciones del experimento E_{14} (29 minutos) tampoco aumentaba excesivamente respecto al consumido en el experimento E_2 (21 minutos y 35 segundos).

	E ₁₄	E ₂
Aptitud media	557,02	555,62
Aptitud máxima	560,1	557,29
Aptitud mínima	554,72	552,63
Generación de la solución óptima media	3120	3008
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	30,95	30,86
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,37	6,65

Tabla 8.27: Resumen de los resultados del experimento E₁₄ y E₂.

En la Figura 8.9 se observa, que la mejor solución alcanzada por el AG al incluir las preferencias de los trabajadores no disminuyó la uniformidad del coste de las asignaciones de los trabajadores, con una desviación típica de los costes de asignación de 5,35, menor que la correspondiente a la mejor solución alcanzada en el experimento E₂, de 6,51. Sin embargo, en el experimento E₁₄, no se logró la uniformidad conseguida por la mejor solución del experimento E₁₃ al haber incrementado el parámetro de uniformidad. En este último caso la desviación típica de los costes de asignación fue de 4,87.

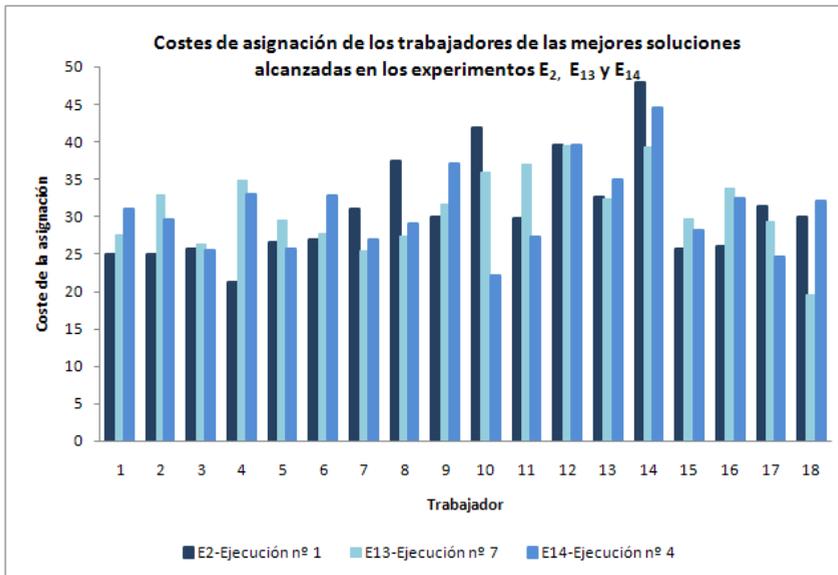


Figura 8.9: Costes de las asignaciones de los trabajadores de las mejores soluciones obtenidas en E₂, E₁₃ y E₁₄.

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 17	Puesto 8	30,93
Trabajador 2	Puesto 1	Puesto 3	Puesto 9	Puesto 5	29,58
Trabajador 3	Puesto 5	Puesto 17	Puesto 15	Puesto 1	25,46
Trabajador 4	Puesto 18	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 14	33
Trabajador 5	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 7	Puesto 18	25,57
Trabajador 6	Puesto 10	Puesto 16	Puesto 2	Puesto 17	32,67
Trabajador 7	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 6	Puesto 10	26,78
Trabajador 8	Puesto 7	Puesto 18	Puesto 10	Puesto 15	28,97
Trabajador 9	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 3	Puesto 13	37,04
Trabajador 10	Puesto 12	Puesto 6	Puesto 1	Puesto 6	21,99
Trabajador 11	Puesto 2	Puesto 11	Puesto 13	Puesto 12	27,15
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 2	39,42
Trabajador 13	Puesto 8	Puesto 13	Puesto 14	Puesto 4	34,79
Trabajador 14	Puesto 16	Puesto 7	Puesto 4	Puesto 11	44,53
Trabajador 15	Puesto 3	Puesto 9	Puesto 12	Puesto 9	28,11
Trabajador 16	Puesto 15	Puesto 1	Puesto 8	Puesto 3	32,32
Trabajador 17	Puesto 4	Puesto 14	Puesto 16	Puesto 7	24,48
Trabajador 18	Puesto 9	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 16	31,94
				Coste medio	30,81
				Desviación típicas	5,35
				Aptitud	554,72

Tabla 8.28: Mejor agenda de rotación obtenida en la ejecución 4 del experimento E₁₄.

En conclusión, y en base a los experimentos realizados, puede afirmarse que, para el caso en estudio, la inclusión de las preferencias de los trabajadores no supone un incremento elevado en la aptitud de las soluciones obtenidas, ni causa la pérdida de uniformidad en el coste de las asignaciones de los trabajadores. Además, el algoritmo es capaz de localizar buenas soluciones, que cumplan con todas las restricciones impuestas, sin que se produzca un aumento significativo del tiempo de cálculo. El pequeño incremento del valor de la función objetivo queda compensado por los beneficios que suponen la consideración de las preferencias de los trabajadores, como por ejemplo, el aumento de la satisfacción, y la aceptación de la agenda de rotación en la fase de implantación.

8.3.8 Efecto de la variación del número, duración y distribución de las pausas sobre los resultado del AG

En este apartado se describen los resultados del análisis realizado sobre la influencia del número, duración y distribución de las pausas en la aptitud de las agendas de rotación generadas por el AG.

En el caso de estudio el tiempo máximo destinado a pausas era de 2 horas y el número de rotaciones 4. Las tres primeras rotaciones de 2 horas y una última rotación de 1 hora. En base a dichas restricciones relativas a la duración total de las pausas, considerando las asignaciones vetadas mostradas en la Tabla 8.15, que

incluían las preferencias de los trabajadores y sus limitaciones físicas y psíquicas, y fijados los parámetros a los establecidos en la fase de parametrización, se propusieron los siguientes experimentos para el análisis del efecto de la variación del número y duración de las pausas:

E₁₅: se pretendió comprobar el efecto sobre la aptitud de las soluciones alcanzadas si se realizaba una pausa de 2 horas tras la tercera rotación.

E₁₆: se analizó el efecto sobre la aptitud de las soluciones alcanzadas por el AG si se realizaban dos pausas de 1 hora tras la primera y la segunda rotación.

E₁₇: el experimento trataba de comprobar el efecto sobre la aptitud de las soluciones alcanzadas si se incluían dos pausas de 1 hora tras la primera y la tercera rotación.

E₁₈: el objetivo del experimento era determinar el efecto sobre la aptitud de las soluciones alcanzadas si se realizaban dos pausas de 1 hora tras la segunda y la tercera rotación.

E₁₉: se pretendía comprobar el efecto sobre la aptitud de las soluciones alcanzadas si se realizaban tres pausas, dos pausas cortas de 30 minutos después de la primera y segunda rotación, y una más larga de 1 hora tras la tercera rotación.

E₂₀: el objetivo del experimento era determinar el efecto sobre la aptitud de las soluciones alcanzadas con la realización de tres pausas, dos micropausas de 15 minutos después de la primera y segunda rotación, y una más larga de 1 hora y 30 minutos tras la tercera rotación.

E₂₁: el experimento analizaba el efecto de la disminución del tiempo de las micropausas a 10 minutos tras la primera y segunda rotación, y una pausa más larga de 1 hora y 40 minutos después de la tercera rotación.

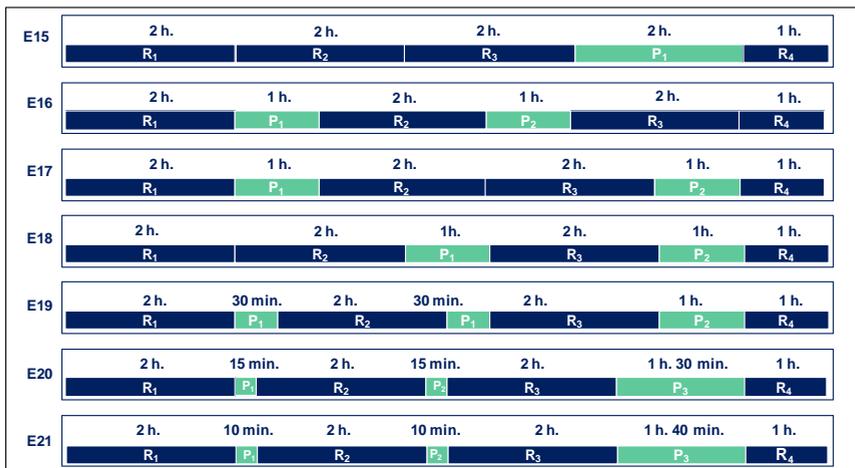


Figura 8.10: Representación gráfica de la distribución y duración de las pausas en los experimentos E₁₅ a E₂₀.

La división del tiempo de descanso en dos pausas de una hora de duración, tras la primera y la segunda rotación (E_{16}), permitió al AG obtener una agenda de rotación (Tabla 8.29) con un valor de la aptitud mínima (aptitud mínima=508,03) menor al logrado en el resto de los experimentos (E_{14} a E_{21}). Dicho resultado reveló la importancia de la distribución de las pausas, de forma que se permitiera a los trabajadores recuperarse de la fatiga acumulada tras cada rotación. Aunque en el experimento E_{16} se realizaban las dos últimas rotaciones sin pausa entre ellas, como los trabajadores se recuperaban adecuadamente con las pausas precedentes, podían exponerse a un periodo continuado de trabajo, que aunque prolongado, no parecía suficiente como para causar una elevada acumulación de fatiga antes de la finalización de la jornada laboral.

Tal y como se muestra en la Tabla 8.30, también en los experimentos E_{19} y el E_{20} se alcanzaron valores de la aptitud mínima mejores que el obtenido en el experimento E_{14} . Así pues, la realización de pausas largas, de 1 hora, (E_{16}), e incluso de micropausas, de 15 o 30 minutos (E_{19} y el E_{20}), tras la primera y segunda rotación, parecía tener un efecto positivo sobre la disminución de la fatiga acumulada de los trabajadores. En el caso de las micropausas, la combinación de dichos periodos cortos de recuperación con la realización de una pausa más larga antes de la última, cuando los trabajadores habían acumulado más fatiga, pareció ser también fundamental para una recuperación adecuada. Sin embargo, micropausas demasiado cortas, de 10 minutos, como en el experimento E_{21} , parecían no ser suficientes para permitir la recuperación de los trabajadores, de forma que el descanso más largo situado tras la tercera rotación, no era suficiente para que pudieran recuperarse de la excesiva acumulación de fatiga causada por las rotaciones precedentes.

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 6	Puesto 13	Puesto 10	Puesto 15	27,29
Trabajador 2	Puesto 5	Puesto 15	Puesto 1	Puesto 16	21,37
Trabajador 3	Puesto 17	Puesto 5	Puesto 9	Puesto 12	27,09
Trabajador 4	Puesto 14	Puesto 3	Puesto 18	Puesto 7	29,98
Trabajador 5	Puesto 8	Puesto 14	Puesto 3	Puesto 17	29,25
Trabajador 6	Puesto 18	Puesto 8	Puesto 2	Puesto 14	30,56
Trabajador 7	Puesto 12	Puesto 9	Puesto 5	Puesto 13	21,82
Trabajador 8	Puesto 4	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 4	28,06
Trabajador 9	Puesto 10	Puesto 2	Puesto 17	Puesto 6	28,95
Trabajador 10	Puesto 3	Puesto 1	Puesto 16	Puesto 5	23,18
Trabajador 11	Puesto 2	Puesto 18	Puesto 6	Puesto 10	25,47
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 3	36,18
Trabajador 13	Puesto 16	Puesto 12	Puesto 13	Puesto 8	28,66
Trabajador 14	Puesto 7	Puesto 16	Puesto 15	Puesto 11	46,27
Trabajador 15	Puesto 9	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 9	31,63
Trabajador 16	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 12	Puesto 1	23,94
Trabajador 17	Puesto 13	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 2	22,69
Trabajador 18	Puesto 15	Puesto 10	Puesto 7	Puesto 18	25,66
Coste medio					28,22
Desviación típicas					5,88
Aptitud					508,03

Tabla 8.29: Mejor agenda de rotación obtenida en la ejecución 10 del experimento E₁₆.

El peor resultado, con un valor de la aptitud mínima de 643,08, correspondió al experimento E₁₅, en el que se analizó la repercusión de la realización de una única pausa de 2 horas tras la tercera rotación. Dicho incremento de la aptitud mínima en relación al resto de combinaciones de pausas analizadas, reveló el aumento de la acumulación de fatiga causada por periodos largos de trabajo sin pausas de recuperación. Así pues, parecía ser excesiva la realización de 3 rotaciones consecutivas de 2 horas cada una, 6 horas en total, sin pausas, aunque el descanso posterior fuera de larga duración (2 horas).

La Tabla 8.30 muestra el resumen de los resultados obtenidos para los experimentos relativos al análisis del efecto de la distribución y duración de las pausas. En el ANEXO 1 se puede consultar con mayor detalle los resultados de las 10 ejecuciones del AG para cada experimento.

	E ₁₅	E ₁₆	E ₁₇	E ₁₈	E ₁₉	E ₂₀	E ₂₁
Aptitud media	647,88	509,57	564,418	558,04	522,32	554,615	567,691
Aptitud máxima	650,83	512,31	566,93	559,73	529,12	558,67	570,85
Aptitud mínima	643,08	508,03	562,49	555,2	524,50	552,24	563,82
Generación de la solución óptima media	2530	2649	2865	3157	3171	2763	2778
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	35,994	28,31	31,357	31	29,139	30,813	31,538
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,801	6,16	6,307	6,6	6,38	6,51	6,88

Tabla 8.30: Resumen de los resultados de los experimentos E₁₅ al E₂₁.

La Figura 8.11 ordena los experimentos realizados en función de la aptitud mínima alcanzada por el AG, mostrando su correspondiente distribución y duración de las pausas.



Figura 8.11: Representación gráfica de la variación de las aptitudes mínimas alcanzadas para diferentes distribución y duración de las pausas en los experimentos E₁₅ a E₂₀.

La mejor agenda de rotación lograda en la fase de experimentación (E₁ a E₂₁), que además incluía las preferencias de los trabajadores, correspondió a la obtenida en la ejecución 10 del experimento E₁₆ (aptitud mínima=508,03) mostrada en Tabla 8.29. En dicha solución, se realizaban dos pausas de una hora tras la primera y la

segunda rotación. Sin embargo, en dicha solución se observó cierto desequilibrio en las asignaciones, ya que el trabajador 14 presentaba un coste de asignación de 46,27, considerablemente superior al coste medio de las asignaciones de 28,22. Ante dicho desequilibrio, se decidió probar la ejecución del AG bajo las mismas condiciones que en el experimento E_{16} pero aumentando el valor del parámetro de uniformidad (u). Con dicho objetivo se propuso el experimento E_{22} :

E_{22} : a partir de las especificaciones del experimento E_{16} y estableciendo el valor del parámetro de uniformidad (u) en 2, se pretendió obtener agendas de rotación en las que se reflejara el efecto positivo de la división del tiempo de descanso de 2 horas en dos pausas de 1 hora tras la 1ª y la 2ª rotación, al tiempo que se lograra una mayor uniformidad en las asignaciones.

La colocación y duración de las pausas adoptada en el E_{22} , junto con el aumento del parámetro de uniformidad ($u=2$), permitió al AG alcanzar una solución que suponía un mayor equilibrio entre los trabajadores en la asignación realizada, tal y como se observa en la Tabla 8.31. No obstante, la aptitud correspondiente a la mejor solución obtenida en las 10 ejecuciones (aptitud mínima= 513,29) supuso un pequeño empeoramiento con respecto a la mejor aptitud lograda en el experimento E_{16} (aptitud mínima= 508,3). Además, en dicha solución, el trabajador 14 mantenía el desequilibrio en su asignación respecto al resto de trabajadores, aunque algo menor, tal y como muestra la Figura 8.12. En éste caso, el planificador podría considerar, el incremento registrado en la aptitud compensado por el menor desequilibrio en las asignaciones.

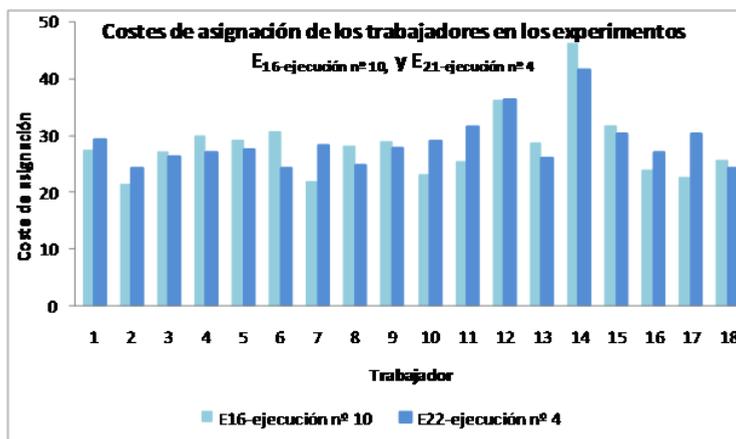


Figura 8.12: Costes de las asignaciones de los trabajadores de las mejores soluciones obtenidas en E_2 , E_{16} y E_{21} .

En conclusión, el análisis detallado de la duración y distribución de las pausas en la agenda de rotación puede repercutir positivamente en la obtención de soluciones que eviten la excesiva acumulación de fatiga por los trabajadores. Si se lograra dicho objetivo pero se observasen desequilibrios en las asignaciones, se debería completar dicho análisis con la variación del parámetro de uniformidad, de forma que

se lograse alcanzar una agenda sin acumulación de fatiga para los trabajadores y equilibrada en sus asignaciones.

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 1	Puesto 12	Puesto 13	Puesto 6	29,17
Trabajador 2	Puesto 16	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 15	24,15
Trabajador 3	Puesto 5	Puesto 15	Puesto 17	Puesto 10	26,07
Trabajador 4	Puesto 12	Puesto 1	Puesto 15	Puesto 7	26,76
Trabajador 5	Puesto 17	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 2	27,48
Trabajador 6	Puesto 7	Puesto 17	Puesto 2	Puesto 14	24,24
Trabajador 7	Puesto 13	Puesto 10	Puesto 6	Puesto 11	28,25
Trabajador 8	Puesto 10	Puesto 6	Puesto 12	Puesto 17	24,63
Trabajador 9	Puesto 6	Puesto 14	Puesto 1	Puesto 4	27,65
Trabajador 10	Puesto 14	Puesto 16	Puesto 4	Puesto 1	28,83
Trabajador 11	Puesto 18	Puesto 3	Puesto 10	Puesto 8	31,31
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 3	36,18
Trabajador 13	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 8	Puesto 13	25,77
Trabajador 14	Puesto 2	Puesto 8	Puesto 7	Puesto 16	41,49
Trabajador 15	Puesto 8	Puesto 9	Puesto 3	Puesto 9	30,06
Trabajador 16	Puesto 9	Puesto 2	Puesto 9	Puesto 5	26,86
Trabajador 17	Puesto 3	Puesto 18	Puesto 16	Puesto 12	30,24
Trabajador 18	Puesto 15	Puesto 13	Puesto 5	Puesto 18	24,15
Coste medio					28,51
Desviación típicas					4,3
Aptitud					513,29

Tabla 8.31: Mejor agenda de rotación obtenida en la ejecución 4 del experimento E₂₂.

8.3.9 Análisis de los resultados proporcionados por el AG

El gráfico de la Figura 8.13 muestra la capacidad del AG propuesto para generar progresivamente mejores soluciones. El gráfico representa una evolución constantemente decreciente (salvo incrementos muy localizados). Esto es debido al empleo de una estrategia elitista que impide la pérdida de orientación del algoritmo. Esta ventaja tiene como contrapartida el peligro de forzar al algoritmo a permanecer durante la exploración en zonas concretas del espacio de búsqueda, en la que se han obtenido buenas soluciones en generaciones anteriores. Una forma de contrarrestar dicho problema es emplear probabilidades de mutación y cruce elevadas, que provoquen la exploración de nuevas zonas. En el algoritmo diseñado, los mejores individuos son introducido en la siguiente población antes de aplicar el operador mutación, por lo que el individuo élite puede verse sometidos a variaciones que quedan reflejadas en los picos localizados de la gráfica, y que, suponen la exploración de nuevas zonas del espacio de soluciones.

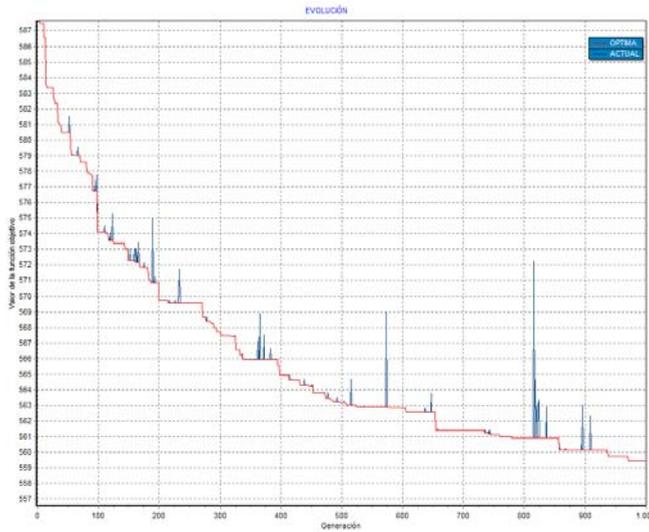


Figura 8.13: Evolución de la aptitud a lo largo de las generaciones en el experimento E_{14} .

El algoritmo es capaz de encontrar buenas soluciones en un tiempo reducido de cálculo, siendo éste en todos los casos inferior a 60 minutos en un PC equipado con un procesador de 1,81Ghz y 1 GB de R.A.M.

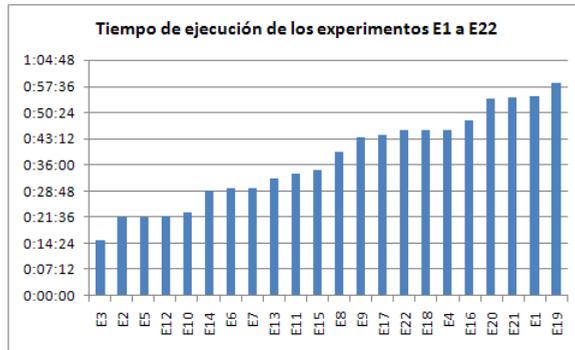


Figura 8.14: Tiempos de ejecución de los experimentos E_1 a E_{22} .

Si bien la mejor aptitud obtenida en los experimentos E_1 a E_{14} , corresponde a la ejecución 1 del experimento E_2 (aptitud mínima = 552,63), cabría la opción de considerar como mejor solución la obtenida en la ejecución 4 en el experimento E_{14} (aptitud mínima = 554,72). La aptitud lograda para E_{14} no supone un empeoramiento significativo con respecto a la de E_2 , con una diferencia de 2,09, y sin embargo, se incluyen las preferencias de los trabajadores y posee una mayor uniformidad en las asignaciones, tal y como se expone en el apartado 8.3.6.

Por otra parte, si fuera posible la variación de la duración de las pausas y su distribución, la mejor agenda de rotación lograda en la fase de experimentación, que

además incluye las preferencias de los trabajadores, corresponde a la obtenida en la ejecución 10 del experimento E_{16} (aptitud mínima=508,03) (Tabla 8.29). En dicha solución se realizan dos pausas de una hora tras la primera y la segunda rotación. Sin embargo, podría interpretarse como mejor solución la alcanzada, con idénticas pausas, en el E_{22} en la ejecución 4 (aptitud mínima=513,29). Aunque dicha solución posee un valor superior de la aptitud, el incremento registrado (5,26) podría considerarse compensado por una mayor uniformidad en las asignaciones de los trabajadores (Figura 8.12).

En todos los experimentos realizados el AG ha sido capaz de obtener agendas de rotación que cumplen con las restricciones impuestas al problema, y minimizan el tiempo consecutivo de realización de un mismo movimiento, tal y como se muestra en la Tabla 8.25, Tabla 8.26, Tabla 8.28, Tabla 8.29 y Tabla 8.31. En la mayoría de los casos, los trabajadores no repiten un mismo puesto a lo largo de la jornada de trabajo, salvo en el caso de aquellos que poseen algún tipo de limitación (por ejemplo el trabajador 12). En estos casos la repetición nunca se da en rotaciones consecutivas.

El algoritmo modifica los valores iniciales de los ítems de cada trabajador para obtener un valor diferente para cada rotación, de manera que refleje los efectos de las tareas realizadas en las rotaciones precedentes. La fórmula de cálculo implica que el valor de un ítem de un trabajador en la rotación actual, se ve afectado en mayor medida por las tareas de rotaciones anteriores, cuanto mayor duración hayan tenido éstas, y cuanto menos tiempo haya transcurrido desde su finalización. En las Tabla 8.32 a Tabla 8.35 se muestra la evolución del valor de los ítems de los trabajadores para cada rotación, en el caso de la mejor solución obtenida en el experimento E_{22} (ejecución 4). Los datos indican el valor de cada ítem al comienzo de la rotación respectiva. En la rotación inicial, el valor de los ítems corresponde al introducido durante la evaluación de los trabajadores. En el comienzo de la segunda rotación, los valores se mantienen, o bien, aumentan debido a la realización, durante la primera rotación, de tareas en las que se ha realizado el movimiento correspondiente al ítem considerado. Puede comprobarse que de los 324 casos (número de trabajadores*número de ítems), en 129 se produce un aumento del valor de los ítems de los trabajadores durante la Rotación 1, comenzando la Rotación 2 con un valor superior al inicial, mientras que en el resto de los casos permanece constante. De esos 129 casos, en 117 el algoritmo ha sido capaz de asignar puestos a los trabajadores durante la Rotación 2, que hacen disminuir, los ítems a valores inferiores a los alcanzados como consecuencia de la Rotación 1. En los 12 casos restantes, la asignación de la Rotación 2, no ha sido suficiente para que disminuya el valor del ítem. Dichos casos se distribuyen de la siguiente manera: 1 corresponde al ítem '*extensión del cuello*' del trabajador 14, 2 a '*flexión de tronco*' de los trabajadores 12 y 14, 2 a '*giro de tronco*' de los trabajadores 12 y 14, 2 a '*lateralización del tronco*' de los trabajadores 12 y 14, y finalmente 2 a '*flexión de piernas*' de los trabajadores 12 y 15. Los casos registrados sin disminución del ítem tras la Rotación 2, corresponden a ítems de movimiento con una valoración inicial distinta de cero para los trabajadores (ver Tabla 8.5). En tales casos, el algoritmo no puede eliminar ni disminuir dicho valor, pero logra no aumentarlo. Ésta capacidad del

algoritmo se refleja en que los trabajadores que tienen alguna limitación en alguno de los movimientos (trabajador 12, 14 y 15), y que por tanto poseen un valor inicial de los ítems correspondientes distinto de 0, mantienen dicho valor a lo largo de todas las rotaciones (coloreado en rosa en Tabla 8.34 y Tabla 8.35). Esto significa que no han sido asignados a puestos donde se necesite realizar dichos movimientos de forma intensiva. En la Figura 8.15 se observa el mantenimiento de los valores iniciales de los ítems de movimiento para el trabajador 12. Al comienzo de la Rotación 3, los valores de la mayor parte de los ítems han disminuido como consecuencia de la pausa, por lo que el algoritmo puede, si la disminución es suficiente, asignar de nuevo a los trabajadores a puestos donde se llevan a cabo movimientos que realizó en las rotaciones anteriores. Así, tras la Rotación 3 se registra un aumento de la mayoría de los ítems, en 117 ocasiones. En la Rotación 4, el algoritmo consigue realizar asignaciones, en 67 casos, en las que los ítems incrementados tras la Rotación 3 son nuevamente disminuidos, evitándose de ésta forma, en la mayoría de los casos, la acumulación de fatiga por la repetición de un movimiento en rotaciones consecutivas. A modo de ejemplo se muestra la Figura 8.16, en ella se observa como para el trabajador 1, sin limitaciones iniciales en sus movimientos, la mayoría de los ítems tienden a aumentar en la Rotación 1 y 3, y a disminuir en la Rotación 2, la pausa y la rotación 4.

En conclusión, el AG resulta una herramienta eficiente para la generación de agendas de rotación en las que se optimicen los criterios de diseño establecidos por el planificador. Su aplicación permite la obtención de soluciones en tiempos de cálculo razonables contemplando todas las restricciones introducidas. Se logran agendas de rotación balanceadas en cuanto a la carga asignada a cada trabajador, en las que se evita la repetición de asignaciones consecutivas a un mismo puesto. Además, se consigue obtener soluciones que permiten la inclusión en el plan de rotaciones de trabajadores con algún tipo de limitación en sus capacidades y se logra considerar las preferencias de estos en su generación del plan de rotaciones, aumentando de este modo la aceptación de la solución propuesta.

		Brazo-abducción	Brazo-extensión	Brazo-flexión	Codo-flexión	Cuello-extensión	Cuello-flexión	Cuello-giro	Cuello-lateralización	Hombro-elevación	Dedos-pinzar	Mano-flexión	Mano-extensión	Mano-giro	Mano-lateralización	Tronco-flexión	Tronco-giro	Tronco-lateralización	Piernas-flexión
Trabajador 1	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rot. 2	0	0	0,76	0,76	0	0,76	0	0	0	0	0	0	0,76	0	0	0	0	0
	Pau.1	0	0	1,1	1,1	0	1,48	1,14	0	0	0,76	0,76	0	0,33	0	0,76	0,76	0	0
	Rot. 3	0	0	0,56	0,56	0	0,72	0,5	0	0	0,33	0,33	0	0,22	0	0,33	0,33	0	0
	Rot. 4	0,76	0,76	1,53	1,53	0	1,64	0,33	0	0	1,37	1,37	0	1,31	0	1,37	0,98	0	0
	Final	0,48	0,48	1,46	1,46	0	1,56	0,68	0	0	1,31	1,31	0	1,26	0	0,92	0,68	0	0
Trabajador 2	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rot. 2	0	0	1,14	1,14	0	1,14	0,76	0	0	0,76	1,14	0	0	0	0,76	0	0	0,76
	Pau.1	0,76	0	1,26	0,5	0	1,64	0,33	0	0	1,1	0,5	0	0	0	0,33	0	0	0,33
	Rot. 3	0,33	0	0,67	0,33	0	0,83	0,22	0	0	0,56	0,33	0	0	0	0,22	0	0	0,22
	Rot. 4	0,22	0	1,62	1,39	0	1,73	1,31	0	0	1,15	1,01	0	0,76	0	0,93	0	0	0,17
	Final	0,2	0	1,15	0,96	0	1,25	0,88	0	0	0,83	1,09	0	0,48	0	1,02	0	0	0,15
Trabajador 3	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rot. 2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0,76	0	0	0	0,76	0	0	0
	Pau.1	0,76	0,76	1,14	1,14	0	1,14	0	0	0	1,14	1,48	0	1,14	0	1,48	0,76	0	0
	Rot. 3	0,33	0,33	0,5	0,5	0	0,5	0	0	0	0,5	0,72	0	0,5	0	0,72	0,33	0	0
	Rot. 4	0,98	0,22	1,1	1,1	0	1,48	0,76	0	0	1,1	0,5	0	1,1	0	0,5	0,22	0	0
	Final	0,68	0,2	1,35	1,35	0	1,59	0,87	0	0	1,16	1,02	0	0,78	0	0,83	0,2	0	0,38
Trabajador 4	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rot. 2	0,76	0,76	1,14	1,14	0	1,14	0	0	0	1,14	1,14	0	1,14	0	1,14	0,76	0	0
	Pau.1	1,1	0,33	1,26	1,26	0	1,64	0,76	0	0	1,26	0,5	0	1,26	0	0,5	0,33	0	0
	Rot. 3	0,56	0,22	0,67	0,67	0	0,83	0,33	0	0	0,67	0,33	0	0,67	0	0,33	0,22	0	0
	Rot. 4	0,39	0,17	0,47	0,47	0	0,58	0,22	0	0	0,47	1,01	0	0,47	0	1,01	0,17	0	0
	Final	0,35	0,15	0,81	0,81	0	1,1	0,77	0	0	0,81	1,09	0	0,81	0	1,09	0,53	0	0
Trabajador 5	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rot. 2	0	0	0,76	0,76	0	1,14	1,14	0	0	0,76	0,76	0	0,76	0	0,76	0,76	0	0
	Pau.1	0,76	0	1,1	0,33	0	1,64	0,5	0	0	1,1	0,33	0	0,33	0	0,33	0,33	0	0
	Rot. 3	0,33	0	0,56	0,22	0	0,83	0,33	0	0	0,56	0,22	0	0,22	0	0,22	0,22	0	0
	Rot. 4	0,22	0	1,15	0,93	0	0,58	0,25	0	0	0,39	0,93	0	0,17	0	0,17	0,17	0	0
	Final	0,58	0,38	1,41	1,21	0	1,1	0,23	0	0	0,92	1,21	0	0,72	0	0,72	0,53	0	0

Tabla 8.32: Evolución del valor de los ítems de los trabajadores 1 a 5 para cada rotación en la solución obtenida en E₁₄ en la ejecución 4.

		Bravo-abducción	Bravo-extensión	Bravo-flexión	Codo-flexión	Cuello-extensión	Cuello-flexión	Cuello-giro	Cuello-lateralización	Hombro-elevación	Dedos-pinzar	Mano-flexión	Mano-extensión	Mano-giro	Mano-lateralización	Tronco-flexión	Tronco-giro	Tronco-lateralización	Piernas-flexión
Trabajador 6	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rot. 2	0	0	0,76	0,76	0	1,14	1,14	0	0	0,76	0,76	0	0	0	0,76	0,76	0	0
	Pau.1	0	0	1,1	1,1	0	1,64	1,26	0	0	1,1	1,1	0	0,76	0	0,33	0,33	0	0
	Rot. 3	0	0	0,56	0,56	0	0,83	0,67	0	0	0,56	0,56	0	0,33	0	0,22	0,22	0	0
	Rot. 4	0,76	0	1,15	0,39	0	1,73	0,47	0	0	1,15	0,39	0	0,22	0	0,17	0,17	0	0
	Final	0,87	0,38	1,41	0,92	0	1,82	0,43	0	0	1,41	0,92	0	0,77	0	0,72	0,53	0	0
Trabajador 7	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rot. 2	0	0	1,14	0,76	0	1,14	0,76	0	0	0,76	0,76	0	0,76	0	0,76	0	0	0
	Pau.1	0,76	0,76	1,26	0,33	0	1,26	1,1	0	0	1,1	1,1	0	0,33	0	0,33	0	0	0
	Rot. 3	0,33	0,33	0,67	0,22	0	0,67	0,56	0	0	0,56	0,56	0	0,22	0	0,22	0	0	0
	Rot. 4	0,22	0,22	1,23	0,93	0	1,23	0,39	0	0	0,39	0,39	0	0,93	0	0,17	0	0	0
	Final	0,2	0,2	1,29	1,02	0	1,48	0,92	0	0	0,73	0,73	0	0,64	0	0,53	0,38	0	0
Trabajador 8	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rot. 2	0	0	0,76	0,76	0	0	0	0	0	0,76	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pau.1	0,76	0,76	1,48	1,48	0	1,14	0	0	0	1,14	1,48	0	1,14	0	1,14	0,76	0	0
	Rot. 3	0,33	0,33	0,72	0,72	0	0,5	0	0	0	0,5	0,72	0	0,5	0	0,5	0,33	0	0
	Rot. 4	0,22	0,22	1,26	1,26	0	1,48	1,14	0	0	1,1	1,26	0	0,33	0	1,1	0,98	0	0
	Final	0,58	0,2	1,31	1,31	0	1,59	1,11	0	0	1,16	0,93	0	0,68	0	0,78	0,68	0	0
Trabajador 9	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rot. 2	0,76	0,76	1,14	1,14	0	1,14	0	0	0	1,14	1,14	0	1,14	0	1,14	0,76	0	0
	Pau.1	0,33	0,33	1,26	1,26	0	1,26	0,76	0	0	1,26	1,26	0	1,26	0	0,5	0,33	0	0
	Rot. 3	0,22	0,22	0,67	0,67	0	0,67	0,33	0	0	0,67	0,67	0	0,67	0	0,33	0,22	0	0
	Rot. 4	0,93	0,17	1,23	0,47	0	1,62	0,22	0	0	1,23	0,47	0	0,47	0	0,25	0,17	0	0
	Final	0,64	0,15	1,48	0,81	0	1,72	0,58	0	0	1,29	0,81	0	0,81	0	0,61	0,15	0	0

Tabla 8.33: Evolución del valor de los ítems de los trabajadores 6 a 9 para cada rotación en la solución obtenida en E_{14} en la ejecución 4.

		Bravo-abducción	Bravo-extensión	Bravo-flexión	Codo-flexión	Cuello-extensión	Cuello-flexión	Cuello-giro	Cuello-lateralización	Hombro-elevación	Dedos-pinzar	Mano-flexión	Mano-extensión	Mano-giro	Mano-lateralización	Tronco-flexión	Tronco-giro	Tronco-lateralización	Piernas-flexión
Trabajador 10	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rot. 2	0,76	0,76	0,76	0	0	0,76	0,76	0	0	0,76	0,76	0	0	0	0	0	0	0
	Pau.1	0,33	0,33	1,1	0,76	0	1,1	0,33	0	0	0,33	0,33	0	0,76	0	0	0	0	0
	Rot. 3	0,22	0,22	0,56	0,33	0	0,56	0,22	0	0	0,22	0,22	0	0,33	0	0	0	0	0
	Rot. 4	0,17	0,17	1,53	1,37	0	1,53	0,93	0	0	0,93	1,31	0	0,22	0	0,76	0	0	0,76
	Final	0,15	0,15	1,46	1,31	0	1,46	0,64	0	0	0,64	0,88	0	0,58	0	0,48	0	0	0,48
Trabajador 11	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rot. 2	0,76	0	0,76	0	0	1,14	0	0	0	0,76	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pau.1	0,33	0	1,1	0,76	0	1,64	0,76	0	0	1,1	1,14	0	0,76	0	0	0	0	0
	Rot. 3	0,22	0	0,56	0,33	0	0,83	0,33	0	0	0,56	0,5	0	0,33	0	0	0	0	0
	Rot. 4	0,17	0	1,53	0,98	0	1,73	0,98	0	0	1,15	1,1	0	0,98	0	0,76	0	0	0
	Final	0,53	0,38	1,46	0,68	0	1,63	1,06	0	0	1,22	1,16	0	0,68	0	0,48	0	0	0
Trabajador 12	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	2	3	3	2
	Rot. 2	0	0	0,76	0,76	0	1,14	0,76	0	2	0,76	1,14	0	0,76	0	2	3	3	2
	Pau.1	0,76	0	1,1	0,33	0	1,64	0,33	0	2	1,1	0,5	0	0,33	0	2	3	3	2
	Rot. 3	0,33	0	0,56	0,22	0	0,83	0,22	0	2	0,56	0,33	0	0,22	0	2	3	3	2
	Rot. 4	0,22	0	1,15	0,93	0	1,73	0,93	0	2	1,15	1,39	0	0,93	0	2	3	3	2
	Final	0,58	0	1,22	0,64	0	1,82	0,64	0	2	1,22	0,96	0	0,64	0	2	3	3	2
Trabajador 13	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rot. 2	0	0	0,76	0,76	0	0,76	0,76	0	0	0,76	0,76	0	0,76	0	0	0	0	0
	Pau.1	0	0	1,48	1,1	0	1,48	1,1	0	0	1,1	1,1	0	1,1	0	0,76	0	0	0
	Rot. 3	0	0	0,72	0,56	0	0,72	0,56	0	0	0,56	0,56	0	0,56	0	0,33	0	0	0
	Rot. 4	0	0	1,26	1,15	0	1,64	1,53	0	0	1,15	1,15	0	1,15	0	0,98	0,76	0	0
	Final	0,38	0	1,31	0,83	0	1,75	1,08	0	0	1,22	0,83	0	0,83	0	0,68	0,48	0	0
Trabajador 14	Rot. 1	0	0	0	0	2	1	1	2	1	0	0	0	0	0	1	2	1	0
	Rot. 2	0	0	0,76	0,76	2	2,14	1,76	2	1	0,76	0,76	0	0,76	0	1	2	1	0
	Pau.1	0	0	1,1	1,1	2	1,5	1,33	2	1	0,33	1,1	0	0,33	0	1	2	1	0
	Rot. 3	0	0	0,56	0,56	2	1,33	1,22	2	1	0,22	0,56	0	0,22	0	1	2	1	0
	Rot. 4	0,76	0	1,15	0,39	2	2,39	1,17	2	1	0,93	0,39	0	0,17	0	1	2	1	0
	Final	0,48	0	1,22	0,73	2	2,53	1,53	2	1	1,02	0,92	0	0,53	0	1	2	1	0

Tabla 8.34: Evolución del valor de los ítems de los trabajadores 10 a 14 para cada rotación en la solución obtenida en E_{14} en la ejecución 4.

		Bravo-abducción	Bravo-extensión	Bravo-flexión	Codo-flexión	Cuello-extensión	Cuello-flexión	Cuello-giro	Cuello-lateralización	Hombro-elevación	Dedos-pinzar	Mano-flexión	Mano-extensión	Mano-giro	Mano-lateralización	Tronco-flexión	Tronco-giro	Tronco-lateralización	Piernas-flexión
Trabajador 14	Rot. 1	0	0	0	0	2	1	1	2	1	0	0	0	0	0	1	2	1	0
	Rot. 2	0	0	0,76	0,76	2	2,14	1,76	2	1	0,76	0,76	0	0,76	0	1	2	1	0
	Pau.1	0	0	1,1	1,1	2	1,5	1,33	2	1	0,33	1,1	0	0,33	0	1	2	1	0
	Rot. 3	0	0	0,56	0,56	2	1,33	1,22	2	1	0,22	0,56	0	0,22	0	1	2	1	0
	Rot. 4	0,76	0	1,15	0,39	2	2,39	1,17	2	1	0,93	0,39	0	0,17	0	1	2	1	0
	Final	0,48	0	1,22	0,73	2	2,53	1,53	2	1	1,02	0,92	0	0,53	0	1	2	1	0
Trabajador 15	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
	Rot. 2	0,76	0	0,76	0	0	1,14	0	0	0	0,76	0	0	0	0	0	0	0	2
	Pau.1	0,33	0	1,48	1,14	0	1,64	1,14	0	0	1,1	0,76	0	0,76	0	0,76	0	0	2
	Rot. 3	0,22	0	0,72	0,5	0	0,83	0,5	0	0	0,56	0,33	0	0,33	0	0,33	0	0	2
	Rot. 4	0,93	0,76	1,26	0,33	0	1,35	1,1	0	0	1,15	0,98	0	0,22	0	0,22	0	0	2
	Final	0,64	0,48	1,5	0,87	0	1,58	1,35	0	0	1,22	1,06	0	0,58	0	0,58	0	0	2
Trabajador 16	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rot. 2	0,76	0	0,76	0,76	0	1,14	0,76	0	0	0,76	0	0	0,76	0	0	0	0	0
	Pau.1	0,33	0	1,48	1,48	0	1,64	1,1	0	0	1,1	1,14	0	0,33	0	0,76	0	0	0,76
	Rot. 3	0,22	0	0,72	0,72	0	0,83	0,56	0	0	0,56	0,5	0	0,22	0	0,33	0	0	0,33
	Rot. 4	0,17	0	1,26	1,26	0	1,35	1,15	0	0	1,15	1,1	0	0,93	0	0,22	0	0	0,22
	Final	0,53	0	1,31	0,93	0	1,58	0,83	0	0	1,22	0,78	0	0,64	0	0,2	0	0	0,2
Trabajador 17	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rot. 2	0,76	0	0,76	0	0	1,14	0	0	0	0,76	0	0	0	0	0	0	0	0
	Pau.1	0,33	0	1,1	0,76	0	1,64	1,14	0	0	1,1	0,76	0	0,76	0	0,76	0,76	0	0
	Rot. 3	0,22	0	0,56	0,33	0	0,83	0,5	0	0	0,56	0,33	0	0,33	0	0,33	0,33	0	0
	Rot. 4	0,17	0	1,15	0,98	0	1,73	1,1	0	0	1,15	0,98	0	0,98	0	0,22	0,22	0	0
	Final	0,15	0	1,22	1,06	0	1,25	0,78	0	0	0,83	1,06	0	0,68	0	0,2	0,2	0	0
Trabajador 18	Rot. 1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Rot. 2	0	0	1,14	1,14	0	1,14	1,14	0	0	0,76	0,76	0	0,76	0	0,76	0	0	0
	Pau.1	0	0	0,5	0,5	0	0,5	0,5	0	0	0,33	1,1	0	0,33	0	1,1	0	0	0
	Rot. 3	0	0	0,33	0,33	0	0,33	0,33	0	0	0,22	0,56	0	0,22	0	0,56	0	0	0
	Rot. 4	0,76	0,76	1,39	1,39	0	1,39	0,25	0	0	1,31	1,53	0	1,31	0	1,53	0,76	0	0
	Final	0,48	0,48	1,34	1,34	0	1,53	0,61	0	0	1,26	1,46	0	1,26	0	1,08	0,48	0	0

Tabla 8.35: Evolución del valor de los ítems de los trabajadores 14 a 18 para cada rotación en la solución obtenida en E₁₄ en la ejecución 4.

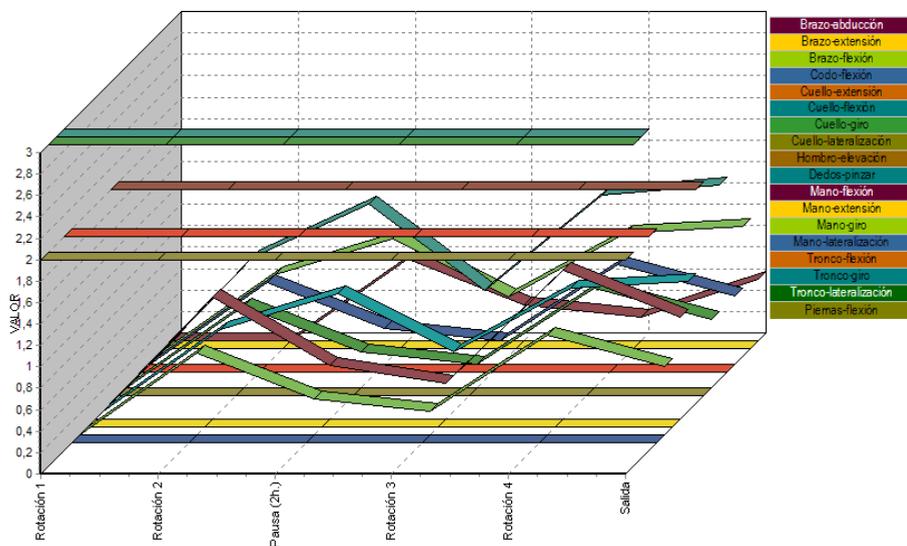


Figura 8.15: Evolución de los valores de los ítems del trabajador 12 a lo largo de las rotaciones en la solución obtenida en E_{14} en la ejecución 4.

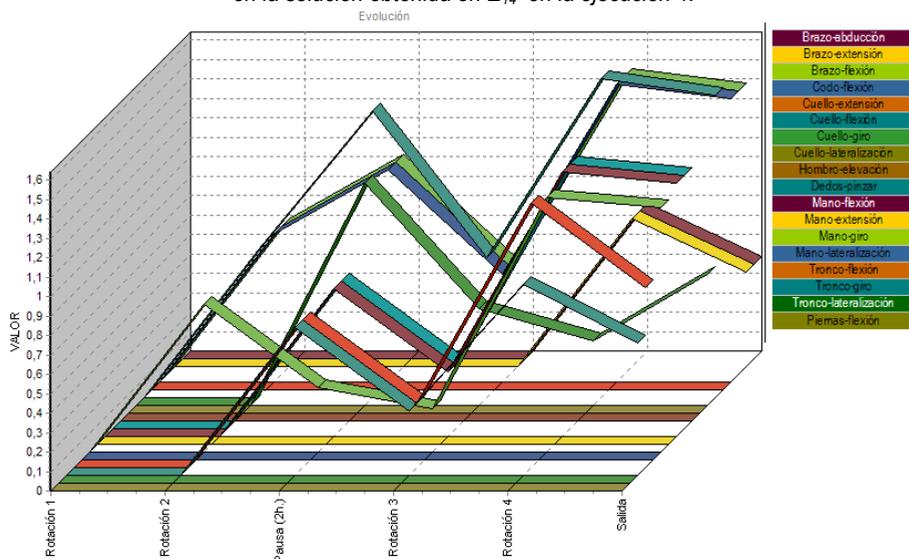


Figura 8.16: Evolución de los valores de los ítems del trabajador 1 a lo largo de las rotaciones en la solución obtenida en E_{14} en la ejecución 4.

9

Conclusiones y trabajos futuros

9. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

9.1. Conclusiones

La metodología que se ha propuesto en la presente tesis viene a cubrir la carencia de procedimientos sistemáticos de generación de agendas de rotación bajo un enfoque ergonómico. La aplicación de la metodología propuesta permite al planificador sistematizar el proceso de diseño de agendas de rotación, y le orienta sobre la forma de considerar los factores que pueden influir en la correcta aplicación de dicha técnica.

Respecto al AG desarrollado con el objetivo de solucionar el problema de optimización planteado, los experimentos llevados a cabo, han permitido validar la capacidad de dicha propuesta para la resolución del problema de la generación de agendas de rotación considerando simultáneamente múltiples criterios y restricciones de asignación, proporcionando buenos resultados en tiempos reducidos de cálculo.

El algoritmo presentado se aproxima al problema desde un enfoque multicriterio, considerando los diferentes factores que afectan a la obtención de soluciones que maximicen los beneficios derivados de la adopción de un sistema de rotación de puestos de trabajo. Para la evaluación de las soluciones el algoritmo considera no sólo la asignación de cada trabajador en cada puesto, sino también el historial previo de asignaciones del trabajador en rotaciones precedentes. En el caso planteado para la validación del algoritmo, se ha logrado obtener soluciones en las que se minimiza la realización prolongada de movimientos de los diferentes miembros del cuerpo, se diversifica el contenido de las tareas realizadas en la jornada y se consideran las limitaciones y preferencias de los trabajadores.

Otro aspecto a destacar del AG presentado, que facilita su aplicación, es la reducida sensibilidad de los resultados obtenidos a una parametrización exhaustiva. El estudio llevado a cabo proporciona ordenes de magnitud de los valores de los mismos que, salvo excepciones, pueden resultar válidas para problemas de distintos tipos.

Cualquier herramienta de ayuda a la organización del trabajo debe ser flexible, adecuándose a las particularidades de cada proceso productivo y el carácter dinámico de dichos procesos. El algoritmo propuesto es capaz de localizar múltiples agendas de rotación que se adaptan al problema planteado con pequeñas diferencias en su valoración. El algoritmo permite, dado el modelo aditivo de la función evaluadora empleado, ponderar el peso de cada uno de los criterios considerados y dejar abierta la posibilidad de incluir nuevos criterios o factores. Por otra parte, la implementación del algoritmo en la aplicación informática MORE, permite la gestión, explotación, modificación y reutilización de la información sobre los trabajadores, puestos y factores evaluados, así como almacenar las agenda de

rotación encontradas y generar informes sobre ellas. Dicha funcionalidad facilita al planificador recalcular y evaluar nuevas soluciones que se adapten a cambios en la plantilla, en los horarios, en las características de los puestos o en las capacidades de los trabajadores. Así, ante una discapacidad temporal de un trabajador, MORE permite buscar en el entorno de la solución actual una nueva agenda de rotación que, con el mínimo cambio en las asignaciones, y por tanto en la aptitud, considere las nuevas condiciones del trabajador. En definitiva, la aplicación MORE resulta fundamental para la aplicación en entornos reales de la metodología propuesta.

Los resultados de este estudio sugieren que la metodología presentada puede resultar una herramienta eficiente en el proceso de diseño ergonómico de agendas de rotación, requiriendo un esfuerzo inicial para la selección de los factores de riesgo a considerar, la elección de los métodos ergonómicos más adecuados para su valoración, y la selección y evaluación de los puestos y los trabajadores implicados en las rotaciones, tras el cuál, el cálculo de diferentes agendas de rotación es una tarea rápida y simple mediante el empleo del AG incluido en ella.

Además de las aportaciones mencionadas se han alcanzado los objetivos planteados en el inicio del presente trabajo:

- Se ha llevado a cabo un análisis del estado del arte de la rotación de puestos de trabajo, empleándose las conclusiones extraídas en la definición de un procedimiento sistemático, estructurado en fases, para asistir al planificador en el proceso de diseño de agendas de rotación encaminadas a la prevención de los TME.
- Se han estudiado los factores de riesgo relacionados con los trastornos músculo-esqueléticos, así como los principales métodos de evaluación ergonómica empleados para su identificación y valoración, con el objetivo de aplicar el conocimiento adquirido en la definición de criterios e indicadores (ítems) que contribuyan al diseño de agendas de rotación que prevengan los TME.
- Se ha estudiado el funcionamiento y el estado del conocimiento de las técnicas metaheurísticas empleadas en la resolución de problemas de optimización combinatoria, al que pertenece el problema planteado y su aplicación a la generación de agendas de rotación.
- Se ha realizado un profundo análisis de la teoría en la que se asientan los algoritmos genéticos, y se han empleado dichos conocimientos para lograr una correcta y eficaz aplicación al problema en cuestión. Dicho análisis se ha materializado en el desarrollo de un AG, como parte de la metodología propuesta, capaz de generar agendas de rotación que optimizan, simultáneamente, múltiples criterios asociados con los TME, diversifican las tareas a realizar durante la jornada, consideran las discapacidades permanentes o temporales de los trabajadores, y sus preferencias, y cumplen con las restricciones de asignación impuestas por el planificador.
- Se ha desarrollado una aplicación informática (MORE) que implementa el

algoritmo desarrollado y facilita el almacenamiento y mantenimiento de la información o *inputs* generados en las fases precedentes de la metodología. Además, el software es en la actualidad ofrecido por la mutua ASEPEYO a sus mutualistas. Entre las empresas que explotan el software fruto de la presente investigación cabe destacar, dada su relevancia, la factoría Ford (España).

- Se han obtenido valores de referencia para los parámetros del AG propuesto, resultado del estudio de parametrización llevado a cabo.
- En el caso de estudio utilizado para la validación de la metodología se han obtenido un conjunto de ítems de movimientos y de capacidades que podrían ser aplicados en otros entornos de características similares.

En definitiva, se ha logrado el objetivo primordial del presente trabajo: se ha desarrollado un método eficiente que permite obtener agendas de rotación destinadas a prevenir los TME frente a uno o varios factores de riesgo. Además, la sencillez de interpretación de los resultados proporcionados, en forma de matriz de asignaciones, facilita al planificador su traslado a la realidad.

Finalmente, se considera que el empleo de la metodología presentada ayudará a la mejora de las condiciones laborales de los trabajadores implicados.

9.2. Trabajos futuros

La validación de metodología se ha centrado fundamentalmente en su capacidad de cálculo de agendas de rotación ajustadas a las restricciones y criterios de un caso concreto de estudio. Sin embargo, la metodología ha sido también empleada para la generación de agendas de rotación en otras plantas manufactureras. En estos casos, su aplicación no ha presentado problemas y ha demostrado su flexibilidad. No obstante, queda pendiente validar si una vez implantadas las agendas de rotación obtenidas mediante la metodología, éstas han supuesto una disminución de la incidencia de los TME entre los trabajadores implicados. Para validar dicha capacidad será necesario esperar a la obtención de datos al respecto y su comparación con el índice de incidencias anterior a la implantación. Debido a que este tipo de trastornos tiene carácter acumulativo, será necesario esperar un periodo suficientemente largo para poder obtener datos significativos.

En relación al AG propuesto, se considera necesario un estudio más profundo sobre la sensibilidad del algoritmo a los diferentes parámetros, y la obtención de valores adecuados para la resolución de otros problemas. Yendo más allá, podrían introducirse mecanismos de auto-adaptación de los diferentes parámetros en función de la evolución de las diferentes generaciones [Srinivas et al., 94b].

Se considera conveniente estudiar el empleo de técnicas de optimización multicriterio más elaboradas que la suma ponderada utilizada en la función de evaluación del AG propuesto. Sin embargo, la inclusión de dichas técnicas en el proceso de evaluación de la bondad de las agendas de rotación no debería retrasar excesivamente el tiempo de cálculo.

Por otra parte, sería necesario explotar el enfoque multicriterio actual de la metodología estudiando su aplicación a la disminución conjunta de la exposición a múltiples factores de riesgo relacionados con los TME. El levantamiento de cargas en cada puesto podría ser contemplado mediante el cálculo del *Job Severity Index* [Ayoub et al., 78; Liles et al., 84], o la ecuación de NIOSH [Waters et al., 94]. También podría incluirse la adopción de posturas forzadas en los puestos, para lo cual podría aplicarse los métodos REBA [Hignett et al., 00] o RULA [McAtamney et al., 93]. Los resultados de la aplicación de los métodos ergonómicos nombrados podrían considerarse como ítems, y ser incluidos en la función de evaluación con sus correspondientes coeficientes de ponderación, siendo el establecimiento de dichos coeficientes y la normalización de las valoraciones de los ítems de los distintos métodos cuestiones no exentas de dificultad.

La duración y número de las rotaciones y las pausas son, en el problema validado, establecidas por el planificador basándose en los requerimientos de la producción y los horarios de la organización. Sin embargo, tal y como se deriva de los experimentos realizados, la duración y distribución de las rotaciones y las pausas influye en la bondad de las soluciones. Por tanto, podría resultar interesante que el propio AG fuera capaz de asesorar al planificador sobre las distribuciones y duraciones más adecuadas. Esto podría llevarse a cabo introduciéndolas en la codificación de cada individuo. Esta nueva codificación haría necesaria la modificación de los operadores de cruce y mutación de manera que impidieran la proliferación de individuos inviables en la práctica.

También queda pendiente de estudio la modificación del AG propuesto para obtener agrupaciones de trabajadores entre los que las rotaciones se realicen de forma cíclica, de modo que se faciliten los intercambios entre trabajadores tras cada rotación y la existencia de trabajadores monitores⁶³ en los diferentes grupos de trabajo.

Finalmente, se considera necesario transferir los resultados de esta investigación a la comunidad científica, a la docencia, y a la sociedad mediante su publicación.

⁶³ Los *monitores* sustituyen a otros trabajadores cuando éstos deben abandonar temporalmente su lugar de trabajo con el objetivo de evitar retrasos y desajustes en la producción en cadena.

10

ANEXO 1
Resultados completos de los experimentos

10. RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS REALIZADOS

10.1. Experimentos de parametrización (E_1 a E_{13})

10.1.1 Parámetros del AG dependientes de las especificaciones del problema empleados en los experimentos E_1 a E_{13}

Acrónimo	Nombre del parámetro	Valor
n_{wor}	Número de trabajadores y puestos	18
n_{rot}	Número de rotaciones	4
n_{it}	Número de ítems considerados en la fórmula de evaluación	18
$C_1...C_{18}$	Coefficientes de ponderación de los ítems	1
f_{red}	Factor de reducción	3
tre	Valor umbral	1
t_1	Duración de la Rotación 1	2 horas
t_2	Duración de la Rotación 2	2 horas
t_3	Duración de la Rotación 3	2 horas
t_4	Duración de la Rotación 4	1 hora
p_1	Duración de la pausa 1 (almuerzo)	2 horas
t_{max}	Tiempo máximo consecutivo de permanencia en puestos similares	2 horas

10.1.2 Asignaciones vetadas correspondientes a las limitaciones de los trabajadores empleadas en los experimento E_1 a E_{13}

	Puesto																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Trabajador 1																		
Trabajador 2																		
Trabajador 3																		
Trabajador 4																		
Trabajador 5																		
Trabajador 6																		
Trabajador 7																		
Trabajador 8																		
Trabajador 9																		
Trabajador 10																		
Trabajador 11																		
Trabajador 12	•				•	•	•	•	•	•		•	•		•	•	•	•
Trabajador 13	•				•	•	•		•	•							•	•
Trabajador 14	•				•	•												
Trabajador 15	•					•												
Trabajador 16																		
Trabajador 17																		

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 10 de E₁

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 12	Puesto 9	27,71
Trabajador 2	Puesto 12	Puesto 8	Puesto 1	Puesto 6	27,65
Trabajador 3	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 17	21,17
Trabajador 4	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 9	Puesto 3	26,13
Trabajador 5	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 1	26,02
Trabajador 6	Puesto 3	Puesto 9	Puesto 7	Puesto 18	24,41
Trabajador 7	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 13	Puesto 12	30,85
Trabajador 8	Puesto 16	Puesto 5	Puesto 17	Puesto 15	26,42
Trabajador 9	Puesto 10	Puesto 3	Puesto 18	Puesto 8	33,82
Trabajador 10	Puesto 17	Puesto 16	Puesto 6	Puesto 10	37,26
Trabajador 11	Puesto 18	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 13	33,05
Trabajador 12	Puesto 2	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	35,92
Trabajador 13	Puesto 8	Puesto 13	Puesto 3	Puesto 14	30,51
Trabajador 14	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 7	50,56
Trabajador 15	Puesto 9	Puesto 12	Puesto 8	Puesto 2	31,17
Trabajador 16	Puesto 4	Puesto 17	Puesto 10	Puesto 16	33,83
Trabajador 17	Puesto 15	Puesto 1	Puesto 16	Puesto 5	31,35
Trabajador 18	Puesto 13	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 4	26,36
				Coste medio	30,78
				Desviación típicas	6,15
				Aptitud	554,2

10.1.4 Experimento E₂**Parámetros de la ejecución de E₂**

Acrónimo	Nombre del parámetro	Valores
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
n_i	Individuos en cada generación	50
p_c	Probabilidad de cruce	0,6
p_m	Probabilidad de mutación	0,3
i_m	Intensidad de mutación	1
u	Exponente de la función de evaluación	1
	Estrategia elitista	Activa
le₁	Intensidad del elitismo	1
	Intensificación de la búsqueda	inactiva
vs	Valor superior	-
g	Periodo de intensificación de la búsqueda	-

Valores de las 10 ejecuciones realizadas en E₂

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	3601	552,63	30,7	6,89
2	3199	556	30,89	6,49
3	3686	556,12	30,9	7,27
4	2654	554,47	30,8	6,61
5	2956	556,18	30,9	6,98
6	1940	557,29	30,96	7,49
7	3561	556,26	30,9	5,89
8	2865	556,05	30,89	6,07
9	2357	557,27	30,96	6,04
10	3265	553,96	30,78	6,82

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₂

Generación máxima del óptimo	3686
Generación del óptimo media	3008
Valor medio de la mejor Aptitud	555,62
Aptitud máxima	557,29
Aptitud mínima	552,63
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	30,86
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,65
Tiempo empleado	0:21:35

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 10 de E₂

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 8	Puesto 13	24,95
Trabajador 2	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 11	24,98
Trabajador 3	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 17	Puesto 16	25,64
Trabajador 4	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 4	Puesto 17	21,17
Trabajador 5	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 18	26,43
Trabajador 6	Puesto 12	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 10	26,91
Trabajador 7	Puesto 9	Puesto 2	Puesto 9	Puesto 5	31,04
Trabajador 8	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 3	Puesto 9	37,34
Trabajador 9	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 13	Puesto 12	29,92
Trabajador 10	Puesto 18	Puesto 16	Puesto 10	Puesto 3	41,77
Trabajador 11	Puesto 16	Puesto 7	Puesto 18	Puesto 15	29,68
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 2	39,42
Trabajador 13	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 14	Puesto 4	32,6
Trabajador 14	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 16	Puesto 7	47,91
Trabajador 15	Puesto 4	Puesto 9	Puesto 12	Puesto 8	25,68
Trabajador 16	Puesto 2	Puesto 17	Puesto 7	Puesto 14	26,02
Trabajador 17	Puesto 8	Puesto 13	Puesto 2	Puesto 1	31,23
Trabajador 18	Puesto 14	Puesto 4	Puesto 1	Puesto 6	29,93
Coste medio					30,70
Desviación típicas					6,51
Aptitud					552,63

10.1.5 Experimento E₃**Parámetros de la ejecución de E₃**

Acrónimo	Nombre del parámetro	Valores
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
n_i	Individuos en cada generación	20
p_c	Probabilidad de cruce	0,6
p_m	Probabilidad de mutación	0,3
i_m	Intensidad de mutación	1
u	Exponente de la función de evaluación	1
	Estrategia elitista	Activa
le₁	Intensidad del elitismo	1
	Intensificación de la búsqueda	inactiva
vs	Valor superior	-
g	Periodo de intensificación de la búsqueda	-

Valores de las 10 ejecuciones de E₃

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	2806	555,04	30,84	7,05
2	3282	554,82	30,82	7,05
3	3438	555,14	30,84	6,61
4	2239	557,21	30,96	5,48
5	3828	557,86	30,99	6,16
6	1838	556,34	30,91	5,73
7	3944	557,1	30,95	7,52
8	3928	555,68	30,87	6,77
9	3711	556,64	30,93	6,77
10	3423	554,21	30,79	6,73

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₃

Generación máxima del óptimo	3944
Generación del óptimo media	3243
Valor medio de la mejor Aptitud	556
Aptitud máxima	557,86
Aptitud mínima	554,21
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	30,89
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,59
Tiempo empleado	0:15:08

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 10 de E₃

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 12	Puesto 1	Puesto 8	Puesto 4	29,23
Trabajador 2	Puesto 3	Puesto 18	Puesto 9	Puesto 5	31,78
Trabajador 3	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 15	Puesto 13	23,74
Trabajador 4	Puesto 5	Puesto 17	Puesto 16	Puesto 10	25,49
Trabajador 5	Puesto 1	Puesto 4	Puesto 17	Puesto 8	35,99
Trabajador 6	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 11	Puesto 12	24,49
Trabajador 7	Puesto 18	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 2	33,91
Trabajador 8	Puesto 2	Puesto 9	Puesto 5	Puesto 17	22,09
Trabajador 9	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 6	Puesto 18	29,43
Trabajador 10	Puesto 10	Puesto 16	Puesto 13	Puesto 7	33,9
Trabajador 11	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 16	25,64
Trabajador 12	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	35,92
Trabajador 13	Puesto 8	Puesto 13	Puesto 3	Puesto 14	30,51
Trabajador 14	Puesto 11	Puesto 15	Puesto 7	Puesto 15	50,27
Trabajador 15	Puesto 9	Puesto 2	Puesto 12	Puesto 9	31,02
Trabajador 16	Puesto 14	Puesto 3	Puesto 1	Puesto 6	29,93
Trabajador 17	Puesto 16	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 3	23,67
Trabajador 18	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 2	Puesto 1	37,21
Coste medio					30,79
Desviación típicas					6,36
Aptitud					554,21

10.1.6 Experimento E₄**Parámetros de la ejecución de E₄**

Acrónimo	Nombre del parámetro	Valores
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
n_i	Individuos en cada generación	80
p_c	Probabilidad de cruce	0,6
p_m	Probabilidad de mutación	0,3
i_m	Intensidad de mutación	1
u	Exponente de la función de evaluación	1
	Estrategia elitista	Activa
le₁	Intensidad del elitismo	1
	Intensificación de la búsqueda	inactiva
vs	Valor superior	-
g	Periodo de intensificación de la búsqueda	-

Valores de las 10 ejecuciones de E₄

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	3253	556,41	30,91	6,36
2	3743	556,7	30,93	5,96
3	3936	557,19	30,95	8,15
4	3146	556,26	30,9	7,43
5	2862	557,06	30,95	5,8
6	3183	554,98	30,83	8,03
7	2378	558,9	31,05	6,16
8	3837	553,17	30,73	6,97
9	3941	556,69	30,93	7,05
10	3987	556,9	30,94	6,56

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₄

Generación máxima del óptimo	3987
Generación del óptimo media	3426
Valor medio de la mejor Aptitud	556,42
Aptitud máxima	558,9
Aptitud mínima	553,17
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	30,91
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,84
Tiempo empleado	0:45:39

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 10 de E₄

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 2	Puesto 17	Puesto 16	Puesto 5	28,28
Trabajador 2	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 8	Puesto 13	24,95
Trabajador 3	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 7	Puesto 18	28,75
Trabajador 4	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 9	19,95
Trabajador 5	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 3	Puesto 14	36,56
Trabajador 6	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 14	Puesto 3	29,01
Trabajador 7	Puesto 15	Puesto 13	Puesto 5	Puesto 17	28,11
Trabajador 8	Puesto 18	Puesto 16	Puesto 10	Puesto 4	41,77
Trabajador 9	Puesto 4	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 10	22,93
Trabajador 10	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 9	Puesto 7	30,32
Trabajador 11	Puesto 8	Puesto 4	Puesto 17	Puesto 8	30,88
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 2	39,42
Trabajador 13	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 13	Puesto 12	27,15
Trabajador 14	Puesto 16	Puesto 7	Puesto 15	Puesto 16	48,07
Trabajador 15	Puesto 12	Puesto 9	Puesto 4	Puesto 11	29,34
Trabajador 16	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 1	Puesto 6	32,21
Trabajador 17	Puesto 9	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 15	31,5
Trabajador 18	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 12	Puesto 1	23,98
Coste medio					30,73
Desviación típicas					6,59
Aptitud					553,17

10.1.7 Experimento E₅**Parámetros de la ejecución de E₅**

Acrónimo	Nombre del parámetro	Valores
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
n_i	Individuos en cada generación	50
p_c	Probabilidad de cruce	0,3
p_m	Probabilidad de mutación	0,3
i_m	Intensidad de mutación	1
u	Exponente de la función de evaluación	1
	Estrategia elitista	Activa
le₁	Intensidad del elitismo	1
	Intensificación de la búsqueda	inactiva
vs	Valor superior	-
g	Periodo de intensificación de la búsqueda	-

Valores de las 10 ejecuciones de E₅

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	3674	554,58	30,81	6,73
2	3710	554,95	30,83	6,48
3	3959	555,52	30,86	7,89
4	3663	554,95	30,83	7,72
5	3687	555,51	30,86	7,09
6	2374	556,02	30,89	6,06
7	3768	556,06	30,89	5,33
8	3502	558,27	31,02	6,34
9	3699	556,36	30,91	6,54
10	2958	557,78	30,99	6,98

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₅

Generación máxima del óptimo	3959
Generación del óptimo media	3499
Valor medio de la mejor Aptitud	556
Aptitud máxima	558,27
Aptitud mínima	554,58
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	30,89
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,72
Tiempo empleado	0:21:35

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 10 de E₅

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 4	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 10	31,72
Trabajador 2	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 7	Puesto 17	28,75
Trabajador 3	Puesto 3	Puesto 1	Puesto 16	Puesto 5	24,32
Trabajador 4	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 12	Puesto 9	27,71
Trabajador 5	Puesto 9	Puesto 4	Puesto 6	Puesto 14	27,03
Trabajador 6	Puesto 18	Puesto 8	Puesto 10	Puesto 2	39,7
Trabajador 7	Puesto 14	Puesto 3	Puesto 1	Puesto 6	29,93
Trabajador 8	Puesto 17	Puesto 16	Puesto 5	Puesto 13	33,99
Trabajador 9	Puesto 16	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 15	26,42
Trabajador 10	Puesto 15	Puesto 7	Puesto 17	Puesto 16	28,9
Trabajador 11	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 9	Puesto 4	26,13
Trabajador 12	Puesto 2	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	35,92
Trabajador 13	Puesto 8	Puesto 13	Puesto 14	Puesto 3	34,79
Trabajador 14	Puesto 11	Puesto 2	Puesto 11	Puesto 7	50,56
Trabajador 15	Puesto 12	Puesto 9	Puesto 3	Puesto 8	28,09
Trabajador 16	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 13	Puesto 12	25,94
Trabajador 17	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 15	Puesto 1	33,51
Trabajador 18	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 18	21,17
Coste medio					30,81
Desviación típicas					6,36
Aptitud					554,58

10.1.8 Experimento E₆**Parámetros de la ejecución de E₆**

Acrónimo	Nombre del parámetro	Valores
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
n_i	Individuos en cada generación	50
p_c	Probabilidad de cruce	0,90
p_m	Probabilidad de mutación	0,3
i_m	Intensidad de mutación	1
u	Exponente de la función de evaluación (uniformidad)	1
	Estrategia elitista	Activa
le₁	Intensidad del elitismo	1
	Intensificación de la búsqueda	inactiva
vs	Valor superior	-
g	Número de generación para la intensificación de la búsqueda	-

Valores de las 10 ejecuciones de E₆

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	3978	553,51	30,75	6,41
2	3523	554,9	30,83	7,59
3	3789	555,79	30,88	6,03
4	3927	554,51	30,81	7,07
5	3771	554,77	30,82	6,5
6	3457	556,39	30,91	6,37
7	2711	556,13	30,9	8,24
8	1859	555,82	30,88	8,06
9	2312	555,26	30,85	6,49
10	3487	557,9	30,99	6,27

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 de E₆

Generación máxima del óptimo	3978
Generación del óptimo media	3281
Valor medio de la mejor Aptitud	555,498
Aptitud máxima	557,9
Aptitud mínima	553,51
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	30,862
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,90
Tiempo empleado	0:29:34

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 1 de E₆

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 14	Puesto 4	Puesto 1	Puesto 6	29,93
Trabajador 2	Puesto 2	Puesto 9	Puesto 12	Puesto 1	27,92
Trabajador 3	Puesto 13	Puesto 3	Puesto 17	Puesto 8	35,73
Trabajador 4	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 18	21,17
Trabajador 5	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 16	Puesto 5	29,29
Trabajador 6	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 16	25,64
Trabajador 7	Puesto 12	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 10	26,91
Trabajador 8	Puesto 4	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 7	28,27
Trabajador 9	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 4	Puesto 17	23,2
Trabajador 10	Puesto 8	Puesto 13	Puesto 10	Puesto 15	35,47
Trabajador 11	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 14	Puesto 3	29,01
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 2	Puesto 11	Puesto 4	39,42
Trabajador 13	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 13	Puesto 12	27,15
Trabajador 14	Puesto 16	Puesto 7	Puesto 15	Puesto 11	48,29
Trabajador 15	Puesto 9	Puesto 12	Puesto 3	Puesto 9	31,7
Trabajador 16	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 9	Puesto 2	26,13
Trabajador 17	Puesto 18	Puesto 8	Puesto 7	Puesto 14	34,27
Trabajador 18	Puesto 17	Puesto 16	Puesto 5	Puesto 13	33,99
Coste medio					30,74
Desviación típicas					6,05
Aptitud					553,51

10.1.9 Experimento E₇**Parámetros de la ejecución de E₇**

Acrónimo	Nombre del parámetro	Valores
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
n _i	Individuos en cada generación	50
p _c	Probabilidad de cruce	0,6
p _m	Probabilidad de mutación	0,1
i _m	Intensidad de mutación	1
u	Exponente de la función de evaluación (uniformidad)	1
	Estrategia elitista	Activa
le ₁	Intensidad del elitismo	1
	Intensificación de la búsqueda	inactiva
vs	Valor superior	-
g	Número de generación para la intensificación de la búsqueda	-

Valores de las 10 ejecuciones de E₇

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	3593	556,31	30,91	6,55
2	2254	556,16	30,9	5,94
3	3529	554,14	30,79	6,71
4	3863	553,77	30,77	7,37
5	2356	555,22	30,85	7,05
6	3644	555,85	30,88	6,05
7	3072	554,52	30,81	7,07
8	2182	556,53	30,92	8,15
9	3742	555,68	30,87	6,48
10	2857	555,8	30,88	5,18

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 de E₇

Generación máxima del óptimo	3863
Generación del óptimo media	3109
Valor medio de la mejor Aptitud	555,39
Aptitud máxima	556,53
Aptitud mínima	553,77
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	30,86
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,65
Tiempo empleado	0:21:28

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 4 de E₇

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 16	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 15	26,42
Trabajador 2	Puesto 17	Puesto 16	Puesto 5	Puesto 13	33,99
Trabajador 3	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 1	19,86
Trabajador 4	Puesto 5	Puesto 17	Puesto 9	Puesto 2	26,13
Trabajador 5	Puesto 4	Puesto 18	Puesto 10	Puesto 16	33,83
Trabajador 6	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 1	Puesto 6	33,71
Trabajador 7	Puesto 18	Puesto 8	Puesto 4	Puesto 10	36,29
Trabajador 8	Puesto 8	Puesto 2	Puesto 17	Puesto 8	30,88
Trabajador 9	Puesto 2	Puesto 13	Puesto 7	Puesto 14	21,42
Trabajador 10	Puesto 15	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 18	32,69
Trabajador 11	Puesto 14	Puesto 3	Puesto 13	Puesto 7	29,03
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 3	39,42
Trabajador 13	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 14	Puesto 4	32,6
Trabajador 14	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 15	Puesto 11	51,1
Trabajador 15	Puesto 12	Puesto 9	Puesto 8	Puesto 12	30,88
Trabajador 16	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 16	Puesto 5	21,02
Trabajador 17	Puesto 9	Puesto 7	Puesto 3	Puesto 17	26,81
Trabajador 18	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 12	Puesto 9	27,71
Coste medio					30,76
Desviación típicas					6,97
Aptitud					553,77

10.1.10 Experimento E₈**Parámetros de la ejecución de E₈**

Acrónimo	Nombre del parámetro	Valores
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
n_i	Individuos en cada generación	50
p_c	Probabilidad de cruce	0,6
p_m	Probabilidad de mutación	0,5
i_m	Intensidad de mutación	1
u	Exponente de la función de evaluación (uniformidad)	1
	Estrategia elitista	Activa
le₁	Intensidad del elitismo	1
	Intensificación de la búsqueda	inactiva
vs	Valor superior	-
g	Número de generación para la intensificación de la búsqueda	-

Valores de las 10 ejecuciones de E₈

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	3714	555,64	30,87	6,06
2	2126	556,73	30,93	7,64
3	3348	554,68	30,82	7
4	2816	555,61	30,87	7
5	2786	556,87	30,94	6,09
6	2421	555,25	30,85	6,34
7	3260	556,93	30,94	5,62
8	1994	554,94	30,83	6,41
9	3094	554,22	30,79	6,78
10	3406	555,32	30,85	7,07

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₈

Generación máxima del óptimo	3714
Generación del óptimo media	2896
Valor medio de la mejor Aptitud	555,62
Aptitud máxima	556,93
Aptitud mínima	554,22
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	30,87
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,60
Tiempo empleado	0:39:36

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 9 de E₈

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 10	Puesto 15	25,56
Trabajador 2	Puesto 8	Puesto 13	Puesto 7	Puesto 14	27,97
Trabajador 3	Puesto 15	Puesto 7	Puesto 18	Puesto 16	28,9
Trabajador 4	Puesto 17	Puesto 4	Puesto 9	Puesto 5	35,33
Trabajador 5	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 12	Puesto 8	25,4
Trabajador 6	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 1	26,02
Trabajador 7	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 13	Puesto 12	30,85
Trabajador 8	Puesto 9	Puesto 12	Puesto 5	Puesto 17	27,8
Trabajador 9	Puesto 16	Puesto 5	Puesto 17	Puesto 4	24,83
Trabajador 10	Puesto 18	Puesto 16	Puesto 4	Puesto 9	39,41
Trabajador 11	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 1	Puesto 6	33,71
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 2	39,42
Trabajador 13	Puesto 13	Puesto 8	Puesto 14	Puesto 3	34,98
Trabajador 14	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 16	Puesto 7	47,91
Trabajador 15	Puesto 12	Puesto 9	Puesto 2	Puesto 11	29,34
Trabajador 16	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 3	Puesto 13	19,54
Trabajador 17	Puesto 4	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 10	31,72
Trabajador 18	Puesto 2	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 18	25,53
Coste medio					30,79
Desviación típicas					6,41
Aptitud					554,22

10.1.11 Experimento E₉**Parámetros de la ejecución de E₉**

Acrónimo	Nombre del parámetro	Valores
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
n _i	Individuos en cada generación	50
p _c	Probabilidad de cruce	0,6
p _m	Probabilidad de mutación	0,3
i _m	Intensidad de mutación	2
u	Exponente de la función de evaluación (uniformidad)	1
	Estrategia elitista	Activa
le ₁	Intensidad del elitismo	1
	Intensificación de la búsqueda	inactiva
vs	Valor superior	-
g	Número de generación para la intensificación de la búsqueda	-

Valores de las 10 ejecuciones realizadas en el experimento E₉

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	2297	555,11	30,84	5,07
2	3956	557,06	30,95	6,7
3	3884	555,72	30,87	7,05
4	2211	557,59	30,98	6,15
5	1436	557,31	30,96	6,37
6	2705	557,9	31	6,74
7	3660	554,05	30,78	7,33
8	3584	556,24	30,9	7,38
9	2997	552,97	30,72	5,46
10	3861	556,77	30,93	5,7

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₉

Generación máxima del óptimo	3956
Generación del óptimo media	3059,1
Valor medio de la mejor Aptitud	556,07
Aptitud máxima	557,9
Aptitud mínima	552,97
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	30,89
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,39
Tiempo empleado	0:43:22

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 9 de E₉

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 17	Puesto 2	29,58
Trabajador 2	Puesto 9	Puesto 2	Puesto 14	Puesto 7	30,65
Trabajador 3	Puesto 12	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 10	26,91
Trabajador 4	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 17	21,17
Trabajador 5	Puesto 8	Puesto 13	Puesto 4	Puesto 14	30,51
Trabajador 6	Puesto 3	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 1	33
Trabajador 7	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 16	Puesto 13	26,18
Trabajador 8	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 1	Puesto 6	32,21
Trabajador 9	Puesto 18	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 9	33,35
Trabajador 10	Puesto 16	Puesto 5	Puesto 9	Puesto 4	22,07
Trabajador 11	Puesto 15	Puesto 7	Puesto 18	Puesto 16	28,9
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 3	39,42
Trabajador 13	Puesto 14	Puesto 4	Puesto 13	Puesto 12	30,85
Trabajador 14	Puesto 2	Puesto 11	Puesto 7	Puesto 15	43,26
Trabajador 15	Puesto 4	Puesto 9	Puesto 12	Puesto 8	25,68
Trabajador 16	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 15	Puesto 5	35,62
Trabajador 17	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 11	30,93
Trabajador 18	Puesto 10	Puesto 16	Puesto 3	Puesto 18	32,67
Coste medio					30,72
Desviación típicas					5,16
Aptitud					552,97

10.1.12 Experimento E₁₀**Parámetros de la ejecución de E₁₀**

Acrónimo	Nombre del parámetro	Valores
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
n _i	Individuos en cada generación	50
p _c	Probabilidad de cruce	0,6
p _m	Probabilidad de mutación	0,3
i _m	Intensidad de mutación	1
u	Exponente de la función de evaluación (uniformidad)	1
	Estrategia elitista	Activa
le ₁	Intensidad del elitismo	1
	Intensificación de la búsqueda	Activa
vs	Valor superior	2
g	Número de generación para la intensificación de la búsqueda	300

Valores de las 10 ejecuciones realizadas en el experimento E₁₀

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	1854	556,42	30,91	6,42
2	1458	556,02	30,89	7,09
3	963	556,91	30,94	5,66
4	3123	555,2	30,85	6,84
5	3303	554,21	30,79	7,79
6	646	555,71	30,87	6,54
7	3233	554,45	30,8	6,17
8	2326	555,38	30,86	7,03
9	607	554,39	30,8	7,55
10	293	555,77	30,88	6,84

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₁₀

Generación máxima del óptimo	3303
Generación del óptimo media	1780
Valor medio de la mejor Aptitud	555,45
Aptitud máxima	556,91
Aptitud mínima	554,21
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	30,86
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,79
Tiempo empleado	0:22:54

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 5 de E₁₀

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 8	Puesto 13	Puesto 5	Puesto 17	27,75
Trabajador 2	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 5	20,2
Trabajador 3	Puesto 18	Puesto 8	Puesto 2	Puesto 11	36,37
Trabajador 4	Puesto 17	Puesto 16	Puesto 4	Puesto 14	38,62
Trabajador 5	Puesto 7	Puesto 18	Puesto 14	Puesto 2	28,41
Trabajador 6	Puesto 4	Puesto 9	Puesto 7	Puesto 18	24,41
Trabajador 7	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 13	Puesto 12	30,85
Trabajador 8	Puesto 5	Puesto 17	Puesto 9	Puesto 4	26,13
Trabajador 9	Puesto 9	Puesto 7	Puesto 10	Puesto 15	29,3
Trabajador 10	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 12	Puesto 1	27,82
Trabajador 11	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 16	25,64
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 3	39,42
Trabajador 13	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 8	Puesto 13	32,31
Trabajador 14	Puesto 16	Puesto 15	Puesto 16	Puesto 7	54,37
Trabajador 15	Puesto 2	Puesto 11	Puesto 3	Puesto 9	24,07
Trabajador 16	Puesto 10	Puesto 3	Puesto 17	Puesto 8	33,82
Trabajador 17	Puesto 12	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 10	26,91
Trabajador 18	Puesto 3	Puesto 14	Puesto 1	Puesto 6	27,8
Coste medio					30,79
Desviación típicas					7,36
Aptitud					554,2

10.1.13 Experimento E₁₁**Parámetros de la ejecución de E₁₁**

Acrónimo	Nombre del parámetro	Valores
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
n _i	Individuos en cada generación	50
p _c	Probabilidad de cruce	0,6
p _m	Probabilidad de mutación	0,3
i _m	Intensidad de mutación	1
u	Exponente de la función de evaluación (uniformidad)	1
	Estrategia elitista	Activa
le ₁	Intensidad del elitismo	1
	Intensificación de la búsqueda	Activa
vs	Valor superior	2
g	Número de generación para la intensificación de la búsqueda	150

Valores de las 10 ejecuciones realizadas en el experimento E₁₁

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	561	554	30,78	7,17
2	3481	556,26	30,9	6,6
3	118	555,01	30,84	6,99
4	1248	553,28	30,74	6,39
5	727	555,38	30,86	6,24
6	2873	555,69	30,87	6,71
7	1669	556,38	30,91	6,6
8	2943	555,28	30,85	6,95
9	2804	557,46	30,97	5,81
10	2335	553,71	30,76	5,74

Resumen de los resultados obtenidos en las 4 ejecuciones de E₁₁

Generación máxima del óptimo	3481
Generación del óptimo media	1875
Valor medio de la mejor Aptitud	555,25
Aptitud máxima	557,46
Aptitud mínima	553,28
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	30,84
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,52
Tiempo empleado	0:33:31

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 10 de E₁₁

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 3	Puesto 18	Puesto 10	Puesto 11	34,46
Trabajador 2	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 17	Puesto 15	25,39
Trabajador 3	Puesto 17	Puesto 6	Puesto 1	Puesto 12	36,46
Trabajador 4	Puesto 18	Puesto 16	Puesto 5	Puesto 9	34,29
Trabajador 5	Puesto 5	Puesto 17	Puesto 9	Puesto 4	26,13
Trabajador 6	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 3	Puesto 18	23,2
Trabajador 7	Puesto 4	Puesto 9	Puesto 13	Puesto 5	27,31
Trabajador 8	Puesto 1	Puesto 8	Puesto 2	Puesto 14	30,89
Trabajador 9	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 4	Puesto 1	19,86
Trabajador 10	Puesto 8	Puesto 3	Puesto 18	Puesto 6	29,03
Trabajador 11	Puesto 13	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 3	26,36
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 2	39,42
Trabajador 13	Puesto 16	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 8	32,63
Trabajador 14	Puesto 2	Puesto 11	Puesto 15	Puesto 7	47,15
Trabajador 15	Puesto 9	Puesto 12	Puesto 8	Puesto 16	33,52
Trabajador 16	Puesto 12	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 10	26,91
Trabajador 17	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 16	Puesto 13	31,51
Trabajador 18	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 7	Puesto 17	28,75
Coste medio					30,79
Desviación típicas					7,36
Aptitud					554,2

10.1.14 Experimento E₁₂**Parámetros de la ejecución de E₁₂**

Acrónimo	Nombre del parámetro	Valores
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
n _i	Individuos en cada generación	50
p _c	Probabilidad de cruce	0,6
p _m	Probabilidad de mutación	0,3
i _m	Intensidad de mutación	1
u	Exponente de la función de evaluación (uniformidad)	1
	Estrategia elitista	Inactiva
le ₁	Intensidad del elitismo	0
	Intensificación de la búsqueda	inactiva
vs	Valor superior	-
g	Número de generación para la intensificación de la búsqueda	-

Valores de las 10 ejecuciones de E₁₂

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	426	581,69	32,32	7,6
2	2040	586,06	32,56	8,61
3	3162	583,07	32,39	8,68
4	3909	587,2	32,62	8,83
5	1672	585,5	32,53	7,58
6	639	583,01	32,39	7,41
7	3264	585,99	32,56	7,02
8	3015	582,59	32,37	11,48
9	2391	586,57	32,59	9,66
10	89	585,13	32,51	10,38

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₁₂

Generación máxima del óptimo	3909
Generación del óptimo media	2060
Valor medio de la mejor Aptitud	584,68
Aptitud máxima	587,2
Aptitud mínima	581,69
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	32,48
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	8,73
Tiempo empleado	0:21:46

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 1 de E₁₂

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 18	Puesto 3	33,69
Trabajador 2	Puesto 16	Puesto 2	Puesto 1	Puesto 9	33
Trabajador 3	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 4	Puesto 1	29,76
Trabajador 4	Puesto 6	Puesto 17	Puesto 16	Puesto 6	29,83
Trabajador 5	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 8	Puesto 5	28,38
Trabajador 6	Puesto 4	Puesto 18	Puesto 12	Puesto 14	31,73
Trabajador 7	Puesto 7	Puesto 10	Puesto 6	Puesto 18	20,26
Trabajador 8	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 2	Puesto 13	37,04
Trabajador 9	Puesto 11	Puesto 5	Puesto 15	Puesto 8	21,1
Trabajador 10	Puesto 18	Puesto 16	Puesto 10	Puesto 15	43,52
Trabajador 11	Puesto 5	Puesto 13	Puesto 9	Puesto 2	22,04
Trabajador 12	Puesto 2	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 4	36,88
Trabajador 13	Puesto 3	Puesto 14	Puesto 13	Puesto 11	31
Trabajador 14	Puesto 8	Puesto 4	Puesto 7	Puesto 10	48,6
Trabajador 15	Puesto 15	Puesto 11	Puesto 3	Puesto 16	32
Trabajador 16	Puesto 14	Puesto 1	Puesto 14	Puesto 7	42,36
Trabajador 17	Puesto 9	Puesto 7	Puesto 17	Puesto 12	34,04
Trabajador 18	Puesto 12	Puesto 9	Puesto 5	Puesto 17	26,45
				Coste medio	32,31
				Desviación típicas	7,19
				Aptitud	581,69

10.1.15 Análisis del efecto del parámetro de uniformidad u (E₁₃)**Parámetros de la ejecución de E₁₃**

Acrónimo	Nombre del parámetro	Valores
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
n _i	Individuos en cada generación	50
p _c	Probabilidad de cruce	0,6
p _m	Probabilidad de mutación	0,3
i _m	Intensidad de mutación	1
u	Exponente de la función de evaluación (uniformidad)	2
	Estrategia elitista	Activa
le ₁	Intensidad del elitismo	1
	Intensificación de la búsqueda	inactiva
vs	Valor superior	-
g	Número de generación para la intensificación de la búsqueda	-

Valores de las 10 ejecuciones de E₁₃

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	3849	1053,19	31,2	4,77
2	2687	1075,08	31,47	5,06
3	3917	1061,34	31,2	6,24
4	3799	1063,06	31,14	5,42
5	2916	1064,43	31,15	4,41
6	2526	1067,29	31,18	6,22
7	3546	1051,31	31,13	5,15
8	3388	1058,11	31,37	4,64
9	3997	1067,81	31,27	4,51
10	1954	1053,47	31,2	4,46

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₁₃

Generación máxima del óptimo	3997	
Generación del óptimo media	3257	
Valor medio de la mejor Aptitud	1061,51	
Aptitud máxima	1075,08	
Aptitud mínima	(u=2)	(u=1)
	1051,31	560,25
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	31,23	
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	5,09	
Tiempo empleado	0:32:14	

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 7 de E₁₃

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador1	Puesto 15	Puesto 1	Puesto 5	Puesto 9	27,52
Trabajador2	Puesto 13	Puesto 8	Puesto 4	Puesto 17	32,91
Trabajador3	Puesto 9	Puesto 5	Puesto 15	Puesto 1	26,32
Trabajador4	Puesto 3	Puesto 18	Puesto 9	Puesto 12	34,8
Trabajador5	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 18	Puesto 2	29,58
Trabajador6	Puesto 4	Puesto 14	Puesto 1	Puesto 6	27,8
Trabajador7	Puesto 14	Puesto 7	Puesto 3	Puesto 18	25,46
Trabajador8	Puesto 12	Puesto 13	Puesto 6	Puesto 14	27,41
Trabajador9	Puesto 2	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 10	31,72
Trabajador10	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 17	Puesto 5	35,95
Trabajador11	Puesto 17	Puesto 2	Puesto 10	Puesto 8	36,98
Trabajador12	Puesto 11	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 4	39,42
Trabajador13	Puesto 16	Puesto 12	Puesto 13	Puesto 16	32,37
Trabajador14	Puesto 7	Puesto 16	Puesto 7	Puesto 15	39,37
Trabajador15	Puesto 8	Puesto 11	Puesto 2	Puesto 11	29,75
Trabajador16	Puesto 18	Puesto 6	Puesto 12	Puesto 13	33,79
Trabajador17	Puesto 1	Puesto 4	Puesto 14	Puesto 7	29,44
Trabajador18	Puesto 5	Puesto 9	Puesto 16	Puesto 3	19,66
Coste medio					31,13
Desviación típica					4,87
Aptitud (u=2)					1051,31
Aptitud (u=1)					560,25

10.2. Análisis del efecto de la consideración de las preferencias de los trabajadores (E₁₄)**10.2.1 Parámetros del AG dependientes de las especificaciones del problema empleados en E₁₄**

Acronímico	Nombre del parámetro	Valor
n_{wor}	Número de trabajadores	18
n_{rot}	Número de rotaciones	4
n_{it}	Número de ítems considerados en la fórmula de evaluación	18
$C_1...C_{18}$	Coefficientes de ponderación de los ítems	1
f_{red}	Factor de reducción	3
tre	Valor umbral	1
t_1	Duración de la Rotación 1	2 horas
t_2	Duración de la Rotación 2	2 horas
t_3	Duración de la Rotación 3	2 horas
t_4	Duración de la Rotación 3	1 hora
p_1	Duración de la pausa 1 (almuerzo)	2 horas
t_{max}	Tiempo máximo consecutivo de permanencia en puestos similares	2 horas

10.2.2 Asignaciones vetadas (limitaciones más preferencias) en E₁₄

	Puesto																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Trabajador 1		•	•	•														
Trabajador 2						•												
Trabajador 3		•	•	•		•												
Trabajador 4									•	•			•					
Trabajador 5						•			•	•			•					
Trabajador 6																		
Trabajador 7		•	•	•													•	•
Trabajador 8																		
Trabajador 9																		
Trabajador 10									•	•			•				•	•
Trabajador 11																		
Trabajador 12	•				•	•	•	•	•	•		•	•		•	•	•	•
Trabajador 13	•				•	•	•		•	•							•	•
Trabajador 14	•				•	•			•	•			•					
Trabajador 15	•					•												
Trabajador 16													•				•	•
Trabajador 17																		
Trabajador 18		•	•	•		•												

Parámetros de ejecución del experimento E₁₄

Acrónimo	Nombre del parámetro	
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
n _i	Individuos en cada generación	50
p _c	Probabilidad de cruce	0,6
p _m	Probabilidad de mutación	0,3
i _m	Intensidad de mutación	1
u	Exponente de la función de evaluación (uniformidad)	1
	Estrategia elitista	Activa
le ₁	Intensidad del elitismo	1
	Intensificación de la búsqueda	inactiva
vs	Valor superior	-
g	Número de generación para la intensificación de la búsqueda	-

Valores de las 10 ejecuciones de E₁₄

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	3768	556,46	30,91	7,52
2	2369	560,1	31,12	6,11
3	3596	557,71	30,98	5,81
4	3008	554,72	30,82	5,66
5	2837	558,13	31,01	5,84
6	2436	555,15	30,84	5,79
7	2229	558,29	31,02	4,75
8	3276	554,78	30,82	7,86
9	3748	558,27	31,02	6,83
10	3936	556,61	30,92	7,52

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₁₄

Generación máxima del óptimo	3936
Generación del óptimo media	3120
Valor medio de la mejor Aptitud	557,02
Aptitud máxima	560,1
Aptitud mínima	554,72
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	30,95
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,37
Tiempo empleado	0:29:00

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 4 de E₁₄

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 17	Puesto 8	30,93
Trabajador 2	Puesto 1	Puesto 3	Puesto 9	Puesto 5	29,58
Trabajador 3	Puesto 5	Puesto 17	Puesto 15	Puesto 1	25,46
Trabajador 4	Puesto 18	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 14	33
Trabajador 5	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 7	Puesto 18	25,57
Trabajador 6	Puesto 10	Puesto 16	Puesto 2	Puesto 17	32,67
Trabajador 7	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 6	Puesto 10	26,78
Trabajador 8	Puesto 7	Puesto 18	Puesto 10	Puesto 15	28,97
Trabajador 9	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 3	Puesto 13	37,04
Trabajador 10	Puesto 12	Puesto 6	Puesto 1	Puesto 6	21,99
Trabajador 11	Puesto 2	Puesto 11	Puesto 13	Puesto 12	27,15
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 2	39,42
Trabajador 13	Puesto 8	Puesto 13	Puesto 14	Puesto 4	34,79
Trabajador 14	Puesto 16	Puesto 7	Puesto 4	Puesto 11	44,53
Trabajador 15	Puesto 3	Puesto 9	Puesto 12	Puesto 9	28,11
Trabajador 16	Puesto 15	Puesto 1	Puesto 8	Puesto 3	32,32
Trabajador 17	Puesto 4	Puesto 14	Puesto 16	Puesto 7	24,48
Trabajador 18	Puesto 9	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 16	31,94
				Coste medio	30,81
				Desviación típicas	5,35
				Aptitud	554,72

10.3. Análisis del efecto de la duración y distribución de las pausa (E₁₅ a E₂₁)

10.3.1 Parámetros del AG dependientes de las especificaciones del problema o inputs empleados en E₁₅ a E₂₂

Acrónimo	Nombre del parámetro	Valor
n _{wor}	Número de trabajadores	18
n _{rot}	Número de rotaciones	4
n _{it}	Número de ítems considerados en la fórmula de evaluación	18
C _{1...C₁₈}	Coefficientes de ponderación de los ítems	1
f _{red}	Factor de reducción	3
tre	Valor umbral	1
t ₁	Duración de la Rotación 1	2 horas
t ₂	Duración de la Rotación 2	2 horas
t ₃	Duración de la Rotación 3	2 horas
t ₄	Duración de la Rotación 3	1 hora
t _{max}	Tiempo máximo consecutivo de permanencia en puestos similares	2 horas

10.3.2 Asignaciones vetadas (limitaciones más preferencias) empleadas en los experimento E₁₅ a E₂₂

	Puesto																	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Trabajador 1		•	•	•														
Trabajador 2						•												
Trabajador 3		•	•	•		•												
Trabajador 4									•	•			•					
Trabajador 5						•			•	•			•					
Trabajador 6																		
Trabajador 7		•	•	•													•	•
Trabajador 8																		
Trabajador 9																		
Trabajador 10									•	•			•				•	•
Trabajador 11																		
Trabajador 12	•				•	•	•	•	•	•		•	•		•	•	•	•
Trabajador 13	•				•	•	•		•	•							•	•
Trabajador 14	•				•	•			•	•			•					
Trabajador 15	•					•												
Trabajador 16													•				•	•
Trabajador 17																		
Trabajador 18		•	•	•		•												

10.3.3 Parámetros de ejecución para los experimentos E₁₅ a E₂₁

Acrónimo	Nombre del parámetro	
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
n _i	Individuos en cada generación	50
p _c	Probabilidad de cruce	0,6
p _m	Probabilidad de mutación	0,3
i _m	Intensidad de mutación	1
u	Exponente de la función de evaluación (uniformidad)	1
	Estrategia elitista	Activa
le ₁	Intensidad del elitismo	1
	Intensificación de la búsqueda	inactiva
vs	Valor superior	-
g	Número de generación para la intensificación de la búsqueda	-

10.3.4 Experimento E₁₅

Duración y distribución de las pausas en el experimento E₁₅

Nº de pausas	Pausa 1	
	Duración	Localización
1	2 horas	Tras la 3ª Rotación

Valores de las 10 ejecuciones realizadas en el experimento E₁₅

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	2147	646,62	35,92	6,71
2	2212	650,15	36,12	7,29
3	2351	647,77	35,99	7,64
4	1869	650,83	36,16	5,03
5	3738	646,61	35,92	7,94
6	2391	647,7	35,98	7,13
7	2640	643,08	35,73	6,63
8	3983	647,04	35,95	7,01
9	1874	649,55	36,09	5,59
10	2102	649,46	36,08	7,04

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₁₅:

Generación máxima del óptimo	3983
Generación del óptimo media	2530,7
Valor medio de la mejor Aptitud	647,88
Aptitud máxima	650,83
Aptitud mínima	643,08
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	35,99
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,80
Tiempo empleado	0:34:35

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 7 E₁₅

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 12	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 14	32,77
Trabajador 2	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 4	Puesto 18	25,48
Trabajador 3	Puesto 17	Puesto 16	Puesto 5	Puesto 1	39,63
Trabajador 4	Puesto 1	Puesto 8	Puesto 2	Puesto 17	37,17
Trabajador 5	Puesto 14	Puesto 3	Puesto 1	Puesto 8	35,87
Trabajador 6	Puesto 3	Puesto 18	Puesto 8	Puesto 10	39,59
Trabajador 7	Puesto 9	Puesto 5	Puesto 13	Puesto 15	28,14
Trabajador 8	Puesto 5	Puesto 17	Puesto 16	Puesto 4	31,44
Trabajador 9	Puesto 10	Puesto 2	Puesto 17	Puesto 6	36,44
Trabajador 10	Puesto 2	Puesto 11	Puesto 14	Puesto 7	32,46
Trabajador 11	Puesto 18	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 3	37,82
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 2	43,31
Trabajador 13	Puesto 8	Puesto 13	Puesto 3	Puesto 13	36,94
Trabajador 14	Puesto 16	Puesto 15	Puesto 7	Puesto 11	54,74
Trabajador 15	Puesto 4	Puesto 9	Puesto 12	Puesto 9	33,91
Trabajador 16	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 12	28,84
Trabajador 17	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 9	Puesto 5	38,36
Trabajador 18	Puesto 15	Puesto 7	Puesto 18	Puesto 16	30,16
Coste medio					35,73
Desviación típicas					6,27
Aptitud					643,08

10.3.5 Experimento E₁₆**Duración y distribución de las pausas en el experimento E₁₆**

Nº de pausas	Pausa 1		Pausa 2	
	Duración	Localización	Duración	Localización
2	1 hora	Tras la 1ª Rotación	1 hora	Tras la 2ª Rotación

Valores de las 10 ejecuciones realizadas en el experimento E₁₆

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	3709	508,95	28,28	6,38
2	1931	510,93	28,39	5,51
3	2955	510,16	28,34	6,54
4	3073	509,53	28,31	6,53
5	1696	512,31	28,46	5,47
6	2462	509,01	28,28	7,77
7	3625	508,64	28,26	6,3
8	3111	508,91	28,27	6,27
9	2409	509,27	28,29	5,03
10	1523	508,03	28,23	5,89

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₁₆

Generación máxima del óptimo	3709
Generación del óptimo media	2649
Valor medio de la mejor Aptitud	509,57
Aptitud máxima	512,31
Aptitud mínima	508,03
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	28,31
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,17
Tiempo empleado	0:48:11

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 10 de E₁₆:

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 6	Puesto 13	Puesto 10	Puesto 15	27,29
Trabajador 2	Puesto 5	Puesto 15	Puesto 1	Puesto 16	21,37
Trabajador 3	Puesto 17	Puesto 5	Puesto 9	Puesto 12	27,09
Trabajador 4	Puesto 14	Puesto 3	Puesto 18	Puesto 7	29,98
Trabajador 5	Puesto 8	Puesto 14	Puesto 3	Puesto 17	29,25
Trabajador 6	Puesto 18	Puesto 8	Puesto 2	Puesto 14	30,56
Trabajador 7	Puesto 12	Puesto 9	Puesto 5	Puesto 13	21,82
Trabajador 8	Puesto 4	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 4	28,06
Trabajador 9	Puesto 10	Puesto 2	Puesto 17	Puesto 6	28,95
Trabajador 10	Puesto 3	Puesto 1	Puesto 16	Puesto 5	23,18
Trabajador 11	Puesto 2	Puesto 18	Puesto 6	Puesto 10	25,47
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 3	36,18
Trabajador 13	Puesto 16	Puesto 12	Puesto 13	Puesto 8	28,66
Trabajador 14	Puesto 7	Puesto 16	Puesto 15	Puesto 11	46,27
Trabajador 15	Puesto 9	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 9	31,63
Trabajador 16	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 12	Puesto 1	23,94
Trabajador 17	Puesto 13	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 2	22,69
Trabajador 18	Puesto 15	Puesto 10	Puesto 7	Puesto 18	25,66
Coste medio					28,22
Desviación típicas					5,57
Aptitud					508,03

10.3.6 Experimento E₁₇

Duración y distribución de las pausas en el experimento E₁₇

Nº de pausas	Pausa 1		Pausa 2	
	Duración	Localización	Duración	Localización
2	1 hora	Tras la 1ª Rotación	1 hora	Tras la 3ª Rotación

Valores de las 10 ejecuciones de E₁₇

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	3343	563,66	31,31	6,6
2	2248	563,68	31,32	6,7
3	3877	564,96	31,39	6,42
4	3262	564,29	31,35	6,17
5	3092	562,49	31,25	6,1
6	3335	564,69	31,37	6,24
7	2916	566,93	31,5	7,2
8	1550	563,22	31,29	6,04
9	1267	565,62	31,42	5,44
10	3760	564,64	31,37	6,16

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₁₇

Generación máxima del óptimo	3877
Generación del óptimo media	2865
Valor medio de la mejor Aptitud	564,42
Aptitud máxima	566,93
Aptitud mínima	562,49
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	31,36
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,31
Tiempo empleado	0:44:07

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 5 de E₁₇

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 16	22,75
Trabajador 2	Puesto 5	Puesto 9	Puesto 2	Puesto 18	24
Trabajador 3	Puesto 16	Puesto 13	Puesto 15	Puesto 5	33,24
Trabajador 4	Puesto 12	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 14	28,2
Trabajador 5	Puesto 18	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 4	28,47
Trabajador 6	Puesto 2	Puesto 18	Puesto 8	Puesto 10	36,03
Trabajador 7	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 12	26,58
Trabajador 8	Puesto 8	Puesto 2	Puesto 17	Puesto 11	31,46
Trabajador 9	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 4	Puesto 17	24,45
Trabajador 10	Puesto 14	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 1	25
Trabajador 11	Puesto 4	Puesto 17	Puesto 9	Puesto 7	40,32
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 3	38,23
Trabajador 13	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 13	Puesto 8	33,82
Trabajador 14	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 7	Puesto 15	45,22
Trabajador 15	Puesto 9	Puesto 8	Puesto 3	Puesto 9	31,84
Trabajador 16	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 16	Puesto 2	27
Trabajador 17	Puesto 17	Puesto 4	Puesto 1	Puesto 6	33,53
Trabajador 18	Puesto 10	Puesto 16	Puesto 12	Puesto 13	32,35
Coste medio					31,25
Desviación típicas					5,77
Aptitud					562,49

10.3.7 Experimento E₁₈

Duración y distribución de las pausas en el experimento E₁₈

Nº de pausas	Pausa 1		Pausa 2	
	Duración	Localización	Duración	Localización
2	1 hora	Tras la 2ª Rotación	1 hora	Tras la 3ª Rotación

Valores de las 10 ejecuciones realizadas en E₁₈

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	3718	555,2	30,85	7,02
2	2786	556,85	30,94	5,81
3	3926	558,83	31,05	7,75
4	2803	559,69	31,09	6,93
5	3061	556,96	30,94	6,88
6	3766	559,41	31,08	6,21
7	3922	559,73	31,1	5,99
8	2130	555,36	30,85	6,03
9	3870	559,01	31,06	6,41
10	1592	559,35	31,08	6,99

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 de E₁₈

Generación máxima del óptimo	3926
Generación del óptimo media	3157
Valor medio de la mejor Aptitud	558,04
Aptitud máxima	559,73
Aptitud mínima	555,2
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	31
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,6
Tiempo empleado	0:45:39

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 1 de E₁₈

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 17	Puesto 16	23,22
Trabajador 2	Puesto 4	Puesto 18	Puesto 8	Puesto 1	33,05
Trabajador 3	Puesto 17	Puesto 16	Puesto 7	Puesto 14	37,12
Trabajador 4	Puesto 18	Puesto 6	Puesto 1	Puesto 3	36
Trabajador 5	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 18	Puesto 5	32,37
Trabajador 6	Puesto 8	Puesto 1	Puesto 2	Puesto 9	32,89
Trabajador 7	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 13	25,63
Trabajador 8	Puesto 5	Puesto 9	Puesto 4	Puesto 17	19,14
Trabajador 9	Puesto 16	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 6	31,77
Trabajador 10	Puesto 1	Puesto 3	Puesto 14	Puesto 11	32,07
Trabajador 11	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 3	Puesto 18	20,89
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 4	39,24
Trabajador 13	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 13	Puesto 8	33,91
Trabajador 14	Puesto 2	Puesto 11	Puesto 15	Puesto 7	48
Trabajador 15	Puesto 12	Puesto 8	Puesto 9	Puesto 2	29,46
Trabajador 16	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 16	Puesto 12	23,87
Trabajador 17	Puesto 3	Puesto 17	Puesto 6	Puesto 10	28,22
Trabajador 18	Puesto 9	Puesto 7	Puesto 10	Puesto 15	28,37
Coste medio					30,84
Desviación típicas					6,644
Aptitud					555,22

10.3.8 Experimento E₁₉

Duración y distribución de las pausas en E₁₉

Nº de pausas 3 (2 micropausas y	Pausa 1		Pausa 2		Pausa 3	
	Duración	Localización	Duración	Localización	Duración	Localización
	35 min.	Tras la 1ª	35 min.	Tras la 2ª	1 hora	Tras la 3ª

una larga)		Rotación		Rotación		Rotación
------------	--	----------	--	----------	--	----------

Valores de las 10 ejecuciones de E₁₉

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	3899	526,71	29,26	6,65
2	3929	524,42	29,13	5,98
3	3349	524,05	29,11	6,48
4	3121	522,32	29,02	6,5
5	3991	524,9	29,16	6
6	2299	525,33	29,18	5,86
7	1410	529,12	29,4	6,12
8	2722	523,36	29,08	6,87
9	3998	522,5	29,03	6,71
10	2996	522,38	29,02	6,63

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₁₉

Generación máxima del óptimo	3998
Generación del óptimo media	3171
Valor medio de la mejor Aptitud	524,51
Aptitud máxima	529,12
Aptitud mínima	522,32
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	29,14
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,38
Tiempo empleado	0:58:24

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 4 de E₁₉

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 12	Puesto 9	Puesto 5	Puesto 18	25,17
Trabajador 2	Puesto 7	Puesto 13	Puesto 14	Puesto 2	24,54
Trabajador 3	Puesto 1	Puesto 16	Puesto 12	Puesto 17	33,56
Trabajador 4	Puesto 16	Puesto 5	Puesto 17	Puesto 15	22,55
Trabajador 5	Puesto 18	Puesto 3	Puesto 1	Puesto 8	34,14
Trabajador 6	Puesto 4	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 6	29,09
Trabajador 7	Puesto 13	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 12	25,42
Trabajador 8	Puesto 10	Puesto 2	Puesto 13	Puesto 7	25,35
Trabajador 9	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 16	Puesto 4	24,66
Trabajador 10	Puesto 6	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 1	22,89
Trabajador 11	Puesto 15	Puesto 7	Puesto 18	Puesto 10	25,88
Trabajador 12	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 3	Puesto 11	35,44
Trabajador 13	Puesto 14	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 13	28,47
Trabajador 14	Puesto 11	Puesto 15	Puesto 7	Puesto 16	48,39
Trabajador 15	Puesto 9	Puesto 12	Puesto 9	Puesto 3	33,59
Trabajador 16	Puesto 2	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 14	22,63
Trabajador 17	Puesto 17	Puesto 8	Puesto 4	Puesto 9	33,53
Trabajador 18	Puesto 8	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 5	27,05
Coste medio					29,02
Desviación típicas					6,151
Aptitud					522,32

10.3.9 Experimento E₂₀

Duración y distribución de las pausas en E₂₀

Nº de pausas 3 (2 micropausas y una pausa larga)	Pausa 1		Pausa 2		Pausa 3	
	Duración	Localización	Duración	Localización	Duración	Localización
	15 min.	Tras la 1ª Rotación	15 min.	Tras la 2ª Rotación	1 hora y 30 min.	Tras la 3ª Rotación

Valores de las 10 ejecuciones de E₂₀

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	2570	556,71	30,93	6,67
2	2320	558,67	31,04	6,24
3	2974	552,24	30,68	7,75
4	2213	552,3	30,68	6,61
5	3753	553,41	30,75	6,1
6	3671	556,55	30,92	5,52
7	1823	552,59	30,7	6,4
8	3736	554,64	30,81	7,18
9	2708	553,8	30,77	6,4

10	1869	555,24	30,85	6,27
----	------	--------	-------	------

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₂₀

Generación máxima del óptimo	3753
Generación del óptimo media	2763
Valor medio de la mejor Aptitud	554,62
Aptitud máxima	558,67
Aptitud mínima	552,24
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	30,81
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,51
Tiempo empleado	0:54:12

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 3 de E₂₀

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación	
Trabajador 1	Puesto 17	Puesto 15	Puesto 10	Puesto 11	42,4	
Trabajador 2	Puesto 10	Puesto 7	Puesto 17	Puesto 2	28,02	
Trabajador 3	Puesto 8	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 1	32,64	
Trabajador 4	Puesto 18	Puesto 16	Puesto 5	Puesto 15	31,55	
Trabajador 5	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 4	Puesto 17	21,92	
Trabajador 6	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 16	22,63	
Trabajador 7	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 16	Puesto 5	23,33	
Trabajador 8	Puesto 5	Puesto 9	Puesto 3	Puesto 9	20	
Trabajador 9	Puesto 3	Puesto 18	Puesto 8	Puesto 10	33,22	
Trabajador 10	Puesto 1	Puesto 8	Puesto 2	Puesto 14	30,11	
Trabajador 11	Puesto 12	Puesto 6	Puesto 14	Puesto 4	21,37	
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 3	Puesto 11	Puesto 3	38,56	
Trabajador 13	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 13	Puesto 8	33,53	
Trabajador 14	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 15	Puesto 7	48,94	
Trabajador 15	Puesto 9	Puesto 4	Puesto 9	Puesto 12	32,77	
Trabajador 16	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 1	Puesto 6	29,33	
Trabajador 17	Puesto 2	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 18	25,53	
Trabajador 18	Puesto 16	Puesto 17	Puesto 7	Puesto 13	36,4	
					Coste medio	30,68
					Desviación típicas	7,33
					Aptitud	552,24

10.3.10 Experimento E₂₁**Duración y distribución de las pausas en E₂₁**

Nº de pausas	Pausa 1	Pausa 2	Pausa 3
--------------	---------	---------	---------

3 (2 micropausas y una pausa larga)	Duración	Localización	Duración	Localización	Duración	Localización
	10 min.	Tras la 1ª Rotación	10 min.	Tras la 2ª Rotación	1 hora y 40 min.	Tras la 3ª Rotación

Valores de las 10 ejecuciones de E₂₁

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	3984	568,02	31,56	6,17
2	2027	569,02	31,61	5,55
3	2205	566,66	31,48	6,95
4	2317	566,07	31,45	6,87
5	1957	566,62	31,48	6,58
6	3995	569,66	31,65	6,39
7	3924	570,85	31,71	9,11
8	2211	568,29	31,57	7,42
9	1388	567,9	31,55	6,66
10	3778	563,82	31,32	7,13

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₂₁

Generación máxima del óptimo	3995
Generación del óptimo media	2778
Valor medio de la mejor Aptitud	567,69
Aptitud máxima	570,85
Aptitud mínima	563,82
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	31,54
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	6,88
Tiempo empleado	0:54:36

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 10 de E₂₁

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 17	Puesto 16	Puesto 13	Puesto 5	42,95
Trabajador 2	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 18	22,32
Trabajador 3	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 15	Puesto 1	28,24
Trabajador 4	Puesto 3	Puesto 17	Puesto 16	Puesto 8	34,99
Trabajador 5	Puesto 16	Puesto 7	Puesto 18	Puesto 2	26,69
Trabajador 6	Puesto 8	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 10	32,91
Trabajador 7	Puesto 15	Puesto 5	Puesto 9	Puesto 12	19,65
Trabajador 8	Puesto 18	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 3	32,9
Trabajador 9	Puesto 2	Puesto 9	Puesto 5	Puesto 17	23,37
Trabajador 10	Puesto 1	Puesto 3	Puesto 14	Puesto 16	31,29
Trabajador 11	Puesto 12	Puesto 1	Puesto 6	Puesto 14	28,17
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 4	39,24
Trabajador 13	Puesto 13	Puesto 12	Puesto 8	Puesto 13	31,42
Trabajador 14	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 7	Puesto 15	44,83
Trabajador 15	Puesto 9	Puesto 8	Puesto 3	Puesto 9	33,56
Trabajador 16	Puesto 6	Puesto 10	Puesto 4	Puesto 11	22,35
Trabajador 17	Puesto 14	Puesto 2	Puesto 1	Puesto 6	30,11
Trabajador 18	Puesto 10	Puesto 15	Puesto 17	Puesto 7	38,83
Coste medio					31,32
Desviación típicas					6,74
Aptitud					563,82

10.3.11 Análisis del efecto del aumento del parámetro de uniformidad (E₂₂)**Parámetros de la ejecución de E₂₂**

Acrónimo	Nombre del parámetro	Valores
Gen	Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	4000
n_i	Individuos en cada generación	50
p_c	Probabilidad de cruce	0,6
p_m	Probabilidad de mutación	0,3
i_m	Intensidad de mutación	1
u	Exponente de la función de evaluación (uniformidad)	2
	Estrategia elitista	Activa
le₁	Intensidad del elitismo	1
	Intensificación de la búsqueda	inactiva
vs	Valor superior	-
g	Número de generación para la intensificación de la búsqueda	-

Duración y distribución de las pausas en E₂₂

Nº de pausas	Pausa 1		Pausa 2	
	Duración	Localización	Duración	Localización
2	1 hora	Tras la 1ª Rotación	1 hora	Tras la 2ª Rotación

Valores de las 10 ejecuciones de E₂₂

Nº Ejecución	Mejor generación	Mejor Aptitud	Coste medio por trabajador	Desviación típica del coste por trabajador
1	2542	929,6	28,69	4,99
2	1207	922,71	28,41	5,23
3	3885	927,35	28,67	4,29
4	2342	918,19	28,52	4,43
5	2702	930,94	28,58	4,87
6	2344	929,51	28,66	4,01
7	3987	922,35	28,52	4,77
8	1409	923,65	28,66	4,29
9	3918	923,92	28,7	4,5
10	2190	928,58	28,65	5

Resumen de los resultados obtenidos en las 10 ejecuciones de E₂₂

Generación máxima del óptimo	3987	
Generación del óptimo media	2652	
Valor medio de la mejor Aptitud	925,68	
Aptitud máxima	930,94	
Aptitud mínima	(u=2)	(u=1)
	918,19	513,29
Valor medio del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	28,61	
Valor medio de la desviación típica del coste medio de las asignaciones por trabajador de la mejor solución por ejecución	4,64	
Tiempo empleado	0:45:29	

Mejor Agenda de Rotación encontrada en la ejecución 10 de E₂₂

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Coste de la asignación
Trabajador 1	Puesto 1	Puesto 12	Puesto 13	Puesto 6	29,17
Trabajador 2	Puesto 16	Puesto 5	Puesto 18	Puesto 15	24,15
Trabajador 3	Puesto 5	Puesto 15	Puesto 17	Puesto 10	26,07
Trabajador 4	Puesto 12	Puesto 1	Puesto 15	Puesto 7	26,76
Trabajador 5	Puesto 17	Puesto 7	Puesto 14	Puesto 2	27,48
Trabajador 6	Puesto 7	Puesto 17	Puesto 2	Puesto 14	24,24
Trabajador 7	Puesto 13	Puesto 10	Puesto 6	Puesto 11	28,25
Trabajador 8	Puesto 10	Puesto 6	Puesto 12	Puesto 17	24,63
Trabajador 9	Puesto 6	Puesto 14	Puesto 1	Puesto 4	27,65
Trabajador 10	Puesto 14	Puesto 16	Puesto 4	Puesto 1	28,83
Trabajador 11	Puesto 18	Puesto 3	Puesto 10	Puesto 8	31,31
Trabajador 12	Puesto 11	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 3	36,18
Trabajador 13	Puesto 4	Puesto 11	Puesto 8	Puesto 13	25,77
Trabajador 14	Puesto 2	Puesto 8	Puesto 7	Puesto 16	41,49
Trabajador 15	Puesto 8	Puesto 9	Puesto 3	Puesto 9	30,06
Trabajador 16	Puesto 9	Puesto 2	Puesto 9	Puesto 5	26,86
Trabajador 17	Puesto 3	Puesto 18	Puesto 16	Puesto 12	30,24
Trabajador 18	Puesto 15	Puesto 13	Puesto 5	Puesto 18	24,15
Coste medio					28,51
Desviación típicas					4,3
Aptitud (u=2)					918,19
Aptitud (u=1)					513,29

11

ANEXO 2
**Implementación informática del AG para la
generación de agendas de rotación**

11. IMPLEMENTACIÓN INFORMÁTICA DEL AG PARA LA GENERACIÓN DE AGENDAS DE ROTACIÓN

11.1. Introducción

El AG propuesto pretende ser una herramienta eficaz de ayuda al planificador en la búsqueda de agendas de rotación de puestos de trabajo que maximicen los beneficios que es posible obtener de esta técnica. Son muchos los factores considerados en el algoritmo para lograr que los resultados obtenidos sean trasladables a la realidad sin necesidad de modificaciones importantes, lo cual implica que el número de datos a introducir y parámetros a fijar para su ejecución sea muy elevado. Para facilitar esta tarea al planificador, se ha implementado el algoritmo en un software denominado MORE, que pretende flexibilizar al máximo el proceso de introducción de datos y parámetros de ejecución, la visualización de resultados y la explotación de la información generada.

El software permite almacenar y gestionar los datos de trabajadores y puestos, los parámetros empleados y los resultados obtenidos mediante una base de datos, lo cual facilita los sucesivos procesos de cálculo. Los resultados se ofrecen de manera gráfica al planificador, permitiéndole introducir cambios manualmente sobre el gráfico, informando sobre cómo varía el valor de la función de evaluación respecto de la distribución original. Esto permite obtener distribuciones con cambios puntuales respecto a la original, para hacer frente a situaciones en las que, por alguna circunstancia, se hace necesario alterar las asignaciones de algún trabajador, no siendo deseable modificar completamente la agenda de rotación de puestos de trabajo.

MORE ha sido desarrollado en el marco de la presente investigación con el soporte de la Mutua de Accidentes Laborales y Enfermedades Profesionales ASEPEYO, y en la actualidad es ofrecida a los mutualistas como herramienta para la realización de rotaciones. La aplicación MORE es también la herramienta empleada para la validación de la metodología propuesta (ver capítulo 8).

La aplicación permite:

- √ Registrar los *inputs* correspondientes a los puestos, los trabajadores, los ítems ergonómicos y las restricciones de asignación.
- √ Fijar los parámetros de ejecución del AG: tamaño de la población, probabilidades de mutación y cruce, activación o desactivación del elitismo, activación de la intensificación de la búsqueda local, etc.
- √ Ejecutar el algoritmo, almacenar los resultados y analizar las soluciones obtenidas.
- √ Ofrecer información en tiempo real, gráfica y numérica, sobre la evolución de la población y los valores de la función objetivo.

En los siguientes apartados se describe la aplicación informática MORE fruto de la investigación realizada en la presente tesis.



Figura 11.1: Interfaz principal de la aplicación informática MORE.

11.2. Gestión de estudios

En la aplicación MORE la creación de agendas de rotación se organiza en **estudios**, cada estudio incluye la siguiente información:

- ✓ Información de los puestos, trabajadores e ítems ergonómicos, y, opcionalmente, de las secciones a las que pertenecen los puestos y trabajadores.
- ✓ Información de la distribución y duración de las rotaciones y las pausas.
- ✓ Información de las penalizaciones o asignaciones vetadas.
- ✓ Información de los parámetros de ejecución del algoritmo.
- ✓ Agenda de rotación obtenida.

Al iniciar la aplicación el planificador deberá crear un nuevo estudio mediante la opción “Nuevo”, mostrada en el margen izquierdo de la *interface* principal (Figura 11.1). Al seleccionar dicha opción el planificador podrá optar por restaurar los valores iniciales para los parámetros y las rotaciones. La Tabla 11.1 muestra los valores por defecto definidos en la aplicación.

Nombre del parámetro	Valor por defecto
Número de generaciones tras las que se detendrá el algoritmo	10000
Individuos en cada generación	30
Probabilidad de cruce	0,6
Probabilidad de mutación	0,2
Intensidad de mutación	1
Exponente de la función de evaluación (uniformidad)	1
Estrategia elitista	Activa
Intensificación de la búsqueda	Inactiva
Nº de rotaciones	4
Duración de las rotaciones	Regular (todas las rotaciones poseen la misma duración y por no es necesario especificarla)
Tiempo máximo de permanencia en el mismo grupo de puestos	2
Valor de los ítem de los puestos que acumulan fatiga	>1,5
Factor de reducción o importancia del historial previo de rotaciones	3

Tabla 11.1: Valores de los parámetros por defecto definidos en MORE.

Tras la introducción de datos y parámetros, y la generación de la agenda de rotación, la opción “Guardar” de la *interface* principal permitirá al planificador almacenar el estudio en un fichero de extensión “.as”. Una vez guardado el estudio, la opción “Abrir” permitirá en el futuro cargar en la aplicación la información del estudio.

Las opciones de “Nuevo”, “Guardar” y “Abrir” estudios, también se encuentran disponibles en el menú superior de la *interface* principal agrupados en la opción “Archivos”.

11.3. Introducción de datos

MORE permite introducir información relativa a las secciones, los puestos, los trabajadores, los ítems ergonómicos, el número y duración de las rotaciones, así como de las asignaciones penalizadas o restringidas. Dicha información queda almacenada en una base de datos en formato Microsoft Office Access 2007.

La introducción de datos relativos a las secciones, los puestos, los trabajadores y los ítems ergonómicos, se realiza a través de la ventana denominada “Gestión de datos” (Figura 11.2). Para acceder a ella se deberá pulsar el botón “Datos” de la *interface* principal del programa.



Figura 11.2: Ventana para la gestión de datos.

11.3.1 Introducción de los ítems ergonómicos

Se recomienda iniciar el proceso de introducción de información en la aplicación por los ítems ergonómicos. Para ello, se seleccionará la opción “Introducción de Ítems ergonómicos” de la ventana de “Gestión de datos” (Figura 11.2), tras lo cual se mostrará el formulario de introducción de los ítems ergonómicos mostrado en la Figura 11.3.

En el formulario de “Introducción de ítems”, el botón “Nuevo” permitirá crear un nuevo ítem ergonómico, para el cual se deberá indicar un código identificativo único y su nombre. Una vez indicada la información del ítem ergonómico, se deberá pulsar el botón “Insertar” para que la información quede debidamente registrada en la base de datos. Dicha secuencia de operaciones deberá repetirse tantas veces como ítems ergonómicos se desee introducir.



Figura 11.3: Interface de introducción de ítems ergonómicos.

11.3.2 Introducción de las secciones

Para introducir las secciones se deberá seleccionar la opción “Introducción de Secciones” de la ventana de “Gestión de datos” (Figura 11.2). En el formulario mostrado para la introducción de las secciones (Figura 11.4) se deberá indicar un código único identificativo de la sección y su nombre. El botón “Insertar” grabará dicha información en la base de datos.



Figura 11.4: Formulario de introducción de las Secciones.

11.3.3 Introducción de los puestos

La introducción de puestos se inicia pulsando la opción “Introducción de puestos” de la ventana de “Gestión de datos” (Figura 11.2). A continuación se mostrará un formulario para la creación de nuevos puestos (Figura 11.5). El botón “Nuevo” permitirá introducir la información de un nuevo puesto, además, al pulsarlo aparecerán automáticamente, en la parte derecha del formulario, todos los ítems ergonómicos introducidos previamente.

Para cada puesto se deberá indicar un código identificativo único, su nombre, si ha sido o no seleccionado para la rotación, y opcionalmente, la sección a la que pertenece y el tipo de puesto, así como el número de puestos iguales o similares en la organización.

Posteriormente, se deberá indicar, para cada uno de los ítems ergonómicos, su correspondiente valoración para el puesto. Para ello se pulsarán los números mostrados en la parte superior derecha del formulario, o bien, se introducirá el valor del ítem en la columna etiquetada como “Valor”.

Una vez introducida toda la información de un puesto ésta deberá ser insertada en la base de datos mediante el botón “Insertar”. Es importante remarcar que sólo si se pulsa esta opción quedará la información registrada.



Figura 11.5: Interface de introducción de puestos.

11.3.4 Introducción de los trabajadores

La introducción de los trabajadores y su información sigue el mismo procedimiento que el descrito para los puestos. En la ventana de “Gestión de datos” (Figura 11.2) se deberá seleccionar la opción “Introducción de trabajadores”, tras lo cual se mostrará el formulario de creación de los trabajadores (Figura 11.6).

En el formulario “Introducción de trabajadores” el botón “Nuevo” permitirá introducir la información de un nuevo trabajador, y mostrará automáticamente todos los ítems ergonómicos existentes en la base de datos. Para cada trabajador se deberá introducir un código identificativo único, su nombre, si ha sido o no seleccionado para participar en la rotación, y opcionalmente, su sección, perfil, formación y cargo. Posteriormente, se deberá indicar la valoración de los ítems ergonómicos. Para ello, se pulsará el correspondiente valor entre los mostrados en la parte superior derecha del formulario, o bien, se introducirá el valor del ítem ergonómico en su correspondiente columna “Valor”.

Tras la introducción de la información solicitada para el trabajador el usuario deberá pulsar el botón “Insertar”, que hará efectiva la creación del trabajador en la base de datos. El proceso descrito para la creación de un trabajador deberá repetirse tantas veces como trabajadores se deseen introducir en la base de datos.

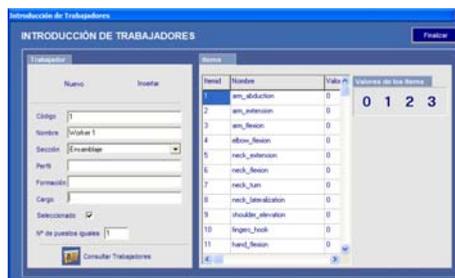


Figura 11.6: Interface de introducción de trabajadores.

11.4. Visualización y modificación de los datos introducidos

Tras la introducción de los ítems ergonómicos, las secciones, los puestos y los trabajadores, es posible visualizar, modificar y borrar dicha información pulsando la correspondiente opción de consulta en la ventana de “Gestión de Datos” (Figura 11.2).

11.4.1 Visualización y modificación de las secciones

El formulario “Secciones” (Figura 11.6) muestra un listado de las distintas secciones introducidas en la base de datos, y permite modificarlas y borrarlas mediante la barra de acciones mostrada en la parte superior de la lista.



Figura 11.7: Formulario de consulta de las secciones.

11.4.2 Visualización y modificación de los puestos

El formulario “Puestos”, mostrado en la Figura 11.8, permite listar los puestos introducidos en la base de datos. En dicho formulario es posible, además, consultar los puestos pertenecientes a una determinada sección. Para ello, se deberá seleccionar la sección deseada y pulsar el botón “Seleccionar Sección”. Posteriormente el botón “Deseleccionar Sección”, permitirá mostrar todos los puestos nuevamente sin el filtro por sección.

El mismo formulario ofrece la opción de búsqueda por nombre de los puestos, con el objetivo de facilitar al planificador la modificación o borrado de los datos introducidos para un determinado puesto.

El botón “Seleccionar Puesto” permite asignar un valor “True” al campo “Seleccionado” del puesto activo, siendo el puesto activo el indicado con un triángulo negro en el margen izquierdo del listado de puestos. El campo “Seleccionado” igual a “True” indica que el puesto será incluido en el plan de rotaciones. Así pues, es posible la introducción en la base de datos de puestos que, “a priori”, pueden no formar parte del plan de rotaciones, siendo posible su posterior inclusión. Del mismo modo, se podrán excluir puestos para la rotación que inicialmente fueron seleccionados. El campo “Total seleccionados” muestra el número total de puestos incluidos en el plan de rotaciones. Dicho valor deberá coincidir con el número total

de los trabajadores seleccionados para rotar (ver Figura 11.9), en otro caso, un mensaje avisará al planificador de que no es posible la obtención de la agenda de rotación cuando trate de generarla.

Por último, el botón “Valores de Ítems ergonómicos por puesto” permite acceder a los valores de los ítems del puesto activo en la lista de puestos (ver Figura 11.8).

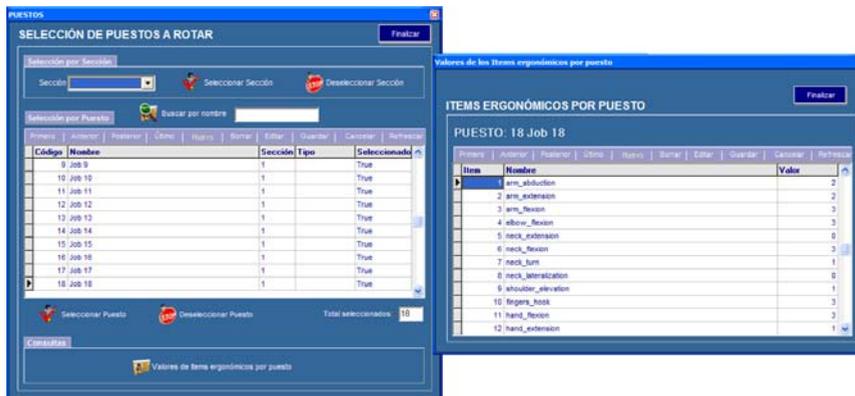


Figura 11.8: Formulario de consulta de los puestos y acceso a los ítems ergonómicos del puesto.

11.4.3 Visualización y modificación de los trabajadores

El formulario “Trabajadores” permite listar la información de los trabajadores introducidos en la base de datos. Su apariencia y funcionalidad, tal y como se muestra en la Figura 11.9, es similar a la del formulario “Puestos”. También es posible listar los trabajadores pertenecientes a determinada sección, así como incluir o excluir a trabajadores del plan de rotaciones mediante los botones “Seleccionar Trabajador” y “Deseleccionar Trabajador” respectivamente. El campo “Total seleccionados” mostrará el número de trabajadores finalmente seleccionados para rotar.

Por último, el botón “Valores de los ítems ergonómicos del trabajador” permite acceder a la información de los ítems del trabajador activo, al igual que en el listado de puestos, marcado por un triángulo negro en el margen izquierdo del listado.

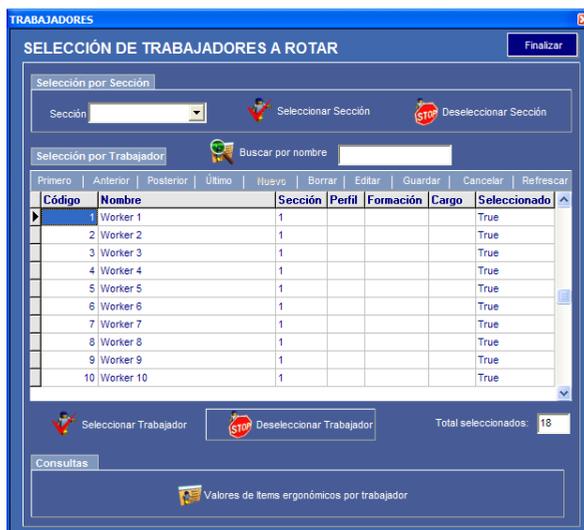


Figura 11.9: Formulario de consulta de los trabajadores.

11.5. Introducción de horarios

Una vez introducida en la aplicación la información de las secciones, puestos, trabajadores e ítems ergonómicos, se deberá introducir el número y duración de las rotaciones y pausas, mediante el formulario denominado “Duración de las rotaciones”, al que se accede a través de la opción “Horarios” situada en el marco izquierdo de la *interface* principal del programa (Figura 11.1).

En el formulario “Duración de las rotaciones” el planificador deberá indicar, en primer lugar, en el campo “Rotaciones”, el número de rotaciones más las pausas. Si se desea que todas las rotaciones y pausas posean idéntica duración se deberá seleccionar la opción “Regular”. En tal caso, no se indicará la duración específica de las rotaciones y pausas, ya que la influencia sobre la fatiga acumulada por el trabajador de los tiempos de ocupación de los puestos y de los periodos de descanso será idéntica para todas rotaciones y periodos de inactividad, y por tanto, pasará a depender únicamente de las características de los puestos y los trabajadores. En caso de que la duración de las rotaciones y/o pausas varíe, se deberá indicar en cada caso su duración en horas y minutos.

Si una rotación es marcada como “Inactiva”, el sistema considerará que se trata de una pausa, en tal caso, se recomienda rellenar el campo “Nombre” de forma que se identifique claramente dicho periodo de inactividad. Véase como ejemplo la figura siguiente.

Rotación	Duración (hh:mm)	Inactividad	Nombre
1	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 1
2	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 2
3	02:00	<input checked="" type="checkbox"/>	Pausa 1
4	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 3
5	01:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 4
6	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 6
7	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 7
8	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 8
9	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 9
10	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 10
11	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 11
12	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 12
13	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 13
14	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 14
15	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 15
16	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 16
17	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 17
18	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 18
19	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 19
20	02:00	<input type="checkbox"/>	Rotación 20

Considerar turnos ficticios como rotación para repetición de puestos

Actividad: 7 h. 0 min. Inactividad: 2 h. 0 min. Aceptar

Figura 11.10: Formulario de introducción del número y duración de las rotaciones y pausas.

11.6. Introducción de penalizaciones y opciones de ejecución

La introducción de las penalizaciones o asignaciones que se desea vetar se realiza pulsando el botón “Penalizaciones” del marco izquierdo de la interface principal. Seleccionada dicha función se abrirá el formulario denominado “Penalizaciones” mostrado en la Figura 11.11.

En el formulario “Penalizaciones” el planificador deberá indicar, en primer lugar, el número de veces consecutivas que un trabajador puede ocupar un mismo puesto. Dicho parámetro trata de introducir variabilidad y diversidad en los puestos ocupados por los trabajadores, con el objetivo de variar los grupos musculares empleados así como el tipo de actividad realizada, siempre y cuando el conjunto de puestos seleccionados para la rotación así lo permitan.

Para restringir la asignación a un puesto de determinados trabajadores, el planificador deberá seleccionar el puesto y el trabajador para el que desea vetar la asignación. A continuación deberá pulsar el botón “insertar”. Una vez insertada la asignación puesto-trabajador vetada se mostrará en la lista de penalizaciones situada en la parte inferior del formulario. Los pasos descritos deberán repetirse tantas veces como penalizaciones deseen introducirse.

Tal y como se ha indicado, a medida que el planificador inserte penalizaciones, éstas se mostrarán en una lista. Los botones situados en la parte superior de dicha lista permitirán al planificador desplazarse entre penalizaciones para su modificación y/o borrado.

Además, el formulario de Penalizaciones contiene otras importantes opciones de ejecución del programa que a continuación se describen:

“Función acumulativa”: si ésta opción es seleccionada el valor inicial de los ítems de cada trabajador será modificado para obtener un valor diferente para cada

rotación que reflejen el efecto de las tareas realizadas en las rotaciones precedentes (ver 7.14.3.1).

“**Considerar disminución progresiva**”: si se selecciona ésta opción el sistema considerará la disminución progresiva de la fatiga causada por la ocupación de determinado puesto en función del tiempo transcurrido desde su ocupación (ver 7.14.3.1).

“**Para valores superiores a**”: éste campo indica a partir de qué valor de los ítems ergonómicos de los puestos se considera que éstos provocan acumulación de fatiga en el trabajador, y por tanto, el sistema los deberá incluir a la hora de calcular los valores de los ítems ergonómicos de los trabajadores al inicio de cada rotación. Dicho campo se corresponde con el parámetro tre del AG (ver Ecuación 2).

“**Factor de disminución**”: éste factor define el grado en que la tarea desarrollada en una rotación determinada debe afectar al valor del ítem ergonómico correspondiente del trabajador para rotaciones posteriores. El valor asignado a dicho campo es inversamente proporcional a la influencia del historial previo de tareas realizadas por el trabajador, es decir, cuanto mayor sea el valor introducido menos se considerará la influencia de las tareas previas realizadas por el trabajador. Dicho campo se corresponde con el parámetro f_{red} del AG (ver Ecuación 2).

Penalizaciones

PENALIZACIONES Finalizar

Repetición de puesto

Nº de repeticiones consecutivas trabajador/puesto 2

Asignación a puesto

Penalizaciones por asignación

Puesto Trabajador Insertar

Primero | Anterior | Posterior | Último | Borrar | Editar | Guardar | Cancelar | Refrescar

Puesto	Nombre	Trabajador	Nombre
1	Job 1	12	Worker 12
1	Job 1	13	Worker 13
1	Job 1	14	Worker 14

Acumulación

Función Acumulativa Para valores superiores a 1.5 Factor de disminución 3

Considerar disminución progresiva

Figura 11.11: Formulario de introducción de penalizaciones y opciones de ejecución.

11.7. Generación de la agenda de rotación

Para la generación de la Agenda de rotación en base a los datos introducidos de los puestos, trabajadores, ítems ergonómicos y penalizaciones, el planificador deberá seleccionar la opción “Calcular” de la *interface* principal del programa, tras lo cual se abrirá el formulario mostrado en la Figura 11.12. En dicho formulario el

planificador deberá indicar, ante de iniciar la búsqueda de la solución, los parámetros de ejecución del algoritmo, de gran relevancia en el proceso de optimización.

En el recuadro identificado como “Parámetros de ejecución” se indicarán:

“**Generaciones**”: valor entero positivo que indica el número de iteraciones del AG hasta su detención.

“**Individuos**”: número entero positivo que determina el número de agendas de rotación cuya bondad se evaluará en cada generación.

“**P. cruce**” y “**P. mutación**”: la probabilidad de cruce y mutación determinan el grado de variabilidad de las agendas de rotación en cada generación. Deben ser valores decimales entre 0 y 1. El parámetro “**Intensidad**” determina la intensidad de la variación definida por el parámetro “probabilidad de mutación”, es decir, en una agenda de rotación cuántos trabajadores intercambian sus puestos en cada rotación. Debe ser un número entero positivo, y como máximo igual al n° de rotaciones \times n° de trabajadores.

“**Estrategia elitista**”: indica si se desea que la mejor agenda de rotación pase siempre a la siguiente generación.

“**Uniformidad**”: para activar el parámetro debe seleccionarse la casilla de selección e indicarse un valor entero positivo mayor que la unidad en el campo situado a su derecha. El parámetro “uniformidad” trata de evitar la existencia de trabajadores sobrecargados, penalizando las agendas de rotación que representen repartos descompensados entre los trabajadores.

“**Optimización**” y “**Cada ... generaciones**”: ésta opción permite activar la búsqueda de soluciones mejores en el entorno de la mejor agenda de rotación encontrada tras cierto número de generaciones. La periodicidad de dicho proceso de optimización local se indica con un valor entero que debe ser inferior al parámetro “**Generaciones**”. El parámetro “**Valores superiores**” limita las modificaciones de la mejor Agenda de rotación para la exploración de su entorno a aquellas asignaciones (trabajador-puesto-rotación) cuyo coste de asignación supere el valor indicado en éste parámetro.

El botón situado junto al de número de rotaciones (Reloj), permite acceder al formulario “Horarios”, y el botón de Penalizaciones (Stop), permite acceder directamente al formulario de introducción de las asignaciones vetadas.

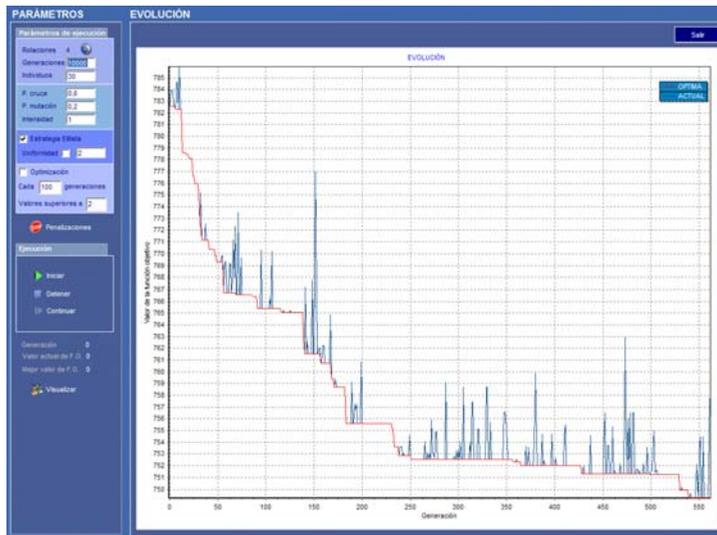


Figura 11.12: Formulario para el cálculo de la Agenda de rotación.

Una vez introducidos los parámetros de ejecución, el botón “Iniciar” permitirá calcular la Agenda de rotación en base a las especificaciones introducidas.

Durante el proceso de cálculo es posible detener la ejecución (botón “Detener”) y continuarla (botón “Continuar”), o reiniciarla (botón “Iniciar”). Además, es posible variar los valores de los parámetros de manera que las modificaciones sean inmediatamente efectivas, así como visualizar la evolución de la búsqueda gráficamente.

En la esquina inferior izquierda, se muestran los valores correspondientes a la generación actual y al valor de la función objetivo para la mejor agenda encontrada en dicha generación, así como el valor de la función objetivo de la mejor agenda de rotación encontrada hasta el momento.

11.8. Visualización de resultados

Una vez obtenida una Agenda de rotación, bien porque se han ejecutado el total de las generaciones indicadas en el correspondiente parámetro, bien por la detención del proceso de cálculo, la aplicación ofrece al planificador tres opciones de visualización de la solución obtenida. Para acceder a dichas opciones se deberá pulsar el botón “Visualizar”, tras lo cual se mostrará la ventana de selección del tipo de visualización Figura 11.13.



Figura 11.13: Ventana de selección de la opción de visualización.

11.8.1 Visualización por Tabla de Asignación

La “**Tabla de Asignación**” muestra en forma de matriz la agenda de rotación obtenida, tal y como se observa en la Figura 11.14. En la parte superior de la matriz se muestran diferentes opciones de visualización:

En la opción “**Visualizar valoración**”, mostrada en la Figura 11.14, cada fila corresponde a las asignaciones de un trabajador en las diferentes rotaciones, indicadas en los títulos de las columnas. En el cruce trabajador*rotación se muestra el puesto asignado. La columna etiquetada como “Cruce” contiene el coste de la asignación de cada trabajador a los diferentes puestos a lo largo de las rotaciones.

La opción “**Visualizar por trabajador**” es idéntica a la anterior eliminando la columna de “Cruce”.

Por último, la opción de “**Visualización por puesto**” muestra para cada puesto (fila) los trabajadores que le son asignados a los largo de las distintas rotaciones (columnas).

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Cruce
Worker 1	Job 6	Job 9	Job 12	Job 9	48,78
Worker 2	Job 8	Job 7	Job 13	Job 2	30,11
Worker 3	Job 10	Job 10	Job 11	Job 7	53,03
Worker 4	Job 12	Job 9	Job 10	Job 10	10,11
Worker 5	Job 17	Job 13	Job 4	Job 1	51,20
Worker 6	Job 10	Job 2	Job 5	Job 13	33,67
Worker 7	Job 7	Job 14	Job 8	Job 14	37,67
Worker 8	Job 1	Job 10	Job 6	Job 12	30,64
Worker 9	Job 9	Job 15	Job 10	Job 5	51,17
Worker 10	Job 10	Job 2	Job 7	Job 10	26,40
Worker 11	Job 4	Job 8	Job 17	Job 5	39,5
Worker 12	Job 11	Job 4	Job 2	Job 2	47,20
Worker 13	Job 3	Job 13	Job 14	Job 15	43,67
Worker 14	Job 2	Job 10	Job 3	Job 11	66,44
Worker 15	Job 5	Job 17	Job 15	Job 10	47,22
Worker 16	Job 14	Job 17	Job 10	Job 3	46,67
Worker 17	Job 13	Job 6	Job 1	Job 6	30,50
Worker 18	Job 10	Job 5	Job 9	Job 17	30,20

Figura 11.14: Ventana de la solución en forma de matriz.

11.8.2 Visualización gráfica de la solución

La opción de visualización “**Grafico**” permite acceder a la pantalla mostrada en la Figura 11.16. La agenda de rotación se muestra en forma de matriz de recuadros. Cada fila corresponde a un trabajador y cada columna a una rotación: En los recuadros se muestra el puesto asignado a cada trabajador (fila) en cada rotación (columna). La última columna (“Evaluación”), muestra el coste de la asignación del trabajador a los diferentes puestos a lo largo de las rotaciones.

Los campos situados en la parte superior de la matriz permiten configurar los colores asignados a los recuadros, o puestos, según el coste de la asignación trabajador-puesto-rotación.

El planificador podrá variar la solución obtenida arrastrando el puesto cuya asignación desea variar sobre el destino. Si el movimiento indicado supone que el puesto sea asignado en la misma rotación a dos trabajadores distintos el sistema mostrará un mensaje de advertencia.

Otro modo de modificar manualmente la agenda de rotación es arrastrando los puestos que se desean reasignar a la zona blanca situada en la parte izquierda de la matriz como paso intermedio a su reasignación, quedando la asignación arrastrada vacía a la espera de que sea arrastrado a dicha localización un nuevo puesto, tal y como muestra la Figura 11.17.

Por último el botón “Optimización” permitirá al planificador realizar una búsqueda automática en el entorno de la agenda de rotación mostrada, ofreciéndose diferentes posibilidades de optimización, tal y como muestra la Figura 11.15.

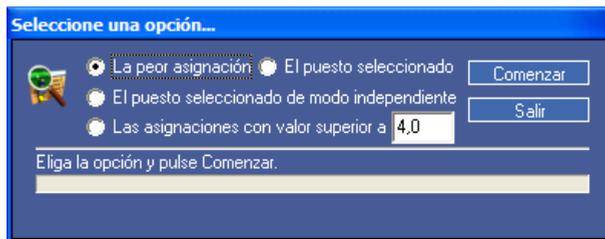


Figura 11.15: Opciones de optimización de la solución obtenida.

En la parte superior de la matriz el botón “Deshacer” permitirá anular el último movimiento entre puestos realizado. El botón “Restablecer” permitirá volver a la agenda de rotación original obtenida por el sistema, anulando todas las modificaciones realizadas por el planificador. Si se pulsa el botón “Guardar”, la agenda de rotación mostrada sustituirá a la agenda original obtenida por el sistema pasando la agenda guardada a ser la solución de referencia.

En la parte derecha de la pantalla de visualización se muestra dos histogramas:

El histograma de título “**Ítems del puesto y del trabajador**” muestra los valores

de los ítems correspondientes al trabajador y al puesto del recuadro activo (o pulsado) de la matriz. El recuadro activo o pulsado aparece hundido con respecto al resto. En la parte superior derecha de la pantalla, sobre el gráfico “Ítems del puesto y del trabajador”, se muestra la información del trabajador, el puesto y la rotación correspondientes al recuadro activo.

El gráfico “**Valoración Puesto-trabajador**” muestra los valores resultantes del producto de los ítems ergonómicos del trabajador y del puesto en la rotación del recuadro activo.

Cabe recordar que los valores de los ítems de los trabajadores al inicio de cada rotación varían en función de los puestos ocupados en las rotaciones precedentes, sin embargo, dicha variación puede ser desactivada desmarcando la opción “**Función acumulativa**”, situada en la parte superior derecha de la pantalla. Si la opción es desmarcada, la bondad de la solución es automáticamente recalculada empleando los valores de los ítems ergonómicos originales de los trabajadores para todas las rotaciones, es decir, sin considerar la fatiga acumulada provocada por los puestos ocupados.

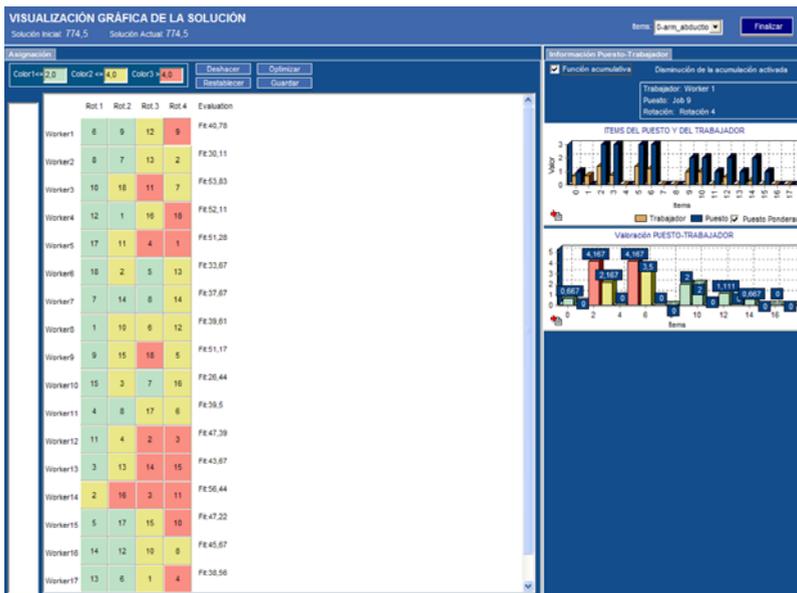


Figura 11.16: Pantalla de visualización gráfica de la solución.

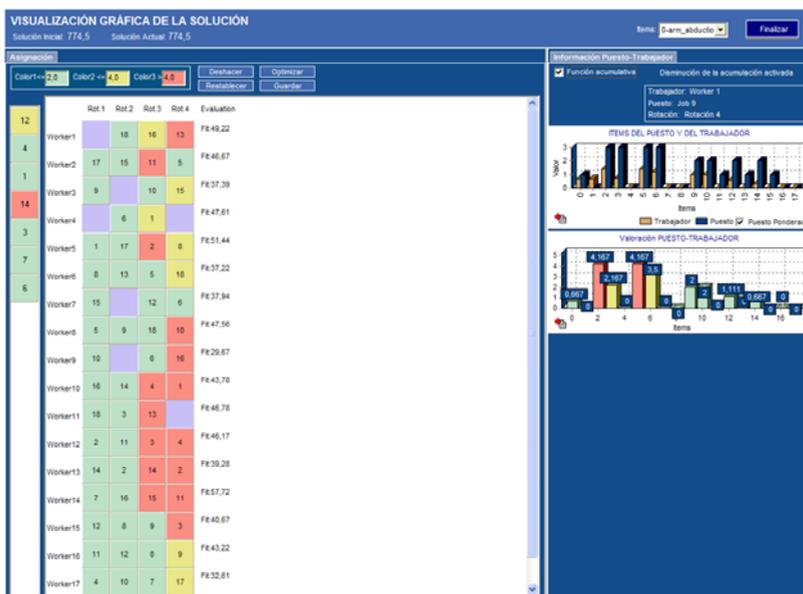


Figura 11.17: Modificación manual de la solución en la pantalla de visualización gráfica.

11.8.3 Visualización de la Función acumulativa por trabajador

La opción “**Valoración acumulativa**” (Figura 11.13) permite acceder a la pantalla de visualización de la “**Función acumulativa por trabajador**” (Figura 11.18). En ella se muestra, en forma de histograma, los valores de los ítems del trabajador seleccionado de la lista de trabajadores al inicio de la rotación marcada en la lista de rotaciones.

En el gráfico situado en la parte inferior muestra, para el trabajador seleccionado, la variación de los ítems ergonómicos a lo largo de todas las rotaciones.

La lista de rotaciones incluye una última rotación ficticia denominada “Final” que permite al planificador visualizar los valores de los ítems del trabajador al finalizar su jornada de trabajo, es decir, al final de la última rotación.

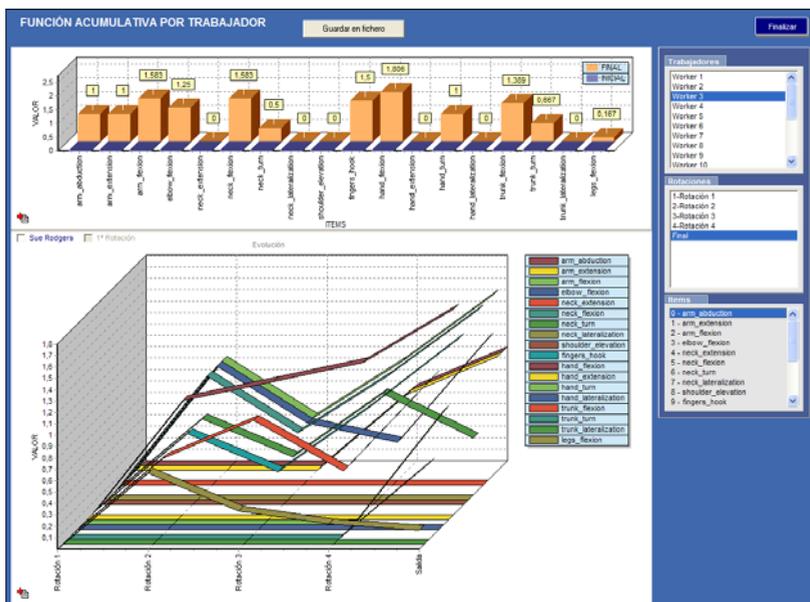


Figura 11.18: Pantalla de visualización de la Función acumulativa por trabajador.

11.9. Generación de informes

Para finalizar, obtenida la agenda de rotación, el botón “Informes” de la *interface* principal permitirá al planificador generar tres tipos de informes:

Informe de **Valoración de la asignación** (Figura 11.20): genera un informe con los puestos asignados a cada trabajador a lo largo de las rotaciones, incluyendo para cada trabajador el coste de sus asignaciones.

Informe de **Asignación (por trabajador)**: es idéntico al anterior pero no muestra el coste de las asignaciones.

Informe de **Asignación (por puesto)** (Figura 11.21): genera un informe con los trabajadores asignados a cada puesto a lo largo de las rotaciones.

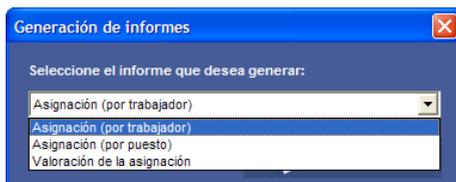


Figura 11.19: Ventana de selección de informes.

MORE **ASEPEYO** **Departamento de Proyectos de Ingeniería**
Asepeyo - Universidad Politécnica de Valencia
Informe: Valoración de la asignación

Fecha de realización: 26/12/2008 15:52:37 Realizado por: Sin responsable.

Observaciones: Sin observaciones.

Calendario de Rotaciones:
 1. Rotación 1 Duración: 02:00 horas
 2. Rotación 2 Duración: 02:00 horas
 3. Rotación 3 Duración: 02:00 horas
 4. Rotación 4 Duración: 02:00 horas
 5. Rotación 5 Duración: 01:00 horas

Trabajador	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 3	Rotación 4	Rotación 5	Cuota
Worker 1	Job 15	Job 5	Job 18	Job 15	Job 15	26,40
Worker 2	Job 17	Job 10	Job 5	Job 13	Job 13	33,76
Worker 3	Job 7	Job 14	Job 2	Job 1	Job 1	18,88
Worker 4	Job 1	Job 17	Job 9	Job 2	Job 2	26,12
Worker 5	Job 4	Job 16	Job 10	Job 16	Job 16	33,83
Worker 6	Job 10	Job 10	Job 1	Job 6	Job 6	33,71
Worker 7	Job 18	Job 8	Job 4	Job 10	Job 10	36,26
Worker 8	Job 9	Job 2	Job 17	Job 9	Job 9	30,88
Worker 9	Job 7	Job 13	Job 2	Job 14	Job 14	31,47

Figura 11.20: Informe de Valoración de la asignación.

MORE **ASEPEYO** **Departamento de Proyectos de Ingeniería**
Asepeyo - Universidad Politécnica de Valencia
Informe: Asignación (por puesto)

Fecha de realización: 26/12/2008 15:51:07 Realizado por: Sin responsable.

Observaciones: Sin observaciones.

Calendario de Rotaciones:
 1. Rotación 1 Duración: 02:00 horas
 2. Rotación 2 Duración: 02:00 horas
 3. Rotación 3 Duración: 02:00 horas
 4. Rotación 4 Duración: 02:00 horas
 5. Rotación 5 Duración: 01:00 horas

Puesto	Rotación 1	Rotación 2	Rotación 4	Rotación 5
Job 1	Worker 16	Worker 10	Worker 6	Worker 3
Job 2	Worker 9	Worker 6	Worker 3	Worker 4
Job 3	Worker 14	Worker 11	Worker 17	Worker 12
Job 4	Worker 5	Worker 12	Worker 7	Worker 13
Job 5	Worker 4	Worker 1	Worker 2	Worker 16
Job 6	Worker 10	Worker 18	Worker 10	Worker 6
Job 7	Worker 3	Worker 17	Worker 9	Worker 11
Job 8	Worker 9	Worker 7	Worker 15	Worker 8
Job 9	Worker 17	Worker 11	Worker 2	Worker 14

Figura 11.21: Informe de Asignación (por puesto).

12

Bibliografía

12. BIBLIOGRAFÍA

- Abrahamsson L., "Restoring the order: gender segregation as an obstacle to organisational development", *Applied Ergonomics*, 33, pp: 549-557, 2002
- Adenso-Díaz, B., Glover, F., Ghaziri, H., González, J.M., Laguna, M., Moscato, P., y Tseng, F., "Optimización Heurística y Redes Neuronales en Dirección de Operaciones e Ingeniería", Edit.:Paraninfo, Madrid, 1996
- Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, "Prevención de los trastornos musculoesqueléticos de origen laboral", *Magazine. Revista de la Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo*, 3, ISSN 1608-4152, 2000a
- Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, "FACTS 5: Trastornos musculoesqueléticos de origen laboral del cuello y las extremidades superiores: Resumen del Informe de la Agencia", 2000b
- Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, "FACTS 3: Trastornos musculoesqueléticos de origen laboral en Europa", 2000c
- Agencia Europea para la Seguridad y la Salud en el Trabajo, "FACTS 71: Introducción a los trastornos musculoesqueléticos de origen laboral", ISSN 1681-2085, 2007
- Ahonen M., Launis, M., y Kuorinka, T., "Ergonomic workplace analysis", Oja, G. (trad.). Helsinki, Finland: Ergonomics Section Finnish Institute of Occupational Health., pp: 33, 1989
- Alexanderson K., Sydsjo, A., Hensing, G., Sydsjo, G., y Carstensen, J., "Impact of pregnancy on gender differences in sickness absense", *Scandinavian Journal of Social Medicine*, 24, pp: 169-176, 1996
- Amano M., Gensyo, U., Nakajima, H., y Yatsuki, K., "Characteristics of work actions of shoe manufacturing assembly line workers and a cross-sectional factor-control study on occupational cervicobrachial disorders", *Japanese Journal of Industrial Health*, 30, pp: 3-12, 1988
- Andersen J.H. y Gaardboe, O., "Prevalence of persistent neck and upper limb pain in a historical cohort of sewing machine operators", *American Journal of Industrial Medicine*, 24, pp: 677-689, 1993
- Andrés, C., "Programación de la Producción en Talleres de Flujo Híbridos con Tiempos de Cambio de Partida dependientes de la secuencia. Modelos, Métodos y Algoritmos de Resolución. Aplicación a Empresas del Sector Cerámico", Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2001

- Andrés C., Molins A., Vicens E., y Albarracín J. M., "Equilibrado de líneas mediante un algoritmo de búsqueda tabú. Aplicación a una empresa del sector del automovil", XXIV Congreso nacional de estadística e investigación operativa, Almería, 1998
- Antonisse H.J., "A new interpretation of the schemata notation that overturns the binary encoding constraint", Third International Conference on Genetic Algorithms, San Mateo, 1989
- Aptel M., Cail, F., Gerling, A., y Louis, O., "Proposal of parameters to implement a workstation rotation system to protect against MSDs", International Journal of Industrial Ergonomics, 38, pp: 900-909, 2008
- Arabas J., Michalewicz, Z., y Mulawka, J.J., "GAVaPS - A genetic algorithm with varying population size", Actas de la International Conference on Evolutionary Computation, pp: 73-78, 1994
- Arbejdsmiljøinstituttet, "AMIS's spørgeskema om psykisk arbejdsmiljø (NIOH's questionnaire on psychosocial work environment)", Copenhagen: Arbejdsmiljøinstituttet, 2000
- Arndt R., "Working Posture and Musculoskeletal Problems of Video Display Terminal Operators - Review and Reappraisal", American Industrial Hygiene Association Journal, 44, pp: 437-446, 1983
- Arya A. y Mittendorf, B., "Using job rotation to extract employee information", Journal of Law Economics & Organization, 20, pp: 400-414, 2004
- Arya A. y Mittendorf, B., "Using optional job rotation programs to gauge on-the-job learning", Journal of Institutional and Theoretical Economics-Zeitschrift fur Die Gesamte Staatswissenschaft, 162, pp: 505-515, 2006
- Asensio-Cuesta S., Diego-Mas, J.A., y Alcaide-Marzal, J., "Estudio de la aplicabilidad práctica de los métodos de evaluación ergonómica de puestos de trabajo", XII Congreso Internacional de Ingeniería de proyectos, Zaragoza, 2008
- Asociación Española de Normalización y Certificación, "UNE-EN 1005-5:2007. Seguridad de las máquinas. Comportamiento físico del ser humano. Parte 5: Evaluación del riesgo por manipulación repetitiva de alta frecuencia", AENOR, 2007
- Åstrand N.E., "Medical, psychological, and social factors associated with back abnormalities and self-reported back pain: a cross-sectional study of male employees in a Swedish pulp and paper industry", Journal of Industrial Medicine [BR], 44, pp: 327-336, 1987
- Atmar W., "Notes on the simulation evolution", IEEE Transactions on neural networks, 5, pp: 130-147, 1994
- Ayoub M.M., Deivanayagam, S., Asfour, S.S., Bakken, G.M., Liles, D., Mital, A., y Sherif, M., "Determination and modeling of lifting capacity. Final Report",

National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), No.5R01-OH-00545-02, 1978

- Ayoub M.M., Selan, J.L., y Liles, D.H., "An Ergonomics Approach for the Design of Manual Materials-Handling Tasks", *Human Factors*, 25, pp: 507-515, 1983
- Baron S., Milliron, M., Habes, D., y Fidler, A., "Hazard evaluation and technical assistance report: Shoprite Supermarkets, New Jersey-New York", Cincinnati, OH: U.S.Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control, National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), HHE88-344-2092, 1991
- Berg M., Sanden, Å., Torell, G., y Järvholm, B., "Persistence of musculoskeletal symptoms: a longitudinal study", *Ergonomics*, 31, pp: 1281-1285, 1988
- Bergenudd H. y Nilsson, B., "Back pain in middle age. Occupational workload and psychologic factors: an epidemiologic survey", *The Spine Journal*, 13, pp: 58-60, 1988
- Bergqvist U., Wolgast, E., Nilsson, B., y Voss, M., "Musculoskeletal disorders among visual display terminal workers: individual, ergonomic, and work organizational factors", *Ergonomics*, 38, pp: 763-776, 1995a
- Bergqvist U., Wolgast, E., Nilsson, B., y Voss, M., "The influence of VDT work on musculoskeletal disorders", *Ergonomics*, 38, pp: 754-762, 1995b
- Berkley K.J., "Sex differences in pain", *Behavioral and Brain Sciences*, 20, pp: 371-380, 1997
- Bernard B., "Musculoskeletal disorders and workplace factors: A critical review of epidemiological evidence for work-related musculoskeletal disorders of the neck, upper extremity, and low back", Cincinnati, Ohio. National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), 1997
- Bernard B., Sauter, S., y Fine, L.J., "Hazard evaluation and technical assistance report", National Institute for Occupational Safety and Health (NIOSH), HHE 90-013-2277, 1993
- Bernard B., Sauter, S., Fine, L.J., Petersen, I., y Hales, T., "Job task and psychosocial risk factors for work-related musculoskeletal disorders among newspaper employees", *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health*, 20, pp: 417-426, 1994
- Biering-Sørensen F., "A prospective study of low-back pain in a general population. I. Occurrence, recurrence, and aetiology", *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 15, pp: 81-88, 1983
- Bleecker M.L., Bohlman, M., Moreland, R., y Tipton, A., "Carpal tunnel syndrome: role of carpal canal size", *Neurology*, 35, pp: 1599-1604, 1985

- Blum C. y Roli, A., "Metaheuristics in combinatorial optimization: overview and conceptual comparison", *ACM Computing Surveys*, 35, pp: 268-308, 2003
- Bonfiglioli R., Mattioli, S., Fiorentini, C., Graziosi, F., Curti, S., y Violante, F.S., "Relationship between repetitive work and the prevalence of carpal tunnel syndrome in part-time and full-time female supermarket cashiers: a quasi-experimental study", *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 80, pp: 248-253, 2007
- Bonfiglioli R., Mattioli, S., Spagnolo, M.R., y Violante, F.S., "Course of symptoms and median nerve conduction values in workers performing repetitive jobs at risk for carpal tunnel syndrome", *Occupational Medicine*, 56, pp: 115-121, 2006
- Bongers P.M., "The cost of shoulder pain at work", *British Medical Journal*, 322, pp: 64-65, 2001
- Bongers P.M., Winter, C.R., Kompier, M.A., y Hildebrandt, V.H., "Psychosocial factors at work and musculoskeletal disease", *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 19, pp: 297-312, 1993
- Borg E. y Kaijser, L., "A comparison between three rating scales for perceived exertion and two different work tests", *Scandinavian Journal of Medicine and Science in Sports*, 16, pp: 57-69, 2006
- Borg, G., "Borg's perceived exertion and pain scales", Edit.:Champaign, IL: Human Kinetics., 1998
- Borg, G., "Rating scales for perceived physical effort and exertion. *International Encyclopaedia of Ergonomics and Human Factors*", Edit.:Taylor and Francis., 2001
- Bovenzi M., "Low back pain disorders and exposure to whole-body vibration in the workplace", *Seminars in Perinatology.*, 1996
- Bovenzi M., Franzinelli, A., Mancini, R., Cannava, M.G., Maiorano, M., y Ceccarelli, F., "Doseresponse relation for vascular disorders induced by vibration in the fingers of forestry workers", *Occupational and Environmental Medicine*, 52, pp: 722-730, 1995
- Bovenzi M. y Hulshof, C.T., "An updated review of epidemiologic studies on the relationship between exposure to whole-body vibration and low back pain (1986-1997)", *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 72, pp: 351-365, 1999
- Bovenzi M., Pinto, I., y Stacchini, N., "Low back pain in port machinery operators", *Journal of Sound and Vibration*, 253, pp: 3-20, 2002
- Bovenzi M., Rui, F., Versini, W., Tommasini, M., y Nataletti, P., "Hand-arm vibration syndrome and upper limb disorders associated with forestry work", *La Medicina del lavoro*, 95, pp: 282-296, 2004

- Brad L.M. y Goldberg, D.E., "Optimal sampling for genetic algorithms", *Artificial Neural Networks in Engineering*, 6, pp: 291-298, 1996
- Bramlette M.F., "Initialisation, mutation and selection methods in genetic algorithm for function optimization", Belew, R.K. y Booke (Eds), L.B., 1991
- Bruhin C., Gerdle, B., Granlund, B., Hoog, J., Knutson, A., y Sundelin, G., "Physical and psychosocial work-related risk factors associated to musculoskeletal symptoms among home care personnel", *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health*, 12, pp: 101-110, 1998
- Buckwalter J.A., Woo, S.-Y., Goldberg, V.M., Hadley, E.C., Booth, F., y Oegema, T.R., "Current concepts review: soft-tissue aging and musculoskeletal function", *Journal of Bone and Joint Surgery [Am]*, 75A, pp: 1533-1548, 1993
- Burdorf A. y Monster, A., "Exposure to vibration and self-reported health complaints of riveters in the aircraft industry", *British Occupational Hygiene Society*, pp: 3-287, 1991
- Burdorf A., Van der Steenhoven, G.A., y Tromp-Klaren, E.G.M., "A one year prospective study on back pain among novice golfers", *American Journal of Sports Medicine*, 24, pp: 659-664, 1996
- Butler R.J. y Liao, H., "Job performance failure and occupational carpal tunnel claims", *Journal of Occupational Rehabilitation*, 12, pp: 1-12, 2002
- Byström S., Hall, C., Welander, T., y Kilbom, Å., "Clinical disorders and pressure-pain threshold of the forearm and hand among automobile assembly line workers", *Journal of hand surgery [BR]*, pp: 6-782, 1995
- Campion M.A. C.L.S.M.J., "Career-Related Antecedents and Outcomes of Job Rotation", *The Academy of Management Journal*, 37, pp: 1518-1542, 1994
- Cannon L.J., Bernacki, E.J., y Walter, S.D., "Personal and occupational factors associated with carpal tunnel syndrome", *Occupational Medicine*, 23, pp: 255-258, 1981
- Carayon P., Smith, M.J., y Haims, M.C., "Work organization, job stress, and work-related musculoskeletal disorders", *Human Factors*, 41, pp: 644-663, 1999
- Carnahan B.J., Carnahan, B.J., Redfern, M.S., y Norman, B.A., "A genetic algorithm for designing job rotation schedules considering ergonomic constraints", *Proceedings of the Congress on Evolutionary Computation*, 2, pp: 1093-1098, 1999
- Carnahan B.J., Norman, B.A., y Redfern, M.S., "Incorporating physical demand criteria into assembly line balancing", *IIE Transactions*, 33, pp: 875-887, 2001

- Carnahan B.J. y Redfern, M.S., "Application of genetic algorithms to the design of lifting tasks", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 21, pp: 145-158, 1998
- Carnahan B.J., Redfern, M.S., y Norman, B., "Designing safe job rotation schedules using optimization and heuristic search", *Ergonomics*, 43, pp: 543-560, 2000
- Cazamian P., "Traité d'ergonomie", Edit: Octares.Toulouse., 1987
- Cerny V., "Themodynamical approach to the travelling salesman problem: An efficient simulation algorithm", *Journal of Optimisation Theory and Applications*, 45, pp: 41-51, 1985
- Chaffin D.B., "Manual materials handling the cause of overexertion injury and illness in industry", *Journal of environmental pathology and toxicology*, 2, pp: 67-73, 1979
- Chambers, L.D.E., "Practical handbook of genetic algorithm: Applications. Volume 1", Edit.:Chapman & Hall/ CRC, Florida, 1995a
- Chambers, L.D.E., "Practical handbook of genetic algorithm: New Frontiers. Volume 2", Edit.:Chapman & Hall/ CRC, Florida, 1995b
- Chambers, L.D.E., "Practical handbook of genetic algorithm: Complex Coding System. Volume 3", Edit.:Chapman & Hall/ CRC, Florida, 1999
- Chandrasakaran A., Chee, H.L., Rampal, K.G., y Tan, G.L., "The prevalence of musculoskeletal problems and risk factors among women assembly workers in the semiconductor industry", *The Medical Journal of Malaysia*, 58, pp: 657-666, 2003
- Chatterjee D., "Workplace upper limb disorders: a prospective study with intervention", *Occupational Medicine*, 42, pp: 129-136, 1992
- Chavarría-Cosar R., "NTP 177: La carga física de trabajo: definición y evaluación", documento electrónico disponible en: www.mtas.es/insht/ntp/ntp_629.htm, fecha de último acceso: Abril /2009
- Chee H.L., Rampal, K.G., y Chandrasakaran, A., "Ergonomic risk factors of work processes in the semiconductor industry in Peninsular Malaysia", *Industrial Health*, 42, pp: 272-281, 2004
- Chen F., Li, T., y Huang, H., "A field study of cold effects among cold store workers in China", *ArcticMedical Research*, 50, pp: 99-103, 1991
- Cheraskin L. y Campion, M.A., "Study clarifies job-rotation benefits", *Personnel Journal*, 75, pp: 31-38, 1996
- Chiang H., Chen, S., Yu, H., y Ko, Y., "The occurrence of carpal tunnel syndrome in frozen food factory employees", *Kaohsiung Journal of Medical Sciences*, 6, pp: 73-80, 1990

- Christmansson M., "The HAMA-method: a new method for analysis of upper limb movements and risk for work-related musculoskeletal disorders", Proceedings of the 12th Triennial Congress of the International Ergonomics Association/Human Factors Association of Canada, August, Toronto (Mississauga: Human Factors Association of Canada), 173, 1994
- Christmansson M., Friden, J., y Sollerman, C., "Task design, psychosocial work climate and upper extremity pain disorders-effects of an organisational redesign on manual repetitive assembly jobs", Applied Ergonomics, 30, pp: 463-472, 1999
- Ciriello V.M. y Snook, S.H., "A study of size distance height, and frequency effects on manual handling tasks", Human Factors, 25, pp: 473-738, 1983
- Clemmer D.I., Mohr, D.L., y Mercer, D.J., "Low-back injuries in a heavy industry: I. Worker and workplace factors", The Spine Journal, 16, pp: 824-830, 1991
- Colombini D., "An observational method for classifying exposure to repetitive movements of the upper limbs", Ergonomics, 41, pp: 1261-1289., 1998
- Colombini, D., Occhipinti, E., y Grieco, A., "Risk Assessment and Management of Repetitive Movements and exertions of upper limbs", Edit.:Elsevier, 2002
- Colorni A., Dorigo M., y Maniezzo V., "An investigation of some properties of an 'ant algorithm'", Proceedings of the Parallel Problem Solving from Nature Conference (PPSN 92) y Elsevier Science Publisher, Bruselas, 1992
- Colorni A., Dorigo, M., Maffioli, F., Maniezzo, V., Righini, M., y Trubian, M., "Heuristics from nature for hard combinatorial optimization problems", International Transactions in Operational Research, 3, pp: 1-21, 1996
- Comisión Europea, "Guía sobre el estrés relacionado con el trabajo ¿La «sal de la vida» o el «beso de la muerte»? (Resumen)", Comisión Europea.Dirección General de Empleo y Asuntos Sociales., pp: -, 2000
- Commissaris D.A., Douwes M., y Looze M. P., "Recommendations for sufficient physical activity at work". C. Berlin and L-O. Bligård (Eds): Proceedings of the 39th Nordic Ergonomics Society Conference, Lysekil, Sweden. 2007
- Connolly D.T., "An improved annealing schema for the QAP", European Journal of Operational Research, 46, pp: 93-100, 1990
- Corlett E.N., Madeley, S.J., y Manenica, I., "Posture targetting: a technique for recording working postures", Ergonomics, 22, pp: 357-366, 1979
- Cosgel M.M. y Miceli, T.J., "On job rotation", Research Papers in Economics, 1998
- Cosgel M.M. y Miceli, T.J., "Job rotation: Cost, benefits, and stylized facts", Journal of Institutional and Theoretical Economics-Zeitschrift fur Die Gesamte Staatswissenschaft, 155, pp: 301-320, 1999

- Crook J., Milner, R., Schultz, I.Z., y Bernadette, S., "Determinants of Occupational Disability Following a Low Back Injury: A Critical Review of the Literature", *Journal of Occupational Rehabilitation*, 12, pp: 277-295, 2002
- Dalmau-Pons I. y Nogareda-Cuixart, S., "NTP 451: Evaluación de las condiciones de trabajo: métodos generales", Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), documento electrónico disponible en: http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_451.htm, fecha de último acceso: Enero /2008
- Davis K. y Jorgensen, M., "Ergonomics. Pros and cons of job rotation as a means of reducing injury costs", *Journal of occupational and environmental hygiene*, 2, pp: D1-D3, 2005
- Davis L., "Applying adaptative algorithms to epistatic domains", *Proc.of the international joint conference on artificial intelligence*, pp: 162-164, 1985
- Davis L., "Adapting operator probabilities in genetic search", *Proceedings of the Third International Conference on Genetic Algorithms y Morgan Kaufmann* , San Mateo, 1989
- Davis, L., "Handbook of Genetic Algorithms", Edit.:van Nostrand Reinhold, New York, 1991
- De Jong K.A., "Genetic algoritms: a 10 years perspective", *Proceedings of the first international conference on genetic algorithms y Lawrence Erlbaum Associates*, 1985
- De Jong, K.A., "Genetic algorithms are not function optimizers", Edit.:Morgan Kaufmann, San Mateo, California, 1993
- De Jong, K.A. y Spears, W.M., "An analysis of the interacting roles of population size and crossover in genetic algorithms", Edit.:Springer-Verlag, 1990
- Dempsey P.G., "Usability of the revised NIOSH lifting equation", *Ergonomics*, 45, pp: 817-825, 2002
- Dempsey P.G., Burdorf, A., y Webster, B.S., "The influence of personal variables on work-related low-back disorders and implications for future research", *Journal of occupational and environmental medicine*, 39, pp: 748-759, 1997
- Dempsey P.G., McGorry, R.W., y Maynard, W.S., "A survey of tools and methods used by certified professional ergonomists", *Applied Ergonomics*, 36, pp: 489-503, 2005
- Devereux J.J., Rydsted, L., Kelly, V., Weston, P., y Buckle, P., "The role of work stress and psychological factors in the development of musculoskeletal disorders", *Robens Centre for Health Ergonomics.University of Surrey.Guildford.Surrey.*, Research report 273, 2004

- Devereux J.J., Vlachonikolis, I.G., y Buckle, P.W., "Epidemiological study to investigate potential interaction between physical and psychosocial factors at work that may increase the risk of symptoms of musculoskeletal disorder of the neck and upper limb", *Occupational and Environmental Medicine*, 59, pp: 269-277, 2002
- Dieck G.S. y Kelsey, J.L., "An epidemiologic study of the carpal tunnel syndrome in an adult female population", *Preventive Medicine*, 14, pp: 63-69, 1985
- Diego-Mas, J.A., "Optimización de la distribución en planta de instalaciones industriales mediante algoritmos genéticos.
- Aportación al control de la geometría de las actividades", Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2006
- Diego-Mas J.A., Asensio-Cuesta, S., Sanchez-Romero, M.A., y Artacho-Ramirez, M.A., "A multi-criteria genetic algorithm for the generation of job rotation schedules", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 39, pp: 23-33, 2009
- Díez-de-Ulzurrun, M., Garasa-Jimenez, A., y Eransus-Izquierdo, J., "Trastornos músculo-esqueléticos de origen laboral", Instituto Navarro de Salud Laboral. Gobierno de Navarra, 2007
- Digalakis J.G. y Margaritis, K.G., "An experimental study of benchmarking functions for genetic algorithms", *IEEE Conferences Transactions, Systems, Man and Cybernetics*, 5, pp: 3810-3815, 2000
- Doelen V. y Barsky, J.A., "Repetitive strain injury within the meat-processing industry", *Occupational Health in Ontario*., 11, pp: 167-, 1990
- Dorigo , M., "Ottimizzazione, apprendimento automatico, ed algoritmi basati su metafora naturale", Tesis doctoral, Politecnico di Milano, Milán, 1992
- Dorigo M. y Gambardella, L.M., "Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 1, pp: 53-66, 1997
- Dorigo M. y Gambardella, L.M., "Ant colonies for the traveling salesman problem", *BioSystems*, 43, pp: 73-81, 1997
- Dorigo M., Maniezzo, V., y Colorni, A., "The ant system: optimization by a colony of cooperating agents", *IEEE Transactions on Systems*, 26, pp: 1-13, 1996
- Dovrat E. y Katz-Leurer, M., "Cold exposure and low back pain in store workers in Israel", *American Journal of Industrial Medicine*, 50, pp: 626-631, 2007
- Downsland, K.A., "Simulated annealing", *Modern heuristics techniques for combinatorial problems*, Edit: Blackwell Scientific Publishers: Oxford, pp: -, 1993a

- Downsland K.A., "Some experiments with Simulated Annealing Techniques for Packing Problems", *European Journal of Operational Research*, 68, pp: 389-399, 1993b
- Drinkaus P., Blosswick, D., Sesek, R., Mann, C., y Bernard, T., "The Strain Index: Using Task Level Outputs to Evaluate Job Risk", 1st Annual Regional National Occupational Research Agenda (NORA) Young/New Investigators Symposium, Salt Lake City, 2003
- Dudek G. y Scheuer, T., "Threshold accepting: a general purpose optimization algorithm", *Journal of Computational Physics*, 90, pp: 161-175, 1990
- Eckenrode J. y Gore, S., "Stress between work and family: Summary and conclusion", *Stress Between Work and Family* (New York: Plenum), 1989
- Efron B., "Bootstrap methods: Another look at the jackknife", *The Annals of Statistics*, 7, pp: 1-26, 1979
- Eggers J., Feillet, D., Kehl, S., Wagner, M.O., y Yannou, B., "Optimization of the keyboard arrangement problem using an Ant Colony algorithm", *European Journal of Operational Research*, 148, pp: 672-686, 2003
- Ellis T., "Implementing job rotation", *Occupational Health and Safety*, 68, pp: 82-84, 1999
- Eriksson T. y Ortega, J., "The adoption of job rotation: Testing the theories", *Industrial & Labor Relations Review*, 59, pp: 653-666, 2006
- Eshelman, L., Caruna, R., y Schaffer, J.D., "Biases in the crossover landscape", Edit.:Morgan Kaufmann, San Mateo, 1989
- Eurofound, "Fourth European Working Conditions Survey. Impact of work on health", European Foundation for the Improvement of Living and Working Conditions, 2005
- European Agency for Safety and Health at Work, "Expert forecast on emerging physical risks related to occupational safety and health", Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2005
- Fagor, "Método perfil de puesto", Fagor salud laboral, 1987
- Falardeau A., "Enquête sur la rotation et l'assignation temporaire", Rapport réalisé dans le cadre des travaux de la Chaire GM en ergonomie de l'UQAM.PISTES, 5, pp: 17-20, 2001
- Falardeau A., Lalande, G., y Vézina, N., "Rotation, assignation temporaire et absentéisme", Actes du Forum de la Chaire GM en ergonomie de l'UQAM : La rotation est-ce une solution?, pp: 67-72, 2003b

- Falardeau A., Lalande, G., y Vézina, N., "Rotation, assignation temporaire et absentéisme", Actes du Forum de la Chaire GM eb ergonomie de l'UQAM: La rotation est-ce une solution?, pp: 67-72, 2003a
- Falardeau A. y Vézina, N., "Rotation des postes, assignation temporaire et impact des absences dans une usine d'abattage et de transformation du porc", Perspectives Interdisciplinaires sur le Travail et la Santé., 4, 2002
- Fallentin N., Viikari-Juntura, E., Wærsted, M., y Kilbom, A., "Evaluation of physical workload standards and guidelines from a Nordic perspective", Scandinavian Journal of Work and Environmental and Health, 27, pp: 1-52, 2001
- Federación Americana del Trabajo-Congreso de Organizaciones Industriales (AFL-CIO), "Stop the pain", Washington D.C: AFL-CIO, 1997
- Federal Register, "29 CFR Part 1910", Ergonomics Program; Final Rule., 65, pp: 68262-68870, Washington, DC: Department of Labor, Occupational Safety and Health Administration, 2000
- Ferrari R. y Russell, A.S., "Neck pain", Best Practice & Research Clinical Rheumatology, 17, pp: 57-70, 2003
- Fillingim B.R., Maixner, W., Kincaid, S., y Silva, S., "Sex differences in temporal summation but not sensory-discriminative processing of thermal pain", Pain, 75, pp: 121-127, 1998
- Flaspöler, E., Dietmar, R., y Brun, E., "Expert forecast on emerging physical risks related to occupational safety and health", European Agency for Safety and Health at Work, , 2005
- Fogarty T.C., "Varying the probability of mutation in genetic algorithm", Proceedings of the third international conference on genetic algorithms, San Mateo, 1989
- Fogel D.B., "An introduction to simulated evolutionary optimization", IEEE Transactions on neural networks, 5, pp: 3-14, 1994
- Fogel D.B. y Fogel, L.J., "Guest editorial; evolutionary computation", IEEE Transactions on neural networks, 5, pp: 1-2, 1994
- Fogel, L.J., Owens, A.J., y Walsh, M.J., "Artificial intelligence through simulated evolution", Edit.:Wiley Publishing, New York, 1966
- Frazer M.B., Norman, W., Wells, R.P., y Neumann, P.W., "The effects of job rotation on the risk of reporting low back pain", Ergonomics, 46, pp: 904-919, 2003
- Frazer M.B., "Job rotation and the risk of reporting low back pain", CRE PREMUS Centre of Research Expertise for the Prevention of Work-Related Musculoskeletal Disorders and Disability. University of Waterloo, 2004

- Freiboth M., Frieling, E., Henniges, D., y Saager, C., "Comparison of different organizations of assembly work in the European automotive industry", *International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice*, 20, pp: 357-370, 1997
- Garg A., Chaffin, D.C., y Herrin, G.D., "Prediction of metabolic rates for manual material handling jobs", *American Industrial Hygiene Association Journal*, 39, pp: 661-764, 1978
- Gaudart C., Laville, A., Molinie, A.F., y Volkoff, S., "Workers Age and Repetitive Work - A Demographic and Ergonomic Approach", *Relations Industrielles-Industrial Relations*, 50, pp: 826-851, 1995
- Gaudart C., "Conditions for maintaining ageing operators at work--a case study conducted at an automobile manufacturing plant", *Applied Ergonomics*, 31, pp: 453-462, 2000
- Gelmers H., "Primary carpal tunnel stenosis as a cause of entrapment of the median nerve", *Acta Neurochir*, 55, pp: 317-320, 1981
- Generalitat de Catalunya, "Manual per a la identificació i avaluació de riscos laborals. Versió 3.1", Generalitat de Catalunya. Departament de Treball. Direcció General de Relacions Laboral, 2006
- Gittleman M., Horrigan, M., y Joyce, M., "'Flexible' workplace practices: evidence from a nationally representative survey", *Industrial & Labor Relations Review*, 52, pp: 99-115, 1998
- Glover F., "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence", *Computers & Operations Research*, 13, pp: 533-549, 1986a
- Glover F., "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence", *Computers & Operations Research*, 13, pp: 533-549, 1986b
- Glover F., "Tabu search - Part 1", *ORSA Journal on computing*, 1, pp: 190-206, 1989
- Glover F., "Tabu search - Part 2", *ORSA Journal on computing*, 2, pp: 4-32, 1990
- Glover F., "Simple Tabu Thresholding in Optimization", *Research Report*, School of Business, University of Colorado, 1991
- Glover F. y Melián, B., "Tabu search", *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial.*, 19, pp: 29-48, 2003
- Glover F., Taillard, E., y Werra, D., "A user's guide to tabu search", *Annals of operations research*, 41, pp: 3-28, 1993
- Glover F., Kelly, J.P., y Laguna, M., "Genetic algorithm and tabu search: hybrids for optimization", *Computers & Operations Research*, 22, pp: 111-134, 1995

- Goldberg D.E., "Alleles, loci and the TSP", Proceedings of the first international conference on genetic algorithms, 1985
- Goldberg, D.E., "Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning", Edit.:Addison-Wesley Publishing Company Inc., Massachusetts, 1989
- Goldberg, D.E., "The theory of virtual alphabets", Proceedings of the parallel problems solving from nature workshop, Edit: Schwefel, H.P. y Reinhard, M.: Dortmund, pp: 13-22, 1991
- Goldberg M.S., Scott, S.C., y Mayo, N.E., "A review of the association between cigarette smoking and the development of nonspecific back pain and related outcomes", The Spine Journal, 25, pp: 995-1014, 2000
- Goldenhar L. y Sweeney, M.H., "Tradeswomen's perpectives on occupational health and safety: A qualitative investigation", American Journal of Industrial Medicine, 29, pp: 516-520, 1996
- González-García, J.L., "Aportación a la optimización multiobjetivo de la distribución en planta", Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 2005
- González-Maestre, D., "Ergonomía y psicología", Edit.:FC Editorial, 2008
- Gore D.R., Carrera, G.F., y Glaeser, S.T., "Smoking and degenerative changes of the cervical spine: a roentgenographic study", The Spine Journal, 6, pp: 557-560, 2006
- Grant K.A., Habes, D.J., y Bertsche, P.K., "Lifting hazards at a cabinet manufacturing company: evaluation and recommended controls", Applied Occupational and Environmental Hygiene, 12, pp: 253-258, 1997
- Grefenstette J., "Optimization of control parameters for genetics algorithms", IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, 16, pp: 122-128, 1986
- Grefenstette J., "A User's Guide to GENESIS Version 5.0", documento electrónico disponible en: <http://www.genetic-programming.com/c2003genesisgrefenstette.txt>, fecha de último acceso: Marzo /1990
- Guelaud F., Beauchesne, M.N., Gautrat, J., y Roustang, G., "Pour une analyse des conditions du travail ouvrier dans l'entreprise", Paris: A.Colin., 1977
- Gunnarsdottir H.K., Rafnsdottir, G.L., Helgadottir, B., y Tomasson, K., "Psychosocial risk factors for musculoskeletal symptoms among women working in geriatric care", American Journal of Industrial Medicine, 44, pp: 679-684, 2003
- Gurrea-Gracia J., Martínez-Gamarra, M., Fernández-Arias, J.C., y Alcázar-Crevillén, A., "Los factores de riesgo psicosocial en el medio laboral. Un enfoque multidisciplinar Resumen de ponencias", V Jornadas de la Sociedad de Medicina, Higiene y Seguridad del Trabajo de Aragón y La Rioja, 2003

- Haahr J.P. y Andersen, J.H., "Physical and psychosocial risk factors for lateral epicondylitis: a population based case-referent study", *Occupational and Environmental Medicine*, 60, pp: 322-329, 2003
- Hagberg, M., Silvertein, B., Weels, R., Smith, M.J., Hendrick, H.W., Carayon, P., y Pérusse, M., "Work-related Musculoskeletal Disorders (WRMD): A reference book for prevention", Edit.:Taylor & Francis., 1995
- Haims M.C. y Carayon, P., "Work Organization Interventions", *International Encyclopedia of Ergonomics and Human Factors*, 3, pp: 1441-1445, 2002
- Hales T.R., Sauter, S.L., Peterson, M.R., Fine, L.J., Putz-Anderson, V., y Schleifer, L.R., "Musculoskeletal disorders among visual display terminal users in a telecom-munications company", *Ergonomics*, 37, pp: 1603-1621, 1994
- Hangai M., Kaneoka, K., Kuno, S., Hinotsu, S., Sakane, M., Mamizuka, N., Sakai, S., y Ochiai, N., "Factors associated with lumbar intervertebral disc degeneration in the elderly", *The Spine Journal*, In Press, Corrected Proof, 2008
- Hansson G., Balogh, I., Ohlsson, K., Pslsson, B., Rylander, L., y Skerfving, S., "Impact of physical exposure on neck and upper limb disorders in female workers", *Applied Ergonomics*, 31, pp: 301-310, 2000
- Hart T.R., archambault, J.M., Kydd, A., Reno, C., Frank, C.B., y Herzog, W., "Gender and neurogenic variables in tendon biology and repetitive motion disorders", *Clinican Orthopaedics and related research*, 351, pp: 44-56, 1998
- Hartman E., Oude Vrielink, H.H.E., Metz, J.H.M., y Huirne, R.B.M., "Exposure to physical risk factors in Dutch agriculture: Effect on sick leave due to musculoskeletal disorders", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35, pp: 1031-1045, 2005
- Hartvigsen J., Bakketeig, L.S., Leboeuf-Yde, C., Engberg, M., y Lauritzen, T., "The association between physical workload and low back pain clouded by the "healthy worker" effect", *Ugeskr Laeger*, 164, pp: 2765-2768, 2002
- Hazzard L., Mautz, J., y Wrightsman, D., "Job rotation cuts cumulative trauma cases", *Personnel Journal*, 71, pp: 29-32, 1992
- Headapole D., "Sex, gender, biology and work", *Occupational medicine: State of the art reviews*, 8, pp: 685-707, 1993
- Henderson C.J., "Ergonomic Job Rotation in Poultry Processing", *Advances in Industrial Ergonomics and Safety.*, 4, pp: 443-450, 1992
- Herberts P., Kadefors, R., Andersson, G., y Petersen, I., " Shoulder pain in industry: an epidemiological study on welders", *Acta OrthopScand*, 52, pp: 306-, 1981

- Hignett S. y McAtamney, L., "Rapid Entire Body Assessment (REBA)", *Applied Ergonomics*, 31, pp: 201-205, 2000
- Hildebrandt V.H., "Back pain in the working population: prevalence rates in Dutch trades and professions", *Ergonomics*, 38, pp: 1283-1298, 2008
- Hinnen U., Läubli, T., Guggenbühl, U., y Krueger, H., "Design of check-out systems including laser scanners for sitting work posture", *Scandinavian Journal of Work Environmental and Health*, 18, pp: 186-194, 1992
- Hinterding, R., Gielewski, H., y Peachey, T.C., "The nature of mutation in genetic algorithms", Edit.:Morgan Kaufmann, San Mateo, 1995
- Hoekstra E.J., Hurrell, J.J., y Swanson, N.G., "Hazard evaluation and technical assistance report: Social Security Administration Teleservice Centers, Boston, MA; Fort Lauderdale, FL", Cincinnati, OH: U.S.Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for DiseaseControl and Prevention, National Institute forOccupational Safety and Health (NIOSH), 92-0382-2450, 1994
- Holland, J.H., "Adaptation in natural and artificial systems", Edit.:University of Michigan Press; Ann Arbor, 1975
- Holmström E., " Musculoskeletal disorders in construction workers", Lund,Sweden: Lund University, Department of Physical Therapy, pp: 1-175, 1992
- Hooffman W.E., van Poppel, M.N.M., van der Beek, A.J., Bongers, P.M., y van Mechelen, W., "Gender differences in the relations between work-relates physical and psychosocial risk factors and musculoskeletal complains [review]", *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health*, 30, pp: 261-278, 2004
- Hrubec Z. y Nashold, B.S., "Epidemiology of lumbar disc lesions in the military in World War II", *American Journal of Epidemiology*, 102, pp: 366-376, 1975
- Huang H.J., "Job Rotation from the Employees' Point of View", *Research and Practice in Human Resource Management*, 7, pp: 75-85, 1999
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, "Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la Manipulación manual de cargas", documento electrónico disponible en: www.mtas.es/insht/practice/G_cargas.htm, fecha de último acceso: Mayo / 2008
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, "V Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo", documento electrónico disponible en: http://www.mtas.es/insht/statistics/5enct_ap.htm, fecha de último acceso: Abril /2009
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, "Encuesta de Condiciones de Trabajo 2005. Daños a la salud", 2005, documento electrónico

- disponible en:
http://www.mtas.es/insht/statistics/ect05_resul.htm#punto4_10, fecha de último acceso: Febrero/ 2008
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, "VI Encuesta Nacional de Condiciones de Trabajo (VI ENCT)", 2007, documento electrónico disponible en:
http://www.insht.es/Observatorio/Contenidos/InformesPropios/Desarrollados/Ficheros/Informe_VI_ENCT.pdf, fecha de último acceso: Abril /2009
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, "Guía técnica para la evaluación y prevención de los riesgos relativos a la Manipulación manual de cargas", documento electrónico disponible en:
www.mtas.es/insht/practice/G_cargas.htm, fecha de último acceso: Marzo /2008
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo, "Síndrome del túnel carpiano. Criterios para su intervención en el ámbito laboral, documento electrónico disponible en:
http://www.mtas.es/insht/practice/f_tunel.htm, fecha de último acceso: Enero / 2008
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), "Encuesta de Condiciones de Trabajo 2005.", documento electrónico disponible en:
http://www.mtas.es/insht/statistics/ect05_resul.htm#punto4_10, fecha de último acceso: Enero /2005
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), "Daños a la salud", documento electrónico disponible en:
http://www.mtas.es/insht/statistics/5enct_ds.htm, fecha de último acceso: Febrero /2008
- International Organization for Standardization, "ISO 11228-3:2007. Ergonomics. Manual handling. Part 3: Handling of low loads at high frequency", ISO, 2007
- International Organization for Standardization, "ISO 11226, Ergonomics - Evaluation of static working postures", ISO, Geneva, Switzerland, 2000
- Jager M., Luttmann, A., y Laurig, W., "Lumbar load during one-handed bricklaying", International Journal of Industrial Ergonomics, 8, pp: 261-277, 1991
- Janikow C.Z. y Michalewicz Z., "An experimental comparison of binary and floating point representations in genetic algorithm", Morgan Kaufman, 1991
- Johanning E., "Back disorders and health problems among subway train operators exposed to whole-body vibration", Scandinavian Journal of Work and Environmental Health, 17, pp: 414-419, 1991
- Johnson D.S., Aragon, C.R., McGeoch, L.A., y Schevon, C., "Optimization by simulated annealing: An experimental evaluation; Part I, Graph coloring and number partitioning", Operations Research, 37, pp: 865-892, 1989

- Johnson D.S., Aragon, C.R., McGeoch, L.A., y Schevon, C., "Optimization by simulated annealing: An experimental evaluation; Part II, Graph coloring and number partitioning", *Operations Research*, 39, pp: 378-406, 1991
- Jones D.F., Mirrazavi, S.K., y Tamiz, M., "Multi-objective meta-heuristics: An overview of the current state-of-the-art", *European Journal of Operational Research*, 137, pp: 1-9, 2002
- Jones, T., "Crossover, macromutation, and population-based search", Edit.:Morgan Kaufmann, San Mateo, 1995
- Jonsson B., "Electromyographic studies of job rotation", *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 14 , pp: 108-109, 1988
- Jorgensen M., Davis, K., Kotowski, S., Aedla, P., y Dunning, K., "Characteristics of job rotation in the Midwest US manufacturing sector", *Ergonomics*, 48, pp: 1721-1733, 2005
- Kamwendo K., Linton, S.J., y Moritz, U., "Neck and shoulder disorders in medical secretaries. Part I. Pain prevalence and risk factors", *Scandinavian Journal of Rehabilitation Medicine*, 23, pp: 127-133, 1991
- Karhu O., Kansi, P., y Kuorinka, L., "Correcting working postures in industry: A practical method for analysis", *Applied Ergonomics*, 8, pp: 199-201, 1977
- Katz J.N., Losina, E., Amick, B.C., Fossel, A.H., Bessette, L., y Keller, R.B., "Predictors of outcomes of carpal tunnel release", *Arthritis Rheum*, 44, pp: 1184-1193, 2001
- Kelsh M.A. y Sahl, J., "Sex differences in work-related injury rates among electric utility workers", *American Journal of Epidemiology*, 143, pp: 1050-1058, 1996
- Kemmlert K. y Kilbom, A., "Method for identification of musculoskeletal stress factors which may have injurious Effects", Paper presented at XIth World Congress on the Prevention of Occupational Accidents and Diseases, Stockholm., pp: 401-404, 1987
- Kilbom Å, "Repetitive work of the upper extremity: part II-the scientific basis (knowledge base) for the guide", *Industrial ergonomics*, 14, pp: 59-86, 1994
- Kilbom Å., Horst, D., Kemfert, K., y Richter, A., "Observation methods for reduction of load and strain on the human body-a review. 171(84):92", *Abetarskyddsstyrelsen Publikation Service*, 171, pp: 92-, 1986
- Kilbom Å y Persson, J., "Work technique and its consequences for musculoskeletal disorders", *Ergonomics*, 30, pp: 273-279, 1987
- Kirkpatrick S., Gelatt, C.D., y Vecchi, M.P., "Optimization by Simulated Annealing", *Science*, 220, pp: 671-680, 1983

- Kivi P. y Mattila, M., "Analysis and improvement of work postures in the building industry: application of the computerized OWAS method", *Applied Ergonomics*, 22, pp: 43-48, 1991
- Kogi K., Kawakami, T., Itani, T., y Batino, J.M., "Low-cost work improvements that can reduce the risk of musculoskeletal disorders", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 31, pp: 179-184, 2003
- Kortt M. y Baldry, J., "The association between musculoskeletal disorders and obesity", *Australian Health Review*, 25, pp: 207-214, 2002
- Kouvelis P., Chiang, W., y Fitzsimmons, J., "Simulated annealing for machine layout problems in the presence of zoning constraints", *European Journal of Operational Research*, 57, pp: 203-223, 1992
- Kristensen T.S., Hannerz, H., Høgh, A., y Borg, V., "The Copenhagen Psychosocial Questionnaire--a tool for the assessment and improvement of the psychosocial work environment", *Scandinavian Journal of Work, Environment and Health*, 31, pp: 405-408, 2005
- Kuijer P.P.F.M., van der Beek, A.J., van Dieen, J.H., Visser, B., y Frings-Dresen, M.H.W., "Effect of job rotation on need for recovery, musculoskeletal complaints, and sick leave due to musculoskeletal complaints: A prospective study among refuse collectors", *American Journal of Industrial Medicine*, 47, pp: 394-402, 2005
- Kuijer P.P.F.M., Visser, B., y Kemper, H.C.G., "Job rotation as a factor in reducing physical workload at a refuse collecting department", *Ergonomics*, 42, pp: 1167-1178, 1999
- Kuik R. y Salomon, M., "Multi-item lot-sizing problem: evaluation of a simulated annealing heuristic", *European Journal of Operational Research*, 45, pp: 25-37, 1990
- Kullpattaranirun T. y Nanthavanij, S., "A heuristic genetic algorithm for solving complex safety-based work assignment problems", *International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice*, 12, pp: 45-57, 2005
- Kurppa K., Viikari-Juntura, E., y Kuosma, E., "Incidence of tenosynovitis or peritendinitis and epicondylitis in a meatprocessing factory", *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health*, 17, pp: 32-37, 1991
- Landau K., Rademacher, H., Meschke, H., Winter, G., Schaub, K., Grasmueck, M., Moelbert, I., Sommer, M., y Schulze, J., "Musculoskeletal disorders in assembly jobs in the automotive industry with special reference to age management aspects", *International Journal of Industrial Ergonomics*, In Press, Corrected Proof, 2008
- Latko W.A., Armstrong, T.J., Franzblau, A., Ulin, S.S., Werner, R.A., y Albers, J.W., "Cross-sectional study of the relationship between repetitive work and the

- prevalence of upper limb musculoskeletal disorders", *American Journal of Preventive Medicine*, 36, pp: 248-259, 1999
- Leboeuf-Yde C., "Body weight and low back pain. A systematic literature review of 56 journal articles reporting on 65 epidemiologic studies", *The Spine Journal*, 25, pp: 226-237, 2000
- Leboeuf-Yde C. y Yassi, A., "Smoking and low back pain: is the association real?", *Journal of Manipulative and Physiological Therapeutics*, 18, pp: 457-463, 1995
- Lee Z.J. y Lee, C.Y., "A hybrid search algorithm with heuristics for resource allocation problem", *Information Sciences*, 173, pp: 155-167, 2005
- Lei, L., Dempsey, P.G., Xu, J., Ge, L., Liang, Y., "Risk factors for the prevalence of musculoskeletal disorders among Chinese foundry workers", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35, pp: 197-204, 05
- Leino P.I. y Hanninen, V., "Psychosocial factors at work in relation to back and limb disorders", *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health*, 21, pp: 134-142, 1995
- Letz R., Cherniack, M.G., Gerr, F., Hershman, D., y Pace, P., "A cross-sectional epidemiological survey of shipyard workers exposed to hand-arm vibration", *Journal of Industrial Medicine [BR]*, 49, pp: 53-62, 1992
- Li G. y Buckle, P., "The development of a practical method for the exposure assessment of risks to work-related musculoskeletal disorders", General report to the HSE (Contract No.R3408), Robens Centre for Health Ergonomics, European Institute of Health and Medical Sciences, University of Surrey, 1998
- Li G. y Buckle, P., "Current techniques for assessing physical exposure to work-related musculoskeletal risks, with emphasis on posture-based methods", *Ergonomics*, 42, pp: 674-695, 1999
- Liles D.H., "The Application of the Job Severity Index to Job Design for the Control of Manual Materials-Handling Injury", *Ergonomics*, 29, pp: 65-76, 1986
- Liles D.H., Deivanayagam, S., Ayoub, M.M., y Mahajan, P., "A Job Severity Index for the Evaluation and Control of Lifting Injury", *Human Factors*, 26, pp: 683-693, 1984
- Lindman R., Eriksson, A., y Thornell, L.E., "Fiber type composition of the human male trapezius muscle: enzyme-histochemical characteristics", *American Journal of Anatomy*, 189, pp: 244-, 1990
- Lindman R., Eriksson, A., y Thornell, L.E., "Fiber type composition of the human male trapezius muscle: enzyme-histochemical characteristics", *American Journal of Anatomy*, 190, pp: 244-, 1991

- Linton S., "Psychological risk factors for neck and back pain", In: A.L.Nachemson and E.Jonsson, Editors, Neck and Back Pain: The Scientific Evidence of Causes, Diagnosis, and Treatment, Lippincott Williams & Wilkins, Philadelphia., pp: 57-78, 2000
- Linton S.J. y Kamwendo, K., "Risk factors in the psychosocial work environment for neck and shoulder pain in secretaries", Occupational Medicine, 31, pp: 609-613, 1989
- Lis A.M., Black, K.M., Korn, H., y Nordin, M., "Association between sitting and occupational LBP", European Spine Journal, 16, pp: 283-298, 2007
- Liss G.M., Jesin, E., Kusiak, R.A., y White, P., "Musculoskeletal problems among Ontario dental hygienists", American Journal of Industrial Medicine, 28, pp: 521-540, 1995
- Llaneza-Alvarez, J., "La Ergonomía forense", Edit.: 2005
- Loiola E.M., Abreu, N. M. M, Boaventura-Netto, P. O., Hahn, P., y Querido, T., "An analytical survey for the quadratic assignment problem", documento electrónico disponible en: http://www.seas.upenn.edu/qaplib/QAP_Survey_04.pdf#search='boaventura%20netto, fecha de último acceso: Diciembre /2004
- Luime J.J., Kuiper, J.I., Koes, B.W., Verhaar, J.A., Miedema, H.S., y Burdorf, A., "Work-related risk factors for the incidence and recurrence of shoulder and neck complaints among nursing-home and elderly-care workers", Scandinavian Journal of Work and Environmental Health, 2004
- Lundy M. y Mees, A., "Convergence of an annealing algorithm", Mathematical Programming, 34, pp: 124-, 1986
- Luopajarvi T., Kuorinka, I., Virolainen, M., y Holmberg, M., "Prevalence of tenosynovitis and other injuries of the upper extremities in repetitive work", Scandinavian Journal of Work and Environmental Health, 5, pp: 48-55, 1979
- Luopajarvi T., Kuorinka, I., Virolainen, M., y Holmberg, M., "Prevalence of tenosynovitis and other injuries of the upper extremities in repetitive work", Scandinavian Journal of Work and Environmental Health, 5, pp: 48-55, 1979
- MacLeod D. y Kennedy, E., "Job Rotation System", documento electrónico disponible en: <http://www.lni.wa.gov/wisha/ergoideas/DocumentsFiles/idea719.pdf>, fecha de último acceso: Mayo /2008
- Maghsoudipour.M., Moghimi, S., Dehghaan, F., y Rahimpanah, A., "Association of Occupational and Non-occupational Risk Factors with the Prevalence of Work Related Carpal Tunnel Syndrome", Journal of Occupational Rehabilitation, 18, pp: 152-156, 2008

- Maniezzo V., Dorigo, M., y Colorni, A., "ALGODESK: An experimental comparison of eight evolutionary heuristics applied to the Quadratic Assignment Problem", *European Journal of Operational Research*, 81, pp: 188-204, 1995
- Marras W.S., Lavender, S.A., Leurgans, S.E., Fathallah, F.A., Ferguson, S.A., y Allread, W.G., "Biomechanical risk factors for occupationally-related low back disorders", *Ergonomics*, 38, pp: 377-410, 1995
- Martín-Daza F. y Pérez-Bilbao, J., "NTP 443: Factores psicosociales: metodología de evaluación", documento electrónico disponible en: http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_443.htm, fecha de último acceso: Abril /2008
- Massey E.W., "Carpal tunnel syndrome in pregnancy", *Obstet Gynecol Surv*, 33, pp: 145-147, 1978
- Mathiassen S.E., "Diversity and variation in biomechanical exposure: What is it, and why would we like to know?", *Applied Ergonomics*, 37, pp: 419-427, 2006
- Mattila, M. y Vilkki, P., "OWAS methods", Edit.:CRC Press, Boca Raton, 1999
- Mayr, E., "Toward a new philosophy of biology: observations of an evolutionist", Edit.:Belknap Press, Cambridge, 1988
- McAtamney L. y Corlett, E.N., "RULA: A survey method for the investigation of work-related upper limb disorders", *Applied Ergonomics*, 24, pp: 91-99, 1993
- McCormack R.R.Jr., Inman, R.D., Wells, A., Berntsen, C., y Imbus, H.R., "Prevalence of tendinitis and related disorders of the upper extremity in a manufacturing workforce", *Journal of Rheumatology*, 17, pp: 958-964, 1990
- McKenna K., McGrann, S., Blann, A., y Allen, J., "An investigation into the acute vascular effects of riveting", *Journal of industrial medicine*, 50, pp: 160-166, 1993
- McLean L., Tingley, M., Scott, R.N., y Richards, J., "Computer terminal work and the benefits of microbreaks", *Applied Ergonomics*, 32, pp: 225-237, 2001
- Menzel N.N., "Psychosocial Factors in Musculoskeletal Disorders", *Critical Care Nursing Clinics of North America*, 19, pp: 145-153, 2007
- Merriam W.P., Burwell, R.G., Mulholland, R.C., Pearson, J.C.G., y Webb, J.K., "A study revealing a tall pelvis in subjects with low back pain", *Journal of Bone and Joint Surgery [Br]*, 65B, pp: 153-156, 1980
- Metropolis N., Rosenblund, A.W., Rosenblund, M.N., Teller, A.H., y Teller, E., "Equation of State Calculations by Fast Computing Machines", *Journal of Chemical Physics*, 21, pp: 1087-1092, 1953
- Michalewicz, Z., "Genetic algorithms + data structures = evolution programs", Edit.:Springer-Verlag New York, Inc, New York, 1992

- Milerad E. y Ekenvall, L., "Symptoms of the neck and upper extremities in dentists", *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health*, 16, pp: 129-134, 1990
- Miller F.G., Dhaliwal, T.S., y Mogas, L.J., "Job rotation raises productivity", *Applied Ergonomics*, 5, pp: 48-48, 1974
- Ming Z., Närhi, M., y Siivola, J., "Neck and shoulder pain related to computer use", *Pathophysiology*, 11, pp: 51-56, 2004
- Ministerio de Trabajos y Asuntos Sociales., "REAL DECRETO 1299/2006", *BOE*, 302, 2006
- Mirtz T.M. y Greene, L., "Is obesity a risk factor for low back pain? An example of using the evidence to answer a clinical question", *Chiropractic and Osteopathy*, 13, pp: 2, 2005
- Misevicius A., "Genetic algorithm hybridized with ruin and recreate procedure: application to the quadratic assignment problem", *Knowledge-Based Systems*, 16, pp: 268, 2003
- Misevicius A., Rubliauskas, D., y Smolinskas, J., "Reconstruct and improve principle based algorithm for the quadratic assignment problem", *Information Technology and Control*, 23, pp: 7-17, 2002
- Mishra S.K. y Misra, V., "Muscle sarcopenia: an overview", *Acta.MyoI.*, 22, pp: 43-47, 2003
- Möller T., Mathiassent, S.E., Franzon, H., y Kihlberg, S., "Job enlargement and mechanical exposure variability in cyclic assembly work", *Ergonomics*, 47, pp: 19-40, 2004
- Moncada S., Llorens, C., y Kristensen, T.S., "Manual para la evaluación de riesgos psicosociales en el trabajo. Método ISTAS21 (CoPsoQ)", Instituto Sindical de Trabajo, Ambiente y Salud (ISTAS), 2002
- Moncada-Lluís S., Llorens-Serrano, C., Kristensen, T. S., y Vega-Martínez, S., "NTP 703: El método COPSOQ (ISTAS21, PSQCAT21) de evaluación de riesgos psicosociales", documento electrónico disponible en: http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_703.htm, fecha de último acceso: Abril /2009
- Mondelo, P.R., Gregori, E., y Barrau, P., "Ergonomía 1: Fundamentos", Edit.:Ediciones UPC, 2001
- Moore J.M. y Garg, A., "A comparison of different approaches for ergonomic job evaluation for predicting risk of upper extremity disorders", *Occupational Health and Safety*, 2, pp: -, 1994

- Moore J.S. y Garg, A., "The Strain Index: A proposed method to analyze jobs for risk of distal upper extremity disorders", *American Industrial Hygiene Association Journal*, 56, pp: 443-458, 1995
- Mork P.J. y Westgaard, R.H., "Long-term electromyographic activity in upper trapezius and low back muscles of women with moderate physical activity", *Journal of Applied Physiology*, 99, pp: 570-578, 2005
- Muhlenbein, H., "Evolution in time and space-the parallel genetic algorithm", *Foundations of Genetic Algorithms*, Edit: Rawlins, G.: Los altos, 1991
- Nanthavanij S. y Kullpattaranirun, T., "A genetic algorithm approach to determine minimax work assignments", *International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice*, 8, pp: 176-185, 2001
- Nanthavanij S. y Yenradee, P., "Predicting the optimum number, location, and signal sound level of auditory warning devices for manufacturing facilities", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 24, pp: 569-578, 1999
- National Institute for Occupational Safety and Health, "Work Practices Guide for Manual Lifting, NIOSH Technical Report No. 81-122," U.S.Department of Health and Human Services, National Institute for Occupational Safety and Health, Cincinnati, OH., 1981
- National Institute for Occupational Safety and Health, "Los Angeles Times, Health Hazard Evaluation", HETA 90-0013-2277 (Washington, DC: NIOSH), 1990a
- National Institute for Occupational Safety and Health, "Los Angeles Times, Health Hazard Evaluation", HETA 90-0273-2130 (Washington, DC: NIOSH), 1990b
- National Institute for Occupational Safety and Health, "FL Thorpe & CO. Inc., Health Hazard Evaluation", HETA 90-0273-2130 (Washington, DC: NIOSH), 1991
- National Institute for Occupational Safety and Health, "US West Communications, Health Hazard Evaluation", HETA 89-0299-2230 (Washington, DC: NIOSH), 1992
- National Institute for Occupational Safety and Health, "Kaiser Aluminum, Health Hazard Evaluation", HETA 95-0109-2520 (Washington, DC: NIOSH), 1995
- National Institute for Occupational Safety and Health, "Hanover Shoe Company, Health Hazard Evaluation", HETA 94-0245-2277 (Washington, DC: NIOSH), 1996a
- National Institute for Occupational Safety and Health, "National occupational research agenda. Cincinnati, OH: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Centers for Disease Control and prevention, National Institute for Occupational Safety and Health, ", DHHS(NIOSH) Publication No.96-115., 1996b

- Nembhard D.A. y Prichanont, K., "Cross training in serial production with process characteristics and operational factors", *IEEE Transactions on Engineering Management*, 54, pp: 565-575, 2007
- Niedhammer I., Landre, M.F., LeClerc, A., Bourgeois, F., Franchi, P., Chastang, J.F., Marignac, G., Quinton, D., Du Noyer, C.R., Schmaus, A., y Vallayer, C., "Shoulder disorders related to work organization and other occupational factors among supermarket cashiers", *International Journal of Occupational and Environmental Health*, 4, pp: 168-178, 1998
- Nilsson T., Burström, L., y Hagberg, M., "Risk assessment of vibration exposure and white fingers among platers. ", *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 61, pp: 473-481, 1989
- Nissen V., "Solving the quadratic assignment problem with clues from Nature", *IEEE Transactions on neural networks*, 5, pp: 66-72, 1994
- Nogareda-Cuixart S. y Dalmau, I., "NTP 452. Evaluación de las condiciones de trabajo: carga postural", Instituto nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo., 2006
- Occupational Safety and Health Administration (OSHA), "Printing Industry Ergonomics: Glossary", documento electrónico disponible en: <http://www.osha.gov/dcsp/products/etools/printing/glossary.html#J>, fecha de último acceso: Abril /2009
- Ohlsson K., Attewell, R., Paisson, B., Karlsson, B., Balogh, I., y Johnsson, B., "Repetitive industrial work and neck and upper limb disorders in females", *American Journal of Industrial Medicine*, 27, pp: 731-747, 1995
- Ohlsson K., Attewell, R., y Skerfving, S., "Self-reported symptoms in the neck and upper limbs of female assembly workers", *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health*, 15, pp: 75-80, 1989
- Ohlsson K., Hansson, G.A., Balogh, I., Strömberg, U., Palsson, B., Nordander, C., Rylander, L., y Skerfving, S., "Disorders of the neck and upper limbs in women in the fish processing industry", *Journal of occupational and environmental medicine*, 54, pp: 826-832, 1994
- OIT-OMS, "Factores Psicosociales en el Trabajo: Naturaleza, Incidencia y Prevención", Oficina Internacional del Trabajo.Ginebra., 1984
- Ólafsdóttir H. y Rafnsson, V., "Increase in musculoskeletal symptoms of upper limbs among women after introduction of the flow-line in fish-fillet plants", *Industrial ergonomics*, 21, pp: 69-77, 1998
- Oncins de Frutos M. y Ruiz-Escribano Taravilla M.T., "NTP 581: Gestión del cambio organizativo", documento electrónico disponible en: http://www.mtas.es/insht/ntp/ntp_581.htm, fecha de último acceso: Diciembre/2008

- Ortega J., "Job Rotation as a Learning Mechanism", *Management Science*, 47, pp: 1361-1370, 2001
- Osman I.H., "Metastrategy simulated annealing and tabu search algorithms for the vehicle routing problems", *Annals of operations research*, 41, pp: 421-451, 1993
- Osman I.H., "An introduction to Meta-Heuristics", *Operational Research, Tutorial Papers*, pp: 92-122, 1995
- Osorio A.M., Ames, R.G., Jones, J., Castorina, J., Rempel, D., y Estrin, W., "Carpal tunnel syndrome among grocery store workers", *American Journal of Industrial Medicine*, 25, pp: 229-245, 1994
- Osterman P., "How Common Is Workplace Transformation and Who Adopts It", *Industrial & Labor Relations Review*, 47, pp: 173-188, 1994
- Ouchi, W.G., "Theory Z: How American Business Can Meet the Japanese Challenge", Edit.: Addison-Wesley, 1981
- Oullet S., Vézina, N., Chartrand, J., Perrier, P.P., y Malo, J.L., "L'implantation de la rotation de postes: un exemple de démarche préalable", *PISTES*, 5, 2003
- Palmer K.T., Syddall, H., Cooper, C., y Coggon, D., "Smoking and musculoskeletal disorders: findings from a British national survey", *Annals of the Rheumatic Diseases*, 62, pp: 33-36, 2003
- Papadimitriou, C.H. y Steiglitz, K., "Combinatorial Optimization: Algorithms and Complexity", Edit.: Dover Publications Inc., New York, 1982
- Paul P., "Job rotation as a factor in reducing physical workload at a refuse collecting department", *Ergonomics*, 42, pp: 1167-1178, 1999
- Pérez A., "Una introducción a la computación evolutiva", documento electrónico disponible en: <ftp://ftp.de.uu.net/pub/research/softcomp/EC/EA/papers/intro-spanish.ps.gz>, fecha de último acceso: November /2004
- Pérez-Morral F., "NTP 175: Evaluación de las condiciones de trabajo: el método L.E.S.T", Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo (INSHT), documento electrónico disponible en: www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/101a200/ntp_175.pdf, fecha de último acceso: Diciembre /2008
- Perkiö-Mäkelä M. y Hentilä, H., "Physical work strain of dairy farming in loose housing barns", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 35, pp: 57-65, 2005
- Phalen G., "The carpal tunnel syndrome: clinical evaluation of 598 hands", *Clinical orthopaedics and related research*, 83, pp: 29-40, 1972

- Piedrahíta H., Punnett, L., y Shahnava, H., "Musculoskeletal symptoms in cold exposed and non-cold exposed workers", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 34, pp: 271-278, 2004
- Piligian G., Herbert, R., y Hearn, M., " Evaluation and management of chronic work-related musculoskeletal disorders of the distal upper extremity", *American Journal of Industrial Medicine*, 37, pp: 93-, 2000
- Piotet, F. y Mabile, J., "Conditions de Travail, mode d'emploi A.N.A.C.T", Edit.:A.N.A.C.T, Montrouge, 1984
- Podniece,Z.; Taylor,N.T.; Head of Working Environment Information Unit; European Agency for Safety and Health at Work "Work-related musculoskeletal disorders: prevention report", European Agency for Safety and Health at Work ,ISBN 978-92-9191-162-2, 2008
- Pope M.H., Wilder, D.G., y Magnusson, M.L., "A review of studies on seated whole body vibration and low back pain", *Proceedings of the I MECH E Part H Journal of Engineering in Medicine*, 213, pp: 435-446, 1999
- Punnett L. y Bergqvist, U., "Musculoskeletal disorders in visual display unit work: Gender and work demands", *Occupational medicine: State of the art reviews*, 14, pp: 113-124, 1999
- Punnett L., Fine, L.J., Keyserling, W.M., y Herrin, G.D., "Back disorders and nonneutral trunk postures of automobile assembly workers", *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health*, 17, pp: 337-346, 1991
- Punnett, L. y Herbert, R., "Work-related musculoskeletal disorders: Is there a gender differential, and if so, what does it mean?", *Women and Health*, Edit: Goldman, M. y Hatch, M., 2000
- Punnett L., Robins, J.M., Wegman, D.H., y Keyserling, W.M., "Soft-tissue disorders in the upper limbs of female assembly workers: impact of length of employment, work pace, and selection", *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health*, 11, pp: 417-425, 1985
- Putz-Anderson, V., "Cumulative Trauma Disorders: A Manual for Musculoskeletal Diseases of the Upper Limbs", Edit.:Taylor & Francis,Inc, London, 1988
- Quenouille M., "Approximation test of correlation in time series", *Journal of the Royal Statistical Society*, 11, pp: 18-84, 1949
- Radcliffe N.J., "Equivalence Class Analysis of Genetic Algorithms", *Complex Systems*, 5, pp: 183-205, 1991a
- Radcliffe, N.J., "Formal Analysis and Random Respectful Recombination", *Proceedings of the Fourth International Conference on Genetic Algorithms*. San Mateo, CA, Edit: Belew, R.K. y Booke, L.B., 1991b

- Rechenberg, I., "Evolutionsstrategie: Optimierung Technischer Systeme nach Prinzipien der Biologischen Evolution", Edit.: Frommann-Holzboog, Stuttgart, 1973
- Reeves C.R., "Genetic Algorithms and Combinatorial Optimization", Applications of Modern Heuristic Techniques, Edit.: Alfred Waller Ltd, 1994
- Regie Nationale Des Usines Renault (Boulogne-Billancourt) Conditions De Travail (Service), "Les profils de poste : methode d'analyse des conditions de travail. RNUR", Edit.:Masson - Collection , 1976
- Richard P., Marchand, D., y Vézina, N., "La rotation comme outil dans la readaptation des travailleurs: est-ce realisable?", Actes du Forum de la Chaire GM eb ergonomie de l'UQAM: La rotation est-ce une solution?, pp: 45-50, 2003
- Riihimäki H., Tola, S., Videman, T., y Hänninen, K., "Low-back pain and occupation: a cross-sectional questionnaire study of men in machine operating, dynamic physical work, and sedentary work", The Spine Journal, 14, pp: 204-209, 1989
- Rissen, D., "Repetitive and monotonous work among women", Tesis doctoral, Stockholm University, 2006
- Rissen D., Melin, B., Sandsjö, L., Dohns, I., y Lundberg, U., "Psychophysiological stress reactions, trapezius muscle activity, and neck and shoulder pain among female cashiers before and after introduction of job rotation", Work & Stress, 16, pp: 127-137, 2002
- Rodgers, S.H., "Ergonomic design for people at work", Edit.:Van Nostrand Reinhold,Eastman Kodak Co., New York, 1986a
- Rodgers, S.H., "Ergonomic design for people at work. Vol.II", Edit.:Van Nostrand Reinhold,Eastman Kodak Co., New York, 1986b
- Rodgers S.H., "A functional job analysis technique", Occupational medicine: State of the art reviews, 7, pp: 679-711, 1992
- Rodrick, D. y Karwowski, W., "Job Rotation", Interventions, controls, and applications in occupational ergonomics, Edit: Marras, W.S. y Karwowski, W., pp: 1-12, 2006
- Rojas-Picazo A. y Ledesma de Miguel, J., "NTP 629: Movimientos repetitivos: métodos de evaluación Método OCRA: actualización", documento electrónico disponible en: http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnicas/NTP/Ficheros/601a700/ntp_629.pdf, fecha de último acceso: Junio /2008
- Romero C., González, P, y Ventura, S., "Algoritmos Evolutivos (Red Española de Procedimientos Metaheurísticos HEUR)", documento electrónico disponible

en: <http://heur.uv.es/ventana/tutorial.php?idPagina=12&idioma=SPA>, fecha de último acceso: Noviembre /2004

- Roquelaure Y., Mechali, S., Dano, C., Fanello, S., Benetti, F., y Bureau, D., "Occupational and personal risk factors for carpal tunnel syndrome in industrial workers", *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health*, 23, pp: 364-369, 1997
- Rucker N. y Moore, J.S., "Predictive validity of the strain index in manufacturing facilities", *Applied Occupational and Environmental Hygiene*, 17, pp: 63-73, 2002
- Rudolph G., "Convergence analysis of canonical genetic algorithms", *IEEE Transactions on neural networks*, 5, pp: 96-101, 1994
- Rundcrantz B.L., Johnsson, B., y Moritz, U., "Occupational cervico-brachial disorders among dentists. Analysis of ergonomics and locomotor functions", *Swedish Dental Journal*, 15, pp: 115-, 1991
- Sakakibara H., Miyao, M., Kondo, T., y Yamada, S., "Overhead work and shoulder-neck pain in orchard farmers harvesting pears and apples", *Ergonomics*, 38, pp: 700-706, 1995
- Salas-Siado J.A., "Tendinitis y bursitis", *Revista de reumatología.*, 2008
- Salhi S., "Defining tabu list size and aspiration criterion within tabu search methods", *Computers & Operations Research*, 29, pp: 67-86, 2002
- Sánchez-Fajardo M.J., "Estudio y evaluación de los puestos de trabajo de máxima severidad ergonómica en la planta de montaje de Ford España S.A., para la implantación de mejoras y sistemas de rotación como medida preventiva", Proyecto final de carrera ETSID. Universidad Politécnica de Valencia, 2005
- Santamarina, M.C., "Métodos de optimización en la generación de distribuciones de plantas industriales mediante la aplicación de algoritmos genéticos y técnicas basadas en árboles de corte", Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Valencia, 1995
- Sauter S.L. y Swanson, N.G., "An ecological model of musculoskeletal disorders in office workers. In: *Beyond Biomechanics: Psychosocial Aspects of Musculoskeletal Disorders in Office Workers*", Moon, S.D., Sauter, S.L.(ed), Taylor & Francis Publishers, London, England, pp: 3-22, 1996
- Schaffer J.D. y Morishma A., "An adaptative crossover mechanism for genetic algorithms", *Proc.of the second international conference on genetic algorithms*, San Mateo, 1987
- Schell, T., "A comparison of selection methods in genetic algorithms based on a set of selection metrics", Tesis doctoral, Universit at Salzburg, Salzburg, 1998

- Schibye B., Skov, T., Ekner, D., y Christiansen, J., "Musculoskeletal symptoms among sewing machine operators", *Scandinavian Journal of Work and Environmental Health*, 21, pp: 427-434, 1995
- Schwefel, H.P., "Numerical optimization of computer models", Edit.:John Wiley & Sons., New York, 1981
- Scott G.B. y Lambe, N.R., "Working practices in a perchery system, using the OVAKO Working posture Analysing System (OWAS)", *Applied Ergonomics*, 27, pp: 281-284, 1996
- Seckiner S.U. y Kurt, M., "A simulated annealing approach to the solution of job rotation scheduling problems", *Applied Mathematics and Computation*, 188, pp: 31-45, 2007a
- Seçkiner S.U. y Kurt, M., "A simulated annealing approach to the solution of job rotation scheduling problems", *Applied Mathematics and Computation*, 188, pp: 31-45, 2007a
- Seckiner S.U. y Kurt, M., "Ant colony optimization for the job rotation scheduling problem", *Applied Mathematics and Computation*, In Press, Corrected Proof, 2007b
- Seçkiner S.U. y Kurt, M., "Ant colony optimization for the job rotation scheduling problem", *Applied Mathematics and Computation*, In Press, Corrected Proof, 2007b
- Shir R., Viikari-Juntura, E., Varonen, H., y Heliövaara, M., "Prevalence and Determinants of Lateral and Medial Epicondylitis: A Population Study", *American Journal of Epidemiology*, 2006
- Shiri R., Solovieva, S., Husgafvel-Pursiainen, K., Taimela, S., Saarikoski, L.A., Huupponen, R., Viikari, J., Raitakari, O.T., y Viikari-Juntura, E., "The Association between Obesity and the Prevalence of Low Back Pain in Young Adults", *American Journal of Epidemiology*, 167, pp: 1110-1119, 2008
- Silverstein B.A., Fine, L.J., y Armstrong, T.J., "Occupational factors and the carpal tunnel syndrome", *American Journal of Industrial Medicine*, 11, pp: 343-358, 1987
- Simon M., Tackenberg, P., Nienhaus, A., Estryng-Behar, M., Maurice Conway, P., y Hasselhorn, H.M., "Back or neck-pain-related disability of nursing staff in hospitals, nursing homes and home care in seven countries--results from the European NEXT-Study", *International Journal of Nursing Studies*, 45, pp: 24-34, 2008
- Smith D.R., Mihashi, M., Adachi, Y., Koga, H., y Ishitake, T., "A detailed analysis of musculoskeletal disorder risk factors among Japanese nurses", *Journal of Safety Research*, 37, pp: 195-200, 2006a

- Smith D.R., Wei, N., Zhang, Y.J., y Wang, R.S., "Musculoskeletal complaints and psychosocial risk factors among physicians in mainland China", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 36, pp: 599-603, 2006b
- Smith D.R., Wei, N., Zhao, L., y Wang, R.S., "Musculoskeletal complaints and psychosocial risk factors among Chinese hospital nurses", *Occupational Medicine*, 54, pp: 579-582, 2004
- Smith R.E., Goldberg, D.E., y Earickson, J.A., "SGA-C: A C-language Implementation of a Simple Genetic Algorithm", *The Clearinghouse for Genetic Algorithms*, TCGA Report No. 91002, 1991
- Snook S.H., "The effects of age and physique on continuous work capacity", *Human Factors*, 13, pp: 467-479, 1971
- Snook S.H., "The design of manual handling tasks", *Ergonomics*, 12, pp: 963-985, 1978b
- Snook S.H., "The design of manual handling tasks", *Ergonomics*, 21, pp: 963-985, 1978a
- Snook S.H., "Approaches to the control of back pain in industry: job design, job placement, and education/training", *The Spine Journal: State of the Art Reviews*, 2, pp: 59-, 1987
- Snook S.H. y Ciriello, V.M., "Maximum weights and workloads acceptable to female workers", *Journal of Occupational Medicine*, 16, pp: 527-534, 1974
- Snook S.H. y Ciriello, V.M., "The Design of Manual Handling Tasks - Revised Tables of Maximum Acceptable Weights and Forces", *Ergonomics*, 34, pp: 1197-1213, 1991
- Snook S.H. y Irvine, C.H., "Maximum acceptable weight of lif", *American Industrial Hygiene Association Journal*, 28, pp: 322-329, 1967
- Snook S.H., Irvine, C.H., y Bass, S.F., "Maximum weights and work loads acceptable to male industrial workers", *American Industrial Hygiene Association Journal*, 31, pp: 579-586, 1970
- Spears W.M., ""Simple Subpopulation Schemes"", *Proceedings of the 3rd Conference on Evolutionary Computation (River Edge, NJ: World Scientific)*, pp: 296-307, 1994
- Spears W.M., De Jong, K.A., Bäck, T., Fogel, D.B., y e Garis, H., "An Overview of Evolutionary Computation", *Proceedings of the European Conference on Machine Learning*. Viena, pp: 442-459, 1993
- Srinivas M. y Patnaik, L.M., "Genetic algorithms: a survey", *IEEE Computer*, 27, pp: 17-26, 1994a

- Srinivas M. y Patnaik, L.M., "Adaptative probabilities of crossover and mutation in genetic algorithms", IEEE Transactions on systems, man and cybernetics, 24, pp: 656-667, 1994b
- Srinivas M. y Patnaik, L.M., "Genetic algorithms: a survey", IEEE Computer, 27, pp: 17-26, 1994c
- St-Vincent M., Vézina, N., Dufour, B., St-Jacques, Y., y Cloutier, E., "La rotation des postes : ce qu'en pensent des travailleurs d'une usine d'assemblage automobile", Perspectives Interdisciplinaires sur le Travail et la Santé, 5, 2003
- Stetson D.S., Albers, J.A., Silverstein, B.A., y Wolfe, R.A., "Effects of age, sex, and anthropometric factors on nerve conduction measures", Muscle Nerve, 15, pp: 1095-1104, 1992
- Stevens J.C., Sun, S., Beard, C.M., O'Fallon, W.M., y Kurland, L.T., "Carpal tunnel syndrome in Rochester, Minnesota, 1961-1980", Neurology, 38, pp: 134-138, 1988
- Stevenson J.M., Greenhorn, D.R., Bryant, J.T., Deakin, J.M., y Smith, J.T., "Selection test fairness and the incremental lifting machine", Applied Ergonomics, 27, pp: 45-52, 1991
- Stoffman L. y Sykes, M., "Job rotation and compliance with the B.C. ergonomic regulatory requirements", Symposium "Multiskilling and job rotation: Ergonomic approaches".Comptesrendus du 31e congrès de l'Association canadienne dérgonomie., 1999
- Syswerda G., "Uniform crossover in genetic algorithms", Proc.of the third international conference on genetic algorithms, San Mateo, 1989
- Syswerda, G., "A study of reproduction in generational and steady-state genetic algorithms", Edit.:Morgan Kauffmann Publishers, 1991
- Tabu Search Applications, "Tabu search applications", documento electrónico disponible en: http://www.tabusearch.net/tabu_search/applications.asp, fecha de último acceso: Agosto /2004
- Taillard E., Gambardella, L.M., Gendreau, M., y Potvin, J.Y., "Adaptive memory programming: A unified view of metaheuristics", European Journal of Operational Research, 135, pp: 1-16, 2001
- Tam K.Y. y Chan, S.K., "Solving facility layout problems with geometric constraints using parallel genetic algorithms: experimentation and findings", International Journal of Production Research, 36, pp: 3253-3272, 1998
- Tanaka S., Wild, D.K., Cameron, L.L., y Freund, E., "Association of occupational and non-occupational risk factors with the prevalence of self-reported carpal tunnel syndrome in a national survey of the working population", American Journal of Industrial Medicine, 32, pp: 550-556, 1997

- Tanaka S., Wild, D.K., Seligman, P.J., Halperin, W.E., Behrens, V.J., y Putz-Anderson, V., "Prevalence and work-relatedness of self-reported carpal tunnel syndrome among U.S. workers: analysis of the Occupational Health Supplement data of 1988 National Health Interview Survey", *American Journal of Industrial Medicine*, 27, pp: 451-470, 1995
- Tharmmaphornphila W., Green, B., Carnahan, B.J., y Norman, B.A., "Applying mathematical modeling to create job rotation schedules for minimizing occupational noise exposure", *Aiha Journal*, 64, pp: 401-405, 2003
- Tharmmaphornphilas W. y Norman , B., "A quantitative method for determining proper job rotation intervals", *Annals of operations research*, 128, pp: 251-266, 2004
- Tharmmaphornphilas W. y Norman, B.A., "A methodology to create robust job rotation schedules", *Annals of operations research*, 155, pp: 339-360, 2007
- Thomas N., hessier-Cotte, C., y Christol, J., "Polyvalence et contrainte mentale", *XXIII journées nationales de médecine du travail*, France, pp: 314-316, 1994
- Tiemessen I., Hulshof, C., y Frings-Dresen, M., "Low back pain in drivers exposed to whole body vibration: Analysis of a dose-response pattern", *Occupational and Environmental Medicine*, In press, 2008
- Tortosa L., García-Molina, C., Page, A., Ferreras, A., Castelló, P., y Piedrabuena, A., "Trabajo y envejecimiento. Mejora de las condiciones ergonómicas de la actividad laboral para la promoción de un envejecimiento saludable", *Revista del Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el trabajo (España)*, 30, pp: 29-36, 2004
- Treaster D.E. y Burr, D., "Gender differences in prevalence of upper extremity musculoskeletal disorders", *Ergonomics*, 47, pp: 495-526, 2004
- Triggs D.D. y King, P.M., "Job rotation: an administrative strategy for hazard control", *Professional Safety*, 45, pp: 32-34, 2000
- Trinkoff A.M., Lipscomb, J.A., Geiger-Brown, J., Storr, C.L., y Brady, B.A., "Perceived physical demands and reported musculoskeletal problems in registered nurses", *American Journal of Preventive Medicine*, 24, pp: 270-275, 2003
- Tsuritani I., Honda, R., Noborisaka, Y., Ishida, M., Ishizaki, M., y Yamada, Y., "Impact of obesity on musculoskeletal pain and difficulty of daily movements in Japanese middle-aged women", *Maturitas*, 20, pp: 23-30, 2002
- Unità di ricerca Ergonomia della Postura e del Movimento (EPM), "The OCRA Checklist for a quick evaluation of the exposure of the upper limbs to repetitive movements", documento electrónico disponible en: http://www.epmresearch.org/html/ocra/D-how_to_apply_the_OCRA_checklist/OCRA_checklist-methods_criteria.html, fecha de último acceso: Enero /2008

- Van Veldhoven M. y Meijman, T.F., "The measurement of psychosocial job demands with a questionnaire (VBBA) [Dutch]", Amsterdam: NIA Dutch institute for working conditions., pp: 59-, 1994
- Van Velzer y C.T., "Economic ergonomic interventions: The benefits of job rotation", Proceedings of the 25th Annual Conference of the Human Factors Association of Canada, pp: 207-212, October 25-28, Ontario, 1992
- Vanhoven E. y Buyens, D., "Continuing Vocational Training in Belgium : an overview", ECER Conference, 4-8/09, Lille, France, 2001
- Vasseljen O.J., Westgaard, R.H., y Larsen, S., "A case-control study psychological and psychosocial risk factors for shoulder and neck pain at the workplace", International Archives of Occupational and Environmental Health, 66, pp: 375-382, 1995
- Vega-Martínez S., "NTP 657: Los trastornos músculo-esqueléticos de las mujeres (I): exposición y efectos diferenciales", 2006, documento electrónico disponible en:http://www.insht.es/InshtWeb/Contenidos/Documentacion/FichasTecnica/s/NTP/Ficheros/601a700/ntp_657.pdf, fecha de último acceso: Mayo /2008
- Veiersted K.B., Westgaard, R.H., y Andersen, P., "Pattern of muscle activity during stereotyped work and its relation to muscle pain", Int.Arch.Occup.Environ.Health, 62, pp: 31-41, 1990
- Veiersted K.B., Westgaard, R.H., y Andersen, P., "Electromyographic evaluation of muscular work pattern as a predictor of trapezius myalgia", Scandinavian Journal of Work and Environmental Health, 19, pp: 284-290, 1993
- Veiersted K.G. y Westgaard, R.H., "Subjectively assessed occupational and individual parameters as risk factors for trapezius myalgia", Industrial ergonomics, 13, pp: 235-245, 1994
- Velle W., "Sex differences in sensory function", Perspectives in Biology and Medicine., 30, pp: 490-522, 1987
- Vézina N., "Rotation implantation: what is at stake? What are the markers", Workshop Principles and Practices of Job Rotation (CRE-MSD, Centre of Research Expertise for the Prevention of Musculoskeletal Disorders), pp: 1-22, 2004
- Vézina N., "Implantation de la rotation: quels sont les enjeux? Quelles sont les balises", PISTES, 5, 2003
- Vézina N., Courville, J., y Geoffrion, L., "Problème musculo-squelettiques et caractéristiques des postes des travailleurs et des postes des travailleuses sur une même chaîne de découpe de dinde", Invisible : Women's Occupational Health and Safety. Charlottetown, Gynergy Press, pp: 29-61, 1995

- Videman T., Nurminen, M., y Troup, J.D.G., "Lumbar spine pathology in cadaveric material in relation to history of back pain, occupation, and physical loading", *The Spine Journal*, 15, pp: 728-740, 1990
- Vieira E.R., Kumar, S., y Narayan, Y., "Smoking, no-exercise, overweight and low back disorder in welders and nurses", *International Journal of Industrial Ergonomics*, 38, pp: 143-149, 2008
- Viikari-Juntura E., "The role of physical stressors in the development of hand/wrist, and elbow disorders. In: Gordon SL, Blair SJ, Armstrong, et al., eds. *Pathophysiology and clinical factors in upper extremity repetitive motion syndromes*", Bethesda, MD: AmericanAcademy of Orthopedic Surgeons., 1995
- Visser, B., "Upper extremity in low-intensity tasks", Tesis doctoral, Vrije Universiteit Amsterdam, 2004
- Voitk T., Habib, A., y Hernandez, A., "Carpal tunnel syndrome in pregnancy", *Canadian Medical Association Journal*, 128, pp: 277-281, 1983
- Waersted M., Bjorklund, R.A., y Westgaard, R.H., "Shoulder muscle tension induced by two VDU-based tasks of different complexity", *Ergonomics*, 34, pp: 137-150, 1991
- Wai E.K., Rodriguez, S., Dagenais, S., y Hall, H., "Evidence-informed management of chronic low back pain with physical activity, smoking cessation, and weight loss", *The Spine Journal*, 8, pp: 195-202, 2008
- Walker-Bone K.E., Palmer, K.T., Reading, I., y Cooper, C., "Soft-tissue rheumatic disorders of the neck and upper limb: prevalence and risk factors", *Seminars in Arthritis and Rheumatism*, 33, pp: 185-203, 2003
- Wang M.J., Hu, M.H., y Ku, M.Y., "A solution to the unequal area facilities layout problem by genetic algorithm", *Computers in Industry*, 56, pp: 207-220, 2005a
- Wang P.C., Ritz, B., Rempel, D., Harrison, R., Chan, J., y Janowitz, I., "Work organization and work-related musculoskeletal disorders for sewing machine operators in garment industry", *Annals of Epidemiology*, 15, pp: 655-655, 2005b
- Waters T.R., Putz-Anderson, V., Garg, A., y Fine, L.J., "Revised NIOSH equation for the design and evaluation of manual lifting tasks", *Ergonomics*, 7, pp: 749-776, 1993
- Waters T.R., Putz-Anderson, V., y Garg, V.Y., "Applications manual for the revised Niosh lifting equation", National Institute for Occupational Safety and Health. Cincinnati. Ohio, 1994

- Webb R., Brammah, T., Lunt, M., Urwin, M., Allison, T., y Symmons, D., "Prevalence and predictors of intense, chronic, and disabling neck and back pain in the UK general population", *The Spine Journal*, 28, pp: 1195-1202, 2003
- Welch L.S., Hunting, K.L., y Kellogg, J., "Work-related musculoskeletal symptoms among sheet metal workers", *American Journal of Industrial Medicine*, 27, pp: 783-791, 1995
- Wells J.A., Zipp, J.F., Schuette, P.T., y McEleney, J., "Musculoskeletal disorders among letter carriers", *Occupational Medicine*, 25, pp: 814-820, 1983
- Wells R., "Job Rotation. Is it a Solution?", *WorkShop Principles and Practices of Job Rotation (CRE-MSD)*, , 2004a
- Wells R., "Job Rotation. Is it a Solution? Introductory Remarks", *WorkShop Principles and Practices of Job Rotation (CRE-MSD, Centre of Research Expertise for the Prevention of Muculoskeletal Disorders)*, 2004b
- Werner R.A., Albers, J.W., Franzblum, A., y Armstrong, T.J., "The relationship between body mass index and the diagnosis of carpal tunnel syndrome", *Muscle Nerve*, 17, pp: 632-636, 1994
- Westgaard R.H., "Generation of muscle tension additional to posture muscle load", *Ergonomics*, 30, pp: 911-923, 1987
- Whitley D. y Kauth, J., "Genitor: a different genetic algorithm", *Proc. Rocky Mountain conf. artificial intelligence*, pp: 118-130, 1988
- Whitley D., "GENITOR: a different genetic algorithm", *Proceedings of the Rocky Mountain conference on artificial intelligence*, Denver, 1988
- Whitley D. y Starkweather, D., "GENITOR-II: a distributed genetic algorithm", *Journal of Experimental and Theoretical Artificial Intelligence*, 2, pp: 189-214, 1990
- Winkel J. y Westgaard, R.H., "Occupational and individual risk factors for shoulder/neck complains: Part II - The scientific basis (literature review) for the guide", *Industrial ergonomics*, 10, pp: 85-104, 1992
- Winkel J. y Westgaard, R.H., "Editorial: A model for solving work related musculoskeletal problems in a profitable way", *Applied Ergonomics*, 27, pp: 71-77, 1996
- Winn F.J. y Habes, D.J., "Carpal tunnel area as a risk factor for carpal tunnel syndrome", *Muscle Nerve*, 13, pp: 254-258, 1990
- Wiseman C. y Badger, D., "Hazard evaluation and technical assistance report: Eastman Kodak, Windsor, Colorado", Cincinnati, OH: U.S. Department of Health, Education, and Welfare, Public Health Service, Center for Disease Control, National Institute for Occupational Safety and Health, DHEW(NIOSH) Report No. TA 76-0131., 1976

- Woolf A.D., Breedveld, F., y Kvien, T.K., "Controlling the obesity epidemic is important for maintaining musculoskeletal health", *Annals of the Rheumatic Diseases*, 65, pp: 1401-1402, 2006
- Xiao G.B., Dempsey, P.G., Lei, L., Ma, Z.H., y Liang, Y.X., "Study on musculoskeletal disorders in a machinery manufacturing plant", *Occupational and Environmental Medicine*, 46, pp: 341-346, 2004
- Xu X., Mirka, G.A., y Hsiang, S.M., "The effects of obesity on lifting performance", *Applied Ergonomics*, 39, pp: 93-98, 2008
- Yaoyuenyong S. y Nanthavanij, S., "Hybrid procedure to determine optimal workforce without noise hazard exposure", *Computers & Industrial Engineering*, 51, pp: 743-764, 2006
- Ylipaa V., Arnetz, B.B., Benko, S.S., y Ryden, H., "Physical and psychosocial work environments among Swedish hygienists: risk indicators for musculoskeletal complaints", *Swedish Dental Journal*, 21, pp: 3-111, 1997
- Youssef H., Sait, M., y Adiche, H., "Evolutionary algorithms, simulated annealing and tabu search: a comparative study", *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 14, pp: 167-181, 2001
- Yu I.T.S. y Wong, T.W., "Musculoskeletal problems among VDU workers in a Hong Kong bank", *Occupational Medicine*, 46, pp: 275-280, 1996
- Zanakis S.H. y Evans, J.R., "Heuristic optimization: why, when and how to use it", *Interfaces*, 5, 1981
- Zurada J., Karwowski, W., y Marras, W.S., "A neural network-based system for classification of industrial jobs with respect to risk of low back disorders due to workplace design", *Applied Ergonomics*, 28, pp: 49-58, 1997
- Zwart C.H., Frings-Dresen, M.H.V., y Kilbom, A., "Gender differences in upper extremity musculoskeletal complaints in the working population", *International Archives of Occupational and Environmental Health*, 74, pp: 21-30, 2000

En Valencia, a 30 de Abril de 2009.