



UNIVERSIDAD  
POLITECNICA  
DE VALENCIA

$\pi$  Departamento  
Proyectos de  
Ingeniería

**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA.  
DEPARTAMENTO DE PROYECTOS DE INGENIERÍA.  
PROYECTOS DE INGENIERÍA E INNOVACIÓN.**

**MODELO DE OPTIMIZACIÓN EN LA GENERACIÓN DE PLANTAS  
INDUSTRIALES, CONSIDERANDO LAS ACTIVIDADES DE  
MANTENIMIENTO Y LAS CONDICIONES AMBIENTALES MEDIANTE EL  
USO DE LA METODOLOGÍA DE LOS ALGORITMOS GENÉTICOS.  
(Tesis Doctoral)**

**Doctorando: D. Román Augusto Contreras Pérez.  
Tutores: Dr. Vicente Agustín Cloquell Ballester.  
Dra. María Cristina Santamarina Siurana.**

**Valencia, Febrero de 2010.**

## Resumen

El entorno competitivo donde se desenvuelven actualmente las organizaciones empresariales, obliga a plantearse esquemas de operación bajo requerimientos de alta calidad y mínimos costes de producción. En los costes de producción, influyen, considerablemente, la distribución de las diferentes actividades en planta y el mantenimiento de los equipos que la conforman. Para la distribución de las actividades, es imperioso diseñar la ordenación, que favorezca el recorrido óptimo de los materiales de producción, para minimizar los gastos asociados al desplazamiento y a otros criterios de implantación. En relación al mantenimiento, es indispensable habilitar aquellas acciones que permitan conservar, plenamente operativos, los equipos del proceso y que a su vez impliquen costes mínimos. Hasta el presente, no se ha propuesto una metodología que contemple ambas consideraciones en el diseño de plantas. En este trabajo, se propone un primer modelo, cuya finalidad es minimizar tanto los costes relacionados por el posicionamiento de las actividades, como los esperados por la aplicación del mantenimiento a los equipos, y la influencia que tiene la distribución en éstos. Como metodología de búsqueda y validación se emplea un algoritmo genético.

Palabras claves: distribución en planta, mantenimiento, optimización combinatorial, algoritmo genético.

## Resum

Degut a l'entorn competitiu on es desenvolupen actualment les organitzacions empresarials, obliga a aquestes a plantejar-se esquemes d'operació sota requeriments d'alta qualitat i mínims costos de producció. Dintre dels costos de producció, influeixen, considerablement, la distribució de les diferents activitats i el manteniment dels equips presents en éstes. Per tant, per a la distribució de les activitats, és necessari dissenyar l'ordenació, que favoreixca la trajectòria òptima dels materials de producció, per a minimitzar les despeses associades al desplaçament i a altres criteris d'implantació. En relació al manteniment, és indispensable habilitar aquelles accions que permeten conservar, plenament operatius, els equips del procés i que a la vegada impliquen costos mínims. Fins el present, no s'ha proposat una metodologia que contemple les consideracions anteriors en el disseny d'una planta. Es per això, que en aquest treball es proposa un primer model, amb una finalitat de minimitzar tant els costos relacionats per al posicionament de les activitats, com els esperats per a l'aplicació del manteniment als equips, i la influència que té la distribució en aquestes. Com a metodologia de búsqueda i validació s'empra un algoritmo genètic.

Paraules claus: distribució en planta, manteniment, optimització combinatorial, algoritme genètic.

## **Abstract**

The competitive environment where business organizations presently develop obligates them to operate under high quality requirements and minimum production costs. Production costs are influenced considerably by the distribution of different plant activities and their equipment maintenance costs. In the design of distribution of activities, consideration of ordering to favor the optimum route for production material and minimizing cost associated with displacement is imperative. This distribution should also pay attention to other introduction criteria. In reference to maintenance, implementing actions that permit the conservation of completely operative equipment, through procedures that minimize process interruptions and their associated costs is crucial. Up to now, methodologies have not been proposed that contemplate together both considerations in plant design. In this work, a first model is proposed, whose goal is to minimize costs related to the positioning of activities and their distribution, as well as those expected in the application of equipment maintenance. A genetic algorithm was used as a search and validation methodology.

**Key Words:** distribution in plants, maintenance, combinatorial optimization, genetic algorithm.

## INDICE

### **Introducción.**

1.- Introducción.....	3
1.1.- Justificación, antecedentes y objetivos del trabajo de investigación. ....	4
1.1.1.- Antecedentes .....	4
1.1.2.- Objetivo del trabajo .....	5
1.2 .- Organización del trabajo .....	5

### **Optimización del Mantenimiento.**

2.- Optimización del mantenimiento.....	11
2.1.- Mantenimiento .....	12
2.1.1.- Objetivos del mantenimiento .....	13
2.1.2.- Tipos de mantenimiento. ....	14
2.1.2.1.- Mantenimiento correctivo .....	14
2.1.2.2.- Mantenimiento preventivo. ....	15
2.1.2.2.1.- Mantenimiento preventivo por tiempo.....	16
2.1.2.2.2.-Mantenimiento preventivo por condición .....	19
2.1.2.3.- Mantenimiento predictivo .....	19
2.1.2.3.1.- Etapas o fases del mantenimiento predictivo.....	20
2.1.2.3.2.- Categorías del mantenimiento predictivo .....	21
2.1.2.3.3.- Técnicas de monitorización para el diagnóstico .....	21
2.1.2.3.4.- Ventajas del mantenimiento predictivo.....	23
2.1.2.3.5.- Desventajas del mantenimiento predictivo .....	24
2.1.2.4.- Mantenimiento modificativo .....	24
2.1.3.- Definición y clasificación de fallos .....	24
2.1.3.1.- Fallos en la vida de un componente.....	26
2.1.3.2.- Curvas de distribución de fallos. ....	27
2.1.3.2.1.- Distribuciones discretas.....	28
2.1.2.3.2.- Distribuciones continuas .....	29
2.1.4.- Gestión del mantenimiento .....	31
2.1.4.1.- Políticas de mantenimiento .....	31

2.1.4.2.-Indicadores del mantenimiento. ....	32
2.1.4.3.- Indicadores para la gestión y optimización del mantenimiento .....	35
2.1.4.3.1.- Tiempo promedio entre fallos (MTBF).....	35
2.1.4.3.2.- Tiempo promedio para reparar (MTTR) .....	36
2.1.4.3.3.- Tiempo promedio para fallar .....	37
2.1.4.3.4.- Fiabilidad .....	37
2.1.4.3.5.- Confiabilidad .....	39
2.1.4.3.6.- Factor servicio.....	39
2.1.5.- Los costes .....	39
2.1.5.1.- Tipos de costes .....	39
2.1.5.1.1.- Costes relacionados con la organización o empresa .....	39
2.1.5.1.2.- Costes relacionados con el mantenimiento.....	40
2.1.5.1.3.- Coste total del mantenimiento .....	41
2.1.6.- Planificación del mantenimiento.....	42
2.1.6.1.- Información necesaria para elaborar un plan .....	43
2.1.6.2.- Selección de un plan de mantenimiento.....	43
2.2.- Modelos y metodología de optimización .....	44
2.2.1.- Optimización a nivel de componente. ....	46
2.2.1.1.- Modelos de regresión.....	49
2.2.1.1.1.- Modelo de regresión de vida acelerada .....	50
2.2.1.1.2.- Modelo de regresión de azar proporcional .....	51
2.2.1.2.- Influencia de las acciones de mantenimiento y condiciones de servicio en la edad del componente .....	51
2.2.1.2.1.- Modelo PAS.....	52
2.2.1.2.2.- Modelo PAR .....	53
2.2.1.2.3.- Modelo de Weibull dependiente de la edad.....	54
2.2.1.3.- Modelo de indisponibilidad considerando la incorporación de los parámetros asociados al mantenimiento y condiciones de servicio. ....	54
2.2.2.- Optimización a nivel de sistema a partir de sus componentes .....	56
2.2.2.1.- Enfoques para la aplicación de la optimización a nivel de componente y/o sistema .....	56
2.2.2.2.- Modelos de costes.....	57
2.2.2.2.1.- Modelos de costes para la optimización en componentes y sistemas .....	57
2.2.2.3.- Procedimiento para implementar la optimización a nivel de sistemas a partir de sus componentes. ....	61
2.2.2.3.1.- Mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM).....	61

2.2.2.4.- Modelo de optimización de Lapa et al.....	66
2.2.2.5.- Modelo de optimización de Marseguerra et at.....	67
2.2.2.6.- Modelo de optimización para el diseño de sistemas PC de Paiton y Campell .....	68
2.2.2.7.-Modelo de optimización de Ta-Cheng Chen y peng_Sheng.....	69
2.2.2.8.- Modelo de Optimización de Fiori de Castro y Lucchesi .....	70
2.2.3.- Optimización del manteneimto a nivel de planta.....	70

### **Distribución en Planta, Optimización de la Implantación.**

3.- Distribución en Planta, optimización de la implantación. ....	81
3.1.- Distribución en planta .....	82
3.1.1.- Objetivos de la distribución en planta .....	84
3.1.2.- Los tipos de distribución en planta.....	89
3.1.2.1.- Dsistribución según el tipo de industria .....	89
3.1.2.2.- Distribución según la organización de la producción. ....	91
3.1.3.- Naturaleza de la distribución en planta .....	97
3.1.4.- Factores que influyen en el diseño de una distribución en planta .....	99
3.1.4.1.- Factor material.....	99
3.1.4.2.- Factor maquinaria.....	100
3.1.4.3.- Factor hombre.....	101
3.1.4.4.- Factor movimiento.....	101
3.1.4.5.- Factor espera.....	103
3.1.4.6.- Factor servicio. ....	104
3.1.4.7.- Factor edificio.....	104
3.1.4.8.- Factor cambio. ....	105
3.2.- Diseño de una distribución en planta .....	105
3.2.1.-Metodologías para el diseño de ladistribución en planta.....	106
3.2.1.1.- Procedimiento del S.L.P.....	108
3.2.2.- Clasificación general de los métodos para generar la distribución a partir del SLP .....	116
3.3.- Formulación de la función objetivo .....	120
3.3.1.- Formulación cuantitativa .....	121
3.3.2.- Formulación cualitativa. ....	122
3.3.3.- Formulación multicriterio.....	123

3.3.3.1.- Técnicas de agregación.....	127
3.3.3.2.- Técnicas de Ponderación .....	128
3.3.3.2.1- Procedimiento de ponderación y análisis de sensibilidad .....	128
3.3.3.3.- Normalización.....	130
3.3.3.4.- Algoritmo interactivo para el problema de distribución en planta .....	132
3.4.- Las Distancias .....	133
3.5.- La resolución del problema de optimización.....	136
3.5.1.- Clasificación de los métodos, como modelos de espacios, para la asignación de las actividades y resolución de la implantación .....	136
3.5.1.1.- Modelo discreto.....	137
3.5.1.2.- Modelo analítico .....	139
3.5.1.3.- Modelos continuos.....	140
3.5.1.3.1.- Método basado en técnicas de cortes .....	141
3.5.1.3.2.- Modelo Multibay.....	145
3.5.1.4.- Métodos generales de construcción y mejora .....	146
3.5.1.5.- Modelos multi-floor.....	153
3.5.1.6.- Modelos de manufactura flexible (células de fabricación) y dinámicos ..	156
3.5.1.7.- Modelos 3D.....	159
3.5.1.8.- Modelo basado en la teoría de grafos (modelo topológico).....	160
3.6.- Distribución en planta y algoritmos genéticos .....	163
3.6.1.- Propuesta de Tam.....	163
3.6.2.- Propuesta multicriterio y macroevolutiva de Santamarina.....	165
3.6.3.- Propuesta de Suresh et al. ....	167
3.6.4.- Propuesta y estudio de Tate y Smith .....	168
3.6.5.- Propuesta de Gupta et al .....	169
3.6.6.- Estudio de Mavriduo y Pardalos .....	169
3.6.7.- Propuesta de Benson y Foote.....	170
3.6.8.- Propuesta de Tam y Chan.....	171
3.6.9.- Propuesta de Al-Hakim .....	173
3.6.10.- Propuesta de Islier .....	173
3.6.11.- Segunda propuesta de Al-Hakim.....	175
3.6.12.- Propuesta de Cheng y Gen.....	176
3.6.13.- Propuesta MULTIHOPE de Kochhar y Heragu .....	176
3.6.14.- Propuesta de Rajasekharan et al .....	178
3.6.15.- Propuesta de Castell et al. ....	182

3.6.16.- Propuesta interactiva de Rao et al. ....	183
3.6.17.- Propuesta de Gau y Meller para árboles de cortes y MIP.....	185
3.6.18.- Propuesta de Matsuzaki et al.....	186
3.6.19.- Propuesta de Kochhar y Heragu (DFLP).....	187
3.6.20.- Propuesta de Hamamoto et al.....	189
3.6.21.- Propuesta y estudio de Lim et al .....	190
3.6.22.- Propuesta de Azadivar y Wang .....	190
3.6.23.- Propuesta de Wu y Appleton. ....	192
3.6.24.- Propuesta de Hicks. ....	194
3.6.25.- Propuesta de Gómez et al.....	194
3.6.26.- Propuesta de Balakrishanan et al .....	196
3.6.27.- Propuesta de Kyu Yeul Lee et al. ....	198
3.6.28.- Propuesta de Kyu Yeul Lee et al. (Multí-Floor) .....	199
3.6.29.- Propuesta de Ming-Jaan Wang et al .....	200
3.6.30.- Propuesta de Diego-Más.....	200
3.6.31.- Propuesta de Hauser y Chung .....	202
3.6.32.- Propuesta de Sirinaovakul y limudomsuk .....	202
3.6.33.- Propuesta de Chan et al .....	205
3.6.34.- Propuesta coevolutiva de Dunker et al .....	206

## **Algoritmo Genético como Metodología de Optimización.**

4.- Algoritmo genético como metodología de optimización.....	209
4.1.- Codificación .....	211
4.1.1.- Ejemplos de codificación.....	213
4.1.1.1.- Codificación desarrollada por Tam .....	213
4.1.1.2.- Codificación propuesta por Muñoz. ....	213
4.1.1.3.- Codificación desarrollada por Santamarina. ....	214
4.1.1.4.- Codificación desarrollada por Suresh et al.....	216
4.1.1.5.- Codificación desarrollada por Islier.....	217
4.1.1.6.- Codificación propuesta por Sánchez.....	217
4.1.1.7.- Codificación propuesta por Lazo y Pacheco .....	218
4.1.1.8.- Codificación desarrollada por Balakrishnan et al.....	219
4.1.1.9.- Codificación desarrollada por Paiton y Campell.....	219

4.1.1.10.- Codificación empleada por Kyu-Yeul Lee et al.....	220
4.1.1.11- Codificación empleada por Ming-Jaan Wang et al.....	222
4.1.1.12- Codificación de Lapa et al.....	223
4.1.1.13.- Codificación de Diego-Más .....	223
4.1.1.14- Codificación de Sirinaovakul y Limudomsuk.....	224
4.1.1.15- Codificación de Chan et al. ....	226
4.2.- Función objetivo (evaluación).....	227
4.3.- Población inicial.....	227
4.4.- Operador selección.....	228
4.5.- Operador cruce.....	230
4.6.- Operador mutación.....	232
4.7.- Operador inversión.....	233
4.8.- Operador clonación. ....	233
4.9.- Penalización y reparación.....	235
4.10.- Escalado .....	236
4.11.- Aplicación de los operadores genéticos .....	237
4.12.- Condición de terminación.....	238
4.12.1.- Criterios de convergencia. ....	239
4.13.- Esquema .....	239
4.13.1.- Paralelismo implícito.....	240
4.13.1.1.- Algoritmo genéticos, métodos paralelos .....	241
4.13.2.- Teorema fundamental de los algoritmos genéticos o teorema de Holland. ....	241
4.13.3.- Bloques. ....	243
4.14.- Desarrollo de especies .....	243
4.15.- Hibridación de los algoritmos genéticos.. ....	244
4.16.- Otras metodologías de optimización. ....	245
4.16.1.- La búsqueda tabú.....	245
4.16.1.1.- Elementos básicos.....	247
4.16.2.- Simulated annealing (recocido simulado).....	249
4.16.2.1.- Símil termodinámico.....	250
4.16.2.1.1.- Determinación de la temperatura inicial.....	252
4.16.2.1.2.- Criterio de terminación. ....	253
4.16.2.2.- Estructura de un algoritmo simulated annealing .....	253
4.16.2.3.- Implementación del algoritmo.....	254
4.16.3.- Simulación Monte Carlo.....	256

4.16.4.- Redes neuronales.....	257
4.17.- Por qué utilizar los algoritmos genéticos .....	258
4.18.- Algoritmos meméticos. ....	259
4.19.- Lógica difusa o borrosa.....	260
4.19.1.- Operaciones básicas de la lógica difusa.....	262
4.20.- Antecedentes experimentales de los algoritmos genéticos.....	263

## **Distribución en Planta y Mantenimiento.**

5.- Distribución en planta y mantenimiento. ....	271
5.1.- Aspectos de la distribución en planta para incluir el mantenimiento .....	276
5.1.1.- Ubicación de los espacios necesarios para el almacenamiento de repuestos y equipos de diagnóstico.....	277
5.1.2.- Espacios necesarios para las actividades de mantenimiento .....	278
5.1.3.- Redundancia de equipos .....	279
5.1.4.- Espacios necesarios para los centros de diagnóstico .....	280
5.1.5.- Distribución de los equipos atendiendo a las condiciones ambientales .....	281

## **Metodología Propuesta.**

6.- Metodología propuesta.....	289
6.1.- Descripción de la metodología del modelo .....	290
6.2.- Consideraciones del modelo .....	292
6.2.1.- Consideraciones del mantenimiento .....	292
6.2.1.1.- Mantenimiento y costes de implementación .....	292
6.2.1.2.- Redundancia y coste de instalación .....	302
6.2.1.3.- Grupos para la intervención. ....	304
6.2.1.4.- Influencia del tiempo de inicio y tiempo medio de reparación (MTTR) .	307
6.2.1.5.- Condiciones ambientales de planta.....	307
6.2.1.6.- Almacén de mantenimiento .....	312
6.2.1.7.- Restricciones, reparación y penalización .....	313
6.2.1.8.- Modelo propuesto para los costes esperados totales del mantenimiento ..	315
6.2.1.9.- Diagramas del modelo propuesto para mantenimiento.....	318
6.2.2.- Consideraciones de la distribución en planta.....	320

6.2.2.1.- Incumplimiento por restricciones geométricas en redundancia .....	323
6.2.3.- Modelo propuesto para la optimización de la distribución y del mantenimiento. .....	330
6.2.3.1.- Representación cromosomica propuesta.....	332
6.2.3.1.1.- Operadores a nivel de especie. ....	333
6.2.3.1.2.- Operadores a nivel de individuo (distribución y mantenimiento)	333
6.2.3.2- Parámetros de partida para el modelo propuesto.....	338

## **Implementación, Conclusión y Trabajos Futuros.**

7.- Implementación, conclusión y trabajos futuros.....	343
7.1.- Implementación .....	344
7.1.1.- Introducción de datos .....	344
7.1.1.1.- Cuadros de diálogo .....	346
7.2. - Diseño de experimentos .....	354
7.2.1.- Determinación de los parámetros genéricos para el modelo propuesto. ....	355
7.2.1.1.- Etapa experimental 1 .....	356
7.2.2.- Influencia del número de actividades en la búsqueda de las soluciones .....	380
7.2.2.1.- Etapa experimental 2 .....	381
7.2.3.- Conclusiones de las etapas experimentales 1 y 2.....	395
7.2.4.- Influencia del Horizonte de Planificación y del MTBF. ....	399
7.2.4.1.- Etapa experimental 3 .....	399
7.2.5.- Influencia de la redundancia en la manutención y configuración de la Distribución .....	407
7.2.5.1.- Etapa experimental 4 .....	407
7.2.6.- Influencia de las condiciones del ambiente .....	411
7.2.6.1.- Etapa experimental 5 .....	412
7.3.- Conclusiones .....	415
7.4.- Trabajos futuros .....	418

## **Anexos.**

8.- Anexos.....	423
8.1.- Manual de instalación LAYGEN + MANTENIMIENTO.....	423
8.1.1.- Intalación del Microsoft.NET framework Versión 1.1 .....	423

8.1.2.- Instalación del INAGRID .....	425
8.1.3.- Instalación del programa LAYGEN + MANTENIMIENTO.....	427
8.2.- Manual de uso del LAYGEN + MANTENIMIENTO.....	432

## **Bibliografía**

9.- Bibliografía .....	443
------------------------	-----



INDICE DE FIGURAS.

**Optimización del Mantenimiento.**

Figura 2.1: Implementación del mantenimiento correctivo (Macián et al., 2000) ..... 15

Figura 2.2: Implementación del mantenimiento preventivo por tiempo con inspecciones  
frecuentes (Macián et al., 2000) ..... 17

Figura 2.3: Implementación del mantenimiento preventivo con intervención sistemática  
(Macián et al., 2000)..... 17

Figura 2.4: Implementación del mantenimiento predictivo por monitorización discontinua  
(Macián et al., 2000).....20

Figura 2.5: Curva de la bañera.....27

Figura 2.6: Representación de las funciones de las distribuciones exponencial.....29

Figura 2.7: Representación de las funciones típicas de la distribución de Weibull.....30

Figura 2.8: Representación de las curvas típicas de la distribución normal ..... 30

Figura 2.9: Gráfico del Coste total del mantenimiento en función del tiempo de parada de  
producción por causas del mantenimiento ..... 42

Figura 2.10: Representación de la relación entre la tasa de fallos en condiciones normales y la  
debida a las covariatas ..... 50

Figura 2.11: Evolución de la edad bajo un modelo PAS (Sánchez, 2000) ..... 53

Figura 2.12: Evolución de la edad bajo un modelo PAR (Sánchez, 2000)..... 54

Figura 2.13: Representación de un sistema conformado por 3 componentes (A,B,C), colocado  
tanto en serie cómo en paralelo ..... 56

Figura 2.14: Proceso de análisis RCM y optimización ..... 64

Figura 2.15: Árbol lógico de causas de fallos dominantes (Suceso TOP de  
Motobomba)(Muñoz, 1997) ..... 65

Figura 2.16: Representación de una distribución (FMS ver capítulo 3), donde se consideran  
las máquinas y los depósitos de almacenamiento intermedio (Azadivar,  
1998).....76

**Distribución en Planta, Optimización de la Implantación.**

Figura 3.1: Fases de planificación de un proyecto industrial (González, 2005). ..... 83

Figura 2.2: Industria Monolineales ..... 90

Figura 3.3: Industria Convergente ..... 90

Figura 3.4: Industria Divergente.....	90
Figura 3.5: Industria convergente y divergente.....	91
Figura 3.6: Distribución por posición fija, montaje de aeronaves .....	92
Figura 3.7: Distribución por posición fija, montaje naval .....	93
Figura 3.8: Distribución por producto, cadena de montaje de un eje motriz (Santamarina, 1995).....	94
Figura 3.9: Formas más comunes de distribución por producto (Domínguez et al., 1995).....	94
Figura 3.10: Distribución por proceso .....	95
Figura 3.11: Causas más frecuentes de una planta completamente nueva y expansión y traslado a una planta ya existente (Moore, 1962).....	98
Figura 3.12: Causas más frecuentes para la reordenación de una planta ya existente y ajuste menores (Moore, 1962).....	99
Figura 3.13: Vinculación entre distribución, producto, proceso y programa de fabricación (González, 2001) .....	106
Figura 3.14: Diagrama esquemático ideal (Buffa, 1955).....	107
Figura 3.15: Diagrama de Bloques (Buffa, 1955) .....	108
Figura 3.16: Systematic Layout Planning (Muther, 1968).....	109
Figura 3.17: Gráfica (Q) y (P) .....	110
Figura 3.18: Análisis de recorrido de productos.....	111
Figura 3.19: Ejemplo de tabla relacional de actividades (TRA) .....	112
Figura 3.20: Diagrama relacional de actividades . .....	113
Figura 3.21: Diagrama relacional de recorridos .....	113
Figura 3.22: Diagrama relacional de espacios .....	114
Figura 3.23: Asignación de actividades y localizaciones (QAP) .....	119
Figura 3.24: Clasificación de los modelos de formulación según la naturaleza de la función objetivo .....	120
Figura 3.25: Tabla relacional de actividades codificación numérica .....	122
Figura 3.26: Representación de compacidad y esbeltez respectivamente (Liggett y Michell, 1981) .....	124
Figura 3.27: Conjunto de soluciones eficientes .....	129
Figura 3.28: Minimización del coste relacional .....	130
Figura 3.29: La variación de los coeficientes condicionan la selección .....	130
Figura 3.30: Funciones de transformación .....	131
Figura 3.31: Lógica de programación de MALDEP .....	133
Figura 3.32: Distancia entre centroide Euclidiana .....	134
Figura 3.33: Distancia métrica rectilínea y centroides de Manhattam .....	134
Figura 3.34: Distancia rectilínea de Techebychev .....	135

Figura 3.35: Distancia de contorno (a + b + c).....	135
Figura 3.36: Modelos de espacio para asignación de actividades .	137
Figura 3.37: Representación del modelo discreto .....	138
Figura 3.38: Utilización de las curvas de llenado .....	138
Figura 3.39: Representación del Método Analítico (Heragu y Kusiak, 1991).....	140
Figura 3.40: Representación de una distribución obtenida con el método analítico .....	141
Figura 3.41: Representación de los cortes en una localización .	142
Figura 3.42: Aplicación de los operadores de cortes .....	142
Figura 3.43: Representación de un árbol de cortes para un conjunto de actividades .....	143
Figura 3.44: Representación de un dendograma .....	144
Figura 3.45: Representación del árbol de cortes .....	144
Figura 3.46: Implantación Multi-bay (Meller, 1997).....	146
Figura 3.47: Diagrama de colocación del algoritmo GRAFT( Armour y Buffa, 1963; Buffa et al., 1994) .....	147
Figura 3.48: Intercambio de actividades de igual área CRAFT .....	148
Figura 3.49: Intercambio de dos actividades adyacentes CRAFT .....	148
Figura 3.50: Lados candidatos de la distribución parcial (Hassan et al., 1986).....	149
Figura 3.51: Distribución final SHAPE (Hassan et al., 1986) .....	149
Figura 3.52: Metodología de asignación ALDEP .....	150
Figura 3.53: Técnica de colocación CORELAP .....	151
Figura 3.54: Rutina de asignación en Espiral PLANET .....	152
Figura 3.55: Distribución final COFAD, (Tompkins y Reed,1976) .....	153
Figura 3.56: Algoritmo MULTIPLE (Bozer et al., 1994).....	154
Figura 3.57: Distribución 2 pisos (Kochhar y Heragu, 98).....	155
Figura 3.58: Distribución en planta multi-floor (Kyu-Yeul Lee et al., 2005).....	156
Figura 3.59: Metodología del Dynamic Facility Layout Problem (Kochhar y Heragu, 1999).....	158
Figura 3.60: Distribución para los N periodos (Balakrishnan, et al. 2003) .....	159
Figura 3.61: Unidades de equipos 3D (Barbosa et al., 2002).....	160
Figura 3.61: Un Grafo .....	161
Figura 3.62: Planaridad de grafos .....	161
Figura 6.63: Grafo G.P.P.M .	162
Figura 6.64: Grafo Dual .....	162
Figura 6.65: Representación de localizaciones y actividades asignadas (Suresh et al., 2000) .....	168
Figura 3.66: Ejemplo de distribución final de Benson y Foote (1997).....	171
Figura 3.67: Distribución de planta de Islier (1998).....	175

Figura 3.68: Representación de una distribución en ciclo cerrado (Cheng y Gen 1998) .....	176
Figura 3.69: Representación de una célula de Rajasekharan et al. (1998).....	179
Figura 3.70: Posibles configuraciones de distribución de células. ....	179
Figura 3.71: Algoritmo genético basado en un proceso heurístico de dos pasos para la resolución del FMS (Rajasekharan et al., 1998) .....	180
Figura 3.72: Representación del sistema integrado para el diseño de la distribución (Rao et al., 1999) .....	185
Figura 3.73: Árbol de cortes y layout de Matsuzaki et al (1999) .....	187
Figura 3.74: Distribución y árbol de cortes de Azadivar y Wang (2000).....	191
Figura 3.75: Árbol de cortes de una distribución (Wu y Appleton 2000).....	192
Figura 3.76: Distribución y líneas de cortes (Wu y Appleton. 2000).....	192
Figura 3.77: Sistema de flujo de materiales y estructura de pasillos (Wu y Appleton, 2000)	193
Figura 3.78: (a) departamentos de anchuras fijas y (b) departamentos de anchuras de dimensiones variables (Gómez et al., 2003) .....	195
Figura 3.79: Proceso de agrupación de Sirinaovakul y Limudomsuk (2007).....	204

### **Algoritmo Genético como Metodología de Optimización.**

Figura 4.1: Estructura básica de un algoritmo genético .....	210
Figura 4.2: Célula, cromosoma y gen .....	211
Figura 4.3: Influencia del alelo en los ojos de la mosca .....	212
Figura 4.4: Árbol de cortes, distribución en planta y representación cromosómica de Tam (1992).....	213
Figura 4.5: Representación cromosómica de Muñoz (Muñoz 1997).....	214
Figura 4.6: Clústeres, árboles de cortes y representación del cromosoma de la especie de Santamarina (1995).....	215
Figura 4.7: Árbol de corte, solución y codificación de la solución (Santamarina, 1995).....	216
Figura 4.8: Matriz y representación cromosómica de Suresch et al. (1995).....	216
Figura 4.9: Cromosoma y planta de Islier (1998).....	217
figura 4.10: Representación del cromosoma de Sánchez (2000).....	217
Figura 4.11: Cromosoma de Lazo y Pacheco (1999).....	218
Figura 4.12: Tabla Horario de Lazo y Pacheco (1999).....	218
Figura 4.13. Representación de Balakrishnan et al. (2003) .....	219
Figura 4.14. Representación del cromosoma de Paiton y Campell (1995).....	219
Figura 4.15: Distribución de Kyu-Yeul Lee et al. (2003) .....	220

Figura 4.16: Representación cromosómica del layout de Kyu-Yeul Lee et al. (2003).....	220
Figura 4.17: Distribución en planta multi-floor (Kyu-Yeul Lee et al., 2005).....	221
Figura 4.18: Representación cromosómica del layout multi-floor (Kyu-Yeul Lee et al., 2005) .....	221
Figura 4.19: Planta y representación cromosómica de Ming-Jaan Wang et al. (2005) .....	222
Figura 4.20: Codificación de las acciones de mantenimiento para 15 días de Lapa y colaboradores (Lapa et al., 2006) .....	223
Figura 4.21: Codificación de la distribución de un árbol de cortes para un individuo (Diego- Más, 2006) .....	224
Figura 4.22: Proceso para la codificación de Sirinaovakul y Limudomsuk (2007) .....	225
Figura 4.23: Distribución en planta y cromosoma final (Sirinaovakul y Limudomsuk (2007) .....	226
Figura 4.24: Representación genotípica de Chan et al (2008) .....	226
Figura 4.25: Sistema de ruleta de Goldberg .....	229
Figura 4.26: Operador cruce .....	231
Figura 4.27: Operador cruce multipuntos .....	232
Figura 4.28: Operador mutación .....	232
Figura 4.29: Representación del operador inversión .....	233
Figura 4.30: Distribución en planta y cromosoma .....	234
Figura 4.31: Distribución y cromosoma clonación vertical .....	234
Figura 4.32: Distribución y cromosoma clonación horizontal .....	235
Figura 4.33: Aplicación de los operadores .....	238
Figura 4.34: Representación de los esquemas .....	239
Figura 4.35: Relación entre los diferentes tipos del memoria .....	247
Figura 4.36: Actualización de la lista tabú .....	248
Figura 4.37: Proceso de búsqueda en la topología de la función objetivo .....	250
Figura 4.38: Algoritmo Metropolis.....	251
Figura 4.39: Evolución del algoritmo Simulated Annealing .....	252
Figura 4.40: Aplicación de un recocido simulado a un problema de optimización .....	255
Figura 4.41: Representación de redes neuronales.....	257
Figura 4.42: Representa las señales adquiridas en cuatro intervalos mensuales con la firma de buen funcionamiento .....	260
Figura 4.43: Funciones de pertenencia .....	262

## **Distribución en Planta y Mantenimiento.**

Figura 5.1: Configuración de Cantoni et al. (2000).....	273
Figura 5.2: Ejemplo de una configuración 1H2H3L (Azadivar y Shu, 1999b) .....	275
Figura 5.3: Representación de una distribución considerando un almacén para mantenimiento .....	278
Figura 5.4: Distribución con separación entre la localización y el área o maquinaria de trabajo .....	279
Figura 5.5: Representación de la redundancia en un sistema de distribución de agua .....	280
Figura 5.6: Cuadro para el entorno circundante (Lie Chien Lin y Gunter 1999).....	282
Figura 5.7: Cuadro para la calidad del ambiente (Lie Chien Lin y Gunter 1999).....	283
Figura 5.8: Cuadro de las circunstancias genéricas para los criterios topográficos y topológicos (Lie Chien Lin y Gunter 1999).....	283

## **Metodología Propuesta.**

Figura 6.1: Esquema general de la propuesta .....	291
Figura 6.2: Comportamiento medio de un equipo sin mantenimiento preventivo/predictivo para el horizonte $t$ .....	293
Figura 6.3: Tasa de fallos lineal seudo constante (elementos mecánicos).....	293
Figura 6.4: Distribución de la probabilidad de densidad de fallos de un equipo (ley normal).....	294
Figura 6.5: Curvas de fiabilidad $R(t)$ y probabilidad de fallo $F(t)$ .....	295
Figura 6.6: Distribución de fallos de dos poblaciones de equipos .....	296
Figura 6.7: Situaciones de mantenimiento correctivo .....	296
Figura 6.8: Representación de un caso para un equipo de la actividad .....	299
Figura 6.9: Representación del posibilidad 1 .....	302
Figura 6.10: Representación del posibilidad 2 .....	302
Figura 6.11: Mantenimiento del equipo redundante .....	303
Figura 6.12: Representación de una actuación que involucra dos equipos de diferente MTBF .....	305
Figura 6.13: Agrupación de actividades en un cromosoma .....	306
Figura 6.14: Agrupación de actividades en un cromosoma .....	306
Figura 6.15: Agrupación de actividades en un grupo .....	306
Figura 6.16: Variación del tipo de mantenimiento .....	307

Figura 6.17: Representación de la relación entre la tasa de fallos en condiciones normales y la debida a las condiciones ambientales .....	308
Figura 6.18: Matriz de las distancias entre las diferentes actividades y las que producen un entorno degradador .....	310
Figura 6.19: Tasa de fallos aleatorios para la función que sigue una ley exponencial o Weibull con $\beta = 1$ .....	311
Figura 6.20: Segmento <i>nai</i> .....	317
Figura 6.21: Segmento redundancia <i>R</i> .....	317
Figura 6.22: Segmentos de mantenimiento propuestos .....	317
Figura 6.23: Diagrama simplificado del flujo de la propuesta a nivel de actividad (sub-diagrama 1).....	318
Figura 6.24: Diagrama 1, para toda la distribución .....	319
Figura 6.25: Ejemplos de asignaciones longitudinales de equipos o actividades redundantes .....	324
Figura 6.26: Ejemplos de asignaciones paralelas de equipos o actividades redundantes ....	324
Figura 6.27: Ejemplos de asignaciones transversales de equipos o actividades redundantes .....	325
Figura 6.28: Localización y actividades para el ejemplo .....	326
Figura 6.29: Asignación paralela de actividades redundantes para el ejemplo .....	326
Figura 6.30: Asignación longitudinal de los equipos o actividades redundantes para el ejemplo .....	327
Figura 6.31: Asignación transversal de los equipos o actividades redundantes para el ejemplo .....	327
Figura 6.32: Áreas de asignación y actividades para el ejemplo .....	328
Figura 6.33: Asignación paralela de actividades redundantes para el ejemplo .....	328
Figura 6.34: Asignación longitudinal de actividades redundantes para el ejemplo .....	329
Figura 6.35: Asignación transversal de actividades redundantes para el ejemplo .....	329
Figura 6.36: Representación genotípica de la solución conjunta .....	332
Figura 6.37: Operador selección-reproducción empleado .....	334
Figura 6.38: Ejemplo de operador cruce utilizado .....	335
Figura 6.39: Ejemplo de actuación del operador mutación .....	336
Figura 6.40: Algoritmo genético para el problema de optimización propuesto .....	337

## **Implementación, Conclusión y Trabajos Futuros.**

Figura: 7.1: Introducción de los datos de entrada para la identificación de la empresa y problema .....	346
Figura 7.2: Introducción de los datos para la optimización del árbol de corte .....	347

Figura 7.3: Introducción de los datos para la optimización del individuo (distribución y mantenimiento).....	348
Figura 7.4: Introducción de los valores relacionales entre actividades .....	349
Figura 7.5: Introducción de la tabla relacional de actividades .....	350
Figura 7.6: Introducción del flujo de materiales entre actividades .....	350
Figura 7.7: Introducción de los datos de mantenimiento para cada equipo o equipos de la actividad .....	351
Figura 7.8: Introducción de los datos globales para mantenimiento .....	352
Figura 7.9: Distribución de menor coste total relacional, árbol de cortes óptimo, número de actuaciones $na(i)$ y $R(i)$ de cada actividad .....	353
Figura 7.10: Resultados mínimos por generación asociados a un proceso de optimización	354
Figura 7.11: Valores de mantenimiento por actividad etapa experimental 1 .....	356
Figura 7.12: Valores de manutención etapa experimental 1 .....	357
Figura 7.13: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 1 .....	359
Figura 7.14: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 1 .....	360
Figura 7.15: Evolución de los costes mínimos totales relacionales a partir de la generación número 8 hasta la 42, ensayo 1 .....	360
Figura 7.16: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 43 hasta la 50, ensayo 1 .....	361
Figura 7.17: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 2 .....	362
Figura 7.18: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 2 .....	363
Figura 7.19: Evolución de los costes mínimos totales relacionales hasta generación 32 y de la 7 a la 19, ensayo 2 .....	364
Figura 7.20: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 34 hasta la 50, ensayo 2 .....	364
Figura 7.21: Distribución del mínimo coste total relacional del ensayo 3 .....	365
Figura 7.22: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 3 .....	366
Figura 7.23: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación número 5 hasta la 50, ensayo 3 .....	366
Figura 7.24: Distribución del mínimo coste total relacional del ensayo 4.....	367
Figura 7.25: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 4 .....	368
Figura 7.26: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 1 hasta la 8, ensayo 4.....	368
Figura 7.27: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 10 hasta la 100, ensayo 4 .....	369

Figura 7.28: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 5 .....	370
Figura 7.29: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 5 .....	370
Figura 7.30: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 1 hasta la 72, ensayo 5 .....	371
Figura 7.31: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 74 hasta la 100, ensayo 5.....	371
Figura 7.32: Distribución del mínimo coste total relacional del ensayo 6 .....	372
Figura 7.33: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 6 .....	373
Figura 7.34: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 4 hasta la 96, ensayo 6 .....	373
Figura 7.35: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 7 .....	374
Figura 7.36: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 7 .....	375
Figura 7.37: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 8.....	376
Figura 7.38: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 8. ....	376
Figura 7.39: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 10 hasta la 50, ensayo 8 .....	377
Figura 7.40: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 52 hasta la 97, ensayo 8 .....	377
Figura 7.41: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 9.....	378
Figura 7.42: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 9 .....	379
Figura 7.43: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 15 hasta la 100, ensayo 9 .....	379
Figura 7.44: Valores de mantenimiento por actividad etapa experimental 2 ensayos 4, 5 y 6 (nueve actividades + almacén).....	381
Figura 7.45: Valores de manutención etapa experimental 2 ensayos 4, 5 y 6 (nueve actividades + almacén) .....	381
Figura 7.46: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 10 .....	382
Figura 7.47: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 10 .....	383
Figura 7.48: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 1 hasta la 31, ensayo 10.....	383
Figura 7.49: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 33 hasta la 50, ensayo 10 .....	384
Figura 7.50: Distribución de mínimo coste total relacional, ensayo 11 .....	385

Figura 7.51: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 11 .....	385
Figura 7.52: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 12 .....	386
Figura 7.53: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 12 .....	387
Figura 7.54: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 8 hasta la 43, ensayo 12.....	387
Figura 7.55: Valores de mantenimiento por actividad, etapa experimental 2 ensayos 13, 14 y 15 (trece actividades + almacén) .....	388
Figura 7.56: Valores de manutención etapa experimental 2 ensayos 13, 14 y 15 (trece actividades + almacén).....	388
Figura 7.57: Distribución de mínimo coste total relacional, ensayo 13.....	389
Figura 7.58: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 13 .....	390
Figura 7.59: : Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 4 hasta la 50, ensayo 13 .....	390
Figura 7.60: Distribución de mínimo coste total relacional, ensayo 14.....	391
Figura 7.61: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 14 .....	392
Figura 7.62: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 6 hasta la 15, ensayo 14 .....	392
Figura 7.63: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 36 hasta la 50, ensayo 14 .....	393
Figura 7.64: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 15 .....	394
Figura 7.65: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 15 .....	394
Figura 7.66: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 9 hasta la 50, ensayo 15.....	395
Figura 7.67: comparación en la convergencia de los costes totales relacionales de los ensayos 1, 2 y 3 para las primeras 22 generaciones .....	396
Figura 7.68: Curva envolvente de mínimos costes totales relacionales del ensayo 3 .....	397
Figura 7.69: Curva envolvente de mínimos costes totales relacionales de la generación 5 hasta la convergencia .....	397
Figura 7.70: Comparación de las oscilaciones de los costes totales relacionales del ensayo 4 y 7. ....	398
Figura 7.71: Comparación las oscilaciones de los costes totales relacionales en función del número de actividades de los ensayos 1 y 10. ....	398
Figura 7.72: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 16 .....	400
Figura 7.73: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 17 .....	402
Figura 7.74: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 18 .....	403

Figura 7.75: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 19 .....	404
Figura 7.76: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 20 .....	405
Figura 7.77: Distribución de menor coste total relacional del ensayo 21 .....	406
Figura 7.78: Matriz de flujo entre actividades (transporte/día) (Hillier, 1963).....	407
Figura 7.79: Distribución de mínimo coste relacional con los valores de Hillier (1963) empleados por Santamarina (1995) .....	408
Figura 7.80: Evolución de los costes relacionados al flujo de materiales (Santamarina, 1995). .....	408
Figura 7.81: Distribución de mínimo coste total relacional, ensayo 22.....	409
Figura 7.82: Evolución del coste relacional asociado al flujo de materiales, ensayo 22 .....	410
Figura 7.83: Evolución del coste relacional asociado al flujo de materiales de la generación número 6 hasta la 459, ensayo 22 .....	411
Figura 7.84: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 23 .....	413
Figura 7.85: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 23 .....	414
Figura 7.86: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 6 hasta la 100, ensayo 23 .....	414
Figura 7.87: Figura 7.85: Comparación de los costes mínimos totales relacionales de la generación 5 hasta la 95 del ensayo 6 y 23 .....	415



# 1

Introducción.



## 1.- Introducción.

El desarrollo de un proyecto es una actividad creativa, fundamentada principalmente en el razonamiento, la experiencia y el conocimiento. Tiene la finalidad de lograr soluciones óptimas, mediante aplicación de técnicas eficientes para el diseño y desarrollo de productos o sistemas.

En los proyectos de diseño de plantas industriales, donde las exigencias actuales de competitividad y de la seguridad, tanto ambiental como del personal son críticas (Del Brío et al., 2004), es determinante, para el eficiente y confiable desarrollo del proceso productivo, la búsqueda de un punto de equilibrio en términos de coste, fiabilidad, o cualquier otro criterio o criterios que sean elegidos. La búsqueda de ese punto, implica la aplicación de metodologías tendentes a lograr que sea el óptimo, es decir, el mejor para nuestro diseño. Dicho punto óptimo, se manifestará como un mínimo o máximo en una función objetivo,  $f(x_i, x_{i+1}, x_{i+2} \dots x_n)$ , donde  $x_i, x_{i+1}, x_{i+2} \dots x_n$  pueden representar las variables o criterios a optimizar, para maximizar o minimizar la función objetivo.

En los problemas de optimización, las variables de la función objetivo que identifican al problema, es decir  $(x_i, x_{i+1}, x_{i+2} \dots x_n)$ , pueden estar relacionadas entre sí por una serie de leyes, de manera que los procesos de optimización quedan restringidos a aquellos conjuntos de variables que confirman dichas leyes. A esta serie de leyes se le denomina restricciones, las cuales definen los límites adecuados de funcionamiento para el problema en estudio. La función objetivo y las restricciones formarán el denominado modelo, que representa una simplificación de los elementos esenciales y de funcionamiento del problema a optimizar (ver capítulos 2, 3, 5 y 6).

Además de la formulación de un modelo, es necesaria la aplicación de una metodología de búsqueda del punto óptimo, como ha sido expresado. La metodología de búsqueda, o de optimización, puede tratarse de algún algoritmo informatizado, como los llamados algoritmos genéticos, desarrollados por Holland en 1975 (Goldberg, 1989). El fin que se persigue con la aplicación de éstos, es explorar y explotar todos los posibles puntos que integran el campo de soluciones, de forma rápida y eficiente, empleando como mecanismo de evaluación la función objetivo y las respectivas restricciones. Estos algoritmos eficientes de optimización, emplean técnicas metaheurísticas (heurísticas mejoradas) como mecanismos de búsqueda. Las técnicas metaheurísticas, consisten en procesos amplios, dirigidos e inteligentes, pensados para explorar y explotar determinadas áreas, o todas de un espacio de soluciones, y que representan actualmente, un gran avance en las metodologías para la resolución de problemas, donde no es posible identificar soluciones óptimas por simple revisión exhaustiva.

## **1.1.- Justificación, antecedentes y objetivos del trabajo de investigación.**

El entorno competitivo donde se desenvuelven actualmente las organizaciones, con sus normativas de producción y seguridad, hace que sea necesario enfocar los diseños de plantas industriales en función de éstas. Esta circunstancia supone mantener un alto nivel de calidad, con gastos que deben ubicarse dentro de un rango permitido, lo que implica reducir los costes de operación para la elaboración del producto, así como los originados por los paros del sistema. Para la reducción de los costes de elaboración, es necesario diseñar la ordenación (distribución en planta) que permita un flujo y desarrollo eficiente del proceso. Esto se traduce en el hecho de diseñar un recorrido óptimo para las materias primas o productos semiacabados, y generar así un gasto mínimo asociado a su desplazamiento, y otros criterios (Muther, 1981). En relación a los costes debidos a los paros, es indispensable seleccionar aquellas actividades que permitan mantener los equipos del proceso con unos costes razonables, y a su vez, mantener un nivel de seguridad requerido. Es importante decir que un paro total o parcial de un equipo, originará costes a la organización, debido tanto al daño en el equipo involucrado, como el coste originado por las pérdidas en la producción.

### **1.1.1.- Antecedentes.**

Como se observará a lo largo del trabajo de investigación, las propuestas para la distribución en planta aún no consideran las actividades de mantenimiento ni su optimización, y viceversa. Solo existen algunos enfoques referidos a las células flexibles, bajo ciertos requerimientos de producción, que involucran algunos aspectos del mantenimiento, pero sin considerar los respectivos costes (Shang, 1995, Shang y Tadikamalla, 1998; Azadivar, 1998; Azadivar y Shu, 1999b). El modelo de Cantoni y colaboradores (Cantoni et al., 2000), configura un layout por redundancia que maximiza la fiabilidad y el beneficio neto de la operatividad de la planta, a partir de los costes de reparación, costes de instalación de equipos redundantes, costes por pérdidas de producción y por accidentes, pero no así los asociados a la manutención, por la asignación de las diferentes actividades en una determinada localización. De igual modo Tavakkoli-Moghaddam y otros (Tavakkoli-Moghaddam et al., 2008), proponen un modelo que permite determinar la asignación óptima de equipos redundantes ganando en fiabilidad y seguridad, al tiempo que minimiza los costes de instalación de los equipos adicionales, pero sin considerar los de manutención y mantenimiento.

Como aspecto introductor, se describirán algunos conceptos preliminares relacionados con las actividades de mantenimiento y distribución en planta, a fin de conocer las características principales de estas actividades y las necesarias para los procesos de optimización. Se analizan también los modelos propuestos por autores a lo largo de la historia, concebidos para optimizar las actividades de mantenimiento y distribución de planta. Por lo tanto, el trabajo versará, en sus primeros capítulos (2 y 3) en la recopilación y estudio de la información relacionada con la optimización de estas actividades, para tener así un conocimiento base y documentado que sustente y fortalezca la propuesta a desarrollar. Se busca comprender las metodologías empleadas para la formulación de los diferentes modelos, indagando en sus diferencias, planteamientos, enfoques y soluciones, así como en los resultados obtenidos por cada autor. También se estudia el estado actual de las técnicas heurísticas y metaheurísticas, analizando los conceptos y teorías en los que se basan para comprender su funcionamiento, forma de aplicación, ventajas y desventajas. Se estudia, en profundidad, la teoría, bases, funcionamiento y comportamiento de los algoritmos genéticos, teniendo como meta comprender y aplicar la correcta implementación (codificación) y parametrización, para la resolución de los problemas de optimización. Seguidamente, se evalúan los desarrollos propuestos hasta ahora para la implantación y el mantenimiento, como los posibles aspectos que permiten fusionar el mantenimiento y la distribución en planta, basándose en los análisis previos, y en la consideración de las condiciones que rodean a los equipos en el ambiente de su desempeño.

### 1.1.2.- Objetivo del trabajo.

Como se ha comentado anteriormente, en el diseño de una distribución en planta, es necesario considerar todo un conjunto de factores que permitan el correcto, eficiente y seguro funcionamiento del proceso productivo. Entre estos factores está el mantenimiento, mediante el cual se pretende conservar los equipos que forman el sistema de producción. La interacción entre el mantenimiento y la distribución en planta, obliga a plantearnos, desde el punto de vista de la optimización, la búsqueda de un punto de balance, lo cual conduce a un problema combinatorial entre éstos. El objetivo principal del trabajo es desarrollar un modelo que contemple las necesidades de producción por medio de una correcta distribución en planta, y que considere, además, las diferentes necesidades y costes del mantenimiento.

## 1.2.- Organización del trabajo.

El desarrollo del trabajo sigue una metodología que parte del estudio y análisis del problema a resolver, sustentada en el análisis de la bibliografía relacionada para conocer las teorías, bases y el funcionamiento de los modelos existentes (Capítulos 2,3, y 5) ya sea en sus características generales como en las particulares.

- **Capítulo 2 (Optimización del Mantenimiento).** Consiste en la recopilación bibliográfica del estado del arte relacionado con el concepto de mantenimiento, tipos de mantenimiento, gestión, políticas, indicadores, tipos de fallos, selección de planes de mantenimiento, modelos para la optimización de las acciones de mantenimiento aplicando algoritmos genéticos y sus formas de implementación. Se describen los modelos para tres niveles: componente, sistema y planta.
- **Capítulo 3 (Distribución en Planta, Optimización de la Implantación).** Se comentarán y analizarán los conceptos relacionados con la distribución en planta, tipos de distribución, objetivos, principios, diseño, procedimientos (S.L.P), métodos de generación de layout (M.G.L), modelos de espacios para la asignación y los diferentes modelos propuestos para la optimización que aplican los algoritmos genéticos.
- **Capítulo 4 (Algoritmos Genéticos como Metodología de Optimización).** Este capítulo muestra una recopilación documental relativa a la metodología de búsqueda de los algoritmos genéticos. Se estudia todo lo concerniente a sus características principales y las propuestas de algunos autores para su aplicación, en temas de mantenimiento y distribución de planta (codificación). También se analizan las últimas tendencias para su aplicación, así como otras metodologías para efectos comparativos.
- **Capítulo 5 (Distribución en Planta y Mantenimiento).** Se analizan diferentes aspectos que permiten fusionar el mantenimiento y la distribución en planta, es decir, cómo incluir en las actividades de ordenanza de los espacios físicos las actividades de mantenimiento. Se realiza un recorrido por algunos desarrollos anteriores, que incluyen algunos aspectos de ambos temas. También se analiza, como paso previo al estudio de las condiciones del ambiente, una propuesta sobre la influencia de factores ambientales externos o bioclimáticos en el ambiente interior de planta.
- **Capítulo 6 (Metodología Propuesta).** En este capítulo se desarrolla la metodología propuesta. Partiendo de los estudios y análisis previos, se elabora un modelo que tiene como finalidad optimizar los costes de la distribución y los asociados al mantenimiento, para una planta nueva. La distribución final, y las condiciones imperantes, influyen en los costes que permiten garantizar la operatividad mínima de estos. El modelo facilita una evaluación de los posibles costes que tendría que asumir la organización, como resultado de las decisiones tomadas por los planificadores en la etapa de prediseño, tanto de la distribución como del mantenimiento.
- **Capítulo 7 (Implementación, Conclusiones y Trabajos futuros).** En la primera parte de este capítulo, se presenta la herramienta que soporta la

aplicación práctica del modelo propuesto. Tiene como finalidad, identificar las variables del problema y mostrar la forma de su implementación. (ver también capítulo 8). A los efectos de poder validar el funcionamiento del modelo o algoritmo, se proponen y desarrollan una serie de experimentos. Estos experimentos permiten evaluar el potencial y la capacidad para la obtención de buenas soluciones. Por ultimo, se presentan las conclusiones, así como también se discuten, las posibles estrategias que se deben desarrollar en el futuro, con la finalidad de superar algunas limitaciones actuales de la metodología propuesta.

- **Capítulo 8 (Anexos).** Se exponen los manuales de instalación, tanto de los programas auxiliares como del software desarrollado. Adicionalmente, se presenta un manual detallado para la aplicación a nivel de usuario.
- **Capítulo 9 (Bibliografía).** Se presenta la bibliografía consultada durante el desarrollo del trabajo de investigación.



# 2

## Optimización del Mantenimiento



## **2.- Optimización del mantenimiento.**

Para que una planta se pueda mantener operativa, se hace necesario aplicar una serie de acciones con el fin de garantizar el funcionamiento de los elementos que la integran. Adicionalmente, estas acciones deben estar encaminadas a reducir al máximo la probabilidad de daños a personas, equipos y medio ambiente por hechos catastróficos, minimizando a su vez, los costes resultantes originados por su implementación. Las actividades dedicadas a mantener, conservar y restablecer, implican la utilización de nuevas técnicas y la definición de metodologías para hacer de ellas las más eficientes posibles. Una acción de mantenimiento eficiente, es aquella que logra un nivel óptimo en cuanto a los resultados y gastos de aplicación.

Desde la antigüedad, el hombre ha conservado sus herramientas de cultivo y caza para garantizar un buen desempeño de las mismas, sin necesidad de reposición, siendo estas técnicas actividades artesanales. En la revolución industrial, con la aparición de las máquinas a vapor, surge la necesidad de un mantenimiento más tecnificado originado por la complejidad de los nuevos equipos. Ya en los años 60 y 70 la evolución de la electrónica permite incorporar sistemas nuevos de control a equipos, como también aparecen los conceptos de la fiabilidad. Finalmente en los años posteriores comienzan las técnicas de mantenimiento on-line y las teorías de optimización de las actividades preventivas.

En el presente capítulo, se hace una recopilación de todo lo concerniente al mantenimiento y sus actividades, poniendo especial interés en las clases de mantenimiento existentes, gestión del mismo, en los indicadores empleados, políticas, clasificación de fallos, planificación, selección de las actividades y modelos de optimización.

Adicionalmente, y como asunto relevante, hace un análisis de los modelos empleados para optimizar las tareas de mantenimiento y sus costes a nivel de componente o sistema. Estos modelos utilizan parámetros que permiten de forma directa la optimización. Se realizará también un estudio de las propuestas de algunos autores para mejorarlos, mediante la inclusión de submodelos como los de regresión o reajuste de la edad, que afectan el análisis de fiabilidad y el proceso de optimización.

A nivel de planta se analizan las propuestas de algunos autores, que enfocan el problema desde diferentes puntos de vista, en función de ciertos requerimientos o criterios.

## 2.1 - Mantenimiento.

Según Dekker (1996), el mantenimiento puede ser definido como la combinación de todas las técnicas y acciones administrativas, para reestablecer y conservar un equipo dentro de unos límites requeridos de funcionamiento, pudiéndose resumir sus objetivos en fiabilidad, eficiencia, calidad del producto y seguridad humana.

De la Asociación francesa (AFNOR) (Boucly, 1998) el mantenimiento se define como un conjunto de actividades destinadas a mantener o reestablecer un bien, a un estado con unas o condiciones dadas de seguridad en el funcionamiento, a fin de que cumplan con una función requerida, suponiendo una combinación de elementos técnicos, administrativos y de gestión.

Para Macián y colaboradores (Macián et al., 2000), el mantenimiento es el conjunto de acciones o técnicas, que permiten conservar o reestablecer un equipo en un estado específico y asegurar un determinado servicio con un coste mínimo y máxima seguridad. Este concepto actualmente se enmarca dentro de los objetivos planteados por la dirección de las empresas, donde las actividades de mantenimiento le corresponde una importancia similar que a las actividades de producción.

Entre las funciones del mantenimiento descritas por los autores están:

- Conservar. Mantener las características operativas del sistema.
- Reestablecer. Devolver las características operativas de los sistemas o equipos
- Obtener un nivel de calidad requerido. Tanto de la operación del equipo como del producto resultante.
- Conseguir máxima rentabilidad económica y máxima seguridad para el usuario, el reparador y la máquina.

Antiguamente el mantenimiento consistía en reparar las averías en los equipos con personal con escasa formación técnica. Este tipo de mantenimiento poco sofisticado, ocasionaba una disminución de la vida útil de las máquinas y de su productividad. A finales de los años 70, surgió una fuerte tendencia hacia la implementación del mantenimiento preventivo y posteriormente hacia el predictivo, esto debido a los siguientes factores:

- Complejidad creciente de las máquinas y equipos.
- Elevado coste de parada de las máquinas por avería o por mantenimiento preventivo.
- El creciente precio de los equipos.
- Desarrollo de nuevas tecnologías aplicables a mantenimiento como:

- Ordenadores pequeños y rápidos.
- Sistemas de adquisición de datos.
- Nuevas tecnologías de captadores para medición de parámetros críticos de funcionamiento.
- Sistemas expertos.
- Desarrollo de nuevas técnicas que incluyen:
  - Herramientas de ayuda a la toma de decisiones (Shang y Tadikamalla, 1998).
  - Diseño para la fiabilidad y mantenibilidad.
  - Desarrollo de la evaluación técnica del mantenimiento.
  - Desarrollo de modelos para la optimización del mantenimiento.

El mantenimiento es sobre todo un servicio, por lo tanto, sus políticas, objetivos y forma de actuar deben estar en concordancia con las políticas y objetivos de la empresa, debiéndose desarrollar y evolucionar conjuntamente.

### **2.1.1.- Objetivos del mantenimiento.**

Los objetivos principales del mantenimiento, atienden a la necesidad de mantener la función para la cual han sido diseñados los equipos, a un coste aceptable o permitido por la organización. Según Olmeda (2003), los objetivos principales del mantenimiento son:

- Reducir al máximo los costes debidos a las paradas por averías accidentales de la maquinaria, que comporten pérdidas de producción o servicio. A este efecto, más adelante se estudiarán modelos de costes para la optimización de las acciones de mantenimiento.
- Limitar el deterioro de la maquinaria y, en consecuencia, el incremento de rechazos o degradación de la calidad del producto.
- Proporcionar conocimiento y asistencia, a partir de la experiencia adquirida, a todos aquellos que intervienen en el proyecto y gestión de nuevas instalaciones.

Adicionalmente:

- Promover un nivel satisfactorio de disponibilidad.
- Mantener un ambiente de trabajo seguro para el personal y el medio ambiente.
- Planificar las tareas para evitar sobre y sub mantenimiento, integrando de forma óptima las tareas de mantenimiento. Por lo general estos procedimientos de integración de tareas no son sencillos, siendo necesario el desarrollo de modelos que cuantifiquen la fiabilidad de emplear ciertas combinaciones de tareas y de la aplicación a posteriori de métodos de simulación.

## **2.1.2 - Tipos de mantenimiento.**

El mantenimiento se puede dividir en función del criterio de iniciación de tareas, como también atendiendo el nivel de intervención y actuación sobre los componentes o sistemas. La utilización de cualquiera de los tipos de mantenimiento que serán comentados, no excluye una integración de estos, y aunque cada uno de ellos tiene su campo económico de aplicación es conveniente combinarlos de forma que sean los beneficios de operación, rendimiento y seguridad los que decanten la mejor alternativa. En la sección relativa a los modelos de optimización del mantenimiento, se estudiarán las propuestas de algunos autores para optimizar la combinación de éstos.

Los tipos de mantenimiento más usualmente empleados son:

- Mantenimiento correctivo.
- Mantenimiento preventivo.
- Mantenimiento predictivo.
- Mantenimiento modificativo.

### **2.1.2.1.- Mantenimiento correctivo.**

Es el que se aplica cuando ocurre un fallo. Este mantenimiento se reduce al simple hecho de reparar el equipo para devolverle las características operacionales iniciales. Supone cambiar, reparar o ajustar la pieza, y debido a que no se puede programar la intervención, la acción se realiza de forma aleatoria. En esta clase de mantenimiento se pueden distinguir dos posibilidades:

- Reparaciones provisionales efectuadas en campo cuando la avería no es grande, pero el tiempo de paro implica grandes costes.
- Reparaciones definitivas necesariamente realizadas en talleres, reestableciéndose el nivel óptimo de operación.

La finalidad del mantenimiento correctivo es conseguir la mayor eficacia en las intervenciones, eficacia que viene determinada en función el cumplimiento de las siguientes condiciones:

- Rapidez de respuesta a la demanda de intervención.
- Rapidez de ejecución o reacondicionamiento.

- Calidad de realización de los trabajos.

El principal inconveniente de este tipo de mantenimiento, es que el usuario detecta la avería en el momento que necesita el equipo o maquinaria, ya sea al ponerlo en marcha o bien durante su utilización. Esto se resume al hecho de que las curvas de degradación del componente se desconocen, y por lo tanto el momento de intervención (figura 2.1).

Para Macián et al. (2000), la adopción de este sistema de mantenimiento se justifica sólo en los siguientes casos:

- Cuando los costes indirectos del fallo son mínimos y los requerimientos de seguridad lo permiten.
- Cuando la empresa está constituida por máquinas en la cual los paros eventuales no son críticos para la producción.
- Cuando la empresa adopta una política de renovación frecuente del material.

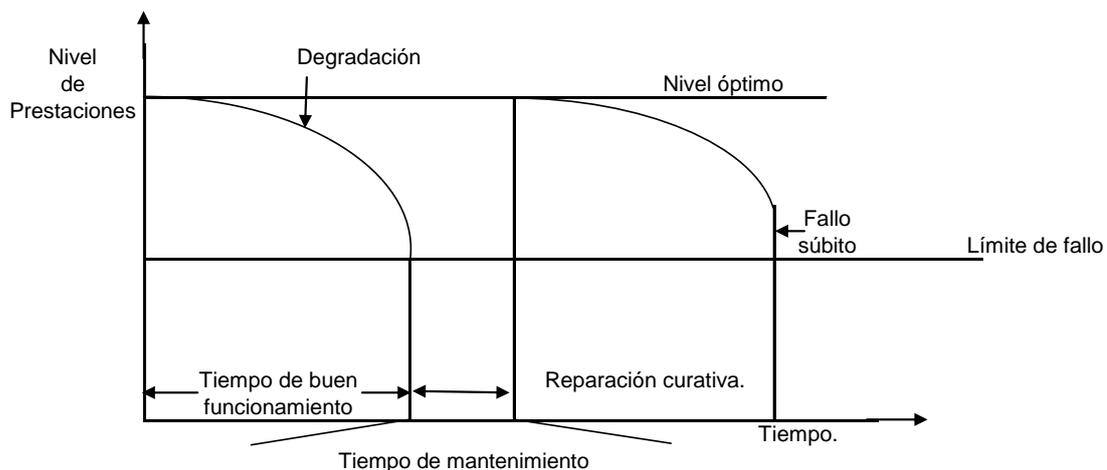


Figura 2.1: Implementación del mantenimiento correctivo (Macián et al., 2000).

### 2.1.2.2.- Mantenimiento preventivo.

El concepto más utilizado establece que el mantenimiento preventivo, consiste en efectuar las intervenciones en las máquinas o equipos antes que se produzca la avería, a intervalos fijos previamente determinados. Bajo este concepto, el Mantenimiento Preventivo implica realizar ciertas reparaciones, o cambios de componentes o piezas, según intervalos de tiempo, o según determinados criterios prefijados para reducir la probabilidad de avería, fallo o pérdida de rendimiento de un sistema.

Según Navarro y Pastor (1997), el Mantenimiento Preventivo tiene por misión conocer el estado actual, por sistema, de todos los equipos y programar así el mantenimiento correctivo en el momento más oportuno.

Por lo comentado, el mantenimiento preventivo tiene como objetivo evitar el fallo por medio de inspecciones e intervenciones de forma periódica o por el conocimiento de la condición o estado del componente. Por lo tanto, podemos dividir el mantenimiento preventivo en dos categorías:

1. Mantenimiento Preventivo por Tiempo.
2. Mantenimiento Preventivo por Condición.

#### **2.1.2.2.1.- Mantenimiento preventivo por tiempo.**

Como se ha indicado anteriormente, el mantenimiento preventivo por tiempo, es el que se lleva a cabo de forma periódica, con intervalos de tiempo definidos, independientemente del conocimiento del estado del componente. La utilización efectiva de estas acciones preventivas, supone la necesidad de conocer o estimar el comportamiento del equipo en el tiempo, para programar así la periodicidad de las tareas. Esto supone, en primer caso, estudiar las recomendaciones del fabricante, para estimar los posibles tiempos de inspección. Por lo tanto, la principal dificultad de este tipo de mantenimiento, es determinar de forma correcta los intervalos de inspección. Sólo se cuenta con una estimación en función de:

- Las recomendaciones del fabricante en primer caso.
- Los históricos de intervenciones anteriores.
- Experiencia por reparaciones correctivas.
- Características propias de la máquina y criticidad de la misma en el proceso.

A continuación, se muestra en la figura (2.2) las inspecciones preventivas realizadas a un equipo cuya ley de degradación se desconoce. Aquí es necesario realizar inspecciones a periodos frecuentes para saber el nivel de degradación en función del tiempo.

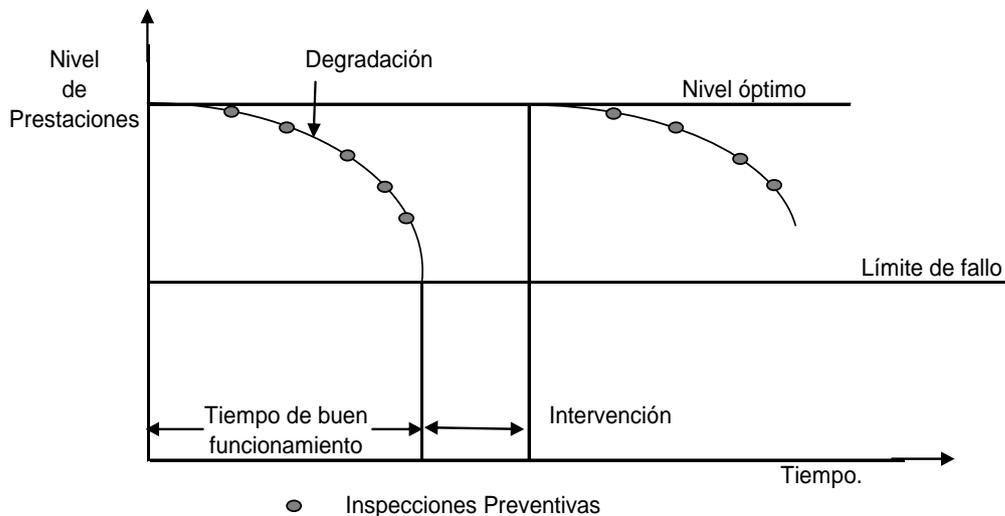


Figura 2.2: Implementación del mantenimiento preventivo por tiempo con inspecciones frecuentes (Macián et al., 2000).

En esta otra (figura 2.3) podemos observar que una intervención anticipada nos generará una pérdida de utilidad del componente. En contra parte, una planificación para una intervención tardía correríamos el riesgo de un fallo súbito (ver capítulo 6).

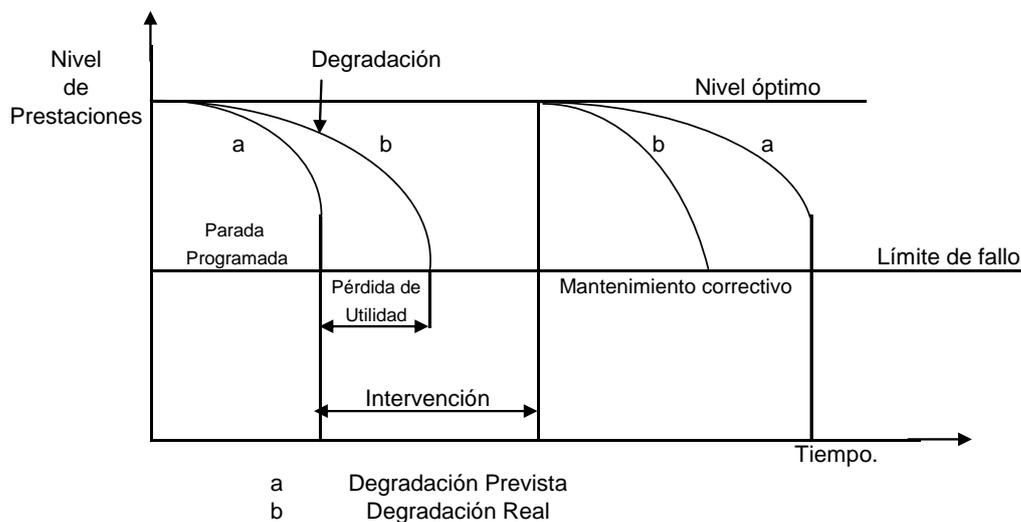


Figura 2.3: Implementación del mantenimiento preventivo con intervención sistemática (Macián et al., 2000).

Estimada la degradación del componente, se pueden establecer los plazos de ejecución del mantenimiento. Estos plazos pueden ser:

- En tiempo absoluto: el plazo se establece según un calendario.
- En tiempo relativo: el plazo se establece contando las unidades de uso del equipo a partir del nivel de funcionamiento óptimo.

### **Desventajas del mantenimiento preventivo por tiempo.**

El Mantenimiento Preventivo por Tiempo presenta las siguientes desventajas:

- Costes muy elevados por la gran cantidad de intervenciones innecesarias, toda vez que los componentes o equipos están en buenas condiciones.
- Es insegura porque la necesidad de reparar sólo se pone de manifiesto desmontando la máquina y revisando sus componentes. Si un fallo grave no se observa por simple inspección, el daño será irremediable y la parada inminente.
- Es imprecisa, porque sin utilizar medios que permitan evaluar la condición real de la máquina, y sin afectar su normal funcionamiento, se desmontan y revisan componentes en perfecto estado, en tanto que otras que corren peligro de avería puede no ser tenida en cuenta.
- Crecimiento desmesurado de la oficina de programación y aumento de la burocracia, administración y control en detrimento del personal especialista.
- Desconexión de los planes de mantenimiento con la marcha real de las instalaciones productivas.

### **Ventajas del mantenimiento preventivo por tiempo.**

Este tipo de mantenimiento se puede aplicar, efectivamente, en aquellos casos en que las actividades preventivas supongan un menor coste que el hecho de permitir que se produzca una avería y efectuar un mantenimiento correctivo. Bajo este criterio las ventajas de este tipo de mantenimiento son:

- Confiabilidad. Los equipos operan en mejores condiciones de seguridad que cuando se emplea el mantenimiento correctivo, ya que se conoce su estado por la inspección y sus condiciones de funcionamiento.
- Mayor duración de los equipos e instalaciones, siempre que se tenga estimado el tiempo medio entre fallos (MTBF. ver indicadores).
- Disminución del tiempo muerto, tiempo de parada de equipos o máquinas.
- Disminución de existencias en almacén y, por lo tanto sus costos, puesto que se ajustan los repuestos de mayor y menor consumo.
- Uniformidad en la carga de trabajo para el personal de Mantenimiento debido a una programación de actividades.
- Menor costo de las reparaciones.

### **Fases del mantenimiento preventivo por tiempo.**

Las fases del mantenimiento preventivo por tiempo son:

- Inventario técnico, con manuales, planos, características de cada equipo.
- Desarrollo de códigos de identificación de componentes.
- Listados de trabajos a efectuar periódicamente.
- Control de frecuencias, indicación exacta de la fecha a efectuar el trabajo.
- Registro de reparaciones, repuestos y costos que ayuden a planificar.

#### **2.1.2.2.2.- Mantenimiento preventivo por condición.**

Es el que se lleva a cabo tras comprobar el estado del componente. El Mantenimiento Preventivo por Condición necesita de un sistema de diagnóstico para la evaluación del deterioro o degradación del componente o sistema. El conjunto de actividades encaminadas a medir el nivel de deterioro o degradación se conoce como Mantenimiento Predictivo.

#### **2.1.2.3.- Mantenimiento predictivo.**

Es el conjunto de actividades o tareas dirigidas a diagnosticar el nivel de deterioro o degradación de un componente o sistema. Para ello se recurre a determinadas técnicas que permiten la realización de mediciones de parámetros críticos o de control en las máquinas. Las mediciones se comparan con los patrones o firmas de buen funcionamiento definidos por el fabricante o por el Departamento de Mantenimiento, para de esta manera detectar las variaciones y tomar las acciones preventivas que sean necesarias.

Para Wonsang (1993), el mantenimiento predictivo, consiste en la monitorización del estado de la máquina de forma continua o discontinua, mediante la captación de señales (parámetros) que sufren una modificación de su valor o magnitud en función de la gravedad del fallo.

Según Olmeda (2003), el mantenimiento predictivo o mantenimiento preventivo por condición, es el que se realiza en base a un deterioro significativo de un equipo, señalado por la variación de uno o más parámetros críticos del funcionamiento o rendimiento de dicha máquina.

Entonces, el mantenimiento predictivo, una metodología que tiene como objetivo final asegurar el correcto funcionamiento de las máquinas a través de la vigilancia de

los niveles indicadores sin necesidad de recurrir a desmontajes y revisiones periódicas, es decir, a no desperdiciar mano de obra y materiales en revisiones preventivas, si realmente no son necesarias. Como se observa en la figura 2.4, se capta el nivel de degradación del componente hasta un límite donde es necesaria la intervención.

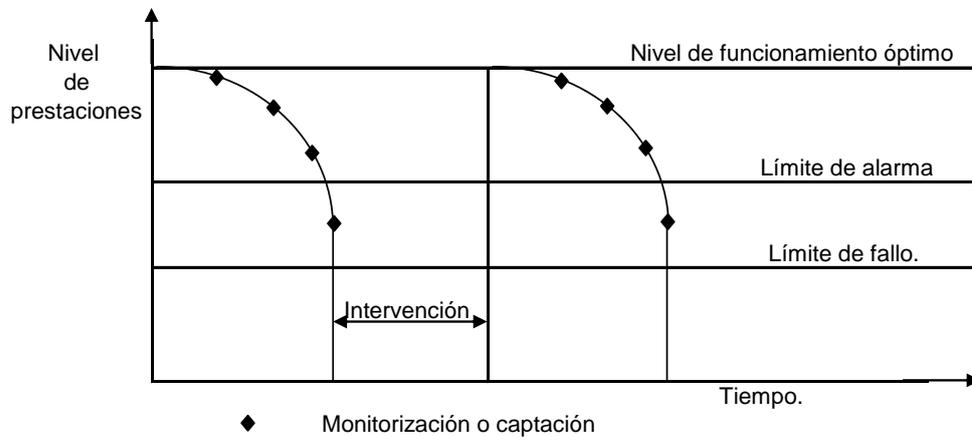


Figura 2.4: Implementación del mantenimiento predictivo por monitorización discontinua (Macián et al., 2000).

En los últimos años, este concepto se ha implantado como filosofía de mantenimiento en las grandes y medianas empresas, dada la complejidad, los costes de los sistemas o equipos y las pérdidas de producción que se pueden producir por la parada de estos.

#### 2.1.2.3.1.- Etapas o fases del mantenimiento predictivo.

Las etapas fundamentales en las que se sustenta el mantenimiento predictivo son:

- Mediciones. Consiste en el proceso de monitorizar los parámetros críticos de funcionamiento del sistema o máquina.
- Análisis. Es la comparación de los valores obtenidos de las monitorizaciones con los valores considerados normales (firmas de buen funcionamiento), es decir, es la determinación del fallo.
- Diagnóstico. Es la determinación de la causa probable que origina el fallo o fallos. El diagnóstico lo podríamos definir también como un estudio de los síntomas que llevan a la detección y aislamiento de las causas de un fallo, que se presenta normalmente como una disminución de las prestaciones. El proceso de diagnóstico consiste primero, en la detección e identificación de los síntomas originados por los fallos (análisis), y segundo, en la identificación del fallo mediante la evaluación de dichos síntomas, siendo conocida esta relación causa-efecto como correlación Síntoma-Fallo. Por lo tanto, la base del

diagnóstico es la relación entre las manifestaciones externas cuantificables y los mecanismos de los fallos de los componentes o sistemas.

- Corrección. Consiste en la reparación en sí.

#### 2.1.2.3.2.- Categorías del mantenimiento predictivo.

El mantenimiento predictivo se divide en dos categorías:

- **Mantenimiento predictivo continuo.** Es aquel donde las condiciones o parámetros indicadores del componente se monitorizan constantemente durante el funcionamiento de la máquina.
- **Mantenimiento predictivo por tiempo.** Es aquel donde las condiciones del componente se monitorizan a intervalos de tiempo programados o preestablecidos.

#### 2.1.2.3.3.- Técnicas de monitorización para el diagnóstico.

Gracias a las modernas tecnologías, existe una serie de métodos o técnicas no intrusivas, que permiten la medición y evaluación de las condiciones de la máquina o componente sin afectar el normal funcionamiento (Robert y James, 1993). Entre las técnicas de evaluación o diagnóstico para Mantenimiento Predictivo están:

- Emisiones acústicas y reconocimiento de sonidos.
- Monitorización de temperaturas.
- Monitorización de corrosión.
- Monitorización de vibraciones.
- Monitorización de fluidos.
- Monitorización de presiones.
- Monitorización de las prestaciones.

**Emisiones acústicas y reconocimiento de sonidos.** Consiste en monitorizar el nivel de ruido emitido por un equipo en funcionamiento para diagnosticar anomalías a partir del espectro acústico. Emplean para ello los sonómetros que muestran el nivel de presión sonora instantáneo en decibelios (dB), lo que normalmente se conoce como nivel de sonido (Sexto, 2000; Ruiz, 2003).

**Monitorización de temperaturas.** Por medio de la medición de temperaturas es posible realizar un diagnóstico del estado de un componente o sistema (Hambright y Benson, 1997). Hoy día se han propuesto técnicas de Termografía Infrarroja para el diagnóstico de fallos en máquinas térmicas (Peralta, 2001). La Termografía Infrarroja,

es una técnica que permite medir y visualizar a distancia, con precisión y sin ningún tipo de contacto, las temperaturas de las superficies. Esta técnica se basa en convertir las mediciones de la radiación infrarroja en medición de temperatura. Esto se logra midiendo la radiación emitida en la porción infrarroja del espectro electromagnético desde la superficie del objeto, para posteriormente convertir estas mediciones en señales eléctricas cuantificables.

**Monitorización de la corrosión.** Técnica que permite evaluar el estado de oxidación de los componentes de estructuras y máquinas. Esta técnica se fundamenta en monitorizar la variación de la impedancia electroquímica que produce la corrosión en los materiales (metales) que componen el sistema (Martínez, 2002).

El proceso de monitorización consiste en la instalación de sensores en determinados puntos de la máquina, que van conectados a un equipo de impedancia electroquímica. Esto permite que por diversos canales se pueda estar monitorizando, en tiempo real, el fenómeno de corrosión en cuanto a velocidad y en cuanto al mecanismo (Pérez, 2004).

**Monitorización de vibraciones.** Es una de las técnicas más empleadas, dada la facilidad de instalación de los sensores así como de la interpretación de los resultados. Consiste en adquirir la señal de los movimientos oscilatorios de sistemas rotatorios o alternativos, para luego a partir del espectro en frecuencias evaluar el estado del mismo (Barilá, 1998; Olmeda, 2003). El análisis de vibraciones es también una técnica utilizada para el diagnóstico de la mayor parte de los problemas electromecánicos.

Para evaluar el espectro de frecuencias se emplean analizadores de espectro FFT (Transformada Rápida de Fourier) que presentan, en tiempo real, los datos dinámicos de las ondas.

**Monitorización de fluidos.** Es medir la cantidad de caudal de fluido que circula por un sistema, como también realizar el análisis de los lubricantes usados (Fygueroa 1994; Ontiveros, 1995; Tormos, 2002).

Las técnicas de análisis de lubricantes es una de las más utilizadas. Se clasifican según su finalidad en: técnicas para cuantificar el contenido de partículas de desgaste, técnicas para cuantificar la contaminación presente en el aceite y técnicas para medir el grado de degradación.

**Monitorización de presiones.** Por medio de manómetros o barómetros es posible medir las presiones de funcionamiento de recipientes y máquinas. Estas técnicas de monitorización de la presión, están empezando a ser muy utilizadas en los equipos que poseen el sistema cilindro-pistón, como motores de combustión o compresores alternativos, donde la presión del cilindro se puede representar en forma de una curva cerrada respecto al volumen barrido por el pistón (P-V), o de una curva abierta, respecto al ángulo de cigüeñal (P- $\alpha$ ) (Macián, 2002). La curva P-V sirve para calcular la potencia y hacer un análisis de la eficiencia de la máquina alternativa, mediante la

evaluación de la condición operativa por la comparación con los parámetros nominales o de diseño.

**Monitorización de las prestaciones.** Consiste en monitorizar las funciones principales para la cual fue diseñada la máquina, para saber si su nivel de operación es eficiente y económicamente rentable. Por ejemplo, monitorizar la potencia y el par de un eje de salida de un motor.

**Tratamiento de señales para Mantenimiento Predictivo.** Una vez monitorizadas las señales a partir del captador, estas recibirán un tratamiento o proceso de conversión eléctrica, para que puedan ser utilizadas electrónicamente por el ordenador. Este tratamiento se realiza mediante un convertidor (analógico- digital) que permitirá enviar la señal digitalizada a un ordenador, para su procesamiento, y luego este presentarla al operador. Los diagnósticos lo puede realizar el mismo ordenador a partir de la implementación de un Sistema Experto (Marc y Yvera, 1989; Lerma, 2000).

#### **2.1.2.3.4.- Ventajas del mantenimiento predictivo.**

Dada la mayor cantidad de información que proporciona este tipo de mantenimiento, más la rapidez con que se envía la información a los centros de control, supera cualquier otro tipo de mantenimiento preventivo. Entre las ventajas de este tipo de mantenimiento están:

- Detectar precozmente e identificar causas de fallos, sin necesidad de parar o desmontar la máquina.
- Seguir la evaluación de la causa del fallo hasta que sea realmente peligrosa. Esto proporciona una valiosa información del estado del componente, permitiendo aumentar o disminuir como sea el caso, las frecuencias de inspección.
- Programar tanto el suministro de piezas como de mano de obra.
- Disminuir el tiempo de reparación (aumentar la mantenibilidad), debido a que se tiene identificada la avería y los componentes que están en fallo.
- Programar la parada para mantenimiento correctivo coincidente con las paradas rutinarias del proceso de producción.
- Reducir costes e incrementar la producción.
- Evitar fallos repetitivos identificando y corrigiendo su causa.

Los aspectos que condicionan la eficacia y la rentabilidad de este tipo de mantenimiento son:

- Procesamiento y tratamiento adecuado de las señales de los parámetros críticos.
- Rápida disponibilidad de resultados necesarios para la toma de decisiones.

#### **2.1.2.3.5.- Desventajas del mantenimiento predictivo.**

La mayor limitación de este tipo de mantenimiento es el coste de los sistemas de adquisición de datos y de procesamiento para la evaluación del estado de degradación. Además de esta desventaja económica posee otras como:

- Generación de gran cantidad de información y gestión de la misma.
- Limitación en el estado actual de estas técnicas para algunos tipos de fallos.
- Necesidad de personal altamente especializado en el uso de estas técnicas.
- Para cada componente o sistema, es necesaria la instalación de equipos de medidas centralizados en una estación de seguimiento y control.

Otros de los inconvenientes del mantenimiento predictivo es que se deben definir los límites de: funcionamiento normal (baja probabilidad de fallo), de funcionamiento en estado de alerta (probabilidad media de fallo) y funcionamiento en estado de alarma (altísima probabilidad de fallo). Por lo dicho anteriormente, muchos parámetros monitorizados no manifiestan de forma precisa la presencia del fallo, convirtiéndose este inconveniente en un problema difuso (Chacón, 2001).

#### **2.1.2.4.- Mantenimiento modificativo.**

Es el que aglomera todas las acciones complementarias del mantenimiento que optimizan los resultados de éste, como pueden ser: trabajos de mejoras y modificación, ampliaciones, renovación y construcción de equipos, participación en programas de investigación, asesoría técnica, rediseños, puesta a punto de maquinas nuevas, estudios de viabilidad, acoplación de nuevos accesorios, modernización e instalación de nuevos equipos.

Este tipo de mantenimiento implica una acción de ingeniería en vez de una de mantenimiento, pero que usualmente es parte de las responsabilidades del Departamento de Mantenimiento. Esta política es muy utilizada en áreas de alto coste de mantenimiento debido a su mal diseño o porque el sistema esta siendo utilizado fuera de sus especificaciones técnicas (Kelly y Harris, 1997).

#### **2.1.3.- Definición y clasificación de los fallos.**

El fallo se define como el suceso por el cual un equipo o sistema disminuye o cesa en su capacidad de cumplir su función dentro de unos límites de actuación, excluyendo de la definición el cese voluntario de su función para realizar

mantenimiento o cualquier otra actividad programada. Como se ha definido en los apartados anteriores, la finalidad del mantenimiento es evitar, prevenir o corregir los fallos que se originan en las máquinas.

Los fallos se pueden manifestar de diferentes formas como:

**Según la frecuencia de aparición:**

- Fallos intermitentes: son los que se producen como la interrupción del funcionamiento del componente durante un intervalo de tiempo breve, volviendo a su funcionamiento de forma inmediata.
- Fallos Permanentes: son los que producen la interrupción total e indefinida de la función del componente o sistema, volviendo esta a su estado operativo mediante una reparación correctiva.

**Según la intensidad:**

- Fallos totales: son los que producen el paro total del componente.
- Fallos parciales. Son aquellos que producen una reducción de la capacidad del equipo, es decir, pérdida de prestaciones.

**Según la velocidad de aparición:**

- Fallos súbitos: su aparición es rápida, por lo que es muy difícil pronosticarlos y monitorizarlos.
- Fallos graduales: son los que disminuyen de forma progresiva la función del componente siendo fácilmente monitorizables para el diagnóstico y predicción.

**Según el riesgo sobre personas o equipos:**

- Fallos peligrosos: son aquellos que implican riesgos sobre personas o equipos indispensables.
- Fallos no peligrosos: son fallos que no implican ningún riesgo grave.

**Según la rapidez e intensidad de aparición:**

- Fallos por degradación: son los fallos que aparecen de forma gradual, produciendo una pérdida parcial de la función del componente.
- Fallos catastróficos: son aquellos de aparición súbita y total.

### Según las causas que lo originen:

- Fallos por envejecimiento: son los que se originan por el proceso de degradación natural en el tiempo, ya sea por el uso o por condiciones ambientales (Ver modelos de vida acelerada). Estos pueden comenzar en diferentes etapas de la vida del componente.
- Fallos por mal uso: son aquellos que se originan por la aplicación de esfuerzos superiores a la capacidad o resistencia de los componentes (ver indisponibilidad por errores humanos y fallos aleatorios).
- Fallos por debilidad propia: son fallos atribuibles a deficiencias en el diseño del componente o defectos de fabricación (ver fallos infantiles).

### Según la dependencia con otros fallos:

- Fallo independiente: el fallo de un componente no afecta a otro.
- Fallos dependientes: el fallo de un componente provoca fallo en otro.

#### 2.1.3.1.- Fallos en la vida de un componente.

Los fallos pueden aparecer en diferentes periodos a lo largo de la vida de un componente, representadas cada una de ellas por la tasa de fallos ( $\lambda$  o  $h$ ). La tasa de fallos  $h$  se define como el número de componentes que han fallado en un intervalo de tiempo dado, respecto al número de componentes que funcionan correctamente desde el principio de ese tiempo considerado.

$$h(t) = [n_i(t)/N_i(t)]/\Delta t. = f(t)/R(t).$$

Donde:

$n_i(t)$  = número de piezas que fallan durante el  $\Delta t$  hasta  $t$ .

$N_i(t)$  = números de piezas en funcionamiento en  $t$ .

$f(t)$  = Densidad de probabilidad de fallo.

$R(t)$  = fiabilidad en  $t$ .

Las etapas de ocurrencia de fallos a lo largo de la vida de un componente son:

- **Fallos infantiles:** son aquellos que ocurren en la etapa inicial de funcionamiento de un componente, se originan por deficiencias del diseño, manufactura o montaje. Para evitar este tipo de fallos es necesario mejorar la calidad del proceso de fabricación así como aumentar el factor de seguridad del

componente. La tasa de fallo de este tipo de avería es decreciente con respecto al tiempo, desde el inicio de funcionamiento del componente.

- **Fallos aleatorios:** son aquellos que tienen una aparición aleatoria en el tiempo, se originan por variaciones en las condiciones de funcionamiento, desgaste y condiciones ambientales (favorables o adversas), es decir, componentes que están sometidos a sollicitaciones o sobrecargas que superen el nivel de resistencia. Para evitarlos, es necesario también aumentar el factor de seguridad y el control sobre las restricciones en el rango de operación. En este caso, la tasa de fallo  $\lambda$  es ligeramente horizontal y creciente para componentes mecánicos, y completamente horizontal para componentes eléctricos, es decir, independiente del tiempo.
- **Fallos dependientes del tiempo o por envejecimiento:** son los que se presentan por la disminución de la resistencia o deterioro natural del componente, a causa de la utilización a lo largo de su vida o por superación de la vida prevista por el diseñador. La tasa de fallos es creciente en relación con el tiempo.

La tasa de fallos en función del tiempo, se puede representar por la curva obtenida por la superposición de los tres tipos de fallos, conocida como curva de la bañera (figura 2.5).

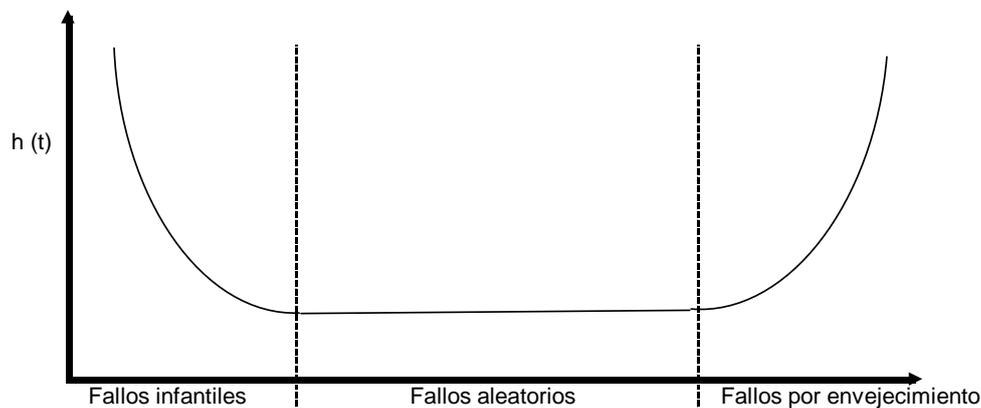


Figura 2.5: Curva de la bañera.

### 2.1.3.2.- Curvas de distribución de fallos:

En la formulación de los modelos de fiabilidad, es necesario aplicar algún tipo de distribución que se adapte o ajuste a los datos de la función considerada y del tipo de fenómeno que se desea analizar.

### 2.1.3.2.1.- Distribuciones discretas.

Las distribuciones discretas se caracterizan porque los valores de las variables no pueden subdividirse y no pueden mezclarse unos con otros, es decir, están representados por números enteros. Las más utilizadas son:

- Distribución Binomial: También conocida como distribución de Bernulli. Esta se relaciona con la probabilidad de obtener un número especificado de éxitos en un conjunto finito de pruebas independientes, donde en cada una se identifica la probabilidad de éxito como (Creus; Martorell, 1991):

$$(R + q)^n = \sum_{x=0}^n \binom{n}{x} R^x q^{n-x}$$

Donde:

R = probabilidad de éxito.

q = probabilidad de fracaso.

n = tamaño de la muestra.

$$\binom{n}{x} = n! / [x!(n-x)!]$$

- Distribución de Poisson: muy empleada para describir el número de fallos de un sistema que consta de varios componentes, con una probabilidad de fallo individual y constante, por componente.

$$f(x) = [(nf)^x / x!].e^{-nf}$$

Donde:

f = probabilidad de defectos o fallos.

x = número de defectos.

f = tanto por uno de fallos.

n = tamaño de la muestra.

nf = número medio de defectos.

**2.1.3.2.2.- Distribuciones continuas:**

Estas pueden estar representadas por números enteros y decimales, pudiendo subdividirse y mezclarse los valores de las variables: las más conocidas son:

- **Distribución Exponencial:** su principal característica es que su tasa de fallos,  $\lambda(t)$  o  $h(t)$ , es constante e independiente del tiempo. Muy utilizada cuando el tiempo transcurrido entre dos fallos consecutivos en un sistema complejo obedece a una distribución exponencial. Se aplica con frecuencia a los análisis de fallos en sistemas electrónicos (Creus, 1991; Llatas, 2004). La fiabilidad bajo esta distribución es:

$$R(t) = e^{-\int_0^t \lambda(t) dt}$$

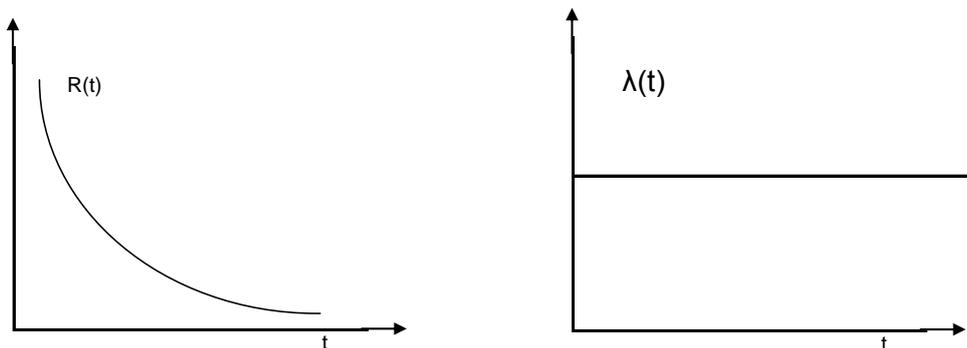


Figura 2.6: Representación de las funciones de la distribuciones exponencial.

- **Distribución de Weibull:** esta distribución se debe a Weibull, investigador sueco que la propuso en 1939. Puede representar a un gran número de fenómenos físicos, entre ellos degradaciones, envejecimientos, etc. Se ajusta bien a cualquier distribución de fallos gracias a sus tres parámetros  $\beta$ ,  $\eta$  y  $\gamma$  (Martorell; Creus, 1991; Usher, 1996). Las formulaciones de la tasa de fallos y fiabilidad de Weibull son:

$$\lambda(t) = (\beta/\eta)[(t - \gamma)/\eta]^{\beta-1}$$

$$R(t) = e^{-\{(t - \gamma)/\eta\}^\beta}$$

- $(\beta)$  = parámetro de forma que describe el grado de variación de la tasas de fallos (adimensional). Para este parámetro, dependiendo del valor que

adopte, representará una tasa de fallos infantil ( $\beta < 1$ ), tasa de fallos aleatorios ( $\beta = 1$ ) y tasa de fallos por degradación o envejecimiento ( $\beta > 1$ ). En el caso de que ( $\beta = 3$ ) tendrá un comportamiento normal.

- ( $\eta$ ) = Parámetro de escala (tiempo).
- ( $\gamma$ ) = Parámetro de origen (tiempo), indica el momento del inicio de los fallos.

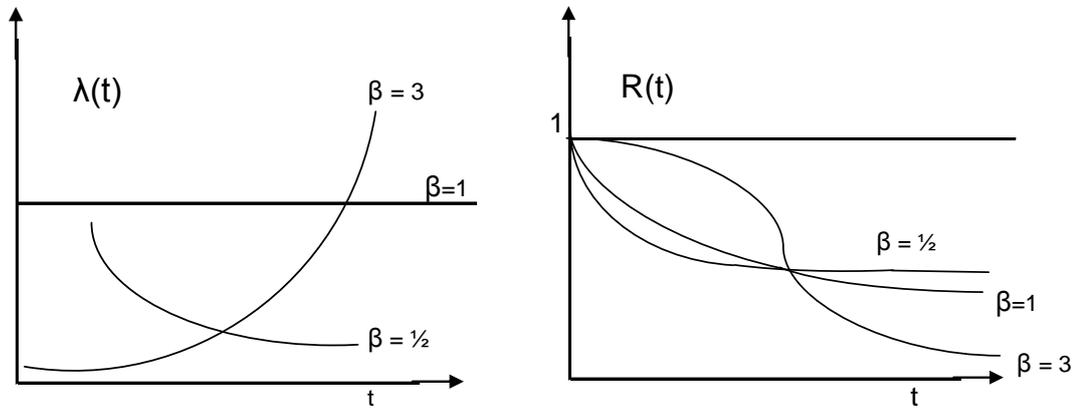


Figura 2.7: Representación de las funciones típicas de la distribución de Weibull.

- Distribución Normal: esta distribución de fallos es de muy fácil aplicación, pero no es muy utilizada por no ajustarse a los casos reales. La expresiones de la fiabilidad y probabilidad de densidad de fallos son:

$$R(t) = \left\{ \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \right\} \cdot e^{-[(t-\mu)^2/(2\sigma^2)]}$$

$$f(t) = \left\{ \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \right\} e^{-1/2[(t-\mu)/\sigma]^2}$$

Donde:

$\mu$  = al valor medio de los datos.

$\sigma$  = desviación típica.

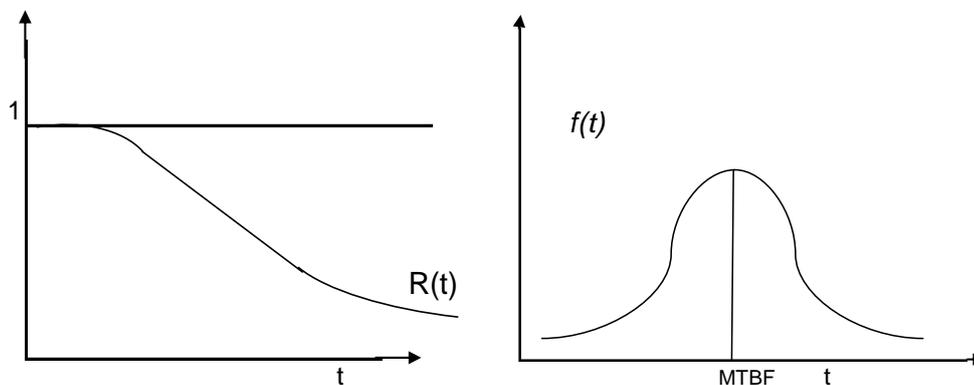


Figura 2.8: Representación de las curvas típicas de la distribución normal.

- Distribución Log-Normal. Esta distribución es usualmente utilizada para representar tiempos de reparación de fallos en componentes, y para caracterizar fallos iniciales en la primera fase de vida y de las variaciones de fiabilidad del mismo.

$$R(t) = \left\{ \frac{1}{\sigma(2\pi)^{1/2}} \right\} \cdot e^{-\frac{(\ln x - \mu)^2}{2\sigma^2}}$$

Donde:  $\sigma$  y  $\mu$  son la desviación estándar del ln de los datos y media aritmética del ln de los mismos, respectivamente.

## 2.1.4.- Gestión del mantenimiento.

Es la adopción de las medidas y la realización de las acciones necesarias para el buen funcionamiento y desarrollo de la función mantenimiento. Para Amendola (2003), la función mantenimiento es la planificación y organización de todas las actividades necesarias para incrementar la confiabilidad y disponibilidad de todos los equipos a un coste razonable, así como su inclusión e interrelación con las otras funciones técnicas y operativas de la empresa. La gestión del mantenimiento establece dos niveles:

- Correspondiente a la dirección. Consiste en la fijación de las políticas de mantenimiento e indicadores para la valoración.
- Correspondiente a los responsables del mantenimiento. Consiste en la planificación organizada y en la toma de decisiones concretas, para la selección de las acciones de mantenimiento necesarias para cumplir con los objetivos de la implantación y la organización. (sobre estos niveles se ahonda en los apartados 2.1.6 y 2.1.6.1)

### 2.1.4.1.- Políticas de mantenimiento.

Las políticas de mantenimiento son la definición de los objetivos que se desean alcanzar, ya sean: técnicos, económicos, de seguridad y humanos, para el mantenimiento de un determinado grupo de equipos en una planta. Consiste también en seleccionar las formas de actuación sobre los equipos, en función de esos objetivos. Entre estas formas de actuación podemos mencionar las activas y las reactivas, (Azadivar, 1998; Azadivar y Tompkins, 1999; Knights, 2004):

las activas:

- Mantenimiento preventivo.

- Predictivo
- De oportunidad.
- De optimización.

Las reactivas:

- Mantenimiento correctivo.

#### **2.1.4.2.- Indicadores de mantenimiento.**

El objetivo principal de la Gestión del Mantenimiento, es aumentar tanto la disposición para que estén en buen funcionamiento los componentes o sistemas de una planta, al menor coste posible. Para lograr este objetivo, las empresas como los Departamentos de Mantenimiento utilizan indicadores como medio para evaluar la efectividad de las acciones de mantenimiento empleadas y su gestión.

Para Boucly (1998), de la Asociación Francesa de Consejeros de Dirección, los indicadores de mantenimiento constituyen expresiones razonables y significativas del valor de dos elementos de la gestión o del funcionamiento de las empresas: ámbito financiero y ámbito de mantenimiento.

En el ámbito financiero, se precisa tanto de los valores normales como de los límites que resultaría arriesgado sobrepasar. El ámbito de mantenimiento constituye una herramienta aplicable a esta área específica. Entre estos últimos podemos mencionar:

##### **Indicadores para el estudio de coste de mantenimiento.**

- Coste de mantenimiento / Valores de activos conservados.
- Coste de mantenimiento / Cifra de Negocios.
- Coste de mantenimiento / Valor añadido.
- Número de horas dedicadas a diversos tipos de mantenimiento / Número total de horas de mantenimiento.

Otros indicadores han sido descritos por Luís Janssens, presidente de la Asociación Belga de Ingenieros y Jefes de Mantenimiento, entre los cuales están (Boucly, 1998):

##### **Indicadores económicos.**

- Coste Total de Mantenimiento / Valor de inmovilización bruto.
- Valor total de existencias de recambio / Valor de inmovilizado bruto.

- Coste de subcontratación / Coste total de mantenimiento.
- Coste de materias consumidas / Coste de la mano de obra.

### **Indicadores técnicos.**

- Número de horas de parada para mantenimiento no previsto / Número total de horas de funcionamiento.
- Número de horas de mano de obra por reparación / Número de total de horas de mano de obra para reparación.

### **Índices de optimización del coste global.**

- Coste unitario del mantenimiento y de falta de disponibilidad / Coste unitario medio de compra, de mantenimiento y de falta de disponibilidad.

Para Navarro y Pastor (1997), dependiendo de cada tipo de empresa y cada situación, conviene desarrollar los indicadores propios que analicen el alcance de los objetivos fijados. Según los autores, los indicadores se clasifican por una diferencia entre el control y los datos necesarios para la Dirección de Mantenimiento y los necesarios para la Gestión Operativa:

### **Indicadores para la dirección de mantenimiento.**

Esta posee una orientación económico técnica cuya información debe reflejar aspectos relacionados con las actividades, recursos y resultados:

- Información sobre las actividades (proceso): la finalidad es conocer, de las actividades de mantenimiento, el número de intervenciones y duración de las mismas. Como ejemplo: total de horas trabajadas y el total de trabajos realizados que indica el grado de actividad para el periodo.
- Información sobre los resultados: La dirección debe conocer el estado de avance de los objetivos parciales fijados, como de los generales. Dentro de los objetivos generales podemos considerar la disponibilidad media para cada línea de producción, tiempos medios de respuestas de averías (**Mean Time to Repair**) y horas de paro para mantenimiento.
- Información sobre los recursos: son los relacionados con la mano de obra empleada, materiales y costes. De la mano de obra deben diferenciarse las horas empleadas por el personal de plantilla y el personal subcontratado. Para los

materiales interesa el coste de los materiales utilizados en labores de mantenimiento y materiales comprados por no disponer en el almacén.

### **Indicadores para la gestión operativa.**

Estos indicadores tratan de facilitar a los responsables de la ejecución del mantenimiento, de datos prácticos para poder realizar su gestión de una manera eficaz. La información es muy importante en este nivel, para planificar las actividades correctivas y preventivas. Esta información está basada en datos técnicos de históricos de intervenciones anteriores.

- Información sobre las actividades (proceso). Aquí interesa conocer las relaciones de intervenciones vs. duración, así como las intervenciones vs. gastos.
- Información sobre los resultados. La información en este aspecto debe ir encaminada a la relación entre las actuaciones y los resultados obtenidos. Es importante tener información sobre los resultados de las reparaciones, la carga de trabajo de cada equipo, etc.
- Información sobre los recursos. Para este nivel operativo es importante conocer en cada momento la carga de trabajo aplicada y los recursos que se están utilizando. Para los recursos humanos, es necesario conocer para cada momento la capacidad de cada equipo, para afrontar las posibles incidencias o reparaciones. Con respecto a los materiales es necesario conocer el consumo o gasto originado por cada incidencia o reparación.

Como indicadores tipo, podemos relacionar los anteriores con los valores más habituales que pueden tomar (Navarro y Pastor, 1997):

- $(\text{Horas de paros por mantenimiento} / \text{Horas de producción realizadas}) \times 100 = 1-3\%$ .
- $(\text{Costes de mantenimiento totales} / \text{Costes de Producción}) \times 100 = 5-6\%$ .
- $(\text{Coste de mantenimiento totales} / \text{Valor inmovilizado bruto}) \times 100 = 4-5\%$ .  
Representa el grado de envejecimiento de la instalación a mantener.
- $(\text{Costes de subcontratación} / \text{Costes totales de mantenimiento}) \times 100 = 20-40\%$ .
- $(\text{Plantilla mantenimiento} / \text{Plantilla total}) \times 100 = 10\%$ .
- $(\text{Técnicos de mantenimiento} / \text{plantilla de mantenimiento}) \times 100 = 10\%$ .
- $(\text{Coste del preventivo} / \text{Costes totales de mantenimiento}) \times 100 = 20\%$ .
- $(\text{Coste de mantenimiento ambiental} / \text{Costes totales de Mantenimiento}) \times 100 = 1-5\%$ .

Salazar (2003), propone otras series de indicadores tales como: los indicadores para el desempeño de la eficiencia y la efectividad, indicadores del desempeño táctico, Indicadores del desempeño funcional, indicadores correspondientes a la planificación y control, indicadores de mantenimiento preventivo, índices de personal e indicadores correspondientes al comportamiento del equipo.

### **2.1.4.3- Indicadores para la gestión y optimización del mantenimiento.**

Los indicadores enumerados son empleados por las Gerencias y Departamentos de Mantenimiento para evaluar el desempeño de las acciones con relación a los objetivos planteados. De los indicadores ya mencionados como la inoperatividad por fallos e inoperatividad por acciones de mantenimiento, se describirán más detalladamente a lo largo del trabajo, pero teniendo un enfoque o punto de vista más probabilista debido a que el interés es su utilización en modelos para la optimización. Amendola (2003) describe una serie de indicadores para la Gestión del Mantenimiento, que otros autores utilizan actualmente para optimizar (Muñoz et al., 1997; Martorell et al., 2000, Martorell et al., 2002; Vaurio, 1995, 1999; Rausand; Shang y Tadikamayya, 1998; Azadivar y Tompkins, 1999; Sánchez, 2000).

Entre estos indicadores de mantenimiento podemos mencionar (Amendola, 2003):

- Tiempo Promedio entre Fallos (Mean Time Between Failure MTBF).
- Tiempo Promedio Para Reparar (Mean Time To Repair).
- Tiempo Promedio para Fallar (Mean Time to Failure).
- Disponibilidad. (se comentará dentro del concepto de fiabilidad junto con el de indisponibilidad)
- Confiabilidad.
- Factor de Servicio.

#### **2.1.4.3.1.- Tiempo promedio entre fallos MTBF (Mean Time Between Failures).**

Tiempo promedio entre fallos o tiempo medio de buen funcionamiento es el parámetro más representativo para la determinación de las leyes estadísticas de fallos. El MTBF indica el intervalo de tiempo donde será más probable que ocurra el fallo una vez que ha sido puesto en servicio el equipo o máquina. Lo dicho anteriormente

implica, que entre más grande sea el valor de este indicador mayor fiabilidad o disponibilidad tendrá el equipo. Una expresión para determinar el MTBF es:

$$\text{MTBF} = \left[ \sum \text{tiempo entre averías} / (\text{n}^\circ \text{ de averías} + 1) \right]$$

Según Wonsang (1993) si se pretende aumentar el MTBF de los equipos es necesario:

- Repararlos correctamente. Una reparación eficaz se debe realizar con repuestos adecuados y una comprobación antes de la puesta en funcionamiento. Aparte de la capacidad profesional del personal, debe disponerse de toda la información técnica histórica del equipo (Chacón, 2001). Una acción del mantenimiento efectiva, le devolverá al componente o sistema cualidades similares a las que tenía cuando este era nuevo.
- Asegurar mediante inspecciones rutinarias en marcha, que las condiciones de trabajos de los componentes o sistemas son las de diseño. También aquellos equipos de seguridad que se encuentran en espera se les deberá hacer pruebas para garantizar su operatividad (Martorell, 1991; Muñoz et al., 1997; Sánchez, 2000).
- Programar las reparaciones con la debida antelación para evitar prisas, trabajos continuados o falta de repuestos.

El MTBF se representa como el punto medio en una curva de densidad de fallos normal.

#### **2.1.4.3.2.- Tiempo promedio para reparar MTTR (Mean Time To Repair).**

Este indicador mide la distribución de tiempo en que un sistema o equipo puede ser devuelto a sus condiciones iniciales de buen funcionamiento, es decir, el tiempo en que se tardaría en reparar el equipo. El tiempo promedio para reparar es un indicador que cuantifica la manteniabilidad, que es la probabilidad de devolver un equipo o sistema a las condiciones de operación óptimas, condicionado a que en un instante de tiempo, este se encuentre en uno de sus estados no operacionales. La manteniabilidad es función del diseño del equipo como estandarización, modularidad, disponibilidad de repuestos, etc.

El tiempo promedio en reparar es un parámetro muy importante, ya que dependiendo del valor que adopte, y de la importancia que tenga para la empresa el hecho de que una máquina se quede parada, se hará un tipo de mantenimiento u otro.

#### **2.1.4.3.3- Tiempo promedio para fallar MTTF (Mean Time to Failure).**

Es el tiempo promedio en que un equipo opera eficientemente sin fallos dentro de un periodo dado, también conocido como tiempo promedio operativo. Regularmente se emplean indistintamente para los análisis el MTBF o MTTF, ya que representa un tiempo medio de operatividad del equipo. Pero la aplicación del (MTTF) como término, es usualmente empleado para representar estadísticamente el instante en que se producirá el fallo una vez que ha sido puesto el equipo en servicio. Con respecto al el MTBF, es más empleado en sistemas que son reparados continuamente después que se produzcan fallos y continúan funcionando. Hay autores que sugieren que el MTBF es la suma del MTTF y el MTTR (McCormick, 1981).

#### **2.1.4.3.4.- Fiabilidad.**

La fiabilidad se define como la probabilidad de que un dispositivo cumpla la función de forma adecuada sin fallos, durante un periodo de tiempo determinado.

Navarro y Pastor (1997) entienden por fiabilidad de una pieza, equipo o sistema a la probabilidad de que este cumpla, sin fallo, una cierta función durante un tiempo dado y bajo unas condiciones determinadas.

También se podría considerar, como la probabilidad que un dispositivo o máquina en espera se ponga en marcha cuando se le necesite, como por ejemplo cohetes y misiles o sistemas de seguridad en plantas nucleares (Martorell et al., 1995; Muñoz et al., 1997).

La fiabilidad es definida también como el grado de confianza que puede concederse a un elemento, ateniéndose a la calidad de los materiales empleados, la perfección con que ha sido labrado, y la multiplicidad y cuidado de los controles y pruebas a que ha sido sometido. Cuando un elemento satisface a todas estas condiciones, se puede tener una seguridad casi absoluta en su capacidad de funcionamiento.

Desde el punto de vista de Creus (1991), para una misión donde no existe posibilidad de reparación, la fiabilidad es la probabilidad de que un equipo trabaje correctamente durante un tiempo determinado y en las condiciones de servicio que encuentre.

En el estudio de la fiabilidad se utilizan diversas funciones temporales, que permiten caracterizar la distribución de los tiempos hasta el fallo. Las funciones más utilizadas son: La función de fiabilidad, La tasa de fallos y la acumulada de fallos (ver apartado 2.1.3.2).

Los estudios de fiabilidad comenzaron a realizarse en los Estados Unidos, cuando los constructores de aeronaves tenían especial preocupación por la seguridad de los aviones, donde la fiabilidad se entendía como la probabilidad de no ocurrencia de fallos que dieran lugar a accidentes. A continuación se definen dos conceptos que cuantifican la fiabilidad:

### **Disponibilidad.**

Es la probabilidad de que un sistema esté operativo o en funcionamiento en un instante de tiempo dado. Y en el caso de que hubiese tenido un fallo, este debió haber sido reparado en un tiempo menor que el máximo permitido para su restauración. La disponibilidad se puede cuantificar como:

$$D = [MTBF/(MTBF + MTTR)]$$

La disponibilidad instantánea o puntual de un componente o equipo se define como la probabilidad de que se encuentre en estado operable en un instante de tiempo. Una magnitud definida a partir de ella es la Indisponibilidad.

### **Indisponibilidad.**

Es la probabilidad de que el sistema o componente se encuentre fuera de servicio o en estado de fallo, por lo tanto, podemos decir que la indisponibilidad es una medida del riesgo. Para Martorell y Doménech (1998) la indisponibilidad se divide en dos categorías:

- la primera relacionada con los fallos aleatorios que en el equipo puedan suceder.
- la segunda debida a acciones de vigilancia y mantenimiento.

En componentes en espera, es posible por medio de la indisponibilidad, estimar cuanto deterioro se le inflinge a un componente como producto de las pruebas de seguridad, es decir, a la vez que se asegura su funcionamiento se recorta la vida del componente (Kim et al., 1993; Uryas'ev y Vallerga, 1993).

Esta magnitud es utilizada en los análisis probabilísticos de seguridad (APS), aplicando la metodología de mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM), para la optimización de las labores de vigilancia y mantenimiento (Vatn et al., 1996; Dekker, 1996). Este parámetro se describe con más detalle en el apartado relativo a los modelos de mantenimiento para la optimización.

#### **2.1.4.3.5- Confiabilidad.**

Los conceptos antes descritos como la fiabilidad, mantenibilidad y disponibilidad junto con la capacidad de que un equipo no produzca en condiciones dadas, incidentes críticos o catastróficos, se denomina seguridad de funcionamiento o confiabilidad.

Este indicador debe darnos la distribución de fallos para uno o más combinaciones de esfuerzos y condiciones ambientes (ver modelos de regresión). Según Amendola (2003) el estudio de la confiabilidad nos permite conocer el comportamiento de los equipos en operación con el fin de:

- Prever y optimizar los recursos humanos y materiales necesarios para el mantenimiento.
- Modificar o diseñar las políticas de mantenimiento a utilizar.
- Calcular instantes óptimos de sustitución económica de equipos.
- Establecer frecuencias óptimas de intervenciones e inspecciones preventivas.

#### **2.1.4.3.6.- Factor de servicio.**

Mide el tiempo efectivo de operación de un equipo durante un periodo determinado. Es una proporción entre el tiempo de operación y el tiempo disponible del equipo.

### **2.1.5.- Los costes.**

El objetivo de la gestión del mantenimiento es optimizar los procedimientos y actuaciones de forma que los objetivos planteados se puedan lograr, con la limitante o condicionante de que la suma de todos los costes relacionado con el mantenimiento y pérdidas de producción para la organización sean mínimos (ver capítulo 6).

#### **2.1.5.1.- Tipos de costes.**

##### **2.1.5.1.1.- Costes relacionados con la organización o empresa.**

Desde un punto de vista global para la organización, los costes se pueden clasificar en:

- Costes variables. Estos tienen las características de ser proporcionales a la producción, mano de obra directa, materiales, repuestos, energía, mantenimiento correctivo y modificativo. Entre los costes variables de mantenimiento podemos tener los de mano de obra y materiales para mantenimiento correctivo.
- Costes fijos. Su característica principal es que son independiente del volumen de producción. Entre estos podemos destacar: mano de obra indirecta, amortización de equipos, locales, mantenimiento preventivo, seguros, alquiler de equipos y máquinas herramientas.

Según Navarro y Pastor (1997) los costes para una organización que deba aplicar acciones de mantenimientos se pueden clasificar en:

- Costes financieros. Estos costes asociados al mantenimiento, se deben tanto al valor de los repuestos del almacén como a las amortizaciones de las máquinas duplicadas para asegurar la producción, es decir, dentro de estos gastos financieros se debe tener en cuenta el coste que supone tener instalaciones o máquinas repetidas para obtener una mayor disponibilidad (ver capítulo 5).
- Costes de fallos. Se refiere al coste de pérdida de beneficio que la empresa soporta por causas relacionadas directamente con el mantenimiento.

#### **2.1.5.1.2.- Costes relacionados con el mantenimiento.**

Según Macián et al. (2000), existen varios tipos de costes de mantenimiento, que han sido propuestos y utilizados dependiendo de las necesidades y objetivos de las empresas. Desde un punto de vista general los clasifica en dos tipos:

- Costes directos de mantenimiento.
- Costes indirectos de mantenimiento

#### **Costes directos de mantenimiento.**

Se refiere a los gastos variables y fijos acumulados, relacionados directamente con el mantenimiento. Entre estos podemos destacar:

- Mano de obra.
- Los generados por los servicios de mantenimiento.
  - Sueldo del personal dirigente de oficina.
  - Alquiler, seguros e impuestos directos.

- Gastos de energía, teléfonos y vehículos de servicio.
- Los de posesión de repuestos, máquinas y herramientas.
  - Tasas de amortización.
  - Evaluación de pérdidas y depreciación de almacenaje.
- Los originados por el consumo de repuestos y materiales.
- Costes de contratos.

El coste directo de mantenimiento es la suma de todos los costes descritos anteriormente.

$$C_{dm} = C_{mo} + C_f + C_c + C_e$$

Donde:

$C_{dm}$  = Coste directo de mantenimiento.

$C_f$  = Costes fijos del servicio de mantenimiento.

$C_c$  = Costes de consumibles (materiales mas recambios).

$C_{mo}$  = Costes de mano de obra.

$C_e$  = Costes por contratación externa.

### **Costes indirectos del mantenimiento.**

Son aquellos que se producen por la parada de la producción ocasionadas por el mantenimiento, cuando se produce una avería o fallo, es decir, costes por paros.

$$C_{im} = T \times T_{pm}$$

Donde:

$C_{im}$  = Coste indirecto.

$T$  = Tasa horaria de parada (€/hora).

$T_{pm}$  = Tiempo de parada de producción por causa del mantenimiento.

### **2.1.5.1.2.- Coste total de mantenimiento.**

El coste total de mantenimiento es la suma de los costes directos y los indirectos, originados por fallos aleatorios como por las actividades de mantenimiento, y tiene un óptimo (figura 2.9) que depende, principalmente, de los tipos de mantenimiento empleados (combinación de tareas), de los medios o recursos invertidos y de la organización como de la gestión del mantenimiento.

$$C_m = C_{dm} + C_{im}$$

Por lo tanto, la suma de todos los costes tanto de mantenimiento y financieros se utilizan para relacionar el gasto y los beneficios que se pueden generar en la empresa.

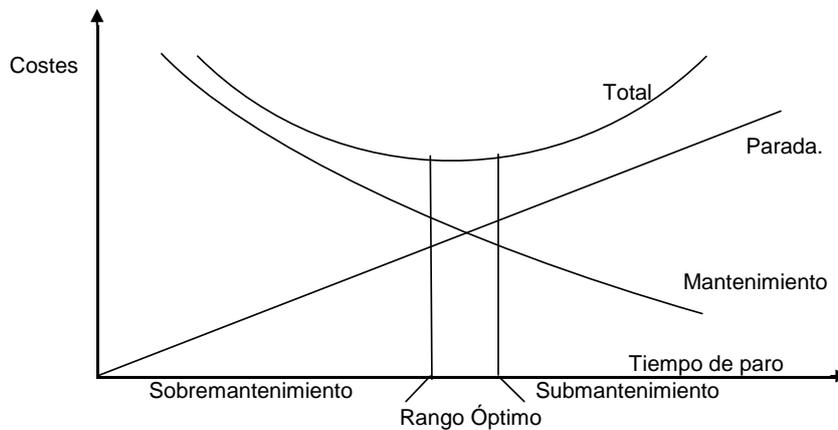


Figura 2.9: Gráfico del Coste total del mantenimiento en función del tiempo de parada de producción por causas del mantenimiento.

### 2.1.6.- Planificación del mantenimiento.

La planificación del mantenimiento es la determinación del nivel óptimo de los recursos tales como trabajadores, repuestos, equipos, espacios y herramientas requeridos para alcanzar el nivel de mantenimiento deseado.

Para determinar el nivel de requerimientos antes mencionado, será indispensable definir o seleccionar los planes de mantenimiento de los equipos, dado que a partir de ellos se determinarán las demás necesidades de mantenimiento en la organización.

Lo primero a realizar en la selección de un plan de mantenimiento, es definir los objetivos que se quieren cumplir o cubrir con la implementación, y estos, como se comentó, tendrán que ser compatibles con los objetivos de la empresa. Los objetivos perseguidos pueden ser:

- Aumentar seguridad.
- Aumentar la vida de los equipos.
- Maximizar la disponibilidad de equipos.
- Disminuir la indisponibilidad de los equipos y por lo tanto pérdidas de producción.
- Reducir costes de mantenimiento.

### **2.1.6.1.- Información necesaria para elaborar un plan.**

Para elaborar un plan de mantenimiento es necesario conocer la siguiente información:

- Factores económicos:
  - Coste de mano de obra y del material.
  - Coste de una parada ya sea planificada o no.
  - Coste de emplear técnicas predictivas y de monitorizado.
- Factores de seguridad:
  - Usuarios y operarios.
  - Componentes equipos y planta.
  - Seguridad en los procesos.
  - Deterioro medio ambiental y disposiciones legales.
- Características de deterioro de los equipos:
  - Tiempo medio entre fallos (ver indicadores).
  - Tiempo y facilidad de reparación (manteniabilidad).
  - Naturaleza del parámetro de fallo y su posible utilización como medio de diagnóstico.

### **2.1.6.2- Selección de un plan de mantenimiento.**

Un plan de mantenimiento a nivel de componente o sistema, se puede definir como la programación de las acciones que pueden ser correctivas, preventivas, predictivas o la combinación de algunas de estas o de todas, para minimizar los periodos de inoperatividad, dentro de unos límites económicos aceptables.

A nivel de planta, consiste en programar todas las actividades de mantenimiento de todos los sistemas y equipos, de forma organizada para cumplir con una serie de objetivos, sin perjudicar los objetivos de la empresa. Según Lazo y Pacheco (1999) para realizar un plan de mantenimiento a nivel de planta, se tiene que considerar las exigencias de mantenimiento o necesidades individuales de cada máquina.

El proceso de selección de un plan de mantenimiento es un problema de costes, ya que como se ha comentado, la utilización de una u otra clase de mantenimiento o la aplicación conjunta de ellos repercutirán en los beneficios, costes, rendimiento y

seguridad de la planta. Por lo tanto, se debe de emplear formas o métodos que busquen un equilibrio óptimo de todos estos factores.

## **2.2.- Modelos y metodología de optimización.**

No resulta fácil determinar si la implementación de una combinación de acciones de mantenimiento son las más idóneas desde el punto de vista de nuestros objetivos. Para superar este problema, muchos autores han desarrollado los modelos de optimización para el mantenimiento. Planteados estos modelos, se aplica una forma de localizar la mejor o mejores soluciones de un posible, y por que no decirlo, casi infinito campo de soluciones. Para ello se han propuesto la utilización de metodologías como la búsqueda tabú (Li-Sheng-Tun et al., 2002; Ouzineb et al., 2008), simulated annealing (Edmund y Alistair, 1998) y los algoritmos genéticos (ver capítulo 4), que emplean, al igual que los anteriores, técnicas metaheurísticas en la búsqueda de la mejor solución (Kanematsu et al., 1990; Chan y Fwa, 1994ab; Kumar y Klefsjö, 1995; Paiton y Campell, 1995; Muñoz, 1997; Martorell, et al 1999; Martorell et al., 2002; Lazo y Pacheco, 1999; Sánchez 2000, Marseguerra y Zio, 2000; Marseguerra et al., 2002; Lapa et al., 2006; Volkanovski et al., 2008). Según Leviting (2006), las técnicas metaheurísticas se basan en un razonamiento artificial, más que en la programación matemática clásica asociada a la programación no lineal y dinámica, con la ventaja que no requieren ninguna información, correspondiendo todos sus puntos visitados a un espacio de solución. Por lo tanto, las técnicas metaheurísticas, que son heurísticas mejoradas, tratan de métodos exploratorios que se usan durante la resolución de problemas, en los cuales, las soluciones se descubren mediante la evaluación del progreso logrado en la búsqueda de un resultado final. Emplean, por lo tanto, un modelo como mecanismo de evaluación.

Antes de entrar en el análisis de los modelos para mantenimiento, es conveniente comentar lo que es un modelo desde el punto de vista del conocimiento.

*“Desde el punto de vista del conocimiento, un modelo es un esquema o descripción mental interior o figurada mediante diagramas, fórmulas matemáticas, reglas lógicas declarativas, etc., que para un determinado conjunto de preguntas, se toma como una representación abstracta de una clase de fenómenos, más o menos hábilmente relacionados dentro de su contexto por un observador y que sirven de soporte para la investigación o la comunicación”, (Chatain,1993).*

Los modelos desarrollados para mantenimiento, como se ha comentado anteriormente, parten de la necesidad de optimizar las acciones de mantenimiento, optimización que implica reducir los tiempos fuera de servicio, tiempos ociosos de operarios y costes de reacondicionamientos. Tienen también la finalidad de tener una metodología donde se puedan representar las probabilidades de ocurrencia de hechos no

deseados y modelar un posible comportamiento futuro, empleando para ellos expresiones matemáticas en función de parámetros estimables (Legát et al., 1996; Hontelez et al., 1996; Sherwin, 1996; Dekker, 1996; Chelbi, 1999). Estos parámetros, pueden ser estimados por medios de los ensayos de durabilidad y fiabilidad realizados por el fabricante. Los ensayos de durabilidad y fiabilidad, pueden realizarse también de forma acelerada a fin de reducir el tiempo del experimento, extrapolando luego hacia las condiciones nominales de funcionamiento. Los fabricantes, por lo general, aportan los valores medios de fallos para cada equipo específico.

Adicionalmente, los mismos ingenieros u operadores de planta, pueden determinar los parámetros más adecuados, dependiendo de las necesidades específicas de mantenimiento, por medio de la implementación de cuestionarios que servirán, además, de históricos de fallos, y como datos para la elaboración de modelos que estimen los momentos más oportunos de intervención. Akabarov y colaboradores (Akabarov et al., 2008), estiman los parámetros y las variables de un modelo de regresión para el mantenimiento preventivo, a partir de la aplicación de cuestionarios del funcionamiento de los equipos de planta, a lo largo de un tiempo determinado, que incluyen, variaciones en los tiempos de fallos, modos y causas de los mismos.

No podemos olvidar, sin embargo, que los problemas de mantenimiento, presentan una naturaleza estocástica, ya que se caracterizan porque poseen un patrón medio de comportamiento a largo plazo que puede ser modelado, y el pronóstico de sus magnitudes, en un instante de tiempo dado, tiene un mayor o menor grado de incertidumbre.

El objetivo de este apartado, es hacer un recorrido por los modelos de optimización para problemas de mantenimiento. Principalmente, se estudiarán los que aplican los algoritmos genéticos. Los algoritmos genéticos son metodologías metaheurísticas de búsqueda, que consisten, básicamente, en simular la evolución de una población de individuos (soluciones) sometidos a una serie de condiciones (función objetivo y restricciones), siendo la evolución de los mismos, consecuencia de un mecanismo de selección natural. La necesidad o importancia de la aplicación de los métodos computarizados de resolución, como los algoritmos genéticos, radica en: la combinación de diferentes estrategias, la consideración de ciertos factores de operación y la multiciplidad de objetivos de los problemas actuales de optimización.

Esta metodología, emplea técnicas de búsqueda aleatoria dirigida y requiere como punto de partida:

- Una población inicial de soluciones (individuos).
- Un procedimiento que permita la codificación de las soluciones.

- La existencia de una relación biunívoca entre el espacio de soluciones  $S$  y el de las estructuras  $S$ . Esto quiere decir que una sola estructura de genes representará a un solo individuo o solución (ver capítulo 4).
- La definición de una función que represente la adaptabilidad del individuo al medio (modelo matemático).
- La definición del conjunto de operadores genéticos (ver capítulo 4).

En el capítulo 4, destinado a profundizar en el tema de los algoritmos genéticos y demás técnicas metaheurísticas, se comentará con más detalle, la explicación en cuanto a la codificación y aplicación de los operadores de ésta metodología.

Según la clasificación propuesta por Dekker y Philip (1998), los modelos de optimización del mantenimiento se pueden dividir, atendiendo a la decisión o necesidad de actuación sobre los elementos, en tres niveles:

- Nivel Componente.
- Nivel Sistema.
- Nivel Planta.

### **2.2.1.- Optimización a nivel de componente.**

La optimización a nivel de componente, corresponde a realizar los análisis para optimizar las acciones de mantenimiento para ganar fiabilidad y reducir costes, a un elemento que conforma a un equipo o sistema específico.

Las formulaciones presentadas a continuación, se desarrollan bajo un APS (Análisis Probabilístico de Seguridad), que proporciona una representación cuantitativa del nivel de seguridad y riesgo de componentes, sobre todo en sistemas de seguridad, con unas condiciones y consecuencias determinadas, siendo necesaria la aplicación de un indicador. Como se ha comentado en el apartado de los indicadores, la fiabilidad, bajo el concepto de indisponibilidad es un parámetro ampliamente utilizado (Vaurio, 1995, 1999; Sánchez, 2000; Marseguerra et al., 2001; Martorell, et al. 2000, Martorell et al, 2002).

La indisponibilidad, como se ha indicado anteriormente, se divide en dos categorías: la primera relacionada a las acciones de vigilancia y mantenimiento, y la segunda debida a los fallos aleatorios que puedan suceder en el componente. Vaurio (1995) propone el siguiente desarrollo para el cálculo de la indisponibilidad:

$$u = u(T) = \rho + (\Delta / T) + z\lambda T$$

$T$  = intervalos de pruebas y mantenimiento.

$z = 1/2$ .

$\rho$ ,  $\Delta$  y  $\lambda$  son independientes de  $T$  y pueden estar en función de otros parámetros debido a diferentes causas de indisponibilidad. Entre estos el autor considera: probabilidad de fallos en demanda, errores humanos, indisponibilidad por reparaciones, fallos aleatorios e indisponibilidad por monitorización de fallos.

Todo esto implica que para minimizar la indisponibilidad dentro de un contexto económico, es necesario encontrar los valores suficientes relacionados con la duración y números de inspecciones, tiempos fuera de servicio por fallos y reparaciones como reducción de accidentes por errores humanos.

Para Kim et al. (1994) y Martorell et al. (1995) la contribución a la indisponibilidad debida a fallos aleatorios, puede formularse también a partir de un modelo de indisponibilidad con dependencia temporal:

$$u_f = (x) \approx \rho + \frac{1}{2} h T.$$

Donde:

$u_f$  = indisponibilidad media en un periodo dado.

$\rho$  = probabilidad de fallo cíclica por demanda.

$h$  = tasa de fallos del componente en espera u operación en función de la edad.

Adicionalmente para Martorell (1996) (Martorell et al., 2000), la contribución a la indisponibilidad debida a tiempos fuera de servicio, por la realización de acciones de vigilancia y mantenimiento, se evalúa a través de las frecuencias de realización de estas actividades y por su duración:

$$u_t(x) = f_t(x) \cdot t \cdot q_o^t.$$

$$u_m(x) = f_m(x) \cdot m \cdot q_o^m.$$

$$u_c(x) = f_c(x) \cdot d(x).$$

Donde:

$u_t(x)$  = indisponibilidad media debida a pruebas de vigilancia (componentes en espera).

$u_m(x)$  = indisponibilidad media debido a mantenimiento programado.

$u_c(x)$  = indisponibilidad media debido a mantenimiento correctivo.

$f_t(x)$  = frecuencia de prueba.

$f_m(x)$  = frecuencia de mantenimiento programados.

$f_c(x)$  = frecuencia de mantenimiento correctivo.

$t$  = duración media de la prueba.

$m$  = duración media del mantenimiento programado.

$d$  = duración media del mantenimiento correctivo.

$q_o^t$  = fracción de la duración  $t$  en que el componente se encuentra indisponible [0,1].

$q_o^m$  = fracción de duración de  $m$  en que el componente se encuentra indisponible [0,1].

Las funciones objetivo propuestas por Martorell et al. (2000) para la optimización de tareas de mantenimiento aplicando un Algoritmo Genético, vienen dadas por la suma de todas las contribuciones a la indisponibilidad relacionadas con fallos aleatorios y por las actividades de mantenimiento.

$$u(x) = u_f(x) + u_t(x) + u_c(x) + u_m(x)$$

Muñoz (1997), propone dividir en estrategias las contribuciones a la indisponibilidad debida tanto a fallos aleatorios como a las actividades de vigilancia y mantenimiento, es decir, agrupa las diferentes tareas de mantenimiento (mantenimiento preventivos por tiempo, por condición y mantenimiento correctivos) dentro de cuatro estrategias, para luego crear una función objetivo, a partir de la suma de todas las contribuciones a la indisponibilidad, dentro de una estrategia dada. Las contribuciones a la indisponibilidad por estrategia propuestas son:

- Estrategia 1: contribución a la indisponibilidad por: fallos aleatorios, mantenimiento correctivo y pruebas de vigilancia.

$$u_f + x(u_c + u_t).$$

Donde:

$x$  = factor de override que indica si la contribución se realiza en recarga,  $x = 0$ , o si se realiza en operación normal,  $x = 1$ .

- Estrategia 2: contribuciones a la indisponibilidad por: fallos aleatorios, mantenimiento correctivo y preventivo por tiempo.

$$u_f = x(u_c + u_v)$$

Donde:

$u_v$  = contribución debida a mantenimiento preventivo por tiempo.

- Estrategia 3: contribución a la indisponibilidad por: fallos aleatorios, correctivo, predictivo por tiempo y preventivo por condición.

$$u_f = x(u_c + u_d + u_{cv}).$$

Donde:

$u_d$  = contribución debida al mantenimiento predictivo por monitorización discontinua.

$u_{cv}$  = contribución debida al mantenimiento preventivo por condición.

- Estrategia 4 contribución a la indisponibilidad por: fallos aleatorios, predictivo por monitorización continua y preventivo por condición.

$$u_f + x(u_{dc} + u_{cv})$$

Donde:

$u_{dc}$  = contribución debida por mantenimiento predictivo por monitorización continua.

Las contribuciones a la indisponibilidad se presentan como un valor medio, que se obtiene, en primer lugar, promediando temporalmente entre dos periodos sucesivos de pruebas o acciones de mantenimiento. En segundo lugar, promediando entre dos periodos de reemplazo, (Kim et al., 1992). Para la optimización, además de este modelo, Muñoz (1997) utiliza un modelo de costes para cada estrategia (ver apartado 2.2.14). Tratándose de un problema combinatorial de difícil solución analítica, el autor utiliza un Algoritmo Genético. Para su aplicación, emplea cromosomas que representan las estrategias o políticas de mantenimiento, y de estos cromosomas, un determinado gen representará una acción de mantenimiento que puede ser: pruebas de vigilancias, mantenimiento correctivo, preventivo, etc. Constituyendo el gen, cada alelo tomará un valor decimal que será la frecuencia y duración de la actividad (ver capítulo 4).

Un aspecto importante de aclarar, es que las indisponibilidades asociadas a los mantenimientos predictivos son nulas, ya que estas no afectarán el normal proceso de funcionamiento al menos que, para realizar la acción, el equipo tenga que ser sacado del proceso productivo o trasladado a taller (mantenimiento predictivo por tiempo). A través de la medición del nivel de degradación del componente se determinará si se efectuará la actividad preventiva por condición CV.

### **2.2.1.1.- Modelos de regresión.**

La fiabilidad de un componente es influenciada no solo por los parámetros asociados al tiempo de operación, sino que influyen otra serie de factores como los de servicio y funcionamiento, entre los que podemos mencionar: periodos de operación continuos o intermitentes, trabajo a carga muy superior a la recomendada por el fabricante y condiciones ambientales desfavorables, como elevadas temperaturas, presiones, polvo y humedad (Kumar, 1996).

Sánchez (2000) incluye dentro de las funciones de indisponibilidad los parámetros antes mencionados, analiza para ello los modelos de regresión como lo son: el modelo de vida acelerada y modelo de azar proporcional. Este último es el que emplea en su

propuesta. La autora, además de este modelo de regresión, emplea un modelo que considera la influencia de las actividades de mantenimiento (ver apartado 2.2.1.2 y 2.2.1.3), uno de coste de implementación (ver apartado 2.2.2.2.1) y un Algoritmo Genético Estacionario para la aplicación de su propuesta. El Algoritmo Genético Estacionario, consiste básicamente en un algoritmo que acumula información relacionada con el espacio de búsqueda inicial, y explota esta información para dirigir la búsqueda a sub espacios con posibles buenas soluciones.

### 2.2.1.1.1.- Modelo de regresión de vida acelerada.

En los modelos de regresión vida acelerada, la función de fiabilidad de un componente se verá afectada por un vector de covariatas, es decir, variables cuyo efecto es modificar la velocidad con la cual un componente se degrada en el tiempo, ya sea por condiciones de operación o ambientales, (Ansell y Phillips, 1994; Guida, 1995). Estas variables son conocidas como variables explicativas.

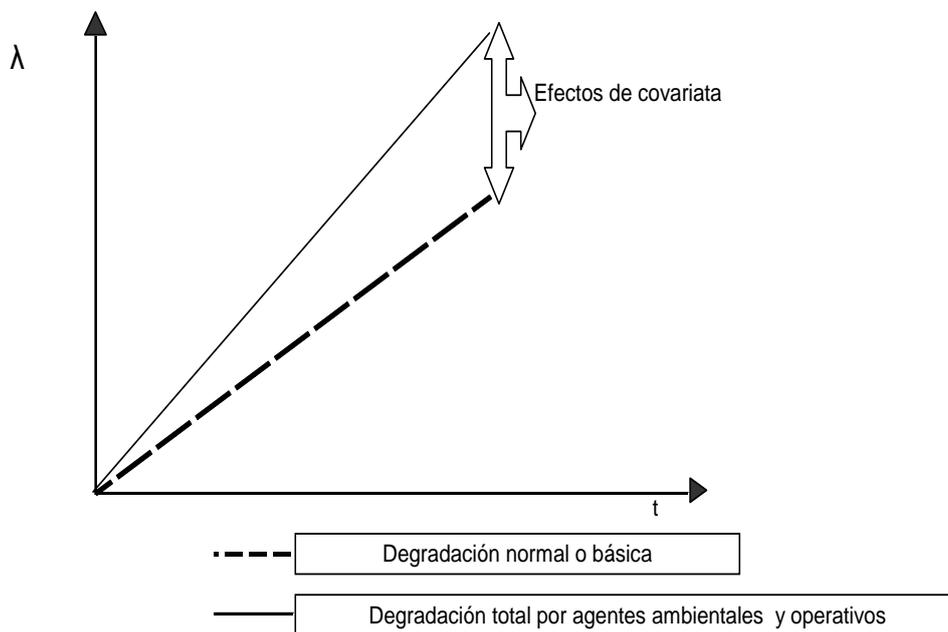


Figura 2.10: Representación de la relación entre la tasa de fallos en condiciones normales y la debida a las covariatas.

En condiciones normales o favorables el valor de la variable explicativa es cero, no influyendo en la ecuación de fiabilidad. Pero si esta es mayor que uno implica una aceleración de la degradación del componente y viceversa.  $\Psi(z)$  es la función vínculo

dependiente de las variables explicativas que satisface  $\Psi(0) = 1$  y  $\Psi(z) > 0$  para todo  $z$ , es decir, que cuando  $z = 0$  (no hay condiciones desfavorables) la fiabilidad en función del tiempo se mantendrá invariable. Un modelo muy utilizado como función vínculo es el llamado log-lineal:

$$\Psi(z) = e^{\beta^T z}$$

Donde:

$\beta$  = vector  $q \times 1$  de los coeficientes de regresión correspondiente a las  $q$  variables explicativas.

$\beta^T$  = transpuesta de  $\beta$ .

La expresión de una tasa de fallo afectada por estos parámetros es (Llatas, 2004):

$$h(t,z) = \Psi(z)h_0(t, \Psi(z))$$

Donde:

$h_0$  = tasa de fallos inicial.

#### **2.2.1.1.2.- Modelos de regresión de azar proporcional.**

Los modelos de vida acelerada modifican el nivel en que un componente se deteriora en el tiempo en función de los valores de las covariatas, mientras que los modelos de azar proporcional resultan de multiplicar la tasa de fallos por el factor de la función vínculo (Kumar y Klefsjö, 1994; Ansell y Phillips, 1997; Martorell et al., 1999b; Llatas, 2004).

$$h(t,z) = h_0(t) \Psi(z)$$

Estos factores de degradación influirán en las ecuaciones de indisponibilidad, es decir, un componente sometido a esfuerzos considerables como a condiciones ambientales adversas, tendrá una mayor probabilidad de fallo (mayor contribución a la indisponibilidad) y se necesitarán acciones de mantenimiento más frecuentes y contundentes para mantenerlo dentro de un margen óptimo.

#### **2.2.1.2.- Influencia de las acciones de mantenimiento y condiciones de servicio en la edad del componente.**

Como se ha observado en el apartado anterior, la edad de los componentes puede verse afectada por las condiciones de servicio (Operación y ambientales) y por las acciones de mantenimiento. Por ejemplo, la edad actual de un componente puede expresarse como función de la edad que tenía justo al final del último mantenimiento, más la variación de la edad durante un periodo transcurrido después de ese último mantenimiento.

Para la contribución a la indisponibilidad por acciones de mantenimiento, Martorell et al. (1995) y Muñoz (1997) utilizan un modelo de fiabilidad con envejecimiento, donde cada actividad de mantenimiento contribuye a modificar la edad del componente en función de la efectividad del mantenimiento realizado. Por lo tanto, si el mantenimiento es efectivo,  $\varepsilon = 1$  el componente quedará como nuevo e iniciará su ciclo de trabajo como tal, pero si  $\varepsilon = 0$ , entonces la edad del componente será la cronológica, es decir, no recibió ninguna acción de mantenimiento.

Para Sánchez (2000) estas dos situaciones extremas ( $\varepsilon = 1$  o  $\varepsilon = 0$ ) no son suficientes para simular el efecto de las actividades de mantenimiento, porque estas en la realidad se sitúan en un nivel intermedio. Para modelar esta situación utiliza los modelos de mantenimiento imperfecto, que fueron propuestos por primera vez por Nakagawa (1980) citado por (Jayabalan, 1992; Chan y Leonard, 1993; Hsu, 1999).

Los modelos de mantenimiento imperfecto, suponen que el mantenimiento reduce la edad del componente en función de la efectividad y estos pueden ser: el PAR (Proportional Age Reduction) propuesto por Malik (1979) y el PAS (Proportional Age Set-Back) propuestos por Martorell en el año 1996 (Martorell et al., 1999b).

#### 2.2.1.2.1.- El modelo PAS.

Este modelo asume que cada actividad de mantenimiento reduce proporcionalmente la edad del componente en un factor  $\varepsilon$  (efectividad del mantenimiento) respecto a la edad que tenía justo antes de entrar en mantenimiento. Por lo tanto, la edad del componente justamente después de recibir el primer mantenimiento es:

$$W_1^+ = (1 - \varepsilon_1)\psi(z_1)t_1$$

Donde:

$\varepsilon_1$  = efectividad de la primera acción de mantenimiento.

$Z_1$  = condiciones de servicio en el instante  $t$ .

Para el caso de 2 actividades de mantenimiento.

$$W_2^+ = (1 - \varepsilon_2)[(1 - \varepsilon_1).\psi(z_1)t_1 + \psi(z_2).(t_2 - t_1)]$$

El comportamiento de este modelo es asintótico (figura 2.11), es decir, cada actividad de mantenimiento devuelve la edad del componente respecto a la edad cero (como nuevo) en función de la efectividad del mantenimiento.

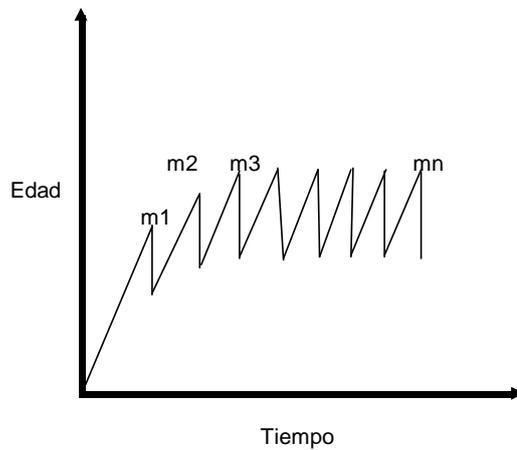


Figura 2.11: Evolución de la edad bajo un modelo PAS (Sánchez, 2000).

#### 2.2.1.2.2.- El modelo PAR.

Este modelo se fundamenta, en que cada actividad de mantenimiento disminuye proporcionalmente el incremento de la edad del componente desde la realización del último mantenimiento. La diferencia con respecto al PAS radica en que este reduce parte de la edad total del componente, mientras que el PAR reduce solo una porción de la edad que este ha ganado desde el último mantenimiento, por lo tanto, el comportamiento del PAR es creciente en lugar de asintótico (figura 2.12). Las ecuaciones para este modelo son:

$$W_1^+ = (1 - \varepsilon_1)\psi(z_1)t_1$$

Para la segunda acción de mantenimiento:

$$W_2^+ = w_1 (1 - \varepsilon_2).\psi(z_2).(t_2 - t_1).$$

Por lo tanto:

$$W_2^+ = (1 - \varepsilon_1)\psi(z_1).t_1 + (1 - \varepsilon_2).\psi(z_2).(t_2 - t_1)$$

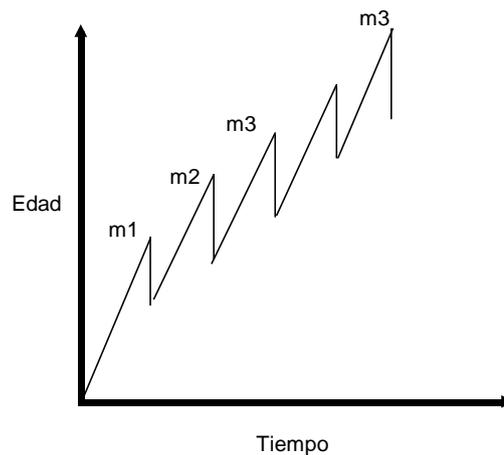


Figura 2.12: Evolución de la edad bajo un modelo PAR (Sánchez, 2000).

### 2.2.1.2.3. - Modelo de tasa de fallo Weibull dependiente de la edad.

La tasa de fallos de Weibull, es el modelo de fiabilidad más utilizado porque permite modelar las distintas fases de la vida de un componente. Una vez formulados los modelos de regresión y de edad, se pueden incluir en la ecuación de Weibull (tasas de fallos). Este tipo de formulación permitirá considerar en el análisis los efectos antes mencionados. Un desarrollo de Weibull considerando una tasa de fallos inducida con un modelo de vida acelerada propuesto por Sánchez (2000) es:

$$h_m(w) = \psi(z) \{ \eta^\beta \cdot \beta \cdot [w_m(t, \varepsilon, z)]^{\beta-1} \} + h_o$$

Este se adopta en el estudio de equipos reparables con una tasa de fallos inicial  $h_o$  donde:

$h_m$  = tasa de fallos después del mantenimiento  $m$  -1.

$\beta$  = parámetro de forma de Weibull.

$\eta$  = parámetro de escala de Weibull.

$w_m$  = edad del componente justo después de la actividad de mantenimiento  $m$ .

### 2.2.1.3.- Modelo de indisponibilidad considerando la incorporación de los parámetros asociados al mantenimiento y condiciones de servicio.

En este apartado se describen las expresiones propuestas por Sánchez (2000) que representan la contribución a la indisponibilidad debida a fallos aleatorios, y en la que

se incluyen los efectos del mantenimiento (ver apartado 2.2.1.2) y las condiciones del servicio (ver apartado 2.2.1.1) en la edad del componente.

Para determinar el valor de la tasa de fallos, al igual que en el caso antes visto (Muñoz, 1997), se utiliza un procedimiento de promediación temporal. En primer lugar se promedia entre dos intervalos consecutivos de prueba o mantenimiento, y en segundo lugar, respecto al periodo de reemplazo del componente ( $L$ ).

La contribución a la indisponibilidad debida a fallos aleatorios, viene dada por (Kim, et al. 1994; Martorell, et al. 1995).

$$u_f(x) \approx \rho + \frac{1}{2}h.T$$

Donde  $T$  es el periodo de realización de pruebas y  $h$  es determinado empleando una distribución de Weibull para los diferentes modelos de reajuste de edad (ver apartado anterior).

Por lo tanto, Las funciones objetivos de la indisponibilidad debida a fallos aleatorios y dependiendo del modelo de edad utilizado son:

**1.- Modelo de edad PAS y tasa de fallos de Weibull:** En un modelo PAS con una tasa de fallos de Weibull, la expresión correspondiente a la indisponibilidad del componente debidas a fallos aleatorios será:

$$u_f = \rho + \frac{1}{2} [(M \cdot \psi(z))^{\beta-1} \cdot (\eta/\epsilon)^\beta \cdot [1-(1-\epsilon)^\beta] + h_o]. T$$

Donde:

$M$  = periodos de mantenimiento.

$\rho$  = probabilidad de fallo.

**2.- Modelo de edad PAR y tasa de fallos de Weibull:** si se utiliza un modelo de edad PAR y una tasa de fallos de Weibull se obtienen la siguiente expresión:

$$u_f = \rho + \frac{1}{2} \cdot [(\psi(z))^{\beta-1} \cdot M \cdot \eta^\beta / (L-M)] \cdot T \cdot \{ [(1-\epsilon)^\beta + (\epsilon^{\beta+1} / 1-\epsilon)] / (1-\epsilon) + (1/(M \cdot (1+\beta))) \cdot [(L-2M) \cdot (-1+\epsilon) \cdot (L-2M)/M]^\beta + [(1-\epsilon) \cdot L + M - 2M \epsilon] \cdot [L - \epsilon + (-1+2\epsilon)]^\beta \cdot (1/(\epsilon - 1)) \} + \frac{1}{2} h_o \cdot T.$$

Esta expresión con las demás contribuciones, será la función objetivo para la optimización de las acciones de mantenimiento de la propuesta de Sánchez (2000). La restricción será una función coste que se expondrá en apartado (2.2.2.2). La función coste podrá ser también la función objetivo, en el caso que se desee minimizar esta en función de un riesgo aceptable establecido, es decir, la indisponibilidad será la restricción para el problema de optimización.

### 2.2.2.- Optimización a nivel de sistema a partir de sus componentes.

Un sistema se puede definir como una colección de componentes arreglados de acuerdo con un diseño específico, con la finalidad de que se realice una o varias funciones con unos valores de fiabilidad aceptable. Los arreglos más simples son:

- En serie. Los sistemas en serie se caracterizan porque sólo están en operación cuando todos sus componentes están en funcionamiento. La fiabilidad es el producto de las fiabilidades de sus componentes, con lo cual la fiabilidad del sistema será menor que la de cada uno de sus componentes.

$$R_{ts} = R1 \times R2 \times R3 \times \dots \times Rn.$$

- En paralelo. Se caracterizan porque el sistema fallará si todos los elementos que le conforman fallan también.

$$(1 - R_{st}) = (1 - R1) \times (1 - R2) \times (1 - R3) \times \dots \times (1 - Rn).$$

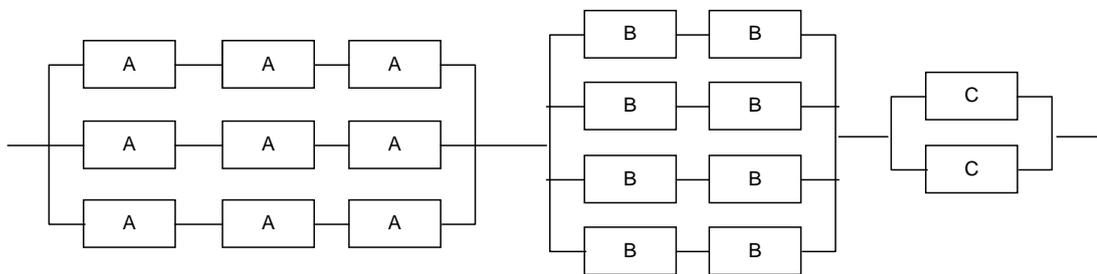


Figura 2.13: Representación de un sistema conformado por 3 componentes (A,B,C), colocado tanto en serie como en paralelo.

#### 2.2.2.1.- Enfoques para la aplicación de la optimización a nivel de componente y/o sistema.

Los análisis de indisponibilidad (APS) para optimización son extensibles y aplicables a la optimización a nivel de sistema. Para ello es necesario considerar los parámetros de fiabilidad asociados a cada uno de los componentes que conforman el sistema (Muñoz, 1997; Sánchez, 2000). La determinación de los niveles componentes o sistemas pueden tener un enfoque subjetivo, es decir, pueden agruparse atendiendo al nivel de complejidad deseado, pudiéndose dividir de la siguiente forma:

- Considerar cada componente del sistema y estudiarlo por separado, es decir, subdividir el sistema en sus  $n$  partes y aplicar la modelación a cada una de ellas. Como ejemplo, si consideramos una motobomba como el sistema, los componentes serían el motor y la bomba. Si consideramos el motor como el sistema, los componentes serían las partes que lo integran. Esta implementación es completamente válida, pero el procedimiento de optimización es engorroso, ya que se incluirían una gran cantidad de elementos a modelar, siendo necesario hacer un estudio detallado de los diferentes elementos que integran el sistema. Para evitar este problema los sistemas se suele dividir a lo máximo en dos o tres componentes (Martorell, 1991).
- Considerar el sistema como una estructura de componentes relacionados. La indisponibilidad del sistema estará representada por un vector de indisponibilidades asociadas a cada componente (Martorell y Doménech, 1998). Además la fiabilidad de un sistema variará, como se ha comentado anteriormente, dependiendo si estos componentes están en paralelo o en serie. El modelo de Vaurio (1995) mostrado anteriormente, puede ser utilizado en sistemas si los componentes que le conforman son probados y/o inspeccionados en un mismo intervalo de tiempo  $T$ , siendo la probabilidad y la tasa de fallos del sistema, la suma de las probabilidades y tasas de fallos de los componentes individuales que lo integran.
- Considerar el sistema como un componente y modelarlo. Ejemplo: la motobomba como un solo componente o entidad única. Este enfoque es utilizado para optimizar labores de mantenimiento a nivel de planta, en el cual cada máquina es modelada como un elemento y la finalidad de la optimización es determinar la frecuencia y el instante de intervención con relación a las otras máquinas (Lazo y Pacheco, 1999).

#### **2.2.2.2.- Modelos de costes.**

La finalidad de estos modelos, es minimizar los costes para un valor máximo permisible o admisible del nivel de riesgos o viceversa. A lo largo del tiempo se han propuestos múltiples modelos de optimización del costo, muchos de ellos consideran modelos de fiabilidad basados en el mantenimiento imperfecto de acciones preventivas (Jayabalan, 1992). A continuación se describirán los modelos de costes utilizados para la optimización combinatorial del mantenimiento bajo un APS.

### 2.2.2.2.1.- Modelos de coste para la optimización en componentes y sistemas.

Para optimizar la combinación de las diferentes acciones de mantenimiento, además del modelo de contribución a la indisponibilidad ya descrito, es necesario utilizar uno que represente los costes de las acciones de mantenimiento y de los ocasionados por fallos aleatorios, para con ello imponer restricciones al proceso de optimización en función de los recursos existentes.

Según Vaurio (1999), Sánchez (2000) y Martorell et al. (2002), los costes relevantes para la optimización a nivel de componente corresponden a los de operación (prueba, mantenimiento y fallos aleatorios), pérdidas de producción y accidentes. Por lo tanto, el modelo puede considerarse limitado a la suma de las consideraciones antes expuestas.

#### Costes de operación.

Las actividades de operación generan un coste anual cuyo valor es la suma de todos los costes relacionados con actividades de vigilancia, mantenimientos preventivo, correctivo y coste anual derivado del replazamiento del equipo. Para Martorell et al. (1999b; 2000), la expresión del coste de operación anual de estas actividades realizadas en planta es:

$$C_o = C_t(x) + C_c(x) + C_m(x) + C_d(x).$$

Donde los costes se obtienen como el producto de la frecuencia anual con la que se realiza la tarea correspondiente, su duración horaria media y el coste por hora:

- Pruebas de vigilancia (para componentes en espera):

$$C_t(x) = (t/T) \cdot C_{ht}$$

Donde:

$t$  = duración media de la prueba.

$T$  = periodo entre pruebas.

$C_{ht}$  = coste medio horario asociado a la realización de la prueba.

- Mantenimiento correctivo.

$$C_c(x) = f_c(x) \cdot d(x) \cdot C_{hc}$$

Donde:

$f_c(x)$  = frecuencia del correctivo.

$d(x)$  = duración medida de una actividad de mantenimiento correctivo.

$C_{hc}$  = coste medio horario asociado a la realización de la acción correctiva

- Mantenimiento preventivo por tiempo.

$$C_m(x) = (m/M).C_{hm}$$

$m$  = duración media de la actividad de mantenimiento preventiva.

$M$  = periodo con que se realiza esa actividad.

$C_{hm}$  = al coste medio horario asociado a la actividad preventiva.

Adicionalmente:

- Mantenimiento predictivo por tiempo.

$$C_d = f_d(x).d_d(x). C_{hd}$$

$f_d$  = frecuencia de aplicación del equipo de diagnóstico.

$d_d$  = duración de la adquisición y tratamiento.

$C_{hd}$  = coste medio horario asociado a la actividad predictiva.

- Mantenimiento predictivo por monitorización continua.

$C_{dc}$  = coste medio horario asociado al monitoreo continuo

- Mantenimiento preventivo por condición.

$C_{cv}$  = está en función de la decisión que se tome como resultado de las monitorizaciones y del coste medio horario de la intervención.

El modelo propuesto por Muñoz (1997), para la optimización combinatorial de tareas de mantenimiento, en componentes y sistemas, emplea los costes de operación relacionados con estrategias que agrupan las acciones por mantenimiento correctivo, preventivo y predictivo. La suma de todos los costes dada una estrategia, representará, junto con la suma de las contribuciones a la indisponibilidad, el modelo para la optimización de las acciones de mantenimiento.

Estrategia 1:  $C_t + C_c$ . El coste de los fallos aleatorios está implícito en  $C_c$ .

Estrategia 2:  $C_c + C_m$ .

Estrategia 3:  $C_c + C_d + C_{cv}$

Estrategia 4:  $C_c + C_{dc} + C_{cv}$ .

En la función de coste propuesta en Martorell et al. (2002) para la optimización de pruebas de vigilancia y mantenimiento, basado en las especificaciones técnicas de los sistemas, además de los costes antes mencionados, emplea el coste por pérdidas de producción.

### **Costes por pérdidas de producción.**

El incumplimiento de los tiempos límites de inoperatividad, pueden obligar a parar la planta con el consiguiente coste asociado a la pérdida de producción. Entre estos tiempos de terminación están:

- Fallos por causas comunes.
- Tiempos de reparación.
- Tiempo de mantenimiento programado.

El tiempo para la realización de una actividad de mantenimiento programado, se encuentra, por lo general, bien organizado o dimensionado, permitiendo realizar dentro de los límites aceptables del tiempo permitido de inoperatividad, las labores de mantenimiento. Pero para el mantenimiento correctivo no ocurre lo mismo, y por lo general estos tiempos superan el máximo tiempo permitido de inoperatividad o indisponibilidad.

La expresión para el cálculo de los costes por pérdidas de producción es:

$$C_{pp} = f_c \cdot T_s \cdot C_{hs}.$$

Donde:

$f_c$  = frecuencia de acciones correctivas o que impliquen el paro de la máquina por fallo del componente o sistema.

$T_s$  = tiempo requerido para el arranque de la planta por fallo del componente o sistema.

$C_{hs}$  = coste horario de tener la planta parada.

### **Costes por accidentes.**

El coste medio anual originado por accidentes se deriva directamente de la definición de riesgos formulada en términos económicos, es decir, la cuantificación de los daños ocasionados por el accidente es expresado como el número de accidentes por año y sus costes medios asociados.

$$C_a(x) = f_n \cdot C_a$$

La función objetivo para un coste total es la suma de todos estos costes mencionados. Y esta función, junto con las de indisponibilidad comentadas anteriormente, será el modelo matemático para el problema de optimización, que por

medio de la aplicación de la metodología del Algoritmo Genético, determinará la mejor solución del campo de soluciones.

### **2.2.2.3- Procedimiento para implementar la optimización del mantenimiento a nivel de sistema a partir de los componentes.**

Para implementar un proceso de optimización a nivel de sistema, es necesario disponer de información relacionada con la ocurrencia de los fallos para la determinación de la tasa de fallos, modos y causas que lo originan. Para Martorell (1991) tener esto presente, supone establecer las características del componente o sistema lo que implica hacer un estudio de:

- La función que desempeña el componente o sistema. Se debe determinar tanto la función primaria como la secundaria.
- Los componentes que lo forman. Un sistema se puede subdividir en sus componentes (ver apartado anterior).
- Su estado de funcionamiento normal, ya sea en continuo o en espera.
- La mantenibilidad, la probabilidad de reparar con la planta en operación.
- Las causas de fallos dominantes y como afecta las funciones.
- Los distintos medios para garantizar su operatividad, actuando sobre las causas dominantes.

Todo lo dicho anteriormente, entra en la aplicación del mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM).

#### **2.2.2.3.1.- Mantenimiento centrado en la fiabilidad (RCM).**

El mantenimiento centrado en la confiabilidad RCM (Reliability Centered Maintenance) es una metodología de análisis sistemático, objetivo y documentado, que puede ser aplicado a cualquier tipo de instalación industrial, ya que es útil para el desarrollo u optimización de un plan eficiente de mantenimiento.

Hoy por hoy, el mantenimiento centrado en la fiabilidad, es el proceso usado para determinar los requerimientos de mantenimiento de cualquier sistema, dentro de su contexto de operación, contemplando para ello siete cuestiones básicas, con relación a los sistemas expuestos a revisión:

- ¿Cuáles son las funciones y estándares de uso apropiadas del sistema en su contexto de operación actual?.

- ¿De que formas puede fallar el sistema para dejar de cumplir sus funciones?.
- ¿Cuáles son las causas de cada **fallo funcional**?.
- ¿Qué sucede cuando cada fallo ocurre?.
- ¿Cómo afecta cada fallo a la función?.
- ¿Qué se puede hacer para prevenir o predecir cada uno de los diferentes fallos?.
- ¿Qué se debería hacer si no se encuentra ninguna tarea proactiva apropiada?.

Por lo tanto, la finalidad principal del mantenimiento centrado en la fiabilidad, es que los esfuerzos de mantenimiento deben ser dirigidos a mantener la **función** que realizan los equipos, más que los equipos mismos. Esto supone un conocimiento de las características de funcionamiento del equipo, lo que implica realizar un análisis RCM. Las etapas de un análisis RCM según Rausand (1998) son:

- Estudio y preparación. En esta etapa se definen los objetivos y el alcance del proyecto de mantenimiento.
- Definición y selección del sistema. Antes de la toma de decisiones para realizar el análisis RCM, se deben considerar dos cuestiones:
  - Para cuáles sistemas es beneficioso el análisis RCM?.
  - A qué nivel (como se ha comentado anteriormente, componente, sistema y planta).
- Análisis funcional de fallos. Los objetivos de esta etapa son:
  - Identificar y describir las funciones del sistema y sus criterios de funcionamiento.
  - Describir los requerimientos de los sistemas para estar operativos.
  - Identificar las formas en que un sistema puede fallar.
- Selección de los componentes o sistemas críticos. Consiste en identificar los componentes o elementos que son fundamentales para el buen desempeño funcional del sistema.
- Análisis y recolección de datos. Para los análisis RCM, es necesario una variedad de datos de entrada como: datos de diseño, datos de operación y datos de fiabilidad. Los datos de fiabilidad, son necesarios para describir, de forma matemática (modelos), el proceso de fallo y las optimizaciones. Los datos de fiabilidad incluyen los siguientes indicadores ya comentados:
  - Tiempo medio de fallo (MTTF).

- Tiempo medio de reparación (MTTR).
- Tasa de fallos.
- Modos de fallos. Consiste en identificar las consecuencias de fallos dominantes. En los análisis probabilísticos de seguridad (APS), la fiabilidad se determina por sus modos de fallos (Muñoz, 1997).
- Selección de las acciones de mantenimiento, intervalos y frecuencias. Esto es la planificación de las acciones de mantenimiento. Como se ha observado a lo largo del trabajo, su aplicación óptima dependerá del modelo desarrollado y de la metodología de búsqueda para la solución.
- Implementación.

Como conclusión, el mantenimiento centrado en la fiabilidad se ocupa de los elementos críticos de los equipos, análisis funcional de fallos, las causas que los originan y las acciones proactivas para evitarlos.

### **Mantenimiento centrado en la fiabilidad y la optimización.**

Para la optimización del mantenimiento, es necesario aplicar la metodología del mantenimiento centrado en la fiabilidad, ya que permite evaluar, por medio del análisis funcional de fallos, qué elementos son críticos para el buen funcionamiento del equipo. La finalidad en sí es analizar las causas de fallo que afectan a los componentes críticos y las tareas encargadas de evitarlas (Vatn et al., 1996).

Cada tarea de mantenimiento debe identificar las partes de los componentes o sistema sobre los que actúa, y que causas de fallo cubre. Si una tarea de mantenimiento cubre sólo unas causas de fallo de una de las partes, entonces dicha tarea debe ser modelada parcialmente, ya que solo controla una fracción de la contribución total por fallos que cubre.

Para prevenir todas las causas de fallos es necesario integrar las tareas que las cubren, ya que por medio de este proceso de integración, como se ha comentado, podemos cuantificar la efectividad de la combinación de tareas mediante la optimización de la indisponibilidad y el coste. El proceso de integración de tareas, para Muñoz (1997), Contini (1995), Martorell et al. (1995a;b), Sánchez (2000) y Marseguerra et al. (2001) se realiza por medio de un árbol lógico de fallos (figura 2.15).

El árbol lógico de fallos es una herramienta que permite estimar la fiabilidad de sistemas completos, además, en el se describen las partes del sistema, el modo de fallo de cada elemento, las causas que originan los fallos y las tareas que las cubren dentro de las diferentes clases de mantenimiento.

Para Chacón (2001) es una forma de conocimiento estructurado de los diferentes tipos de fallos, que se reagrupan en forma jerárquicas siguiendo, en cada caso particular, árboles de descomposición AND / OR (y/o). La combinaciones lógicas AND / OR, dentro del árbol lógico de fallos, definen los sucesos no deseados (TOP). La probabilidad de que aparezca un suceso TOP en un instante t, constituye la probabilidad de fallo del sistema, la cual se conoce como la ya comentada indisponibilidad. Así, la indisponibilidad a nivel de componente se denomina suceso básico. Por lo tanto, los componentes se modelan como un suceso básico dentro del análisis probabilístico de seguridad aplicando RCM.

Resumiendo lo establecido por Muñoz (1997), Martorell y Doménech (1998), Sánchez (2000) y Marseguerra et al. (2001), los árboles lógicos de fallos son una descripción funcional del sistema en los diferentes subsistemas o componentes, a partir de los cuales se determinan los conjuntos mínimos de corte (MCS) que a su vez representan un conjunto de estados de indisponibilidad de los componentes (sucesos básicos) en los cuales el sistema estará indisponible. De los MCS se determinan las combinaciones de acciones de mantenimiento, dado que cada conjunto mínimo representa también, las estrategias de mantenimiento que cubren las diferentes causas de fallos.

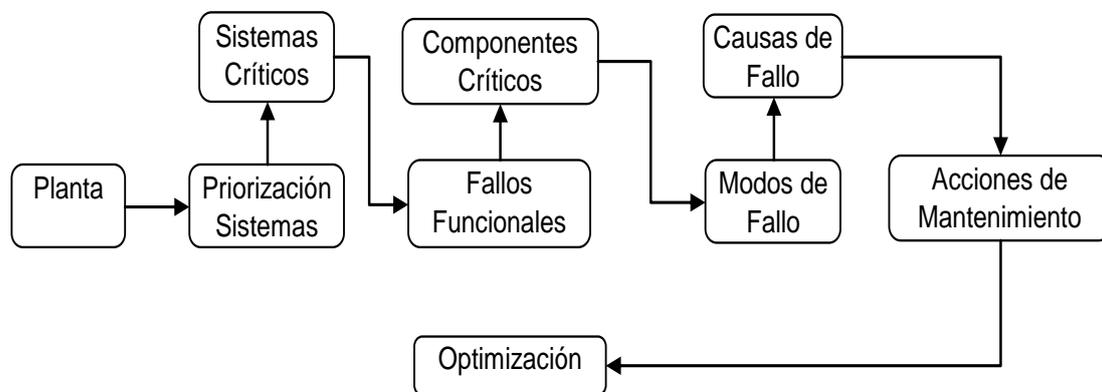


Figura 2.14: Proceso de análisis RCM y optimización.

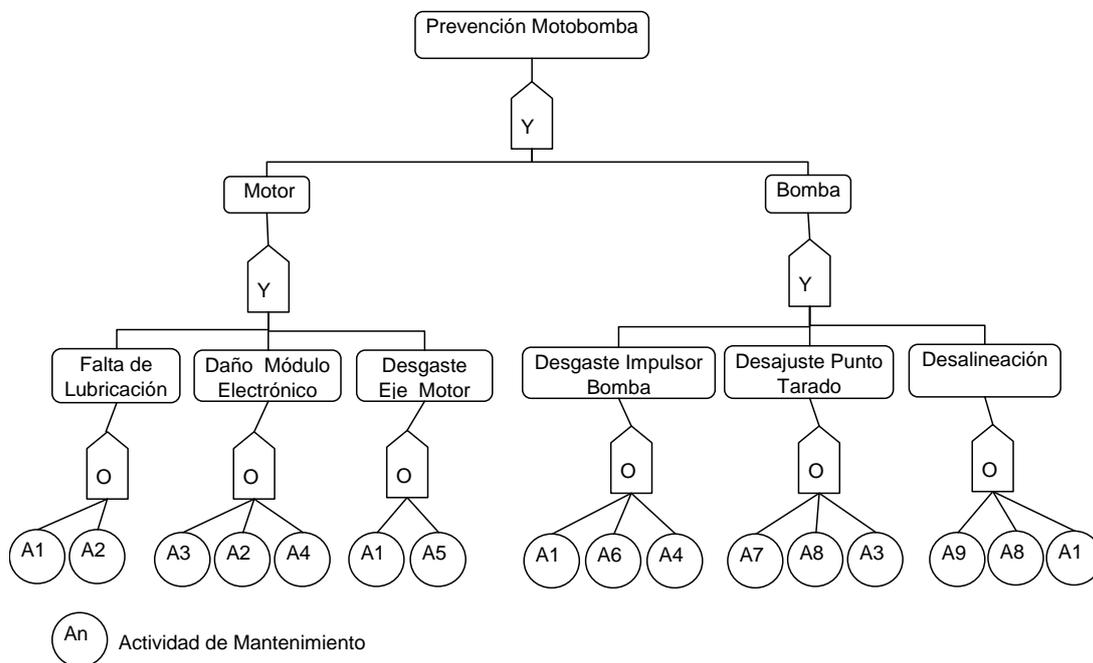


Figura 2.15: Árbol lógico de causas de fallos dominantes (Suceso TOP de Motobomba) Muñoz (1997).

Los métodos de optimización aplicando RCM, pueden ser enfocados también como un problema de decisión. Esto implica que el problema debe ser analizado bajo los siguientes puntos propuestos por Vatn y colaboradores (Vatn et al., 1996):

- Definición del problema: se definen y se analizan los objetivos principales que se desean alcanzar como los límites del sistema.
- Se establecen las funciones de pérdida y las de preferencia. Se formulan las ecuaciones de indisponibilidad y coste en base a posibles criterios de riesgos. Aquí se incluyen aspectos tanto cualitativos como: la seguridad humana, protección medio ambiente y los cuantitativos como: costes a reducir, número de accidentes, etc.,
- Las estrategias de mantenimiento que serán empleadas y las políticas de reemplazo.
- Resultados. La evaluación de las posibles alternativas de solución, y la determinación de la mejor o mejores alternativas para lograr los objetivos esperados.

**Entre los criterios de riesgos que podemos mencionar están:**

- Criterios de riesgos despreciables. Son los que establecen una condición de riesgo despreciable, es decir, no representa una amenaza para la producción y seguridad del personal.
- Criterios de riesgos mínimos o aceptables. Son aquellas condiciones que representan una pequeña amenaza, no repercutiendo gravemente en la seguridad de las personas y en la producción, estos pueden ser resueltos de forma rápida con una tarea proactiva. Puede tratarse de un riesgo grave pero con una probabilidad de ocurrencia muy pequeña.
- Criterios de riesgos graves. Estos representan la paralización parcial de la producción y el posible daño a equipos y personas. Se deben establecer las tareas proactivas necesarias para evitar su posible aparición.
- Criterios de riesgos inaceptables o condicionantes. Estos representan la pérdida de vidas humanas o la paralización total del proceso productivo. Al igual que en el caso anterior, se deben combinar las acciones proactivas para minimizar su probabilidad de aparición.

La toma de decisiones formará parte de un criterio de aceptación, que no es más que la aplicación de los criterios antes descritos, bajo un patrón de aceptabilidad del riesgo establecido.

A continuación, se describen otros enfoques de modelos de optimización para el mantenimiento a nivel de sistema, considerando particularidades de los componentes.

**2.2.2.4.- Modelo de optimización de Lapa et al.**

Lapa, y colaboradores (Lapa et al., 2006) proponen, al igual que Muñoz (1997) y Sánchez (2000), un modelo que previamente realiza un análisis de la fiabilidad a nivel de componente y luego emplean un modelo a nivel de sistema, en función del número de componentes integrantes. Este modelo probabilístico acumulativo, representa la fiabilidad del sistema durante el estado operacional y no operacional, e involucra aspectos como la probabilidad de un mantenimiento imperfecto y su influencia en la fiabilidad y probabilidad de mantenimiento correctivo. También consideran el instante de ejecución de la tarea preventiva. Utilizan una función coste dependiente del mantenimiento preventivo y el esperado potencial por correctivo. Aplican un algoritmo

genético cuyo cromosoma es binario en la programación del mantenimiento; el valor uno representa cuando el componente del sistema está listo para la operación o está operativo, y cero el instante de intervención para un horizonte de planificación de 15 (días).

### 2.2.2.5.- Modelo de optimización de Marseguerra et al.

Marseguerra y colaboradores (Marseguerra et al., 2002), presentan un modelo enmarcado en una búsqueda multiobjetivos, que tiene como finalidad optimizar el beneficio neto del sistema durante su funcionamiento ( $G$ ) y la disponibilidad media del mismo ( $A$ ), sobre un tiempo de operación ( $TM$ ), empleando también un modelo para la evaluación de la degradación de los componentes, para el cálculo de la disponibilidad instantánea en función de  $t$ . Las consideraciones de la propuesta son:

- El nivel de degradación de cada componente es conocido para todo instante.
- La probabilidad de fallo de un componente y su disponibilidad instantánea son conocidas, a partir del conocimiento de la degradación del componente en un instante  $t$  [emplean la metodología de Markov como modelo para evaluar la degradación de un sistema a partir de sus componentes, y determinar los valores instantáneos de disponibilidad e indisponibilidad (McCormick, 1981)].
- Mantenimiento preventivo basado en la condición o nivel de degradación del componente (mantenimiento predictivo). Para componentes similares se aplica la misma metodología o política de mantenimiento.

El beneficio neto está basado en un balance de los siguientes términos: beneficio total del sistema en operación, costes del mantenimiento y penalizaciones por los instantes de parada. La función objetivo de ésta propuesta es:

$$G = P - (C_M + C_D)$$

Donde:

$G$  = el beneficio neto.

$$P = Pt \int_0^{TM} A(t) dt$$

$P$  es beneficio total del sistema.

Donde:

$Pt$  = cantidad de dinero por unidad de tiempo, pagada por los clientes por el servicio.

$A(t)$  = disponibilidad del sistema en el instante  $t$ .

$$C_M = \sum C_M^i \int_0^{TM} M^i(t) dt$$

$C_M$  es el total de gastos de mantenimiento de todos los componentes del sistema,  $i = 1, 2, 3, \dots, N_c$ .

Donde:

$C_M^i$  = coste por unidad de tiempo para el mantenimiento del componente  $i$ .

$M^i(t)$  = probabilidad de que el componente  $i$  esté en mantenimiento en el instante de tiempo  $t$ .

$$C_D = C_u \int_0^{TM} [1 - A(t)] dt.$$

$C_D$  es el reembolso para los clientes debido a tiempos fuera de servicio.

Donde:

$C_u$  = penalización monetaria, por unidad de tiempo, cuando el sistema está fuera de servicio.

Para la optimización, los autores utilizan un algoritmo genético con simulación Monte Carlo para evaluar los costes y la disponibilidad respectivamente, es decir, la simulación Monte Carlo obtiene una serie de soluciones y el algoritmo genético las evalúa, limitando así el número de iteraciones (ver capítulo 4).

### 2.2.2.6.- Modelo de optimización para el diseño de sistemas PC de Paiton y Campell.

A pesar de que el enfoque que se describe a continuación es para el diseño en fiabilidad de sistemas PC, resulta interesante comentarlo dada su posible analogía con la optimización de la labores de mantenimiento a nivel de planta, y con la optimización de

los espacios existentes en las distribuciones, ya que incluye, además de un análisis de fiabilidad, la redundancia, lo que implicará considerar un espacio adicional. Bajo este enfoque, Paiton y Campell (1995) desarrollan un modelo que tiene por objetivo mejorar la fiabilidad de diseño de un sistema PC a partir del coste de implementación por componente, tasa de fallos y la redundancia en paralelo de algunos de los componentes. La finalidad es minimizar los costes de implementación de los componentes, ya sea redundantes o no, empleando para ello un desarrollo que considera:

- La tasa de fallos del componente  $h$ .
- Tiempo para reparar el componente  $j$ ,  $TR_j$ .

Tasa de fallos del sistema:

$$h_s = [\sum h_j] + h_{a,b} + h_{c,d}$$

Donde el primer término son los componentes en serie, y los dos últimos son para los componentes en paralelos. Para el sistema en serie:

$$h_{1,2} = h_1 \cdot h_2 \cdot (TR_1 + TR_2) / [1 + h_1 TR_1 + h_2 TR_2]$$

Posteriormente los autores, determinan el MTBF a maximizar del sistema, como el inverso de la tasa de fallos (ver capítulo 6).

Para la búsqueda de la mejor alternativa, los autores emplean también la metodología de los algoritmos genéticos. Este algoritmo utiliza un cromosoma donde cada gen representa un determinado componente, y dentro de este, cada alelo representa el nivel de coste de su implementación (los autores utilizan tres niveles 1 bajo, 2 medio y 3 alto) (ver capítulo 4). Además del algoritmo, los autores utilizan el método de LHS (Latin Hypercube Sampling) para la determinación adecuada de la población.

### **2.2.2.7.- Modelo de optimización de Ta-Cheng Chen y Peng-Sheng.**

Siguiendo esta misma línea, Ta-Cheng Chen y Peng-Sheng (2005), desarrollan un algoritmo que tiene la finalidad de determinar la combinación óptima de componentes en redundancia, para maximizar la fiabilidad del sistema. Toma en cuenta los costes de implementación de cada tipo de componente que integran los diferentes subsistemas y sus probabilidades de fallo. Como metodología de optimización, emplean una nueva técnica metaheurística denominada algoritmos inmunes. Estos, a diferencia de los genéticos, producen generaciones de anticuerpos que siguen patrones de reconocimiento que funcionan como restricciones. A medida que el algoritmo avanza, los anticuerpos

evolucionan para generar nuevas restricciones en función del incremento de complejidad del problema.

### **2.2.2.8.- Modelo de optimización de Fiori de Castro y Lucchesi (2006).**

Fiori de Castro y Lucchesi (2006), presentan un modelo que se utiliza para la asignación de componentes redundantes en un sistema, y cuyo objetivo en el proceso de la optimización, es encontrar el número de componentes para los subsistemas y la cantidad de recursos del mantenimiento que maximicen la disponibilidad del mismo. Este modelo está en función de la probabilidad de mantenimiento correctivo y del impacto de la cantidad de recursos para el mantenimiento en el índice de formalidad, bajo las siguientes restricciones:

1. Coste del diseño.
2. Peso del sistema.
3. Volumen del sistema
4. Coste de mantenimiento correctivo.

Como hemos mencionado, emplean un nuevo indicador de formalidad, el cual consiste, básicamente, en la probabilidad que un sistema no falle, y si este falla, repararlo en el menor tiempo posible. Para los análisis de fiabilidad emplean la curva de Weibull. Utilizan también un MTTR variable en función de los recursos empleados para el correctivo.

### **2.2.3.- Optimización del Mantenimiento a Nivel de Planta.**

En el año 1995, Vaurio (1995) presenta un modelo para la optimización del mantenimiento para evaluar en riesgo y coste una planta, pasando primeramente por el nivel componente y sistema. Este modelo fue punto de partida de los desarrollos propuestos por Muñoz (1997) y Sánchez (2000) para la optimización de las acciones de mantenimiento, aplicando los Algoritmos Genéticos.

El procedimiento descrito por Vaurio (1995) para la optimización a nivel de planta, agrupa los componentes de los sistemas en conjuntos bajo las siguientes suposiciones.

- El estado de indisponibilidad de cada componente puede ser modelado por uno o más eventos básicos (TOP), es decir, analiza cada componente como un solo

elemento en un RCM. Los diferentes eventos básicos que le pueden ocurrir a un componente, pueden ser agrupados en diferentes grupos de prueba. Esto quiere decir, que las causas de fallos que sean cubiertas de forma similar, entrarán en un mismo grupo.

- Los componentes de un mismo grupo deben ser mantenidos o inspeccionados en el mismo intervalo.
- Cualquier componente puede ser un miembro de uno o más grupos de prueba.
- Como se ha comentado anteriormente, las causas de fallos por errores humanos pueden ser modelados como un suceso básico en las ecuaciones de indisponibilidad.
- La indisponibilidad ocasionadas por los eventos básicos asociados con los diferentes intervalos fijados son independientes.

### Función Coste y Riesgo.

La función de coste es la relación (Vaurio, 1995):

$$Y(T) = \sum_{i=1}^i (C_i/T_i)$$

Donde la suma de cada uno de los términos es inversamente proporcional al valor del intervalo  $T_i$ . Cada  $C_i$  representa el coste por acción para ese intervalo. Hay diferentes alternativas para seleccionar las constantes del coste  $C_i$ : la primera para un periodo de operación de un  $C_i = Y$ , donde se minimiza el número total, para los grupos de pruebas, los mantenimientos para el periodo  $Y$ . Segundo  $C_i = Y.n_i$  donde  $n_i$  es el número de componentes pertenecientes a un grupo de prueba, para minimizar el número total de acciones de mantenimiento para ese periodo. Finalmente,  $C_i = Y.n_i.c_i$ , donde  $c_i$  es igual a coste de cada actividad de mantenimiento.

En el proceso de optimización, la función coste está condicionada por una función de riesgo  $F(T) \leq R$ , donde  $F(T)$  representa la frecuencia de accidentes y no puede exceder el valor límite  $R$ . Por lo tanto, la ecuación final para la optimización es:

$$\text{Minimiza } Y(T) = \sum_{i=1}^i (C_i/T_i) \text{ bajo la condición } F(T) = R.$$

Este modelo organiza todas las actividades de mantenimiento de los componentes de planta, a partir de la agrupación en conjuntos, en función de la similitud de las tareas necesarias para cubrir las causas de fallos.

Lazo y Pacheco (1999) proponen otro enfoque, un modelo para optimizar las secuencias de mantenimiento y el tiempo del personal destinado para realizarlo. Los autores utilizan para buscar la mejor solución, la siguiente función objetivo:

$$\text{Evaluación} = \text{Min} \left[ \sum_{i,j} Dec_i \times F_j + \sum_m Dec_m \times 250 \right]$$

Donde  $Dec = PT\% + Ds\% + PDpto\%$ .

- $i$  = posición del gen dentro del cromosoma (ver capítulo 4).
- $j$  = posición en horas de horario.
- $m$  = horas en el horario, donde se colocan las máquinas que no pudieron ser planeadas.
- $F_j$  = factor de penalidad, varía de 0 a 200.
- $PT$  = porcentaje de trabajo de la máquina recomendado por el fabricante. Tiene mayor prioridad aquella máquina que ha trabajado más del 100% del recomendado por el fabricante.
- $Ds$  = números de días transcurridos desde el último mantenimiento. Tiene prioridad de recibir mantenimiento aquellas máquinas con mayor número de días sin recibirlo.
- $Dpto.$  = departamento donde está ubicada la máquina. Representa la importancia que ocupa la máquina en el proceso productivo.

El modelo toma las siguientes consideraciones:

- Las recomendaciones del fabricante. Son condicionantes del proceso de optimización, es decir, el número mínimo de acciones de mantenimientos necesarias definidas por el fabricante.
- Fecha del último mantenimiento realizado a cada máquina.
- El tiempo necesario de mantenimiento de cada modelo.
- La importancia de la máquina dentro de la empresa.

Las restricciones propuestas por el autor son:

- El mantenimiento se realiza sólo en horario de trabajo.
- No se debe programar mantenimiento en horas de comida.

- Las labores de mantenimiento no deben interrumpirse, es decir, se realizan en el primer bloque en la mañana o en el segundo de la tarde.
- El personal de mantenimiento no debe tener horas ociosas.
- El orden para el mantenimiento en las máquinas deberá satisfacer el siguiente criterio:  $PT > Ds > Dpto$ .

Este es un modelo que tiene un enfoque diferente a los estudiados, dado que no está en función de ningún indicador o parámetro de los descritos anteriormente. Este se basa en obtener la secuencia de operaciones para realizar el mantenimiento de cada máquina en función de las condicionantes antes mencionadas. Se trata de un desarrollo simple para aplicarlo en planta, pero tiene el inconveniente que no incluye los posibles fallos aleatorios que se puedan presentar, los costes de implementación y de las condiciones de servicio.

Utilizan un algoritmo genético que cuenta con una metodología para minimizar las desventajas de éste. Esta metodología, consiste en variar la tasa del operador mutación para evitar que el algoritmo genético evolucione a mínimos locales, debido a las variaciones que provoca la variable  $PDpto$ . La herramienta informática utilizada por los autores para el desarrollo del algoritmo, fue Evolver 4.0 para Excel.

Li Sheng-Tun y otros (Li Shen- Tun et al., 2002), desarrollaron un modelo para refinerías, que optimiza las inspecciones en los tanques de almacenamiento para minimizar las interrupciones de flujo de crudo causadas por las mismas. En las refinerías, la interrupción del flujo desde un tanque de almacenamiento afectará la estabilidad del suministro, y la capacidad para mantenerlo dependerá de la capacidad neta de suministro de la planta. Las restricciones del problema son:

- Los programas de mantenimiento deberán comenzar el primer día del mes y terminar el último, durante un periodo de un año.
- El volumen del suministro neto debe ser mucho mayor que cero en cualquier instante de tiempo. El objetivo es mantener al máximo el nivel de reserva neta de la planta durante el mantenimiento de algún tanque.

De acuerdo a una valoración conservadora realizada por los autores para un año de estudio, la función que determina el nivel más bajo de la reserva neta que deberá ser minimizada es:

$$Net = \min N_m = \min \left\{ C - \sum_{i=1}^T \eta_{i,m} - \omega_m, m \right\}$$

Donde:

$N_m$  = la reserva neta obtenida en el mes  $m$ .

$C$  = la capacidad total de la planta.

$\eta_{i,m}$  = la capacidad de interrupción del tanque  $i$ -ésimo en el mes  $m$ .

$T$  = el número de tanques en planta.

$\omega_m$  = la carga máxima pronosticada para el mes  $m$ .

El desarrollo propuesto es específico para la aplicación en refinerías de crudo, tratándose de un modelo que considera aspectos relacionados con la capacidad de almacenamiento en planta. Este modelo tiene un enfoque global para toda la red de distribución de la refinería, que igual al anterior, no considera aspectos de mantenimiento detallados en los tanques de almacenamiento. Como metodología de optimización utilizan un algoritmo genético con lista o memoria tabú (ver capítulo 4). La finalidad de la hibridación como se verá más adelante, es aumentar las bondades de ambos algoritmos en la búsqueda del óptimo global.

En este mismo orden, Sotelo y Borán (2002) proponen un modelo para organizar por medio de un algoritmo genético el uso de bombas de agua en una central de bombeo, permitiendo la optimización del: mantenimiento en las que están fuera de servicio y del nivel de potencia en las que están en servicio para maximizar el nivel de bombeo para satisfacer la demanda puntual.

Azadivar (1998) plantea un modelo de optimización que considera las diferentes políticas de mantenimiento (variables cualitativas), y los parámetros de diseño del proceso productivo (variables cuantitativas) como la localización y tamaño de los buffer (almacenamientos intermedios de productos semi-acabados). La finalidad de la propuesta es optimizar el nivel de servicio para mantener una estructura de trabajo en proceso (WIP). Las políticas empleadas por el autor son:

- Política de mantenimiento predictivo.
- Política de mantenimiento reactivo (correctivo).
- Política de mantenimiento de oportunidad.
- Política de mantenimiento preventivo basado tiempo.
- Política de mantenimiento preventivo basado en MTBF.

Para la resolución del problema, el autor presenta una metodología computarizada basada en la integración de un proceso de simulación y optimización por medio de un algoritmo genético simple. El algoritmo genético utilizado, está fundamentado en el

estudio de Goldberg (1989) (ver capítulo 4). En la búsqueda de la mejor solución propuso la siguiente función objetivo:

$$\text{Maximizar } E[f(X,Y)] = E[f(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n, Y_1, y_2, y_3, \dots, y_m)].$$

Donde:

$X$  = representa las variables cuantitativas como: el vector frecuencias de los mantenimientos preventivos, vector longitud necesaria para los almacenes intermedios, vector localización de los almacenes, etc.

$Y$  = representa las variables cualitativas como: la política de mantenimiento a emplear, prioridad de las tareas, etc.

Sujeto a la restricción explícita como el total de espacio disponible para los almacenes en las estaciones de trabajo, y la implícita como el tiempo mínimo para la entrega de un producto.

La propuesta del autor es un enfoque diferente, donde además de la inclusión de las políticas de mantenimiento se consideran parámetros del proceso productivo en planta. Este desarrollo se asemeja a los análisis que haremos posteriormente en el siguiente capítulo, sirviéndonos también como referencia para nuestro estudio de optimizaciones conjuntas (mantenimiento y distribución en planta (ver capítulos 5 y 6).

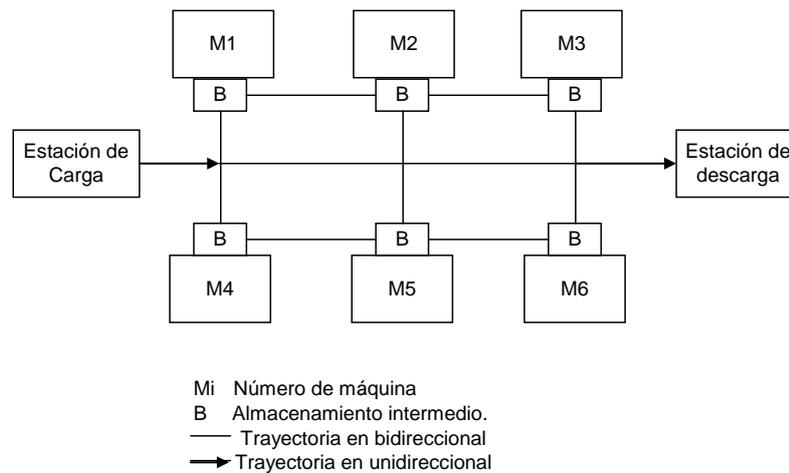


Figura 2.16: Representación de una distribución (FMS ver capítulo 3), donde se consideran las máquinas y los depósitos de almacenamiento intermedio (Azadivar, 1998).

Volkanovski y colaboradores (Volkanovski et al., 2008) presentan un modelo para la optimización del mantenimiento en centrales eléctricas, cuyo índice de riesgo es la pérdida de la carga o la probabilidad de que ésta ocurra en un lapso de un año. Este valor, representa por lo tanto, la confiabilidad del sistema de energía. Emplean un algoritmo genético para determinar el mínimo nivel de pérdida de carga en la planta. Esto lo realiza mediante la optimización de los horarios de mantenimiento para los generadores y la reducción de los costes de operación de éstos, pero procurando como fin último, satisfacer la demanda eléctrica puntual. Emplea una función objetivo, donde la pérdida de carga es un factor que aplica a todas las restricciones asociadas a los sistemas energéticos de esta naturaleza. Para el análisis de la probabilidad de pérdida de carga, utilizan datos que representan los estados de interrupción de carga para una central específica.

Los diferentes modelos para la optimización del mantenimiento, ya sea a nivel de componente, sistema o planta, atienden a las necesidades y criterios de actuación sobre los elementos a mantener, a las condicionantes, a la relación de fiabilidad entre componentes o sistemas y a los objetivos del mantenimiento. Los criterios y/o condicionantes pueden ser seguridad, productividad, capacidad de reposición y costes de mantenimiento. Donde la seguridad es una condicionante extremadamente importante, como en equipos o sistemas de Centrales Nucleares (Martorell, 1991;

Muñoz et al., 1997, Muñoz, 1997; Sánchez, 2000) y sistemas de aviación (Dekker, 1998), los modelos detallados para componente o sistema pueden ser aplicados.

Si el objetivo es realizar una secuencia de acciones de mantenimiento atendiendo a ciertos criterios como los propuestos por Lazo y Pacheco (1999), se pueden emplear formulaciones similares a las últimas descritas. Y al observar en la literatura, existen gran cantidad de propuestas para mantenimiento que emplean también algoritmos genéticos, como el modelo desarrollado Chan y Fwa (1994ab) para la optimización de la planificación del mantenimiento en la red de vías y autovías. Chanlu y Yoshito (1997) proponen la optimización de los programas de mantenimiento en los recubrimientos de protección de puentes. Y los desarrollos de Burke y Smith (1998a) y Volkanovskia et al. (2008), para la optimización en la utilización y mantenimiento de los generadores en planta, para conservar un nivel de carga en la red eléctrica. Cada uno de estos modelos está en función de ciertos criterios, necesidades y requerimientos.



# 3

Distribución en Planta,  
Optimización de la Implantación.



### **3.- Distribución en planta, optimización de la Implantación.**

Dadas las exigencias del entorno productivo actual, se hace necesario, cada vez más, elaborar productos de una gran calidad y cantidad a menor coste. Esto requiere del desarrollo de procesos de producción más eficientes y diseños óptimos a nivel de los sistemas productivos en una determinada planta. Para la optimización de un sistema productivo, es necesario organizar de forma eficiente, los elementos que lo integran, dentro del espacio disponible que posee la organización. Esto nos obliga a considerar un aspecto relevante del proceso productivo, como lo es el movimiento de materiales o materias primas para la elaboración de los productos. A partir del conocimiento del recorrido de estos materiales a través del proceso y de otros criterios seleccionados por la organización, será necesario determinar las posiciones relativas de los departamentos o actividades que hagan que este sea el menor posible. Para ello se formulan, hoy día, metodologías o técnicas que permiten determinar aquella ordenación que disminuya el recorrido de materiales, repercutiendo esto en el coste final de manutención. Con la aparición de los ordenadores, se ha hecho un gran avance en las técnicas encaminadas a optimizar la distribución de planta, a partir de las metodologías formuladas para tal fin.

En el presente capítulo, se realiza una recopilación de todo lo concerniente a los procedimientos para la colocación adecuada de estos elementos, para lograr así una correcta distribución en planta. También se aborda, de forma resumida y como paso previo a nuestro trabajo, el proceso de diseño esquemático de la distribución conocida como SLP (Sistematyc Layout Planning), para posteriormente comentar, a partir de la unión de las etapas finales de este proceso, los métodos para generar la distribución MGL (Métodos de Generación de Layout).

Del MGL se clasifican y definen algunas de las técnicas que han sido desarrolladas a lo largo de la historia por diferentes autores, técnicas que implican actualmente metodologías de optimización. De estas, al igual que el capítulo anterior, se comentan las propuestas para la resolución del problema de distribución bajo el enfoque combinatorial, y más aún, aplicando la metodología metaheurística de los algoritmos genéticos.

En el apartado final, se describen los diferentes desarrollos relacionados con la aplicación de los algoritmos genéticos. A partir de las propuestas y estudios realizados por algunos autores, y del uso de algunos de los atributos de estos algoritmos, se describen las diferentes maneras de formular el problema para resolver la optimización. Por lo tanto, el objetivo principal del capítulo, es conocer las diferentes formas de elaboración del modelo para la aplicación de la metodología de búsqueda.

### **3.1.- Distribución en planta.**

Como paso previo a nuestro trabajo, mencionaremos los conceptos existentes en la bibliografía en relación con la distribución en planta.

Según Muther (1981), la distribución en planta implica la ordenación física de los elementos industriales. Esta ordenación, ya practicada o en proyecto, incluye tanto los espacios necesarios para el movimiento del material, almacenamiento, trabajadores indirectos y todas las otras actividades o servicios, como el equipo de trabajo y el personal de taller.

Para Domínguez y colaboradores (Domínguez et al., 1995), la distribución en planta es el proceso para la determinación de la mejor ordenación de los factores disponibles, de modo que constituyan un sistema productivo capaz de alcanzar los objetivos fijados de la forma más adecuada y eficiente posible.

Bajo la perspectiva de un proyectista, una distribución de planta puede comprender solamente un lugar de trabajo individual, o la ordenación completa de muchas áreas de uso industrial, pero, cualesquiera sea el caso, debe ser considerado para lograr una distribución eficiente, que será plasmada en el plano de localización de los equipos (Anaya, 1998).

Desde el punto de vista de la arquitectura industrial, la distribución en Planta, es la ciencia de la conformación y calificación de los requerimientos espaciales, funcionales y ambientales de la actividad industrial, formalizados a través del proyecto y materializados mediante la construcción de los sistemas industriales (Jaén et al., 2002).

Según el enfoque de Gómez-Senent (1997), la distribución en planta consiste en resolver el problema de colocar todos los componentes físicos que intervienen en un proceso de fabricación, de modo que su comportamiento sea óptimo, desde el mayor número de puntos de vista posibles.

Por lo tanto, y como conclusión, la distribución en planta se fundamenta en la ordenación o integración de los espacios físicos que posee la organización, buscando con ello optimizar los recursos que dispone siendo estos de índole material y humano, en función de ciertos criterios u objetivos planteados por la organización o el diseñador. Para un desarrollo eficiente será necesario también tener presente todos los requerimientos (necesidades de espacio, seguridad, movilidad, etc.), así como las posibles discrepancias que se puedan originar a partir de ellos.

La distribución en planta representa un problema complejo, donde además de la aplicación de las metodologías de distribución y optimización, es necesario el conocimiento de las características principales y específicas tanto del proceso, los equipos y los materiales que circularán por toda la implantación.

Los problemas de distribución se pueden organizar, atendiendo al proceso de evolución de la misma, de la siguiente manera:

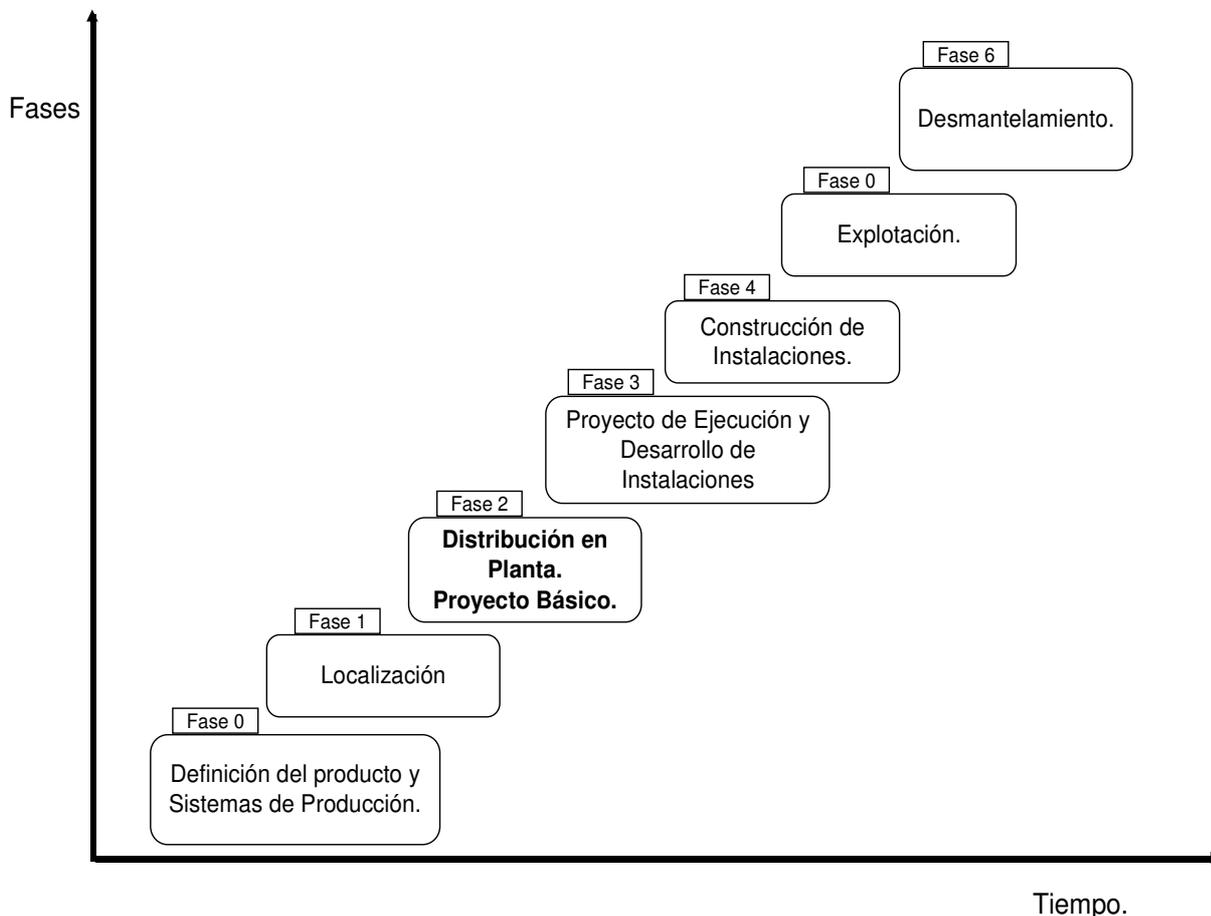


Figura 3.1: Fases de planificación de un proyecto industrial (González, 2005).

La primera etapa (fase 0), la definición del producto consiste en seleccionar o diseñar los productos. El diseño de un producto implica la determinación de las características, el momento y el conjunto de posibilidades que se pueden ofertar a los mercados. Los sistemas de producción representan la selección y diseño de los procesos necesarios para elaborar el producto, es decir, especificar como se desarrollará las actividades y qué tecnologías serán utilizadas por la organización para el logro de los objetivos planteados (Alcaide et al., 2001; Cross, 2002; Alcaide et al, 2004).

La localización (fase 1), representa la elección de un lugar geográfico para colocar la implantación que favorezca las operaciones de la empresa. Esto implica considerar factores como: facilidad y costes de transporte, mano de obra, materias primas disponibles, consumidores para los productos, servicios disponibles para los procesos, etc. (Francis et al., 1983; Badri, 1999; Cloquell, 1999; Ambrosino y Scutella, 2005; Klose y Drex1, 2005).

Como se ha observado al principio, es necesario determinar la ubicación de las actividades para que el recorrido de materiales sea mínimo, considerando a su vez otros factores (fase 2). Una mala distribución en planta, puede implicar también una configuración irregular de los departamentos, lo cual puede dar origen a: maquinaria y hombres parados, demora en la entrega de productos acabados o semi-acabados, problemas para la inspección y mantenimiento de los equipos, riesgos para el personal y equipos, poca adaptabilidad a cambios en las especificaciones del producto o a la demanda, etc. A partir de esta etapa donde se desarrolla la distribución en conjunto, se materializan las siguientes fases 3 y 4. La fase 3 representa el diseño de la distribución en detalle, es decir, considera las necesidades y aspectos que realmente se contemplarán en la planta, como por ejemplo: tomas de agua y de electricidad, ventanas, iluminación, extracción, ventilación. etc.

Las últimas etapas, fases 5 y 6, representan, respectivamente, la utilización de la planta y el desmantelamiento al finalizar la producción y no continuación de la misma o de otros procesos.

### **3.1.1- Objetivos de la distribución en planta.**

Una distribución óptima en planta repercutirá en un desempeño más eficiente de la producción, lo que implicará, a su vez, una interacción mucho más satisfactoria de todos los elementos involucrados en el proceso productivo, siendo estos los materiales, productos intermedios, equipos, sistemas de seguridad, talleres y operadores de planta.

Para Moore (1962) citado por (Santamarina, 1995) los objetivos de una distribución son:

- Minimizar los costes del manejo de materiales.
- Utilizar el espacio disponible de la manera más efectiva.
- Simplificar al máximo el proceso productivo.
- Promover la seguridad en el trabajo y aumentar la satisfacción del personal.
- Estimular a los operarios para aumentar el rendimiento.
- Evitar inversiones innecesarias.
- Disminuir al máximo el trabajo en curso.

La distribución en planta debe ajustarse a las necesidades y objetivos planteados por la organización. Según Apple (1977), los objetivos principales que desea una organización de una distribución en planta son:

- Facilitar la manufactura de procesos.
- Minimizar el recorrido del material.
- Mantener la flexibilidad de las operaciones de producción.

- Mantener el volumen de ventas.
- Mantener la inversión y amortización de los equipos.
- Hacer un uso económico y eficiente del edificio.
- Promover el uso eficiente de la mano de obra.
- Proporcionar satisfacción a los empleados en aspectos como la seguridad y el confort.

Muther (1981), plantea que el objetivo principal de la distribución en planta, consiste en el proceso de hallar una ordenación de las áreas de trabajo y del equipo, que sea la más económica para el trabajo, para el almacenaje, movimientos de materias y equipos, ya sean de producción o de taller, al mismo tiempo que sea la más segura y satisfactoria para los empleados y el medio ambiente. Por lo tanto, y a partir de este enfoque, los objetivos enumerados por Muther son:

- Reducción de riesgos para la salud y aumento de la seguridad de los trabajadores.
  - Elevación de la moral y satisfacción de los trabajadores.
  - Incremento de la producción.
  - Disminución en los retrasos de producción.
  - Ahorro de áreas ocupadas.
  - Reducción del manejo de materiales.
  - Mayor utilización de la maquinaria, de la mano de obra y de los servicios.
  - Reducción del material en proceso.
  - Acortamiento del tiempo de producción.
  - Reducción del trabajo administrativo y del trabajo indirecto en general.
  - Mejora y facilidad en la supervisión.
  - Disminución de la congestión y confusión.
  - Disminución del riesgo para el material y su calidad.
- 
- **Reducción de riesgos para la salud y aumento de la seguridad de los trabajadores.** Es importante tener una ordenación de las instalaciones de forma tal que los equipos que realicen procesos peligrosos como trato de sustancia químicas, altas temperaturas o emisiones acústicas que impliquen riesgos a los trabajadores, sean ubicados adecuadamente. Se deben tener presente también las condicionantes contra incendios como (Jaén et al., 2002):
    - Condicionantes de elementos constructivos para resistir incendios.
    - Condicionantes geométricos que establezcan las condiciones que debe satisfacer el diseño del edificio, a objeto de garantizar el confinamiento, control de incendio y evacuación de los ocupantes.
    - Condicionantes para la dotación de instalaciones de protección.

Otras condicionantes para la seguridad son (Pierre, 1978; Vallhonrat y Coromitas 1991):

- Los accesos, pasillos y salidas deben ser amplios y bien señalizados.
  - No deben colocarse maquinarias peligrosas en pasos frecuentes.
  - Los operarios no deben estar en las zonas peligrosas.
  - No deben existir elementos punzantes o cortantes en áreas de trabajo y circulación.
  - Debe existir acceso expedito a los equipos de emergencia.
- 
- **Elevación de la moral y satisfacción de los trabajadores.** Una buena distribución en planta donde se considere las necesidades de los trabajadores, aumentará la autoestima y por ende la capacidad productiva de estos. Se deben considerar múltiples factores como lo son la ventilación, exposición a sustancias tóxicas, distancias a recorrer por los empleados, lugares confinados, buena iluminación, seguridad industrial, etc.
  - **Incremento de la producción.** La distribución en planta repercutirá en un aumento considerable de la producción, debido al mejor reordenamiento tanto de las máquinas de producción como de los sistemas de transporte de materiales, permitiendo por ende la reducción de los costes.
  - **Disminución en los retrasos de producción.** Cuando una planta está bien organizada y ordenada, el material del proceso no se detiene, y si lo hace será de forma mínima, debido a que la línea de producción y los trabajadores no tendrán tiempos ociosos.
  - **Ahorro de áreas ocupadas.** Una correcta distribución de planta evitará que se presenten espacios ociosos, largas distancias entre máquinas de producción, largos recorridos para el personal de producción y taller, dispersión de los almacenes, etc.
  - **Reducción del manejo de materiales.** Una adecuada distribución en planta repercutirá en la reducción del movimiento y manipulación de los materiales como: materias primas de producción, máquinas y herramientas.
  - **Mayor utilización de la maquinaria, de la mano de obra y de los servicios.** Cuando el coste de alquiler de las máquinas y pago de mano de obra son elevados, es conveniente utilizarlo al máximo. Una correcta distribución de planta permitirá aprovechar al máximo la utilización de los recursos disponibles.
  - **Reducción del material en proceso.** El empleo de una correcta distribución en planta originará que el material esté en movimiento continuo, de una operación a otra, permitiendo mayor rapidez a través de la planta y reduciendo la cantidad de material en espera para el proceso.

- **Acortamiento del tiempo de producción.** Utilizando una adecuada distribución en planta, se lograrán reducir las distancias largas innecesarias como los tiempos de espera y almacenamiento inútiles, acortando el tiempo que necesita el material en su recorrido a través del proceso productivo.
- **Reducción del trabajo administrativo y del trabajo indirecto en general.** La reducción de los tiempos de producción y de espera, permitirán una reducción de las actividades de programación como de papeleo.
- **Mejorar y facilitar la supervisión.** Una correcta distribución permitirá un control más eficiente de las labores de vigilancia, tanto de los empleados y de los procesos productivos como del estado de los equipos
- **Disminución de la congestión y confusión.** La finalidad de la distribución es evitar las intersecciones de las líneas de producción y de transporte de materiales, que originan confusiones y congestiones.
- **Disminución del riesgo para el material y su calidad.** Separando las actividades que pudieran afectarse mutuamente se garantizará la calidad final del producto terminado.
- **Mayor facilidad de ajuste a los cambios de condiciones.** Un buen diseño de planta deberá considerar las posibilidades futuras de cambio de condiciones de los procesos de producción como diseño de nuevos productos (distribuciones flexibles).
- **Otras ventajas.** Entre estas podemos mencionar un mejor manejo de los costes de producción, mayor facilidad para el mantenimiento de equipos, mejores condiciones sanitarias, mejor ordenación de los equipos de producción y mejor disposición de los operarios y del personal de producción.

Los objetivos descritos anteriormente pueden ser expresados en principios que constituirán el apoyo teórico y metodológico para el diseño de una distribución de planta de forma ordenada. Estos principios es recomendable cumplirlos en su totalidad.

Muther (1981) propone los principios básicos de la distribución en planta que se describirán a continuación:

- **Principio de la integración de conjunto.** La distribución en planta es la que integra, de forma organizada, todos los elementos del proceso productivo, incluyendo los equipos de producción, espacios físicos disponibles, almacenaje de materias primas y repuestos, personal de producción o de mantenimiento, vigilancia y seguridad, es decir, la coordinación de las actividades para que todos los elementos de planta se comporten como una sola unidad productiva.

- **Principio de mínima distancia recorrida.** La mejor distribución en planta es la que permite el menor movimiento, tanto de las materias primas, maquinaria, herramientas, personal de producción, como del mantenimiento. Los movimientos en planta implican costes relacionados al gasto energético empleado por el transporte. Existen, en la actualidad, muchos sistemas de transporte como cintas transportadoras, trasportes neumáticos o hidráulicos, grúas eléctricas y motorizadas como carretillas elevadoras que requieren de alguna fuente de energía para el desplazamiento (Vallhonrat y Coromitas, 1991).
- **Principio de circulación o flujo de materiales.** Este principio se refiere a la existencia de un mínimo de congestión en el desplazamiento de algunos materiales en relación con otros, es decir, los materiales deben moverse a través de la planta sin dificultades o interrupciones prolongadas. Este principio guarda una estrecha relación con el principio anterior, donde el material debe recorrer la mínima distancia de forma progresiva hasta el final del proceso.
- **Principio del espacio cúbico.** Es el aprovechamiento del espacio físico en las tres dimensiones. Algunos procesos productivos emplean movimientos verticales o inclinados, utilizando transportadores por gravedad para el desplazamiento de materiales (Vallhonrat y Coromitas, 1991). Kochhar y Heragu (1998, 1999) consideran las dimensiones de los departamentos y los flujos verticales entre los diferentes pisos de la planta. Barbosa et al. (2002), proponen un desarrollo que considera los 3 ejes coordenados ( $x,y,z$ ), es decir, las tres dimensiones.
- **Principio de satisfacción y seguridad.** Como se ha indicado anteriormente, es importante considerar el factor humano en el diseño de plantas industriales, es decir, la distribución deberá contemplar el confort y la seguridad de los operarios. Esto implica incluir factores como aislamientos térmicos, calidad del aire, aislamiento higroscópico, iluminación y acondicionamiento acústico (Santamarina et al., 1998). En cuanto a la seguridad se deberá incluir en los planos de la distribución sistemas contra incendio, mecanismos de desalojo rápido de los empleados, etc.,.
- **Principio de flexibilidad.** Se refiere a la necesidad de que la distribución actual se adapte a los nuevos cambios que exige el mercado y a las nuevas tecnologías. Muchos de estos cambios se originan por modificaciones en el diseño, cambios en las especificaciones del producto, cambios en los métodos de producción, incorporación de nuevos sistemas de trasportes, nuevas normas de seguridad, nuevas mezclas de productos, cambios en el volumen de la demanda, creación de nuevos departamentos, equipos diagnóstico para mantenimiento, nuevas normas ambientales y programas futuros de expansión, (Moore, 1969; Clayton et al., 1975; Apple, 1977; Kochhar y Heragu, 1999; Bowser, 2004). Graves y Taylor (1994) citados por (Lie Chien Lin y Gunter, 1999), proponen índices

para evaluar la flexibilidad de una distribución, estimando el tiempo de respuesta a un nuevo producto y demanda.

Para Upton (1994), este principio puede ser visto desde diferentes puntos de vista como: flexibilidad del producto, flexibilidad de proceso, flexibilidad de determinación de itinerarios, flexibilidad de composición, flexibilidad funcional, flexibilidad de estado, flexibilidad de volumen, flexibilidad de programa, flexibilidad a largo plazo, flexibilidad a corto plazo, flexibilidad de expansión, flexibilidad de maquinaria, flexibilidad de mano de obra, flexibilidad de instalaciones y flexibilidad de modificaciones de diseño.

Rajasekharan, et al. (1998), Kochhar y Heragu (1999), y Balakrishnan et al. (2003), desarrollaron modelos que responden a estos cambios como: DFLP (Dinamic Facility Layout Problem), FMS (Flexible Manufacturing System) y DPLP (Dinamic Plan Layout Problem). El DFLP y DPLP simulan los cambios del entorno productivo (formulación dinámica), y buscan un balance entre los costes originados por los cambios, costes de los nuevos desplazamientos de materiales y los beneficios del cambio.

### **3.1.2- Los tipos de distribución de planta.**

Según Pierre (1978) existen diferentes tipos de distribución en planta, que se agrupan bajo dos puntos de vista:

- Bajo el punto de vista del tipo de industria.
- Bajo el punto de vista del tipo de organización de la producción.

#### **3.1.2.1.- Distribución según el tipo de industria.**

- **Industrias monolineales:**

La fabricación se realiza a lo largo de un circuito único, donde los productos se desplazan sucesivamente. Este tipo de distribución se emplea para tratar materias primas en la elaboración de productos únicos.

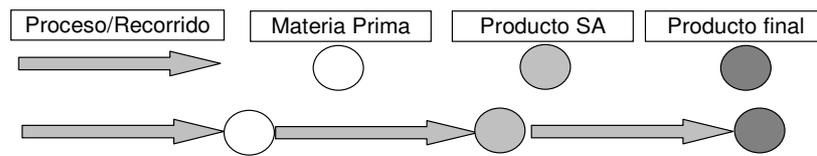


Figura 3.2: Industria monolineales.

- **Industrias sintéticas o convergentes.**

En este tipo de distribución, los productos semiacabados o materias primas llegan de diferentes puntos, convergiendo todos a una línea final de montaje.

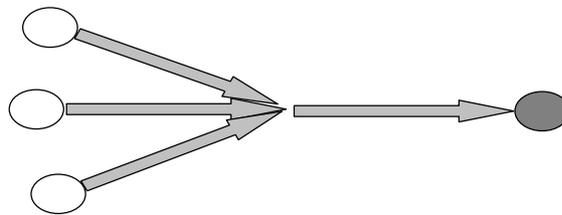


Figura 3.3: Industria convergente.

- **Industrias analíticas y divergentes.**

La materia prima a lo largo del proceso, diverge en diferentes líneas originando una serie de productos diferentes.

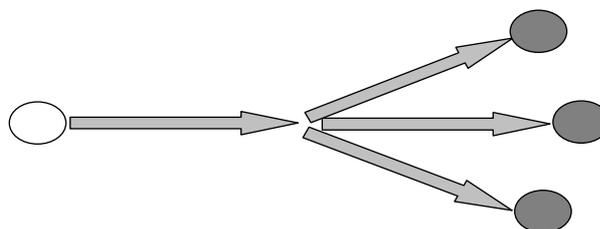


Figura 3.4: Industria divergente

- **Industria convergente y divergente.**

Este tipo de distribución es un híbrido de los antes mencionados. Consiste en que las materias primas en diferentes procesos convergen en un producto intermedio para luego divergir en diferentes productos particulares.

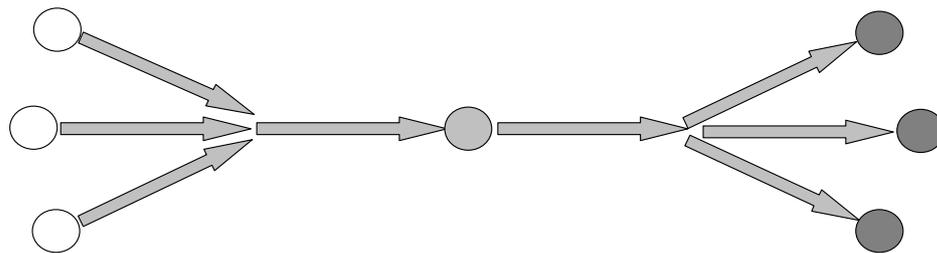


Figura 3.5: Industria convergente y divergente

### 3.1.2.2.- Distribución según la organización de la producción.

Este enfoque o punto de vista de la distribución es el más empleado, llamándose inclusive tipos básicos de distribución. Para comenzar a hacer el análisis y clasificación de las distribuciones según la organización de la producción, es importante mencionar las relaciones existentes entre los elementos involucrados en la misma: materiales, hombres y maquinaria. Existen sólo cinco modos de relacionar, en cuanto al movimiento, estos tres elementos de producción:

- **Movimiento de material:** Es el elemento más movido dentro de la planta. Consiste en el movimiento de la materia en el proceso manufacturero.
- **Movimiento del operario:** Los operarios se mueven de un proceso al siguiente para realizar las operaciones necesarias sobre el material.
- **Movimiento de maquinarias:** los operarios mueven diversos elementos como máquinas y herramientas, a lo largo de la distribución, para actuar sobre piezas en el proceso productivo.
- **Movimiento de material y operario:** el operario o trabajador se mueve junto con el material llevándolo a los lugares de procesado, ya sea a un lugar de trabajo o a una máquina.
- **Movimiento de material y maquinaria:** las herramientas y los materiales se mueven hacia los operarios encargados del proceso de producción.

Como se ha observado anteriormente, para que exista un proceso productivo es menester que se desplace al menos uno de los elementos antes mencionados. Por lo general es el material el que se desplaza, pudiéndole ocurrir según Muther (1981) tres cosas durante la elaboración del producto terminado:

- **Cambio de la forma inicial del material (elaboración o fabricación).** En estos se pueden incluir procesos de moldeado o prensado.

- Cambio de propiedades o características del material (tratamiento). Se pueden incluir el recocido de metales, cambio de las propiedades químicas de compuestos, etc.
- Adición de piezas para conformar el producto final (montaje o ensamblaje).

El proceso de selección de un tipo de distribución u otra, está muy relacionado con el tipo de operación de producción que se va a realizar al material y los movimientos de los medios directos de producción. Los tipos clásicos de distribución según la organización de la producción son tres (Muther, 1981):

- **Distribución por posición fija.** Tanto máquinas de producción y el equipo convergen en el punto donde se desarrolla el proceso productivo, es decir, el material o el producto a ser acabado está fijo y los desplazamientos los realizan todos los medios de producción. Esta forma de distribución es muy empleada cuando el producto final consiste en un elemento de grandes dimensiones y pequeñas cantidades, ejemplo:
  - Proyectos de montaje final de barcos en astilleros y de aviones grandes en hangares.
  - Proyectos de construcción de edificios, carreteras, puentes, túneles, etc.
  - Proyectos múltiples que se realizan en un mismo lugar como estudios de arquitectura, departamentos I+D, etc.



Figura 3.6: Distribución por posición fija, montaje de aeronaves.



Figura 3.7: Distribución por posición fija, montaje naval.

- **Distribución por producto.** En este tipo de distribución, es el material que se desplaza mientras que las máquinas y operarios de producción están fijos. El material sigue la secuencia de la línea de producción de uno en uno. Esta es adoptada cuando la producción está organizada, ya sea de forma continua (refinerías, centrales eléctricas, etc.) o repetitivas (electrodomésticos, cadenas de lavado de vehículos, etc.) (Vallhonrat y Coromitas, 1991).

Ventajas de la distribución por producto son:

- Manejo reducido de materiales.
- Escasa existencia de trabajos en curso.
- Tiempos cortos de fabricación.
- Uso más efectivo de la mano de obra.
- Mayor facilidad de control.
- Reducción de la congestión.
- Simplificación de sistemas de planificación y control de la producción.
- Simplificación de tareas.

Inconvenientes de la distribución por producto.

- Ausencia de flexibilidad en el proceso.
- Escasa flexibilidad en los tiempos de fabricación.
- Inversión muy elevada.
- El conjunto depende de cada una de las partes.
- Trabajos muy monótonos.

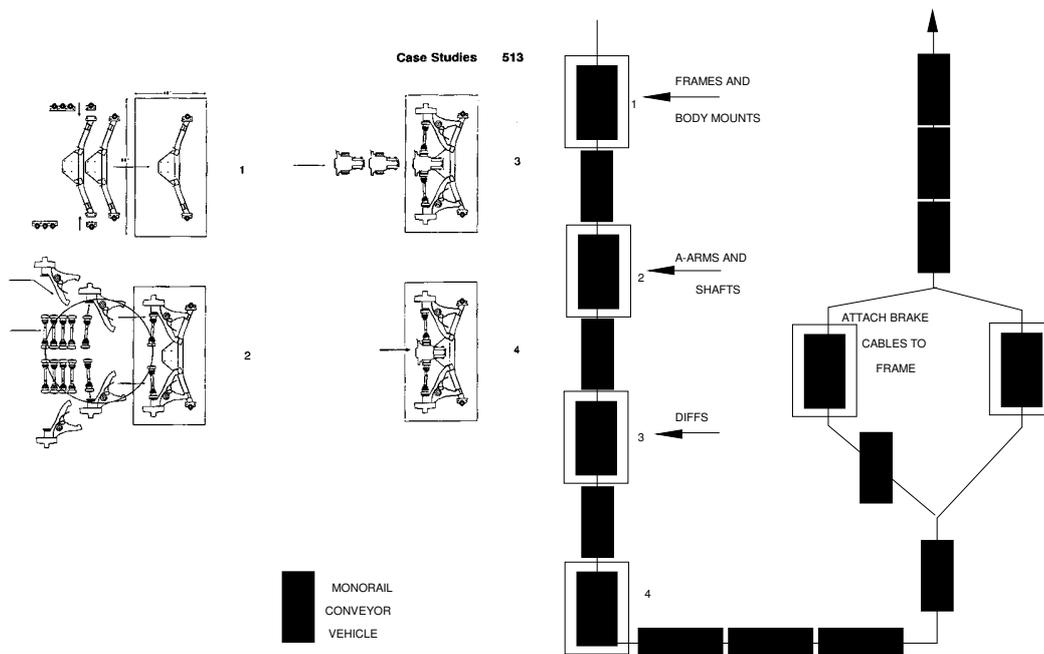


Figura 3.8: Distribución por producto, cadena de montaje de un eje motriz (Santamarina, 1995).

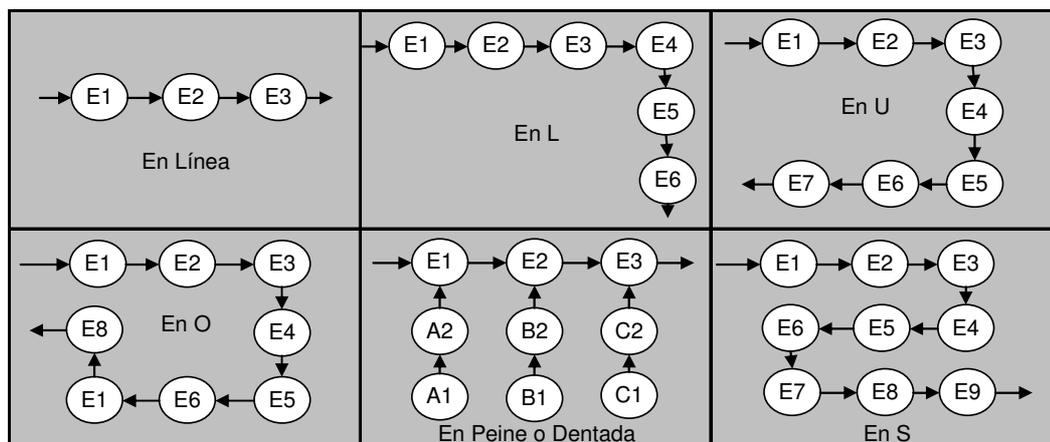


Figura 3.9: Formas más comunes de distribución por producto (Domínguez et al., 1995).

El flujo de trabajo en este tipo de distribución puede adoptar diferentes formas como se observa en la figura, dependiendo de cuál se adapta mejor a una determinada situación.

- **Distribución por proceso.** En este tipo de distribución, los operarios y máquinas de producción están organizados en un mismo espacio físico de acuerdo al proceso que se desarrolla, es decir, los puestos de trabajo se agrupan

por el tipo de actividad, de ahí que estas distribuciones también sean denominadas "por funciones" (Pierre, 1978). Se adopta cuando la producción se organiza por lotes de pedidos o series cortas.

Algunas de sus ventajas son (Vallhonrat y Coromitas, 1991):

- Flexibilidad en el proceso debido a la versatilidad de equipos y personal calificado.
- Adaptabilidad a gran variedad de productos y a la demanda intermitente.
- Menores inversiones en equipo.
- Mayor fiabilidad. La diversidad de tareas asignadas a los trabajadores reduce la insatisfacción y desmotivación de la mano de obra.

Los inconvenientes que presenta este tipo de distribución son:

- Baja eficiencia en el manejo de materiales.
- Elevados tiempos de ejecución.
- Dificultad en la planificación y control de la producción.
- Costo por unidad de producto más elevado y baja productividad.

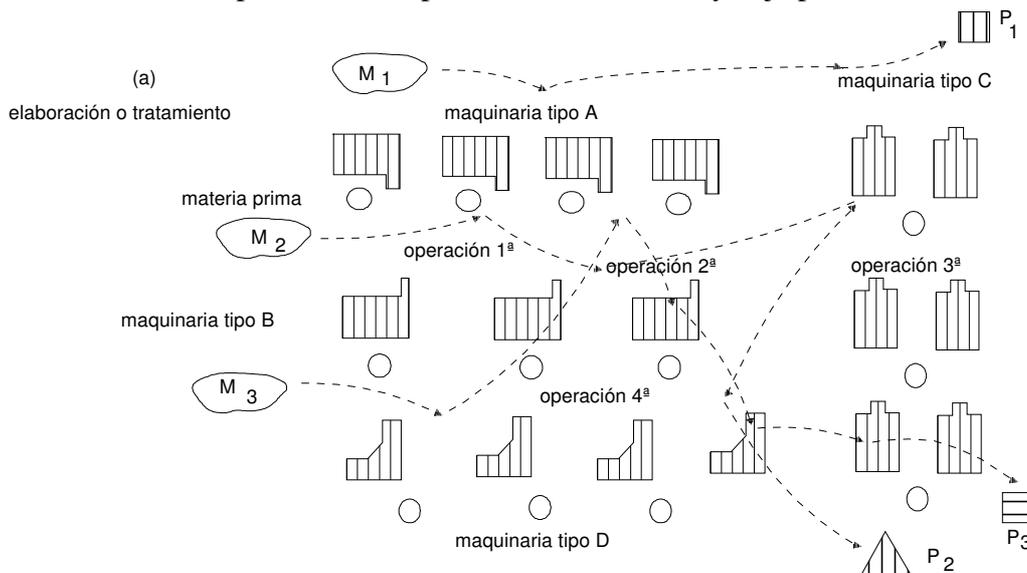


Figura 3.10: Distribución por proceso (Santamarina, 1995).

Para Muther (1981), la mayor parte de las distribuciones existentes constituyen una combinación de todas, pero las más usuales son las orientadas al proceso y al producto. Actualmente es necesario disponer de un sistema productivo que permita obtener como solución plazos breves y costes bajos, manteniendo a su vez la flexibilidad. Para cumplir con lo expresado, se debe disponer de un tipo de distribución que contenga las características comunes de la distribución orientada al proceso, dada su flexibilidad y la orientada al producto dada su eficiencia, denominándose este enfoque tecnología de grupos (Villahonrat y Coromitas, 1991). La tecnología de grupos

da como resultado la división del área de producción en sub áreas, llamándose a cada una de estas células de fabricación flexible. Para Contero (1995), las células de fabricación o agrupación por familia consiste en reunir los diferentes elementos, empleando para ello ciertas características comunes como: materiales similares, formas y secuencia de ensamblajes similares, procesos de manufactura iguales, etc., es decir, en agrupar los elementos en grupos homogéneos desde el punto de vista del proceso. Según Jaén y colaboradores (Jaén et al., 2002), éste concepto consiste en un conjunto de dos o más unidades de fabricación interconectadas por un sistema de transferencia, bajo un control central, formando un sistema integrado dentro del proceso de fabricación, por lo tanto, las Células de fabricación flexibles representan la unidad básica de los procesos de manufactura flexible. Los subsistemas que forman la Células Flexibles de Fabricación se organizan de acuerdo con la tecnología de grupos como:

- Subsistema de máquinas controladas por microcomputador.
- Subsistema de transporte y colocación de herramientas en las máquinas.
- Subsistema de carga y descarga en las máquinas.
- Subsistema de transporte y almacenaje de materias primas, productos semiterminados, productos y herramientas.
- Subsistema de ensamblaje de piezas y unidades.
- Subsistema de inspección y control de calidad.
- Subsistema de control de las instalaciones y medio ambiente.
- Subsistema de control central.

Este tipo de distribución tiene la ventaja de permitir el mejoramiento de las relaciones humanas y de las habilidades técnicas de los operadores. También disminuye la cantidad de material en proceso, los tiempos de preparación y de fabricación, facilitando, a su vez, la supervisión y el control visual del proceso productivo y de las máquinas encargadas. Como desventaja se aprecia que potencia el incremento de los tiempos inactivos de las máquinas e incrementa los costes.

Para llevar a cabo el proceso de formación de células se deben seguir tres pasos fundamentales (Evans, 1990):

- Seleccionar las familias de productos.
- Determinar las células.
- Detallar la ordenación de las células.

Para seleccionar familias y determinar las células se emplea el análisis del flujo de producción, que se basa en una matriz máquinas-componentes, cuya finalidad es identificar los componentes que tienen necesidades de maquinaria en procesos similares.

### **3.1.3.- Naturaleza de la distribución en planta.**

Entre las causas más comunes por las que aparecen problemas de distribución en planta podemos mencionar: cambios en la demanda y diseño de nuevos productos, cambio en la localización de los mercados, nuevas tecnologías de los equipos de producción, legislaciones ambientales y de seguridad, nuevas técnicas de mantenimiento para los equipos, cambio de los mismos por obsolescencia, etc. Por lo tanto, la implantación de los sistemas productivos no implica necesariamente la creación o construcción de una planta nueva. En algunos casos, muchos sistemas productivos se instalan en plantas ya existentes, con lo cual el proceso de implantación está delimitado o limitado por la estructura física, lo que representa un ajuste o reordenación en la distribución.

Los tipos básicos de problemas de distribución en planta son cuatro (Moore, 1969):

- Proyecto de una planta completamente nueva. Cuando no existe aún una estructura física y el proceso de implantación implica el diseño de la misma. El proyecto de distribución, deberá determinar el diseño del edificio para la ubicación del proceso y áreas administrativas.
- Expansión y Traslado a una planta ya existente. Cuando los sistemas productivos se instalan en una planta ya existente, se tiene una limitante a la hora de hacer la distribución de acuerdo con las necesidades de producción.
- Reordenación de una planta ya existente. Es la realización de cambios considerables en planta, para adecuarlos a las necesidades de los nuevos sistemas, entorno económico o procesos productivos.
- Ajustes Menores en distribuciones ya existentes. Implica cambios poco considerables en la estructura de planta para adecuarlo a las nuevas circunstancias.

Según Moore (1969), los motivos principales por los que se originan la reordenación de la planta son:

- Cambio en el diseño del producto. Como ejemplo, en la industria automotriz los modelos cambian considerablemente cada tres o cuatro años, lo que implica cambios necesarios en la organización de la distribución.
- Aparición de nuevos productos. Gracias a los avances de la investigación, los conocimientos existentes aumentan y por lo tanto la capacidad de innovar y crear. Para el progreso de una empresa es necesario la creación de nuevos productos a partir de estos nuevos conocimientos. El desarrollo de nuevos productos implica, por lo tanto, la reordenación del aparato productor y la

adquisición de maquinas y componentes nuevos, que repercutirán también en la reorganización de la planta.

- Cambios en la demanda. Implica revisar la ordenación existente, resultando en cambios de la planta, e incluso en el desarrollo de una nueva.
- Maquinaria y actividades obsoletas. La adquisición de nuevas tecnologías implica adecuar el entorno industrial de acuerdo a las especificaciones de estas.
- Accidentes frecuentes. Las distribuciones y los entornos peligrosos deberán ser revisados y modificados, para adecuarlos a las normativas actuales de seguridad industrial
- Puestos de trabajos inadecuados para el personal. Como se ha dicho, es necesario revisar los entornos no adecuados.
- Cambios en la localización de los mercados. Los costes de transporte en algunos casos, implica la búsqueda de una nueva localización y la construcción de una nueva planta.
- Necesidad de reducir costes. Por lo general implica cambios menores dentro de la planta, para adecuarla a un proceso productivo más eficiente.

Las figuras mostradas (3.11, 3.12) a continuación muestran la relación entre las causas expuestas por Moore (1969) y la distribución en planta.

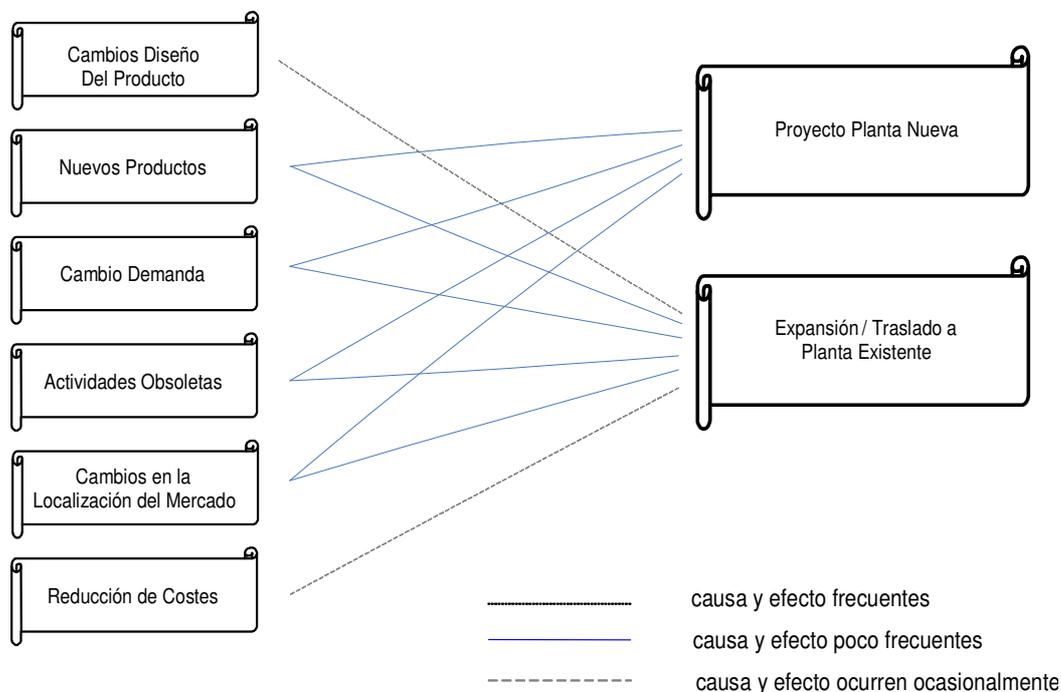


Figura 3.11: Causas más frecuentes de una planta completamente nueva y expansión y traslado a una planta ya existente (Moore, 1962).

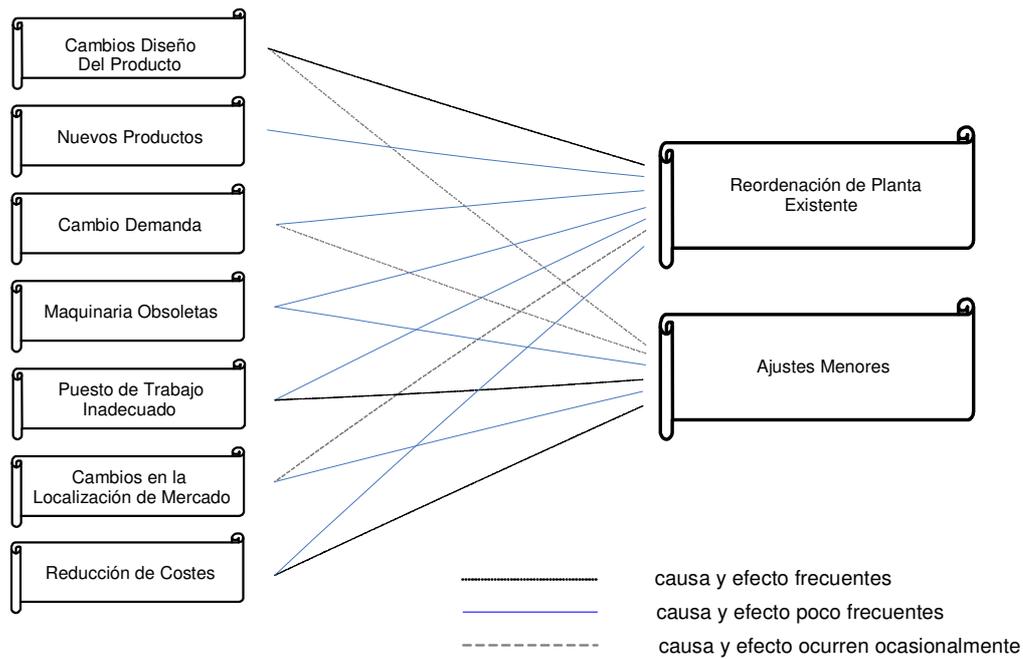


Figura 3.12: Causas más frecuentes para la reordenación de una planta ya existente y ajuste menores (Moore, 1962).

### 3.1.4.- Factores que influyen en el diseño de una distribución en planta.

En el proceso de diseño de la distribución en planta, es necesario considerar los factores implicados en ella y las relaciones existentes entre los mismos, para de esta forma analizar las diversas características y consideraciones que deben ser tomadas en cuenta al momento de llevar a cabo una distribución. Estos factores se dividen en ocho grupos (Muther, 1981): Materiales, Maquinaria, Hombre, Movimiento, Espera, Servicio, Edificio y Cambio.

#### 3.1.4.1 - Factor material.

En todo proceso de producción, el material representa la fuente principal para la elaboración del producto terminado. Es por tanto imprescindible, considerar este factor en el diseño final de la distribución, ya que el determinará, en buena medida, y en función del recorrido, el tipo de planta a emplear. Dentro de los materiales se pueden considerar todos aquellos elementos necesarios para la producción, seguridad del personal y mantenimiento:

- Características químicas y físicas de la materia prima.
- Material de recuperación o reciclaje.
- Material para el proceso de producción.
- Productos acabados y materiales de embalaje.
- Piezas rechazadas, a recuperar o repetir.
- Material saliente o embalado.
- Materiales y accesorios empleados en el proceso.
- Chatarras, viruta, desperdicios, desechos.
- Materiales para mantenimiento y taller.

El objetivo del proceso productivo es tratar, transformar o ensamblar el material, logrando con ello un producto con formas y características determinadas. Por esta razón, la distribución de los elementos de producción depende en gran medida del producto que se desee y el material utilizado para su realización.

Las consideraciones que afectan el factor material son:

- Especificaciones del diseño del producto.
- Cantidad y variedad de productos o materiales.
- Secuencia de operaciones para la obtención del producto final.

### **3.1.4.2.- Factor maquinaria**

La información sobre la maquinaria es imprescindible para una localización conveniente de la misma. La información en relación a las máquinas, puede ser consultada en los manuales del fabricante, donde se especifican las condiciones de operación, operarios necesarios, características físicas (peso y dimensiones) y las necesidades tanto energéticas como de algunos elementos para su utilización. Es por esto que la ubicación de las mismas dependerá de los requerimientos de la máquina y las necesidades de producción.

Este factor incluye los siguientes elementos:

- Máquinas de producción y equipo de proceso o tratamiento.
- Dispositivos especiales de la máquina para procesos específicos.
- Herramientas para su mantenimiento y demás accesorios para la producción.
- Unidades de prueba para la verificación de las condiciones de operación.
- Herramientas manuales y eléctricas manejadas por operarios.
- Cuadros de control para monitoreo del proceso y mantenimiento predictivo. (ver capítulo 3 y 5)
- Maquinaria de repuesto o inactiva para procesos en que la fiabilidad es crítica (redundancia). (ver capítulo 5).

- Maquinaria para mantenimiento, herramientas de taller u otros servicios.

Las consideraciones sobre el factor maquinaria son:

- Proceso en el que actúa dentro de la planta.
- Maquinaria, características físicas y espacios necesarios.
- Utillaje y equipo. Accesorios y personal necesario.
- Utilización de la maquinaria, formas adecuadas de uso.
- Requerimientos relativos a la máquina como necesidades energéticas y frecuencias de mantenimiento (ver capítulo 2).

### **3.1.4.3.- Factor hombre.**

Es el hombre, como factor de una distribución en planta, el más adaptable de los antes mencionados. Se puede trasladar a otros departamentos o áreas de producción, se puede formar para que realice nuevas actividades y se le puede ubicar en cualquier distribución que sea apropiada para las operaciones de producción. En la distribución es necesario considerar los aspectos de confort y seguridad, así como organizar los equipos de trabajo, de tal manera que no se interfieran mutuamente. Ejemplo los equipos de mantenimiento, limpieza y producción

Los elementos de este factor son:

- Mano de obra fija.
- Jefes y supervisores de equipo.
- Jefes de inspección y mantenimiento.
- Personal contratado.
- Personal de servicio.

Entre las consideraciones de este factor están:

- Condiciones de trabajo seguras para los trabajadores.
- Cantidad de mano de obra para cada proceso.
- Sincronización de los diferentes equipos de la planta.

### **3.1.4.4.- Factor movimiento.**

El movimiento es clave en el diseño de la distribución en planta, ya que es uno de los tres elementos básicos de la producción (material, hombres y maquinaria), además

es esencial para hacer posible el proceso productivo. Como se ha comentado anteriormente, uno de los objetivos de la distribución en planta, es optimizar las distancias a recorrer para minimizar costes de transportación.

Los elementos y particularidades de este factor son (Vallhonrat y Coromitas, 1991):

- Rampas, conductos, tuberías, raíles guía.
- Transportadores (de rodillos, ruedas, rastrillos, tableros articulados, de cinta, etc.).
- Grúas, monorraíles.
- Ascensores, montacargas, cabrias, etc.
- Equipo de estibado, afianzamiento y colocación.
- Vehículos industriales.
- Transportadores sobre el agua.
- Correo.

Consideraciones sobre el factor movimiento.

- Patrón de circulación de flujo. Movimientos de entrada y salida de material, movimientos de materiales de servicio o mantenimiento, movimiento de maquinaria y personal.
- Reducción del manejo innecesario y anti-económico.
- Manejo combinado.
  - El dispositivo de manejo o transporte puede usarse como dispositivo de almacenaje.
  - El manejo puede servir de regulador del ritmo de operación. Un transportador mecánico moviéndose, ya sea continuamente o de modo intermitente, puede acomodar el ritmo de las operaciones que alimenta.
- Espacio para el movimiento.
  - Espacio reservado para pasillos.
  - Espacio subterráneo o bajo los bancos de trabajo.
  - Espacio exterior al edificio.
  - Espacio para labores de mantenimiento (ver capítulo 5).
- Equipo de manejo.
  - Coste de funcionamiento de la maquinaria (combustibles y lubricantes).
  - Coste de mantenimiento de los equipos para el desplazamiento.

- Aspectos de seguridad de los equipos de transporte para el operario y otros.
- Efectos sobre las condiciones de trabajo.

También es importante en los movimientos de materiales evitar retrocesos y cruces de líneas de desplazamiento (Sly, 1997).

### **3.1.4.5.- Factor espera.**

Existe un área donde el material puede esperar, aparte de la zona del proceso productivo y destinado a contener los materiales, repuestos y máquinas, llamándose esta zona área de almacenamiento. Caso contrario, los materiales pueden esperar en la misma área de producción, aguardando a ser trasladados a la operación siguiente. A esto se le conoce como demora o espera (Azadivar y Wang, 2000).

Los costes de espera son los siguientes:

- Coste del manejo en el área de espera.
- Coste de los registros necesarios para no perder la pista del material en espera.
- Costes de espacio y gastos generales.
- Coste de protección del material en espera.
- Coste de los contenedores o equipo de retención.

Elementos particulares del factor espera:

- Área de recepción del material entrante.
- Almacenaje de materia prima u otro material comprado.
- Almacenajes dentro del proceso.
- Demoras entre dos operaciones.
- Áreas de almacenaje de productos acabados.
- Áreas de almacenaje de suministros, mercancías devueltas, material de embalaje, material de recuperación, desechos, material defectuoso, suministros de mantenimiento, piezas de recambio y muestras.
- Áreas de almacenamiento de herramientas, utillajes, galgas, calibres, maquinaria y equipo inactivo o de repuesto.
- Recipientes vacíos.

Consideraciones para el factor espera:

- Situación de los puntos de almacenaje o espera dentro de la distribución.

- Espacio para cada punto de espera.
- Métodos de Almacenaje.

#### **3.1.4.6.- Factor servicio.**

Los servicios de una planta son todas las actividades adicionales necesarias, personal extra y elementos que sirven de apoyo al proceso productivo. Estos consisten en una serie de elementos que junto a los de producción contribuirán considerablemente al buen desempeño de la planta. Estos servicios son:

- Servicios relativos al personal, como instrucciones de seguridad.
- Servicios de acceso a la planta.
- Instalaciones para áreas de esparcimiento.
- Protección contra fuego.
- Iluminación adecuada.
- Calefacción, ventilación y oficinas.
- Servicio de alimentación.
- Control de calidad y producción.
- Servicio relativo a la maquinaria y mantenimiento.
- Distribución de servicios auxiliares.

#### **3.1.4.7.- Factor edificio.**

El edificio es la estructura física donde se ubica la distribución. Representa la carcasa donde se localizan máquinas, materias y operarios. Este factor puede ser un limitante en el caso de que el edificio exista antes del diseño de la distribución.

Los elementos de este factor son:

- Edificio de un solo uso o de varios.
- La forma física que influye en la distribución.
- Ventanas para iluminación natural.
- Suelos y sótanos.
- Cubiertas y techos.
- Escaleras, ascensores y montacargas.
- Columnas y paredes.

### **3.1.4.8.- Factor cambio.**

Se requiere en la distribución de planta, de una condición de flexibilidad para que esta se adapte a los cambios.

Los elementos de este factor son:

- Flexibilidad de la producción.
- Adaptabilidad y versatilidad.
- Expansión y cambios externos.

## **3.2.- Diseño de la distribución de planta.**

El diseño consiste en un proceso creativo y de toma de decisiones para desarrollar un plan que satisfaga una necesidad o necesidades, requiriendo por lo tanto, un esfuerzo mental para definir y comprender el problema que demanda solución. Para González (2001), la distribución de planta, consiste en el diseño de la disposición de los elementos físicos de una actividad relacionada con la fabricación industrial, empleando para ello un proceso sistemático y creativo de forma análoga a cualquier otra actividad del diseño en proyectos de ingeniería.

Para el diseño de la distribución, es necesario considerar aspectos como: requerimientos del proceso y de seguridad, diseño de productos y diversificación, cambios de diseño y demanda de productos, cambios en las tecnologías de los equipos de procesos, aperturas o cierre de líneas de producción, mantenimiento de la estructura y equipos, reemplazo de equipos, áreas para el personal, planificación del proceso, etc.

Según González (2001), el diseño de una distribución en planta dentro del contexto de planta industrial, implica una interacción de esta con el diseño del proceso, diseño del producto y diseño de los programas de producción (figura 3.13).

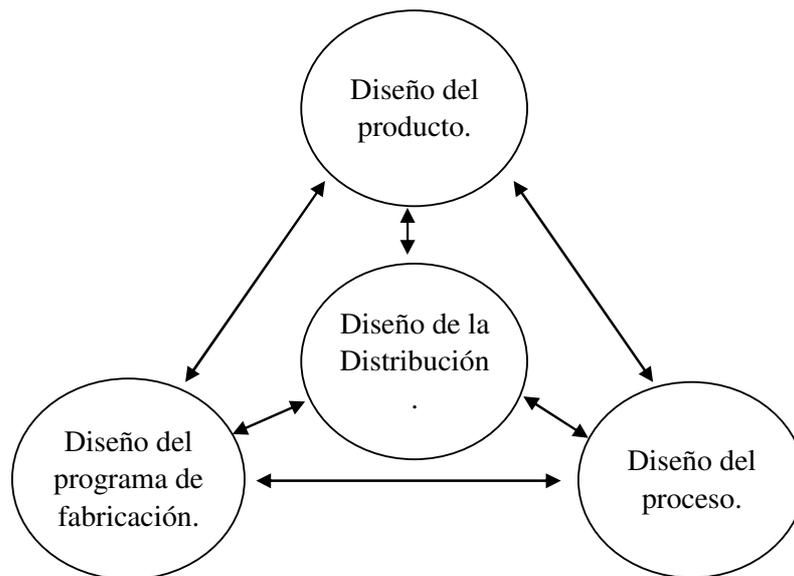


Figura 3.13: Vinculación entre distribución, producto, proceso y programa de fabricación (González, 2001).

### 3.2.1.- Metodologías para el diseño de la distribución en planta.

Para el diseño de una distribución, no existen métodos, formas o técnicas únicas de aplicación o resolución, habiendo la posibilidad de que para una determinada metodología se puedan emplear, combinaciones o variaciones para mejorarla, en función de necesidades específicas. Uno de los métodos más conocido para resolver el problema de implantación es el S.L.P (Systematic Layout Planning) propuesto por Muther en 1968. Esta metodología, esquemática, organizada, multicriterio, sistemática y prácticamente simple, consiste en fijar una serie de procedimientos para valorar, visualizar e identificar las relaciones existentes de todos los elementos (hombre, materiales, máquina, etc.), dentro de la distribución, incluyendo los siguientes puntos: recolección de datos, consideraciones cualitativas, diagrama relacional, requerimientos de espacios, espacios disponibles, diagramas relacional de espacios, consideraciones de modificaciones, limitaciones y evaluación (selección de alternativas).

Entre los primeros autores que desarrollaron esta metodología está Immer, que en el año 1950 (Immer, 1950), propuso un método sencillo basado en el principio de circulación o flujo de materiales, para resolver problemas de reordenación en las plantas en las que ya existía un proceso. La propuesta, según el autor, se basaba en tres fases:

- Plantear correctamente el problema.

- Detallar las líneas de flujo.
- Convertir las líneas de flujo en líneas de maquinaria.

Mas tarde, Buffa (1955), desarrolló un método llamado sequence analysis (SA) muy similar al SLP cuyas etapas eran:

- Recolección de datos relacionados con la organización, recorrido de las piezas en forma de hojas de rutas y estudio de los requerimientos del sistema.
- Realización de una tabla resumen, describiendo la secuencia de operaciones de cada una de las piezas.
- Elaboración de la tabla de cargas de transporte, expresando las cargas mensuales entre los diferentes departamentos (Load Summary).
- Elaboración del diagrama esquemático ideal (figura 3.14), localizando la posición relativa ideal entre los centros de trabajo. De este planteamiento surge el método basado en teoría de grafos que se describirá más adelante.

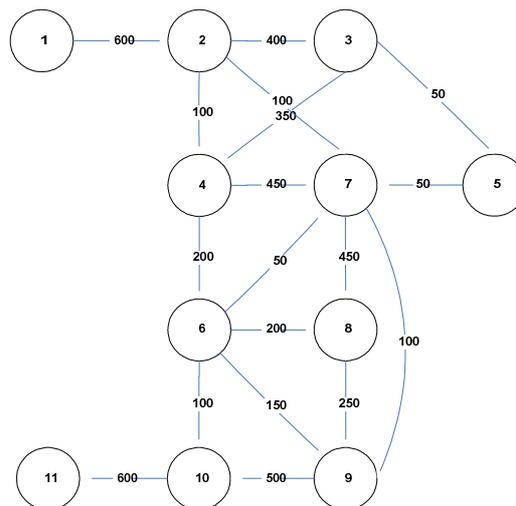


Figura 3.14: Diagrama esquemático ideal (Buffa, 1955).

Las líneas indican la carga transportada de materiales. Este grafo se elabora manualmente y se repite hasta lograr el objetivo. Es importante minimizar los cruzamientos de las líneas y que los departamentos en que el transporte de materiales sea mayor estén adyacentes.

- Elaboración del diagrama de bloques (figura 3.15) mostrando las relaciones entre los diferentes departamentos (layout de bloques).

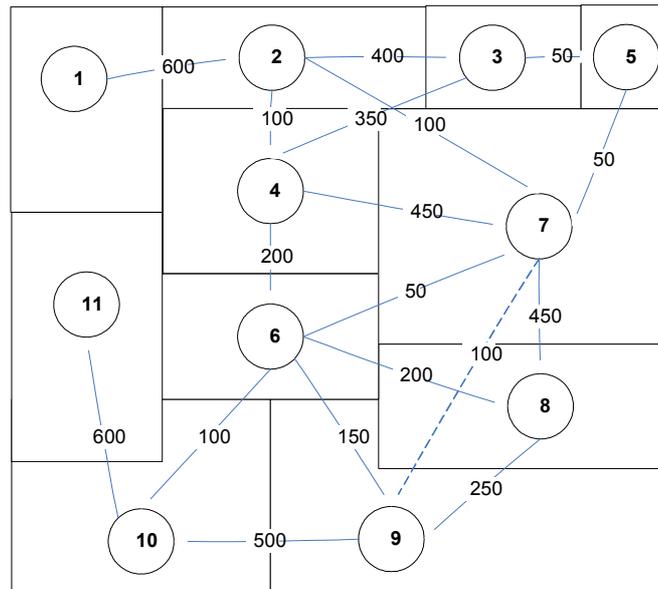


Figura 3.15: Diagrama de Bloques (Buffa, 1955).

- Desarrollo en detalles de los sistemas de manutención de materiales (layout de detalle).

### 3.2.1.1.- Procedimiento del S.L.P.

La aplicación de la metodología SLP (figura 3.16), comienza con la recolección de la información sobre el producto. La información necesaria es según Muther (1973) citado por (Vallhonrat y Coromitas, 1991; Hicks, 2003):

- Cantidad. Esta puede ser evaluada a partir de diferentes unidades de medida como: volumen ocupado, peso, valor económico, número de piezas producidas o utilizadas, etc.
- Procesos. Son las actividades necesarias para la transformación y tratamiento de la materia prima. Incluye también las actividades de montaje.
- Servicios. Son los medios auxiliares de la producción que permiten su buen funcionamiento incluyendo el mantenimiento.
- Recorrido. Es el orden de las operaciones como el desplazamiento de los materiales. Este puede ser medido en tiempos de operación y desplazamientos.
- Producto. Para la distribución en planta, es necesario clasificar los productos en grupos, cuando en un proceso estén incluidos varios de ellos y sean de diferente naturaleza. Este abarca productos y materiales como:

- Piezas compradas.
  - Materias primas.
  - Productos fabricados por la empresa.
  - Residuos y materia de desperdicio.
  - Productos en proceso.
- Tiempo. Se emplea para saber cuando fabricar la cantidad de productos en función del tiempo de fabricación, la maquinaria más idónea para satisfacer los tiempos, etc.

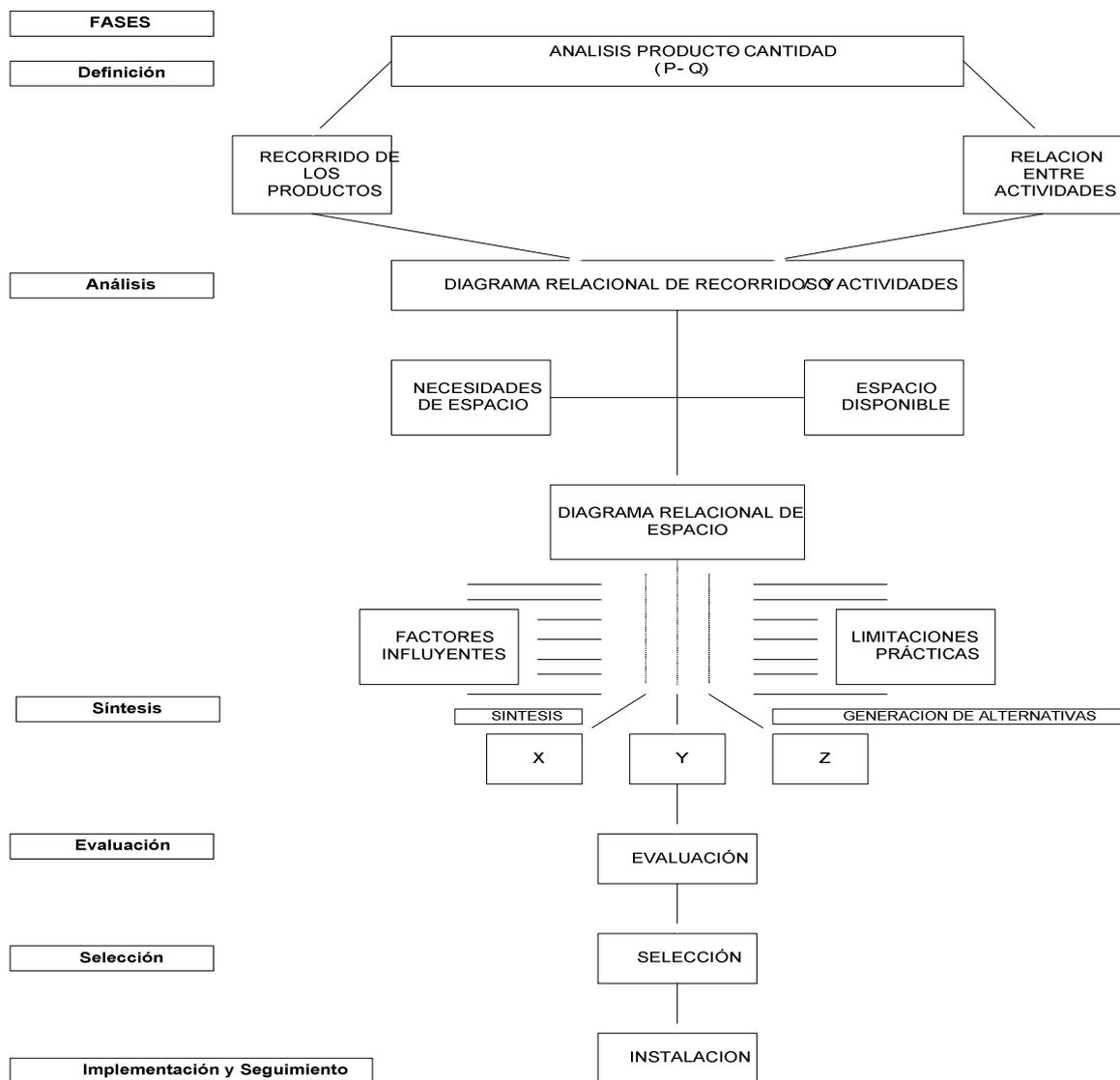


Figura 3.16: Systematic Layout Planning (Muther, 1968).

Las etapas que conforman el diseño de una distribución bajo esta metodología son (Muther, 1968):

- Definición del problema.
  - Análisis del producto y cantidad. Es importante para el proyecto de implantación, conocer la información en relación con la cantidad (Q) y tipos de productos (P) a producir. Esto permitirá tomar las previsiones que sean necesarias al momento de realizar la implantación. Muther (1968) propone una gráfica que relaciona la cantidad con los tipos de productos a fabricar (figura 3.17). La gráfica aporta información que nos permite visualizar de antemano, el tipo de distribución más probable a utilizar.

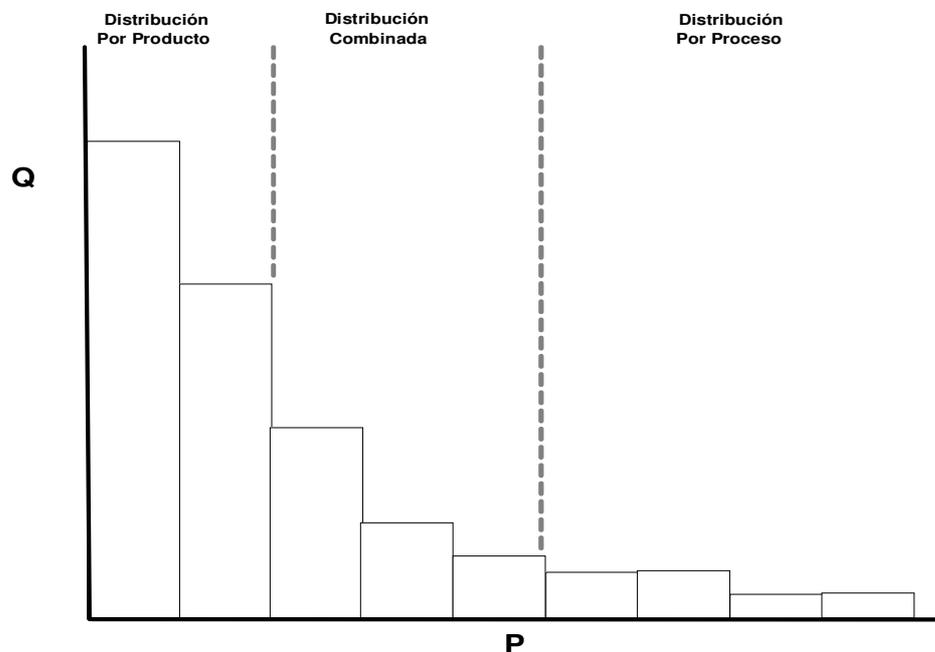


Figura 3.17: Gráfica (Q) y (P)

- Análisis del recorrido (figura 3. 18). El movimiento de materiales es un factor importantísimo en el diseño de distribuciones, dado que los volúmenes y costes de los mismos en el proceso son considerables. El análisis de recorrido representa la determinación de la secuencia de los movimientos o desplazamientos de los materiales a lo largo de las etapas del proceso. Implica valorar también la amplitud e intensidad de esos desplazamientos. Existen tres formas de llevar a cabo el análisis de recorrido:
  - Diagrama de recorrido sencillo. Se utiliza para pocos tipos de productos y grandes cantidades de los mismos. Los diagramas se

presentan en esquemas del proceso de fabricación, describiendo las operaciones para fabricar el producto, la secuencia de ejecución y orientación en las relaciones que deben de existir entre las distintas operaciones del proceso productivo.

- Diagrama multiproducto. Varios tipos de productos y cantidades intermedias. Este emplea una matriz donde es posible visualizar, en el mismo instante de tiempo, todos los productos incluidos en el proceso. Este tipo de diagrama, permite encontrar la ordenación de las operaciones respetando el principio de flujo de materiales.
- Tabla matricial. Para muchos productos con características diferentes y donde no es posible agruparlos en familia, se utiliza la tabla matricial propuesta por Muther (1981).

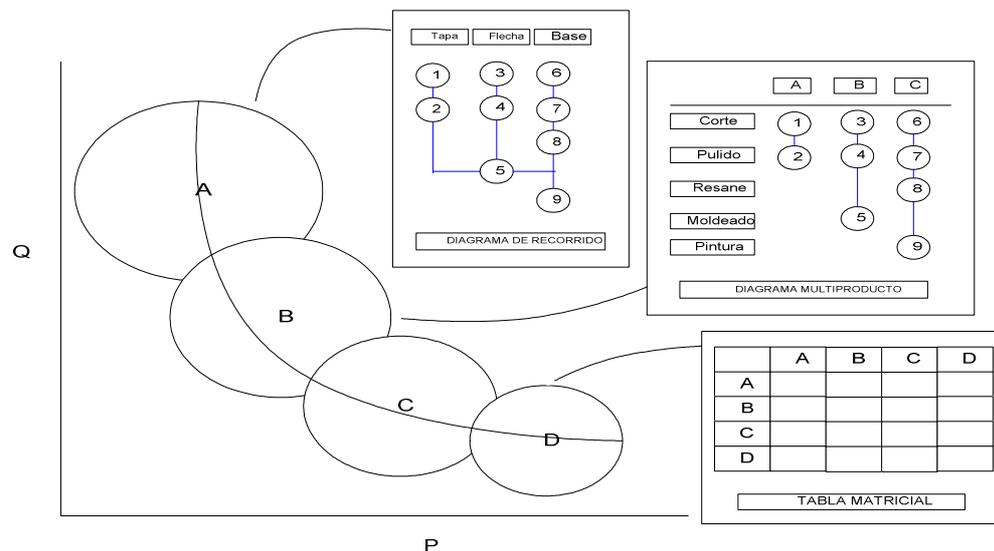


Figura 3.18: Análisis de recorrido de productos.

- Relación entre actividades. Es necesario conocer y comprender las relaciones entre todos los elementos que conformarán la distribución en planta. En estas relaciones se incluyen todos los elementos: hombre, máquinas y materiales que de una forma directa o indirecta contribuirán al proceso de producción (consideraciones cualitativas). También pueden ser consideradas las actividades como medios auxiliares de producción, seguridad industrial y mantenimiento. Para representar las relaciones se utiliza la tabla relacional de actividades T.R.A (figura 3.19), que es un cuadro donde se organizan las relaciones entre actividades, y por medio de la cual se valora la necesidad o importancia de que dos actividades estén próximas en la implementación.

Muther (1968) emplea la escala A, E, I, O, U; X para calificar y cuantificar la relación entre actividades, donde A = absolutamente necesaria, E = especialmente importante, I = importante, O = ordinaria, U = sin importancia, X = rechazable.

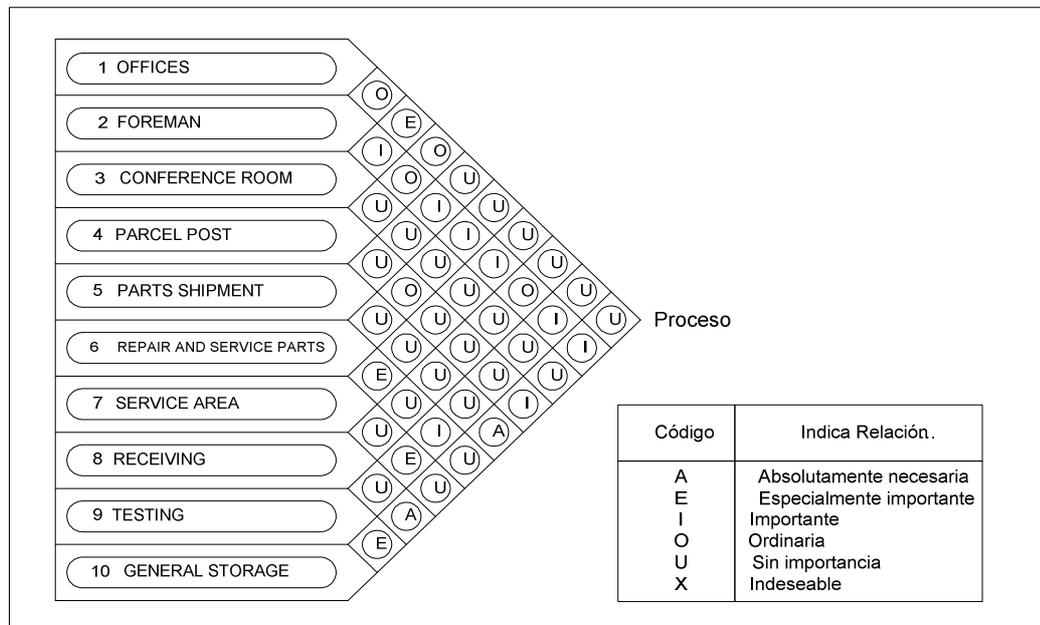


Figura 3.19: Ejemplo de tabla relacional de actividades (TRA).

- Análisis del problema.
  - Diagrama relacional de actividades y recorridos (figura 3.20 y figura 3.21 respectivamente). El diagrama relacional de actividades y recorridos, es un grafo que representa la secuencia de actividades y la importancia relativa de las adyacencias entre estas. Este grafo se obtiene a partir de la tabla relacional de actividades comentada anteriormente y del análisis de recorridos.

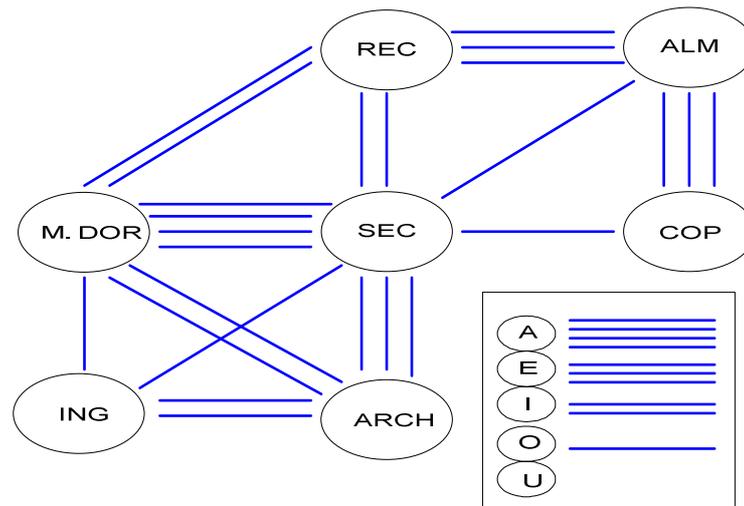


Figura 3.20: Diagrama relacional de actividades (Glover et al., 1985)

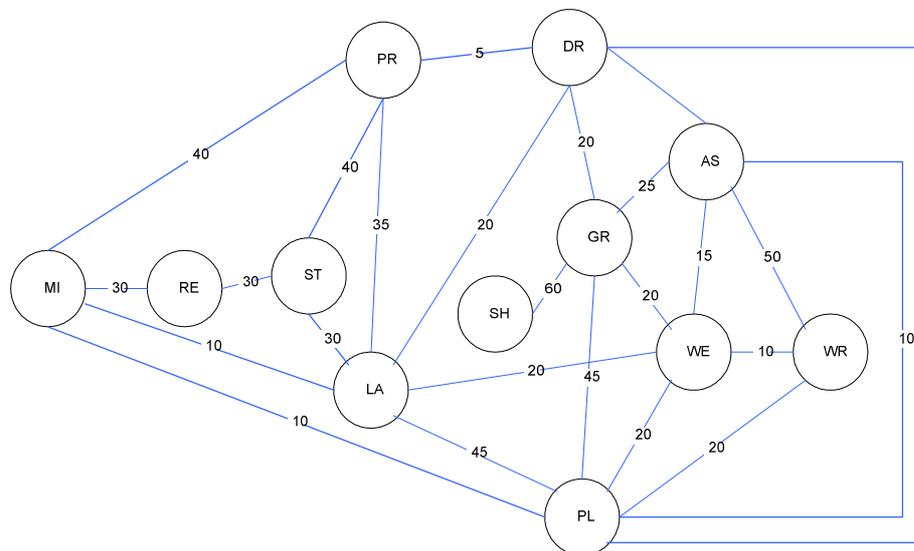


Figura 3.21: Diagrama relacional de recorridos (Montreuil y Ratliff, 1989).

- Necesidad y disponibilidad de espacios (diagrama relacional de espacios, figura 3.22). Para decidir la localización donde se va a ubicar la distribución, es importante conocer, aunque de manera aproximada, la necesidad de espacio de la planta.

El diagrama relacional de espacios se diferencia de los anteriores, en que la simbología está dibujada a escala, de esta forma cada superficie asignada estará representada por una escala proporcional necesaria (Muther, 1968).

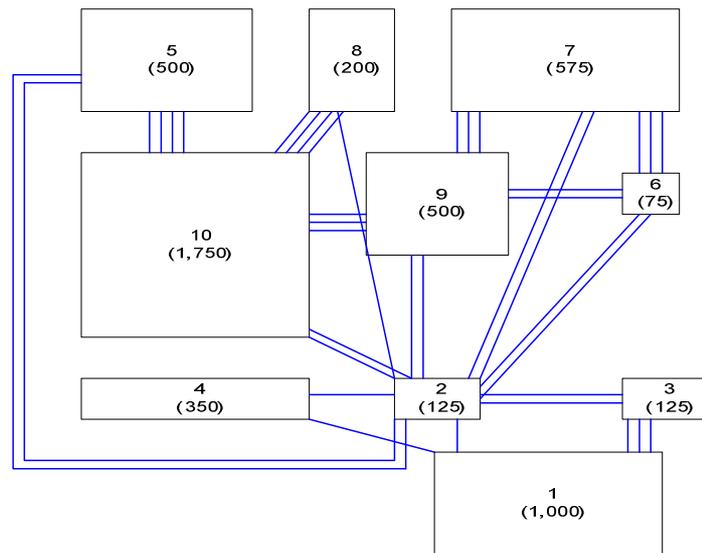


Figura 3.22: Diagrama relacional de espacios (Muther, 1968).

Entre las actividades que requieren espacio están:

- Almacenes de productos terminados.
  - Mantenimiento (ver capítulos 2 y 5).
  - Almacenes para equipos móviles de manutención.
  - Embalaje.
  - Almacén de materias primas.
  - Aparcamiento de vehículos de transporte.
  - Oficinas, aseos y vestuarios
  - Pasillos.
  - Almacenes de materias primas.
  - Almacenes de herramientas.
  - Comedores, etc.
- Generación de alternativas (síntesis). Esta etapa depende tanto de la información disponible, objetivos, parámetros como de los medios que tenga el proyectista para realizar su trabajo. Estas pueden ser:
    - Manuales. Es la aplicación de técnicas de sistemas de representación (geometría descriptiva) y maquetas (Pierre, 1978).
    - Métodos de generación de layout (MGL). Estos métodos ayudan al proyectista en la búsqueda de una solución para la implantación (ver apartado 3.2.2).

A partir de todos estos factores se desarrollan diferentes propuestas o alternativas de distribuciones de planta. Unos aspectos a considerar en las diferentes alternativas, según Rodríguez et al. (2002) son:

- Sectorización de la planta.
- Relocalización y amplitud de los espacios productivos, según las necesidades actuales y posibles crecimientos.
- Asignación de productos-clientes a zonas según el análisis histórico.
- Pasillos amplios adaptados a los requerimientos de los nuevos carros y con recorridos perpendiculares.
- Ubicación en paralelo de las máquinas y en la zona central de la nave para facilitar el flujo de productos.
- Accesos suficientemente amplios en zonas de paso y oficinas, etc.

Rodríguez y colaboradores (Rodríguez et al., 2002), proponen también un proceso de simulación para evaluar el comportamiento de las diferentes alternativas, en relación con el funcionamiento de las secciones de montaje y el almacenamiento. La finalidad de la propuesta, es estudiar y evaluar el comportamiento de la alternativa de distribución para luego hacer la elección más idónea.

- Evaluación y selección de las alternativas. La evaluación y selección de las alternativas es un compendio de todos los aspectos de cada etapa, es decir, la decisión final estará influenciada tanto por criterios cualitativos (como las necesidades de proximidad, seguridad, etc.) y cuantitativos (como necesidad de espacio y distancias a recorrer). Este enfoque se conoce como la naturaleza multicriterio de los problemas de distribución que se comentarán posteriormente, (Rosenblatt, 1979; Fortenberry y Cox, 1985; Urban, 1987; Malakooti, 1989; Islier, 1998; Kochhar y Heragu, 1999; Sha y Chen Chien-Wen, 2001; Deb y Bhattacharyya, 2003).
- Implantación y seguimiento.

La correcta ubicación de los equipos, combinado con un buen flujo en los recorridos de las materias, serán la base de un sólido proceso de producción. Actualmente existen nuevos programas (S.L.P) que agilizan y optimizan el flujo de materiales generando a su vez posibles alternativas. Entre estas herramientas informática tenemos: Factory OPT, Factory PLAN, y FactoryFLOW (Sly, 1997).

### **3.2.2.- Clasificación general de los métodos para generar la distribución a partir del SLP.**

Los avances en las técnicas de manufactura y producción, tecnologías nuevas presentes en productos, informática, equipos y costes, hacen necesaria la utilización de metodologías que ayuden o faciliten el trabajo de evaluar, seleccionar y optimizar el diseño de la distribución en planta (ver apartado 3.5). Los métodos para generar la distribución o MGL (Métodos de Generación de Layouts) son la integración de las fases síntesis, evaluación y selección del S.L.P (Systematic Layout Planning).

Para tener una idea de los métodos existentes, Santamarina (1995) ofrece una primera clasificación global desde diferentes puntos de vista:

- Por la forma de generar la solución.
  - Métodos de construcción.
  - Métodos de mejora.
  - Métodos híbridos.
- Por la técnica utilizada en la ubicación de las actividades.
  - Métodos basados en las técnicas discretas.
  - Métodos basados en las técnicas corte.
  - Métodos basados en técnicas analíticas.
- Por la naturaleza de la función objetivo (formulación de la función objetivo).
  - Métodos cuantitativos.
  - Métodos cualitativos.
  - Métodos multicriterios.
- Por la técnica empleada en resolver el problema.
  - Métodos óptimos ó exactos.
  - Métodos heurísticos y metaheurísticos.
- Por la forma de generar la solución.
  - Métodos de construcción. Este algoritmo selecciona las actividades y las reparte de forma secuencial en la planta, pudiendo ser estas de dimensiones conocidas o desconocidas. Entre estos métodos podemos mencionar: ALDEP (Seehof y Evans,1967), CORELAP (Lee y Moore, 1967), SHAPE (Hassan et al., 1986).etc.,

- Métodos de mejora. Parten de una solución inicial y mediante un algoritmo de intercambio van modificando las posiciones ocupadas por las diferentes actividades, buscando una mejora de la calidad de la distribución. Entre estos podemos mencionar el: GRAFT (Buffa, et al. 1964), los métodos basados en búsqueda tabú (Abdinnour-Helm y Hadley, 2000) y simulated annealing (Mavridou y Pardalos, 1997).
- Métodos híbridos. Emplean las dos metodologías antes comentadas, entre estos podemos mencionar los basados en algoritmos genéticos.
- Por la técnica utilizada en la ubicación de las actividades.
  - Métodos basados en las técnicas discretas. Esta se realiza por la formulación discreta (discretización) del dominio global.
  - Métodos basados en las técnicas cortes. El espacio para cada actividad es asignado mediante un algoritmo recursivo del área total en cuestión, (Santamarina, 1995; Tam y Chan, 1998; Gau y Meller, 1999; Azadivar y Wang, 2000).
  - Métodos basados técnicas analíticas. Esta se plantea como una formulación analítica del problema.
- Por la naturaleza de la función objetivo (formulación del problema).
  - Métodos cuantitativos. La formulación se basa en el coste asociado a los desplazamientos de materiales entre las actividades.
  - Métodos cualitativos. Se basa en factores cualitativos que se cuantificarán en función a una escala de valores.
  - Métodos multicriterios. Es la formulación global de los problemas de distribución.
- Por la técnica empleada en resolver el problema.
  - Métodos óptimos ó exactos. Se basan en procedimientos de límites (branch and bound) que pueden ser enumerativos o semi enumerativos. Los algoritmos branch and bound comienzan con una solución inicial, estableciendo una cota superior de los posibles valores óptimos en la función objetivo. A partir de esta solución establecida, se diversifican y se obtienen nuevas soluciones para las próximas configuraciones. Estas nuevas soluciones pasarán a ser cotas inferiores, las cuales se comparan con la cota superior ya establecida. Si una solución óptima es menor que la solución de la cota superior, para problemas de minimización, el nodo queda sondeado, si no es factible, se ramifica nuevamente.
  - Métodos heurísticos y metaheurísticos.

- Métodos generales. Entre estos podemos citar a los ya mencionados GRAFT, ALDEP, CORELAP, SHAPE, etc.,
- Métodos basados en la teoría de grafos. Esta metodología busca una ordenación topológica a partir de un GPPM (Grafo Planar Ponderado Máximal).
- Métodos basados en simulated annealing. Esta metodología de optimización metaheurística, se basa en la aplicación de la analogía en relación con el comportamiento de los metales al ser enfriados, es decir, simula un proceso de evolución termodinámica hasta un estado de mínima energía o de equilibrio termodinámico, (kirkpatrick et al., 1983).
- Métodos basados en lógica borrosa. Esta emplea la lógica difusa. La lógica difusa se basa en la teoría de los conjuntos difusos o borrosos, es decir, no es posible determinar un criterio de todo o nada, dada la imprecisión de los límites (Shanker y Vrat, 1999; Deb y Bhattacharyya, 2003).
- Métodos basados en búsqueda tabú. Metodología de optimización conformada por una memoria a corto, medio y largo plazo que orienta la búsqueda con base a ciertas condiciones tabú, direccionando las operaciones de una forma subordinada para evitar caídas en óptimos locales (Glover, 1986, 1989, a,b; Abdinnour-Helm y Hadley, 2000).
- Métodos basados en computación evolucionista. Estas se basa en la analogía de evolución de las especies, es decir, consiste en simular el proceso evolutivo de una población de individuos en un entorno definido.

La mayoría de las formulaciones matemáticas de estos problemas, establecen la implantación como un problema cuadrático de asignación QAP (Quadratic Assignment Problem). En la formulación QAP, se toma en cuenta que las  $n$  actividades serán asignadas a  $n$  localizaciones. El término de asignación, corresponde a que una actividad sólo será asignada a una determinada localización.

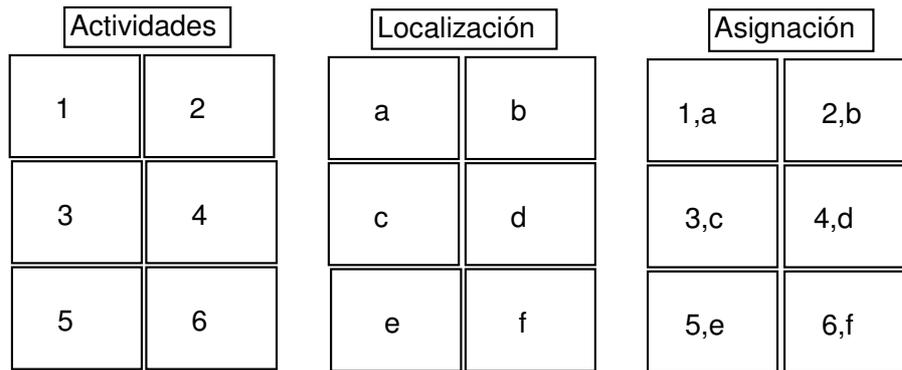


Figura 3.23, Asignación de actividades y localizaciones (QAP).

Esta fue utilizada por vez primera por Koopman y Beckmann en 1957 (Suresh, et al., 1995; Sha y Chen Chien-Wen, 2001; Gómez et al., 2003). La formulación general para un modelo (QAP), propuesto en 1994 por Li y Smith es (Ontiveros, 2004):

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{h=1}^n f_{ij} \cdot d_{kh} \cdot x_{ik} \cdot x_{jh}$$

sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ik} = 1 \quad (k = 1, 2, 3, \dots, n).$$

$$\sum_{k=1}^n x_{ik} = 1 \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n).$$

Donde:

$f_{ij}$  = flujo de materiales entre la actividad  $i$  a la  $j$ .

$d_{kh}$  = distancia entre las localizaciones  $k$  y la localización  $h$ .

$x_{ik} = 1$  sí la máquina  $i$  es asignada a la localización  $k$ , y cero lo contrario.

La primera restricción asegura que una actividad es asignada a una localización. La segunda a que sólo una localización va a ser utilizada por una sola actividad.

La función coste de manutención es:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} \cdot d_{ij}$$

Donde:

$c_{ij}$  = coste asociado al flujo de materiales entre la actividad  $i$  a la  $j$ .

$d_{ij}$  = distancia entre las localizaciones de la actividad  $i$  y la localización de la actividad  $j$ .

Este tipo de formulación toma en cuenta que las  $n$  actividades serán asignadas a las  $m$  localizaciones, siendo  $n$  igual a  $m$ . Adicionalmente las áreas de las actividades serán iguales y cuadradas. Para problemas de áreas desiguales, la planta se puede descomponer en un conjunto de partes de igual área (ver formulación discreta).

### 3.3.- Formulación de la Función Objetivo.

La formulación de la función objetivo para la optimización de la distribución en planta, la podemos clasificar, como ya se ha comentado en los MGL, en tres tipos de formulación: cualitativa, cuantitativa y multicriterio.

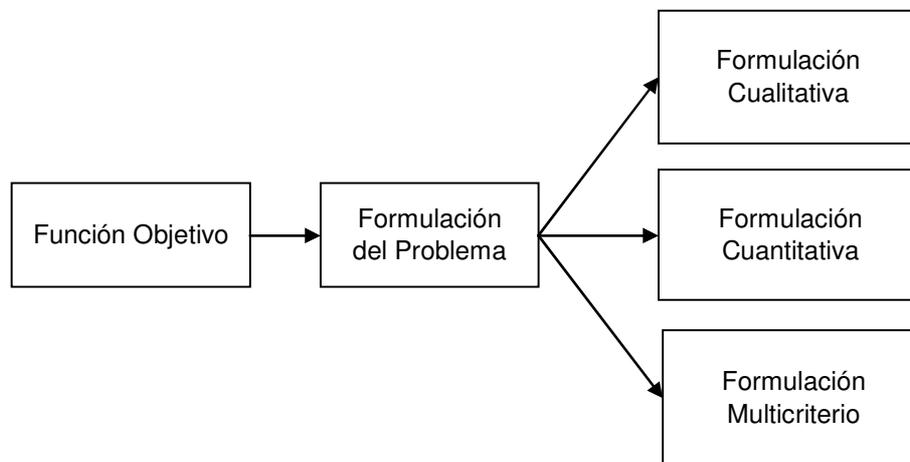


Figura 3.24: Clasificación de los modelos de formulación según la naturaleza de la función objetivo.

### 3.3.1.- Formulación cuantitativa.

La formulación del problema se basa en el elemento coste asociado a los desplazamientos de materiales entre las diferentes actividades.

El elemento coste contempla dos aspectos: primero el coste asociado al flujo de materiales entre actividades aplicando la intensidad relacional ( $w_{ij}$ ), y segundo, el coste asociado a la localización de una actividad en una determinada posición.

La intensidad relacional es un concepto introducido por Hospitaler y Cano en 1986 (Contero, Santamarina, 1995; Ontiveros, 2004), que define la necesidad de proximidad entre un par actividades. El otro concepto utilizado es la distancia relacional ( $d_{ij}$ ), que representa la magnitud que cuantifica la distancia relativa entre dos actividades (centro de gravedad o centroide de dos actividades multiárea) (Heragu, 1997). La expresión del coste relacional entre dos actividades es:

$$c_{ij} = w_{ij} \cdot d_{ij}$$

Y, para múltiples actividades  $m$  a distribuir, se puede utilizar la expresión:

$$C = \sum_{i=1}^m b_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} \cdot d_{ij}$$

Para formular el problema como un problema cuadrático de asignación (QAP), es necesaria la definición de una variable llamada de asignación que representa los siguientes aspectos:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si la actividad } i \text{ este en la localización } k \\ 0 & \text{en caso contrario.} \end{cases}$$

Por lo tanto, se puede expresar, la función objetivo para minimizar el coste total de la distribución en planta de la siguiente manera:

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n a_{ik} \cdot x_{ik} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f_{ij} \cdot c_{ij} \cdot d_{kl} \cdot x_{ik} \cdot x_{jl}$$

Sujeto a

$$\sum_{i=1}^m x_{ik} = n_i \quad i = 1, 2, \dots, m$$

$$\sum_{k=1}^n x_{ik} = 1 \quad k = 1, 2, \dots, n$$

$$x_{ij} = x_{ij}^2$$

Donde:

$n$  = número de localizaciones igual a  $m$ .

$a_{ik}$  = coste de instalar una determinada actividad  $i$  en una localización  $k$ .

$f_{ij}$  = flujo de materiales de la actividad  $i$  a la  $j$  y es independiente de la localización de las actividades.

$c_{ij}$  = coste de transportar por unidad de distancia, una unidad de producto desde la actividad  $i$  a la actividad  $j$ , siendo independiente de las actividades y dependiente del sistema de manutención.

$d_{kl}$  = distancia de la localización  $k$  a la  $l$ .

Uno de los principales inconvenientes de la formulación cuantitativa, es la limitación a la hora de incluir aspectos como: servicios auxiliares de producción, servicios al personal y mantenimiento. Esto se debe a que las intensidades relacionales de estos con los medios directos de producción, no pueden ser expresados adecuadamente por medio del recorrido de productos.

### 3.3.2- Formulación cualitativa.

Se basa en los factores cualitativos que se cuantificarán a partir de una escala de importancia entre dos actividades adyacentes (figura 3.25). Como mecanismo de resolución cualitativo-cuantitativo, se utiliza la tabla relacional de actividades TRA (figura 3.19), y partiendo de la escala propuesta por Muther (1968) (A, E, I, O, U; X) se toman los distintos valores que se emplearán en la formulación matemática.

A	E	I	O	U	X	Referencia
6	5	4	3	2	1	(Dutta,1982)
5	4	3	2	1	-1	(Fortenberry y Cox, 1985)
64	16	4	1	0	-1024	(Tompkins, 1984)

Figura 3.25: Escala relacional de actividades codificación numérica.

La formulación cualitativa tiene como finalidad maximizar el coeficiente de relación global, que representa la disposición que mejor se adapta a las preferencias de adyacencia de las actividades.

Cuando se trata de problemas de optimización de multitarea, se utiliza una matriz de fronteras  $F(f_{ij})$ , que contienen toda la información relacionada con la adyacencia

entre las actividades. Si dos actividades  $i$  y  $j$  tienen frontera común el valor  $f_{ij}$  es uno y cero lo contrario. Por lo tanto se puede expresar.

$$\max \text{imizar } R = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m r_{ij} \cdot f_{ij}$$

$r_{ij}$  = representa los valores numéricos asociados a la tabla TRA.

Este tipo de formulación tiene el inconveniente, que el estudio está sujeto al la subjetividad del proyectista, al momento de evaluar las relaciones entre actividades.

### 3.3.3.- Formulación multicriterio.

Permite abordar el problema desde un punto de vista más global, porque se adapta mejor a los casos reales, donde es necesario considerar criterios tan amplios como la seguridad, satisfacción del personal, espacios a utilizar, servicios, flexibilidad, mantenimiento, estética, ruidos, temperatura, costes, etc. Así, la función objetivo bajo este enfoque contemplará múltiples factores.

Según lo dicho por Gómez-Senent (1997), el objetivo principal de este tipo de formulación, es seleccionar la mejor alternativa desde los diferentes puntos de vista u objetivos.

Malakooti (1989), comenta, que cualquier problema de distribución en planta, tiene un enfoque multicriterio en la selección de la mejor solución, siendo bastante específica en dominio y problema.

La distribución en planta se formula, por su naturaleza propia, en un problema multicriterio donde es posible actuar en tres vertientes:

- La generación de la alternativa.
- La selección de la alternativa.
- En la generación y en la selección de las alternativas.

Las ventajas de la formulación multicriterio, con relación a la formulación cualitativa, es que esta última limita el número y tipos de factores a considerar en la distribución, restringiéndose a un número pequeño de objetivos. La técnica de formulación multicriterio se puede utilizar para optimizar los costes de la producción bajo diferentes criterios elegidos por los expertos. De los criterios descritos por Ontiveros (2004) podemos mencionar:

- Criterios de formas: esbeltez y compacidad (figura 3.26).

- Criterios económicos: coste de inversión, operación, material almacenado, costes de mantenimiento, etc.
- Criterios tecnológicos: volumen de producción, transporte interno, secuencia de operaciones, manutención, ampliación, etc.,.
- Criterios organizativos: modularización, estandarización, simplicidad, etc.
- Criterios de flexibilidad: de volumen, maquinaria, expansión, etc.
- Criterios de seguridad y salud.

La compacidad se obtiene dividiendo el área del rectángulo más pequeño que puede contener la actividad por el área de esa actividad. La esbeltez se obtiene dividiendo la longitud más pequeña del rectángulo que contiene a la actividad por su ancho.

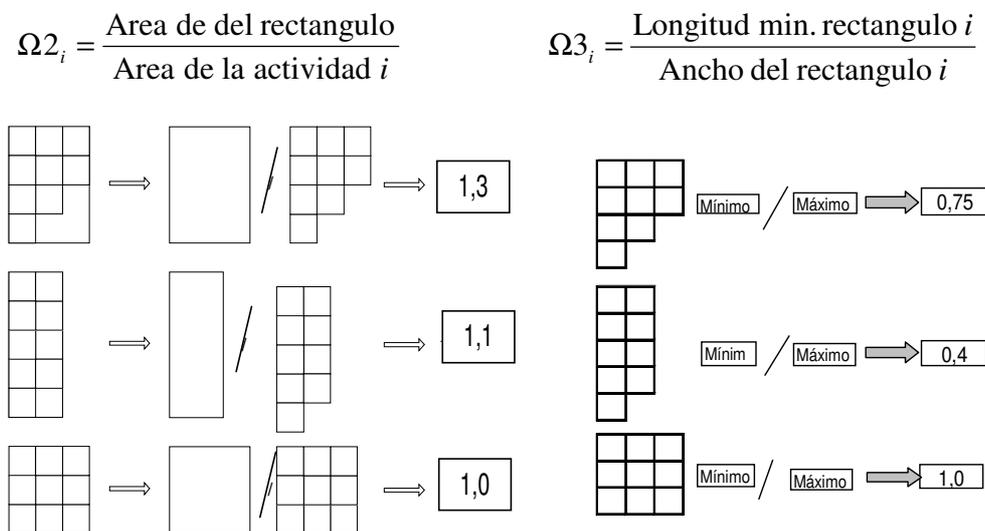


Figura 3.26: Representación de compacidad y esbeltez respectivamente (Liggett y Michell, 1981).

Rosenblatt (1979), fue el primer autor que combinó en la función objetivo criterios cuantitativos y cualitativos. Raoot y Rakshit (1993) citados por (Islir, 1998) integran también ambos criterios en una función objetivo para optimizar costes empleando modelos aditivos (ver apartados 3.3.3.1 y 3.3.3.2). Mas tarde, Sha y Chen Chien-Wen (2001) presentan un estudio basado en la propuesta de autores como: Dutta y Sahu (1982); Fortenberry y Cox (1985), Malakooti (1989); Urban (1987), Harmonosky y Tothero (1992) entre otros, para la distribución en planta bajo múltiples objetivos, formulada como un QAP y denominada MOFL (Multiple Objective Facility Layout Problem). La función objetivo presentada por los autores, está en función de una variable que representa la combinación de criterios (cualitativos y cuantitativos). En esa misma publicación y aplicando el mismo modelo, los autores emplean la media y la desviación estándar de los costes de distribución para diferentes alternativas, definiendo

para ello límites de control. Esta propuesta, además de determinar las mejores alternativas en función de los criterios, normaliza los resultados (ver apartado 3.3.3.3.2.1).

Como se ha comentado anteriormente, para Sha y Chen Chien-Wen (2001) los análisis multicriterios en distribución en planta, pueden ser formulados también como un problema cuadrático de asignación QAP (quadratic assignments problem), donde la finalidad es minimizar el coste de asignar  $n$  actividades a  $n$  localizaciones. La formulación es:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{h=1}^n A_{ijkl} X_{ij} X_{kl}$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} = 1 \text{ para todas las localizaciones } j.$$

$$\sum_{j=1}^n x_{ij} = 1 \text{ para todas las localizaciones } i.$$

Donde:

$X_{ij} = 1$  si la actividad  $i$  es asignada a la localización  $j$ , y cero todo lo contrario.

$A_{ijkl}$  es el coste de localizar la actividad  $i$  en la localización  $j$  y la actividad  $k$  en la localización  $l$ .  $A_{ijkl}$  representa en la ecuación, el coste variable de combinar factores cualitativos y cuantitativos en el modelo MOFL. La siguiente ecuación, implica que en cada localización solo será asignada una actividad, y la última que cada actividad será asignada a solo una localización física.

Desde los años 70, una gran cantidad de desarrollos para la distribución en planta bajo múltiples criterios han sido propuestos:

- Rosenblatt (1979), Dutta y Sahu (1982) definen el coste de localizar una actividad como:

$$A_{ijlk} = \alpha_2 \cdot C_{ijlk} - \alpha_1 \cdot R_{ijlk}.$$

Donde:

$C_{ijlk}$  = coste total de mantenimiento.

$R_{ijlk}$  = coeficiente de relación global total.

$\alpha_1$  y  $\alpha_2$  son los coeficientes de ponderación de importancia relativa del coste derivado del flujo de materiales.

- Fortenberry y Cox (1985), presentan un modelo de multicplidad o multiplicativo, en el cual las necesidades de acercamientos, como criterios cualitativos y las distancias entre departamentos, (factores cuantitativos) afectan el diseño de la implantación. El coste es definido como:

$$A_{ijkl} = f_{ik} \cdot d_{jl} \cdot r_{ik}$$

Donde:

$f_{ik}$  = flujo de trabajo de la actividad  $i$  a la  $k$ .

$d_{jl}$  = distancia entre los centros de las localizaciones  $j$  y  $l$ .

$r_{ik}$  = coeficiente de relación global entre las actividades  $i$  y  $k$ .

- Khare (1988) citado por (Sha y Chen Chien-Wen, 2001) define el costo como:

$$A_{ijkl} = \alpha_1 \cdot f_{ik} \cdot d_{jl} + \alpha_2 \cdot r_{ik} \cdot d_{jl}$$

Donde:

$f_{ik}$  = flujo de trabajo de la actividad  $i$  a la  $k$ .

$r_{ik}$  = coeficiente de relación global entre las actividades  $i$  y  $k$ .

$f_{ik}$  = flujo de materiales entre las actividades  $i$  y  $k$ .

$d_{jl}$  = distancia entre los centros de las localizaciones  $j$  y  $l$ .

- Urban (1987) presenta un modelo aditivo que combina los aspectos cualitativos y cuantitativos asignando valores apropiados a los pesos de los criterios. El coste es definido como:

$$A_{ijkl} = d_{jl} \cdot (f_{ik} + C \cdot r_{ik})$$

Donde:

$C$  = constante de peso que determina la importancia de las adyacencias en la implantación.

$r_{ik}$  = valor en la tabla relacional de las actividades  $i$  y  $k$ .

$d_{il}$  = distancia de los centros de las localizaciones  $j$  y  $l$ .

$f_{ik}$  = flujo de materiales entre actividades.

- Malakooti (1989), propone un método de agregación parcial interactivo en el que se van generando y evaluando alternativas secuencialmente, permitiendo un proceso de mejora, debido a que en el paso siguiente se consideran las opiniones pasadas de los expertos. Para las industrias modernas, el autor, además del criterio coste derivado de la manutención, le da importancia a las distribuciones que proporcionen la máxima flexibilidad.

Deb y Bhattacharyya (2003) exponen los problemas de distribución en planta como un problema difuso, dado que, en su criterio, las opiniones emitidas por uno o más expertos en relación a los diferentes criterios del problema (cuantitativos y

cualitativos) son imprecisas. El problema aquí es planteado mediante variables lingüísticas (ver capítulo 4), expresiones difusas y algoritmos borrosos. Estas son técnicas alternativas para el trato de condiciones multicriterios no discretas.

### 3.3.3.1.- Técnicas agregación.

Existen diferentes formas de agregar los diferentes objetivos que se desean incluir en la función objetivo, siendo la más empleada la suma ponderada. En esta técnica, como se ha observado anteriormente, a cada criterio se le asigna un coeficiente de ponderación que representa la importancia de este con respecto a los otros:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^u w_i f_i(\underline{x})$$

Donde:

$w_i \geq 0$  son los pesos que representan la importancia relativa de los criterios  $f_i(x)$ .

Otro procedimiento es la programación por metas (González, 2005), este consiste en que el decisor tiene que asignar las metas u objetivos que se deseen lograr para cada uno de los criterios. La finalidad en si, es minimizar las desviaciones de éstos con lo que realmente se aspira, es decir, minimizar la diferencia entre los valores obtenidos y los deseados. Se incorporan en el problema como restricciones. La formulación de este método puede ser de la siguiente manera:

$$\min \sum_{i=1}^u |f_i(\underline{x}) - T_i|, \quad / \quad \underline{x} \in F$$

Donde:

$T_i$  = meta u objetivo establecido para el i-ésimo criterio  $f_i(\underline{x})$ , y  $F$  representa el conjunto de soluciones posibles.

El método de las restricciones, es otra metodología que se basa en minimizar una función objetivo, considerando a los demás objetivos como restricciones que están acotadas por niveles permisibilidad  $\varepsilon_i$ . Por lo tanto, se realiza una minimización con la finalidad de que el criterio más relevante quede sujeto a estas restricciones adicionales.

Existen otras técnicas como la familia de los métodos ELECTRE, que consisten en métodos de sobre clasificación que utilizan los fundamentos de criterio concordante, criterio discordante, índice de concordancia, etc. (Aragonés, 1997). También están los métodos de jerarquías analíticas AHP (Analytic Hierarchy Process), que utilizan escalas

relativas (ratios de preferencia) y comparaciones binarias en los diferentes niveles del problema de decisión (Saaty, 2000)(ver apartado 3.2.2.5.4).

Actualmente se emplean técnicas de fronteras de Pareto, que consisten en determinar un punto (óptimo de Pareto), que maximice el nivel de satisfacción de un criterio sin perjudicar a los otros. Esta fue originalmente propuesta por Francis Isidro Edgeworth y posteriormente generalizada por Wilfredo Pareto (González, 2005).

### 3.3.3.2.- Técnicas de Ponderación.

La utilización de la formulación multicriterio para la optimización de la distribución en planta, puede tener al final de su aplicación una gran dispersión de los resultados debido a los pesos que se les asignen a los criterios. Resulta difícil satisfacer todas las necesidades de adyacencia, por lo tanto, la solución final deberá ser un equilibrio entre las necesidades o exigencias establecidas por los diferentes expertos. Cada alternativa bajo un criterio tiene un coste parcial de aplicación,  $C_i$ , que representa el coste obtenido al aplicar el criterio  $i$ , siendo la expresión:

$$C_t = \sum_{i=1}^p \alpha_i \cdot C_i$$

un modelo aditivo de suma ponderada del coste total de la distribución, donde  $\alpha_i$  representa los coeficientes de ponderación.

No resulta fácil establecer los coeficientes de ponderación, dado que su aplicación se basa en las opiniones emitidas por los expertos al momento de resolver el problema. Por medio de la variación de los coeficientes de ponderación  $\alpha_i$ , se puede obtener una serie de soluciones diferentes.

Existen dos problemas considerables al aplicar este método:

- La asignación de los valores de los coeficientes de ponderación, como se ha comentado, se realiza de forma subjetiva, como experiencia personal de los expertos.
- No hay homogeneidad en la utilización de las unidades en la estimación de los diversos costes.

### 3.3.3.2.1- Procedimiento de ponderación y análisis de sensibilidad.

El procedimiento de ponderación, plantea como punto de partida una matriz de jerarquización de criterios, en la que se comparan los criterios de los diferentes expertos de dos en dos, estimando su importancia relativa. Este procedimiento es conocido como el ya comentado método (AHP) desarrollado por Saaty en el año 1980 (Aragonés, 1997; Shang y Tadikamalla, 1998), y empleado por Shang y Tadikamayya (1998) para determinar los pesos adecuados de los criterios en la optimización del diseño en células flexibles de fabricación, bajo los criterios de: flujos de material, esperas y trabajo en proceso. La matriz final es una herramienta que ofrece un sistema para probar la consistencia de los juicios de los expertos, a su vez, se puede obtener información adicional por medio de todas las comparaciones posibles y el análisis de sensibilidad ante los cambios de juicio.

El análisis de sensibilidad (Rosenblatt, 1979; Malakooti y D`Sousa, 1987; Malakooti, 1989), es el procedimiento mediante el cual se determinan la variación de los resultados, debida a los cambios de los diferentes coeficientes de ponderación, permitiendo, a su vez, determinar cual es la distribución más adecuada bajo esos coeficientes (figura 3.29).

La determinación de la solución más adecuada proviene de un conjunto de soluciones eficientes ( $S_3, S_2, S_5$ ). El conjunto de soluciones eficientes, es aquel que está formado por una serie de soluciones que satisfacen medianamente los objetivos de la distribución, bajo los criterios y su valoración.

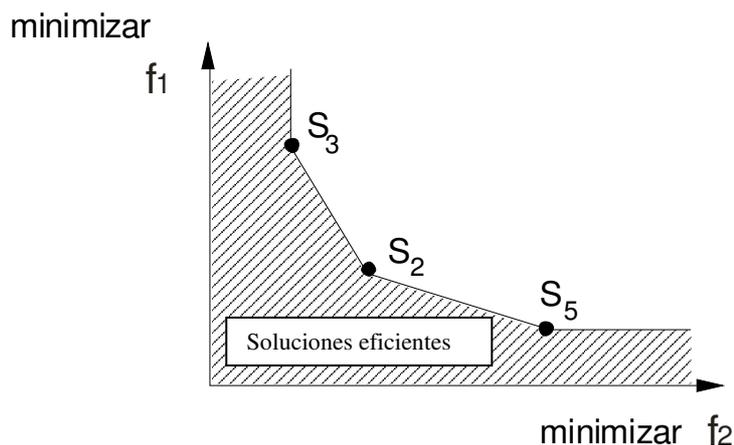


Figura 3.27: Conjunto de soluciones eficientes.

Determinados los coeficientes de ponderación  $\alpha_1$  y  $\alpha_2$ , la distribución más adecuada será la que minimice el coste relacional total.

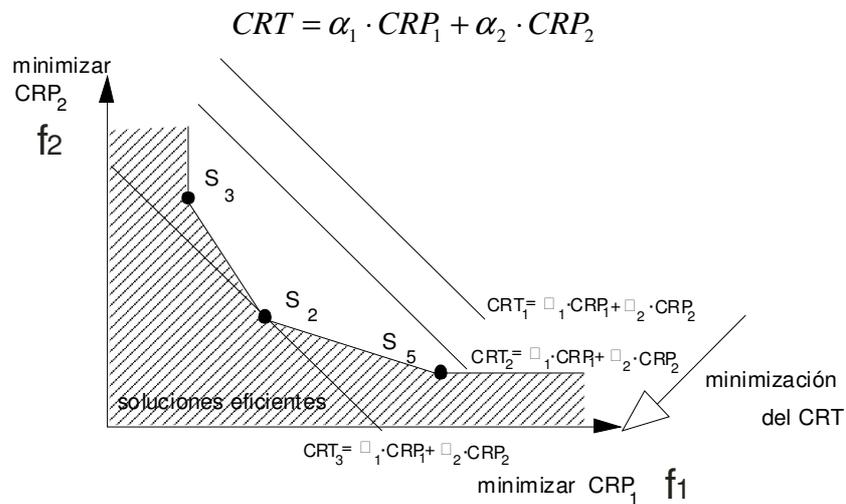


Figura 3.28: Minimización del coste relacional.

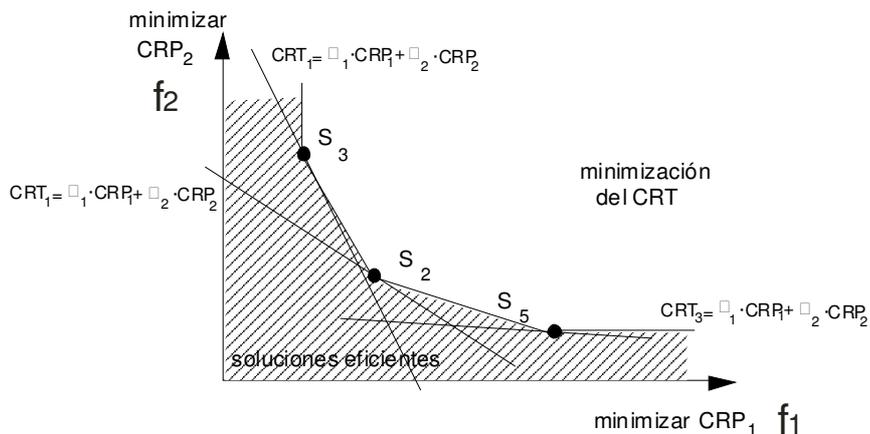


Figura 3.29: La variación de los coeficientes condicionan la selección.

Para el procedimiento de ponderación se establecen escalas de valores, siendo la más utilizada la del 1 al 9 (1 = indiferencia, 3 = moderada, 5 = fuerte, 7 = muy fuerte, 9 = importancia extrema). Los valores de escala 2,4,6,8 son los valores intermedios de los anteriores (Saaty, 2000).

### 3.3.3.3.- Normalización.

Para la aplicación de las técnicas multicriterios en la selección de la mejor distribución en planta, es necesario normalizar las variables o unidades empleadas en la

determinación de los costes parciales. Para el método ELECTRE, no es necesaria la normalización, ya que este puede seleccionar la mejor alternativa sin recurrir a ella (Aragónés, 1997). Pero la mayoría de los métodos de generación de layout, bajo la formulación multicriterio, utilizan la suma ponderada, siendo necesaria la búsqueda de una metodología de normalización. Una propuesta para normalizar las unidades empleadas de intensidad relacional, son las funciones de transformación de preferencia (Sarin, et al. 1992). Las funciones de transformación (figura 3.30), relacionan los valores que toman los distintos indicadores con la intensidad relacional normalizada, limitando la variación de esta dentro de un intervalo de valores prefijados, por lo que se obtiene las intensidades relacionales con ciertas medidas métricas ya normalizada.

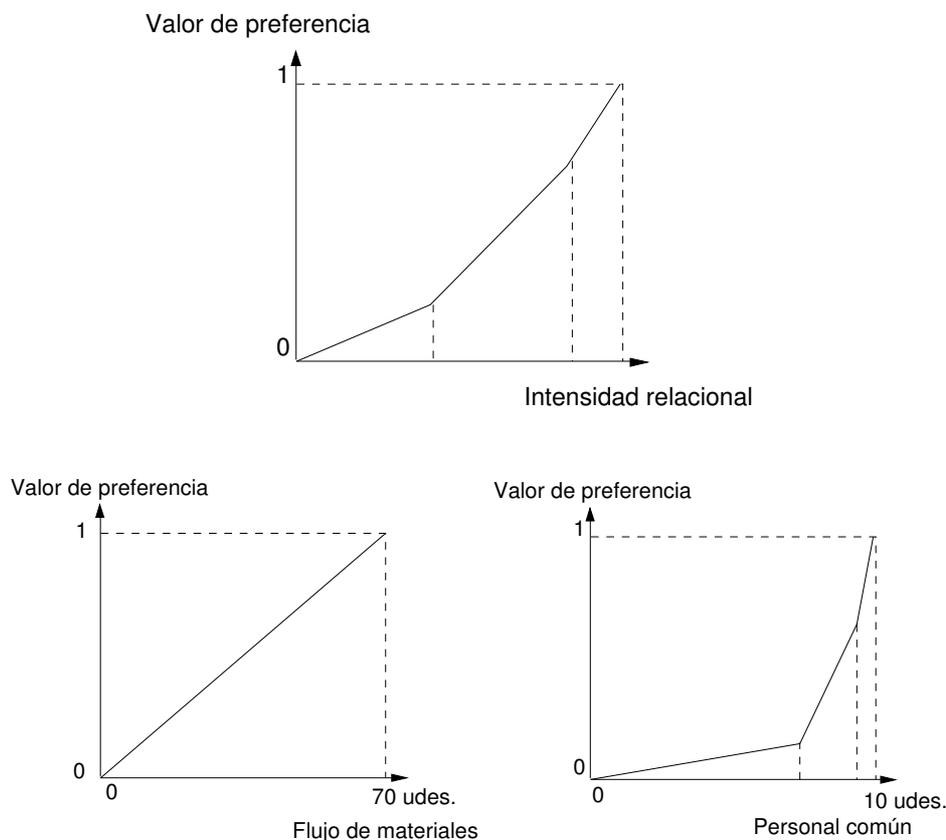


Figura 3.30: Funciones de transformación.

Otro procedimiento de normalizado propuesto por Urban (1987), cuantifica las relaciones existentes entre dos actividades bajo los diferentes criterios. Estas relaciones se representan en sucesivas matrices cada vez que se evalúa un determinado criterio.

Para la normalización se emplea la siguiente expresión :

$$t_{ij,k} = \frac{w_{ij,k}}{\sum_{i=1}^u \sum_{j=1}^u w_{ij,k}}$$

Donde:

$w_{ij,k}$  = valor de la intensidad relacional existente entre las actividades  $i$  y  $j$  para el criterio  $k$ -ésimo.

$t_{ij,k}$  = valor relacional normalizado entre las actividades  $i$  y  $j$  para el criterio  $k$ -ésimo.

$u$  = número de criterios considerados.

$\alpha_k$  = coeficiente que representa la importancia relativa del criterio  $k$ -ésimo.

Harmonosky y Tothoro (1992), presentan una metodología que normaliza todas las variables antes de la aplicación:

$$A_{ijkl} = \sum_{m=1}^n \alpha_m \cdot (w_{ikm} / \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n w_{ikm}) \cdot d_{jk}$$

Donde:

$\alpha_m$  = peso para un criterio  $m$ .

$w_{ikm}$  = valor de intensidad relacional entre las actividades  $i$  y  $k$  para el criterio  $m$ .

$d_{jk}$  = distancia rectilínea entre los centros de dos localizaciones.

Mas tarde Sha y Chen Chien-Wen proponen en su publicación (Sha y Chen Chien-Wen, 2001), una nueva metodología de normalización que consiste en utilizar la media y la desviación estándar del coste de distribución, empleando límites de control superior e inferior:

$$LCLm = Mm - r \cdot \delta m.$$

$$UCLm = Mm + r \cdot \delta m.$$

Donde:

$Mm$  = valor medio del coste de las distribuciones posibles para el criterio  $m$ .

$\delta m$  = desviación estándar de las distribuciones posibles para el criterio  $m$ .

$r$  = nivel de desviación seleccionado por el diseñador.

Por lo tanto, el valor normalizado  $Um$  para el criterio  $m$ :

$$Um = [(Pm - LCLm) / (UCLm - LCLm)]$$

Donde  $Pm$  es el valor objetivo para el criterio  $m$ .

### 3.3.3.4.- Algoritmo interactivo para el problema de distribución en planta.

Ontiveros (2004), formula un algoritmo interactivo que propone unir el planteamiento matemático QAP con las soluciones empíricas de bloques, para así obtener una nueva y eficiente metodología de solución. El objetivo de la propuesta, es permitir la posibilidad de que el decisor del problema de distribución en planta, incluya

ciertos criterios como: valor relacional, coste de mantenimiento, forma de esbeltez y compacidad (como se comentó la compacidad corresponde a la división del área de la actividad, entre el área del rectángulo menor que es capaz de contener la actividad). A partir de estos criterios y de las diferentes alternativas de distribución generadas, tomar las decisiones de forma efectiva. El algoritmo desarrollado por el autor, en su etapa de generar las alternativas, está basado en el algoritmo propuesto por González en 2003 (Ontiveros 2004), que utiliza la simulated annealing, y como fuente principal para desarrollar el algoritmo (LAYAL), emplea el modelo geométrico ALDEP. LAYAL es en el inicio un algoritmo de construcción que entra posteriormente en una etapa de mejora. Ontiveros utiliza para resolver las matrices de decisión, las metodologías de resolución multicriterio: AHP, ELECTRE, PROMETHEE, PRES (desarrollado en el Departamento de Proyectos de Ingeniería UPV), (Aragónés, 1997) y SMART. El apoyo informático utilizado para la propuesta fue el multicriterio automated layout design program (MALDEP).

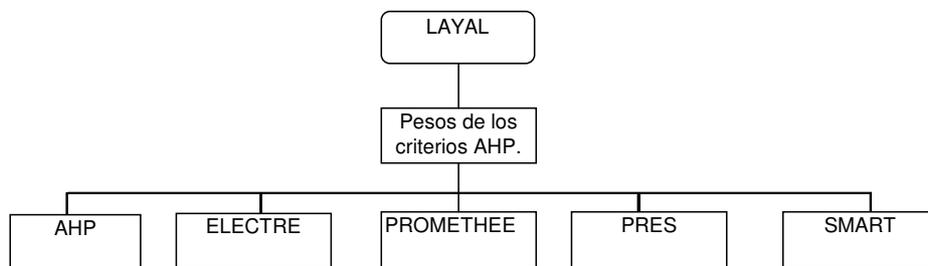


Figura 3.31: Lógica de programación de MALDEP (Ontiveros, 2004).

### 3.4.- Las Distancias.

Una de las distancias más utilizadas, descritas por Heragu (1997) y Tompkins et al. (1996), es la que existe entre los centros de gravedad o centroides de las actividades, conocida también como distancia euclidiana. Esta se emplea cuando se desea simplificar la formulación, o no se dispone de la información suficiente para determinar los puntos de entrada y salidas como puertas en cada una de las actividades.

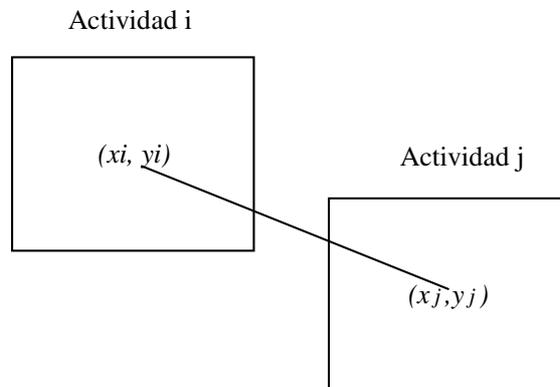


Figura 3.32: Distancia entre centroide Euclidiana.

Otra de las distancias frecuentemente utilizada en los problemas de distribución, dada su facilidad de cálculo y practicidad, es la rectilínea o de ángulo recto conocida como la distancia de Manhattant (figura 3.33). La distancia rectilínea se calcula por medio de la siguiente expresión:

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$$

Esta expresión representa la suma de las distancia vertical y horizontal de los centroides del área de la actividades *i* y *j*.

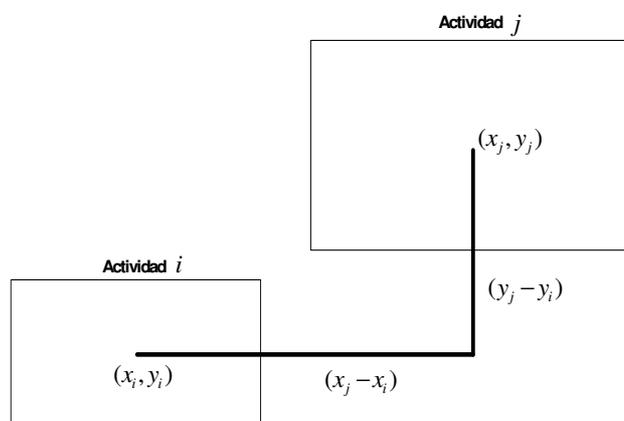


Figura 3.33: Distancia métrica rectilínea y centroides de Manhattam.

La distancia de Techebychev, es aquella más lejana ya sea la vertical u horizontal de los centroide de un par de actividades.

$$d_{ij} = \max(|x_i - x_j|, |y_i - y_j|)$$

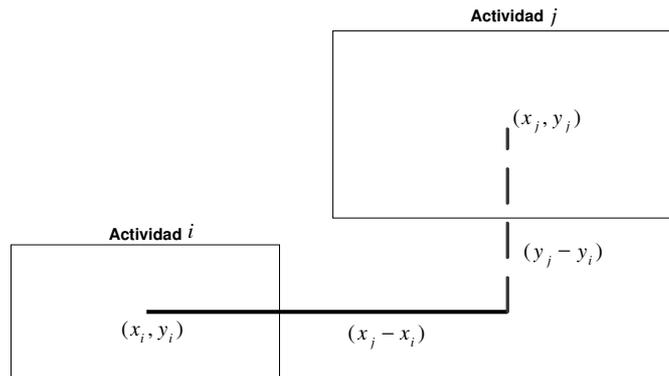


Figura 3.34: Distancia rectilínea de Techebychev.

Otra de las distancias utilizadas es la de contorno, que se diferencia de la anterior porque considera el desplazamiento por los pasillos que bordean los departamentos (Benson y Foote, 1997).

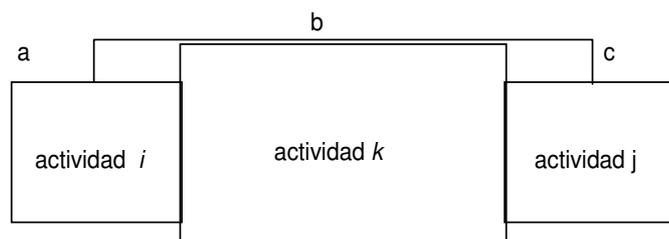


Figura 3.35: Distancia de contorno (a + b + c).

## **3.5.- La resolución del problema de optimización.**

Como se ha observado, es necesario plantearnos un modelo que nos permita la asignación de las actividades para crear implantaciones factibles, para posteriormente, aplicar, una metodología de optimización que nos lleve a la mejor de las soluciones candidatas.

Antes de describir los modelos que aplican los algoritmos genéticos, consideramos necesario comentar más detalladamente los métodos mencionados anteriormente (ver apartado 3.2.2) para asignar las actividades, dado su interés para los problemas de distribución y la relación de estos con los algoritmos genéticos. Como por ejemplo, los métodos basados en árboles de cortes (Santamarina, 1995; Tam, 1992; Gau y Meller, 1999; Azadivar y Wang, 2000).

### **3.5.1.- Clasificación de los métodos, como modelos de espacio, para la asignación de las actividades y resolución de la implantación.**

Los modelos de espacio, son básicamente, un nuevo enfoque y ordenación de los métodos de generación de layouts (MGL) para la clasificación por la **técnica utilizada en el tratamiento del espacio para la asignación de las actividades**, y que incluye además, nuevos métodos y requerimientos de implantación. González (2005) los clasifica en: modelos topológicos (ver apartado de métodos basados en teoría de grafos) y modelos geométricos, que pueden ser de una dimensión de dos o tres (consideran el principio cúbico de la distribución en planta) y los múltiples pisos (multi-floor). Este nuevo enfoque multi-floor considera la incorporación de varios niveles en la planta, es decir, incluyen los  $n$  pisos que integran la planta para minimizar el coste debido al movimiento de materiales entre departamentos y pisos (ver apartado 3.5.1.5).

En años recientes y dadas las necesidades de adaptar las distribuciones al entorno productivo cambiante, aparecen los métodos o modelos de manufactura flexible (células de fabricación) y dinámicos. Los dinámicos consideran las condiciones de producción para un próximo periodo, diseñando por lo tanto, la distribución que minimice el coste asociado al flujo de materiales y los costes asociados a la nueva reordenación. A lo largo de los apartados finales de este capítulo, se comentarán algunos desarrollos bajo éste enfoque.

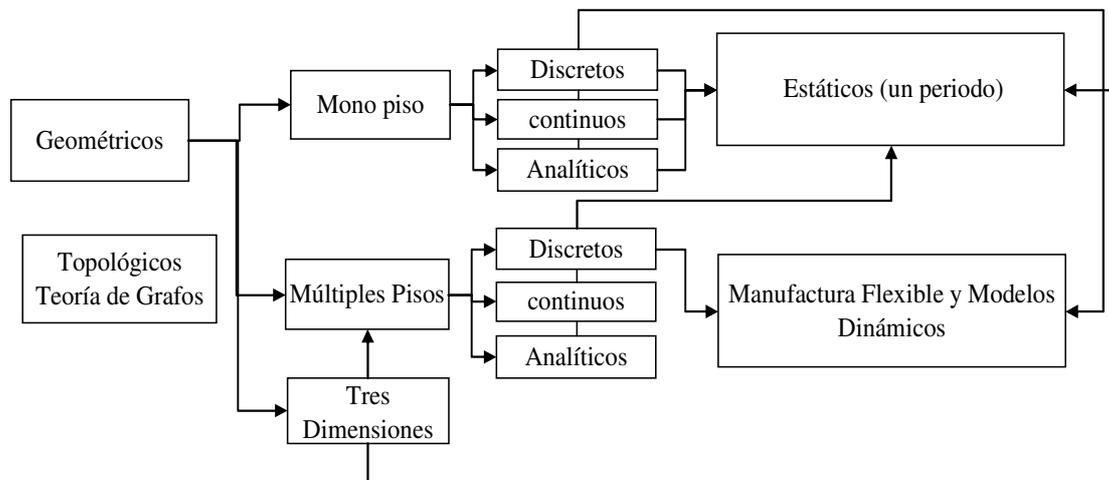


Figura 3.36: Modelos de Espacio para asignación de actividades.

Los modelos geométricos consideran que en el problema de distribución en planta, se involucran factores como la forma y dimensión de la localización o recinto, dimensión, forma y posición de las diferentes actividades o departamentos, y con la métrica utilizada para medir la distancia entre las actividades para evaluar el coste de manutención.

Dentro de estos métodos o modelos geométricos para la asignación de las actividades, como se ha observado en el apartado 3.2.2, están el discreto, analítico y continuo. Dentro del continuo tenemos las técnicas de cortes (árboles de corte) y multy-bay (Meller, 1997). Para la resolución del problema, se pueden aplicar algoritmos branch and bound, algoritmos heurísticos que pueden ser de mejora, construcción o híbridos, y los metaheurísticos como lo son los algoritmos genéticos.

### 3.5.1.1.- Modelo discreto.

Este método se basa en que un determinado dominio  $D$ , de área  $A$ , puede ser subdividido (discretización en celdas o retículas) en  $n$  partes de áreas  $a_i$  y geometría libre  $D(a_i)$ , siendo un conjunto de estas las ubicaciones  $S_i$  (conjunto de asignación) donde se asignarán sin disgregación y superposición, las  $m$  actividades en la distribución. Esta asignación se hará en función de las necesidades relacionales, teniendo como objetivo minimizar el coste relacional del sistema. Para facilitar la formulación de la función coste, se introduce el concepto de variable de asignación, que se define igual a 1 si una actividad  $i$  ocupa una localización  $k$  y cero todo lo contrario ( $x_{ik} = 1$  si la actividad  $i$  ocupa  $k$  y cero lo contrario). Estas variables agrupadas en una

matriz  $X = I_{ik}I$ , representan la configuración de la distribución en planta y a partir de estas se define la distancia  $d_{ki}$  (distancia de la localización  $k$  a la actividad  $i$ ) y  $d_{ij}$  (distancia de la actividad  $i$  a la  $j$ ).

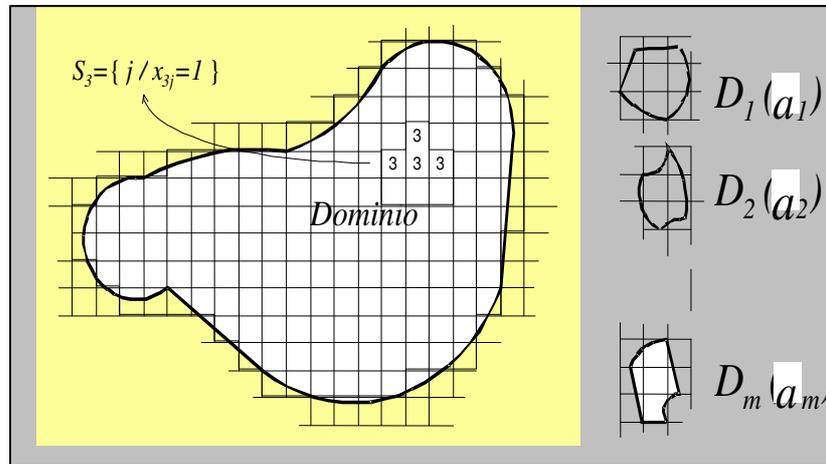


Figura 3.37: Representación del modelo discreto.

Para la generación de la implantación, se emplean generalmente las SFC (Curvas de llenado), que consiste básicamente en establecer un recorrido que representa la secuencia de la distribución, por el área discretizada para asignar las diferentes actividades siguiendo el orden de las SFC (Bozer et al., 1994; Khonar y Heragu , 1998).

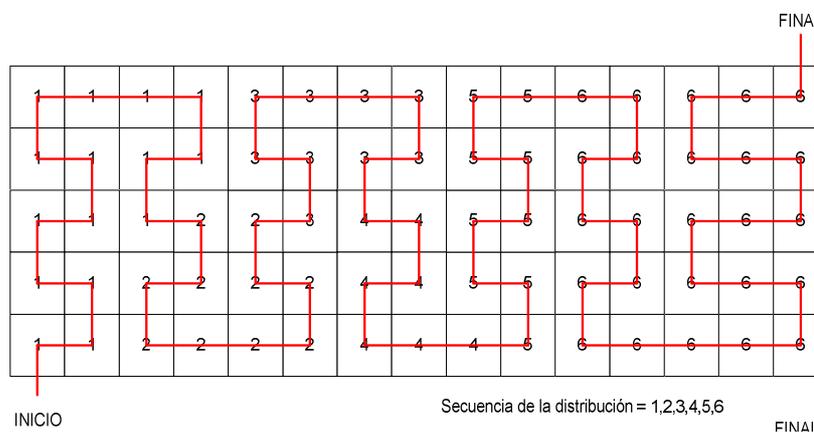


Figura 3.38: Utilización de las curvas de llenado.

Para evitar la disgregación y satisfacer las necesidades de espacios de las actividades, se emplean mecanismos de control de agregación como el algoritmo de etiquetado y el algoritmo de conectividad. El primero, evalúa la integridad de la actividad recorriendo retícula a retícula del dominio  $D$  de arriba hacia abajo, de izquierda a derecha y comprobando si las retículas pertenecen a una misma actividad para luego etiquetar. Una vez terminado el recorrido, analiza la etiqueta y evalúa el

número de fragmentos en que se ha dividido la actividad. El segundo utiliza una matriz binaria que representa la conectividad de cada una de las retículas de una actividad con las del resto.

La mayoría de los métodos de generales de construcción y mejora que se comentarán en el apartado (3.5.1.4), como por ejemplo: GRAFT (Armuor y Buffa, 1963), ALDEP (Seehof y Evans, 1967), PLANET (Apple y Deisenroth, 1972); CORELAP (Lee y Moore, 1967), así como los multi-floor: MULTIPLE (Bozer et al., 1994); GRAFT 3D Cinar (1975)(Bozer et al., 1994); SPACEGRAFT (Johnson, 1992); MULTIHOPPE (Kochhar y Heragu, 1998) y dinámicos (Dynamic Facility Layout Problem) (Kochhar y Heragu, 1999) utilizan el modelo discreto.

### 3.5.1.2.- Modelo analítico.

Es aquel en que una actividad tiene asignada una forma cuadrada rectangular, definida por sus longitudes (largo, ancho). La posición estará representada por las distancias de los ejes de coordenadas a los centros de los rectángulos definidos como  $x_i$  y  $y_i$ , respetando las condiciones de no inclusión y superposición, (Heragu y Kusiak; Tam y Li, 1991). Como se ha observado, el valor de la distancia entre dos actividades puede ser escrito como:

$$d_{ij} = \left| x_i - x_j \right| + \left| y_i - y_j \right|$$

- La condición de no inclusión: esta garantiza que las actividades queden dentro de un rectángulo que representa las dimensiones máximas de su dominio:

$$\begin{aligned} x_i + \frac{l_i}{2} &\leq H & i = 1, \dots, n \\ y_i + \frac{b_i}{2} &\leq V & i = 1, \dots, n \end{aligned}$$

Donde  $H$  y  $V$  son las dimensiones horizontal y vertical respectivamente.

- La condición de no superposición: para evitar el solapamiento entre actividades y obtener así una distribución viable:

$$\begin{aligned} \left| x_i - x_j \right| &\geq \frac{1}{2}(l_i + l_j) + d_{\min_{ij}}, i = 1, \dots, n-1 j = i+1, \dots, n \\ \left| y_i - y_j \right| &\geq \frac{1}{2}(b_i + b_j) + d_{\min_{ij}}, i = 1, \dots, n-1 j = i+1, \dots, n \end{aligned}$$

- Condición de aspecto y orientación. En el caso de que las actividades no sean rígidas (geometría variable), y sólo se conozca el área  $A_i$  y su longitud mínima  $l_i$  de cada una de ellas, se establece la siguiente restricción geométrica:

$$l_i \geq L_i \quad i = 1, \dots, n$$

$$b_i = \frac{A_i}{l_i} \quad i = 1, \dots, n$$

$q_i$  representa el coeficiente de aspecto y es la relación alto/ancho, que se define como:

$$q_i = \frac{\text{altura actividad } i}{\text{longitud actividad } i} = \frac{A_i / l_i}{l_i} = \frac{A_i}{l_i^2}$$

En el caso de una actividad de geometría fija, es decir con  $q_i \min = q_i \max$ , y orientación libre:

$$\frac{1}{q_{i \max}} \leq \frac{1}{q_i} \leq \frac{1}{q_{i \min}}$$

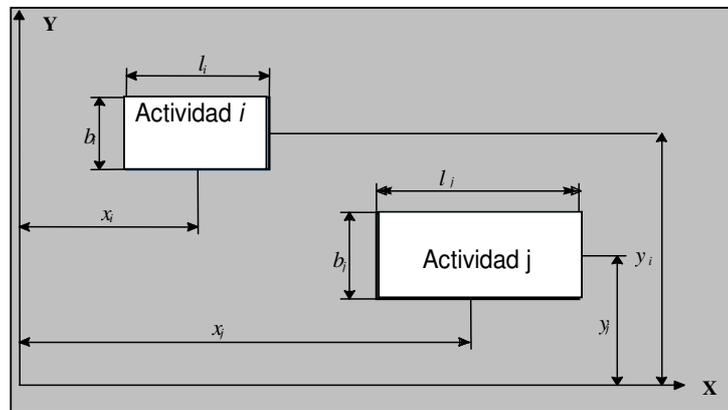


Figura 3.39: Representación del Método Analítico (Heragu y Kusiak, 1991).

La función objetivo para minimizar el coste de mantenimiento debido al movimiento de materiales es:

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m c_{ij} \cdot f_{ij} (|x_i - x_j| + |y_i - y_j|)$$

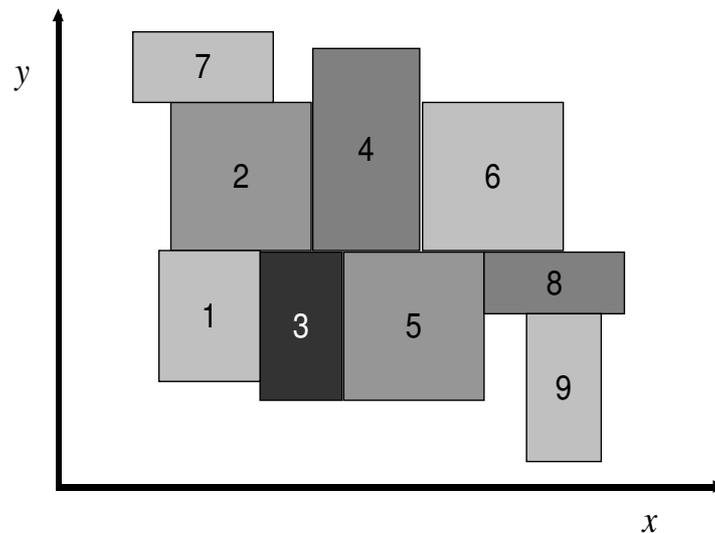


Figura 3.40: Representación de una distribución obtenida con el método analítico.

Actualmente existen nuevos desarrollos de los métodos analíticos que emplean la metodología MIP (Mixed Integer Programming). Estos consisten en definir el problema de distribución, como un método secuencial, donde las actividades se colocan una después de otra en un plano definido por los ejes coordenados, en el cual no existe la restricción en la forma del espacio donde las actividades serán colocadas. La forma de las actividades se consideran rectangulares o cuadradas y su orientación es conocida. Utiliza variables que representan las proyecciones de las dimensiones y distancias de las actividades o células sobre los ejes coordenados, para evitar así intersecciones y asignar, dependiendo del problema, recorridos de contorno (Das, 1993; Rajasekharan et al., 1998).

### 3.5.1.3- Modelos continuos.

En este modelo, la asignación de las actividades en planta por lo general se realiza de forma recursiva, empleando para ello y en la mayoría de los casos, restricciones en cuanto a la geometría de las actividades. La finalidad es ubicar, sin solapamiento, las  $n$  actividades rectangulares de áreas  $a_i$  y geometría flexible  $D_i(a_i)$ , [relación alto/ancho variable] en un dominio  $D$  de geometría y área conocida  $A$ .

#### 3.5.1.3.1.- Método basado en técnicas cortes.

Este método consiste en subdividir un dominio de partida  $D(A)$  de forma recursiva, empleando para ello operadores de cortes que indican las direcciones en las que se efectuarán las divisiones, es decir, los operadores representan las direcciones de cortes

mediante la asignación de las posiciones relativas de los departamentos en un área predeterminada [a la derecha de (d), a la izquierda de (i), arriba de (a) y debajo de (b)]. Estos cortes suelen ser siempre perpendiculares entre si (verticales u horizontales) como se observa en la figura 3.41.

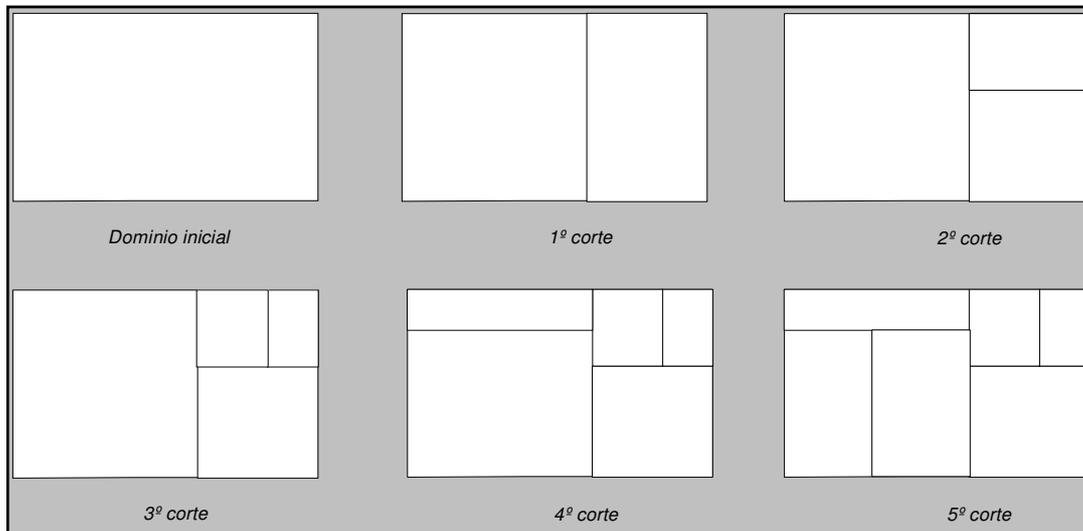


Figura 3.41: Representación de los cortes en una localización.

La siguiente figura muestra la aplicación de los operadores de cortes, para un par de actividades 1 y 2 de áreas  $a_i$  y  $a_j$ .

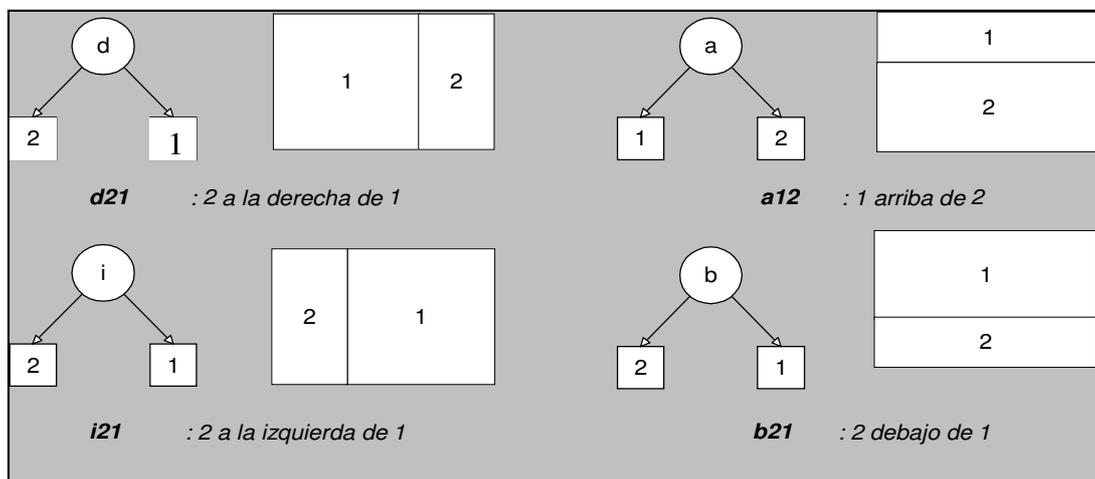


Figura 3.42: Aplicación de los operadores de cortes.

Y para un conjunto formado por n actividades.

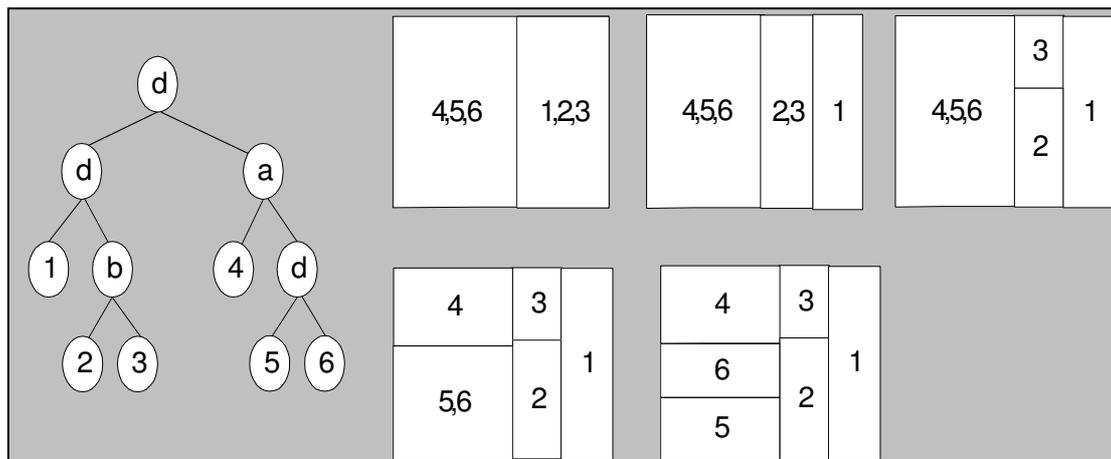


Figura 3.43: Representación de un árbol de cortes para un conjunto de actividades.

De un solo árbol de cortes se pueden obtener una cantidad considerable de distribuciones. Para hacer esto posible, es necesario variar los operadores de cortes. El número de configuraciones que pueden obtenerse de un árbol de cortes de  $n$  actividades puede expresarse como:

$$N = (P/2)^{n-1} \cdot n!(n-1)!$$

Para organizar los departamentos o áreas de producción, se utiliza las técnica de agrupamiento (clustering) (Tam, 1992), que consisten en agrupar las actividades manteniendo como criterio el concepto "necesidad de adyacencia" o de "intensidad relacional"  $W(ij)$ . Para esquematizar el orden de los agrupamientos se utilizan los dendogramas, que representan los grupos de actividades y permiten a su vez tener información en relación a los cortes. Los dendogramas se transforman con la información de los operadores en árboles de cortes, (Tam, 1992; Santamarina, 1995).

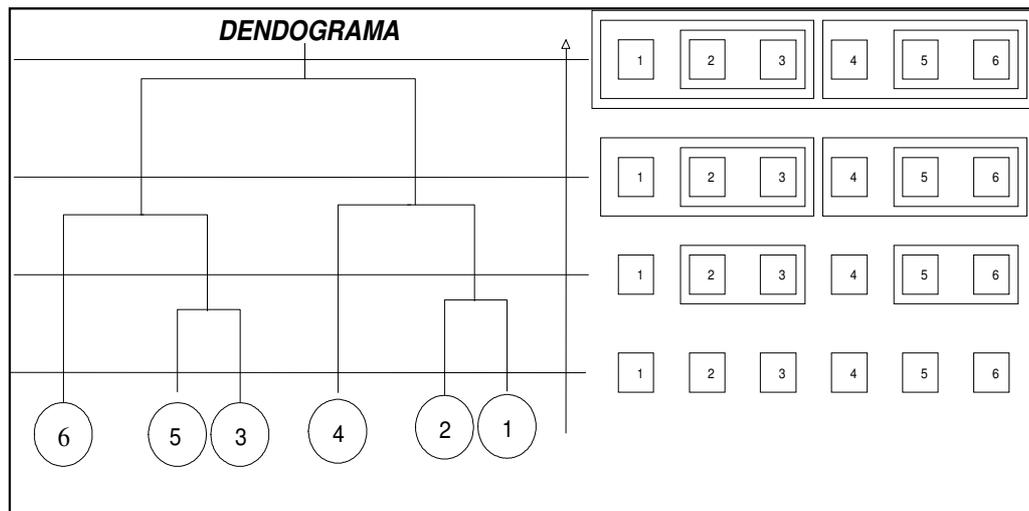


Figura 3.44: Representación de un dendograma.

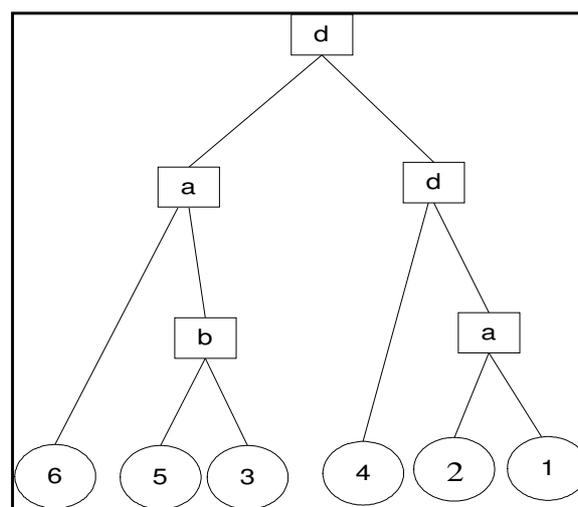


Figura 3.45: Representación del árbol de cortes.

La técnica de agrupamiento estudia la afinidad de las diferentes actividades y emplean para ello las matrices de distancia  $d(d_{ij})$ , donde los elementos que la constituyen representan la distancia entre un par de actividades. Esta distancia se calcula por medio de la intensidad relacional que se ha comentado anteriormente. La expresión que se da a continuación, condiciona a que aquellas actividades más afines o que tengan una mayor intensidad relacional, tengan una menor distancia para el primer agrupamiento.

$$d_{ij} = \frac{1}{1 + w_{ij} + w_{ji}}$$

Una vez realizado este primer agrupamiento, se recalcula la matriz de distancias, considerando el nuevo grupo como una actividad y recalculando sus distancias con el resto de actividades aún agrupadas. Para el recálculo de las distancias se pueden utilizar diferentes técnicas como encadenamiento completo, simple, centroide, “group average”, etc.

Empleando las distancias contenidas en el método “group average” (Tam, 1992), la distancia de cualquier actividad aún no agrupada “*k*” a un grupo recién constituido por la agrupación de dos actividades o grupos de actividades “*i*” y “*j*”, se calcula por:

$$d_{k(ij)}^2 = \frac{n_i}{n_i + n_j} d_{ki}^2 + \frac{n_j}{n_i + n_j} d_{kj}^2$$

Donde:

$n_i$  = número de actividades incluidas en el grupo “*i*”.

$n_j$  = número de actividades incluidas en el grupo “*j*”.

$d_{ki}$  = distancia entre la actividad “*k*” y el grupo de actividades “*i*” antes de la agrupación.

$d_{kj}$  = distancia existente entre la actividad “*k*” y el grupo de actividades “*j*”, antes de la agrupación.

Si existen *m* actividades se realizan *m*-1 agrupaciones. Para cada una de ellas, se van agrupando las actividades o grupos de actividades que son entre sí, mucho más afines.

### 3.5.1.3.2.- Modelo Multibay.

Meller en el año 1997 (Meller, 1997), desarrolla y publica el modelo Multibay. El modelo tiene la finalidad de determinar la distribución más eficiente, en un recinto de dimensiones conocidas, que sea definida por bahías o naves paralelas rectangulares. En muchos procesos de manufactura, la distribución de la implantación, se basa en un diseño paralelo de naves, donde el material se mueve principalmente dentro de ellas, y el movimiento inter-nave es dirigido por el sistema de manutención o transporte en los extremos que interconectan las naves. Este problema tiene dos etapas para la resolución: la primera consiste en asignar los departamentos en las naves, y la segunda, en determinar la distribución en cada una. Tienen alguna similitud con los multi-floor (ver

apartado 3.5.1.5), sin embargo no son proporcionales, pero aun así los multi-floor pueden ser aplicados para resolver el multibay bajo ciertas características.

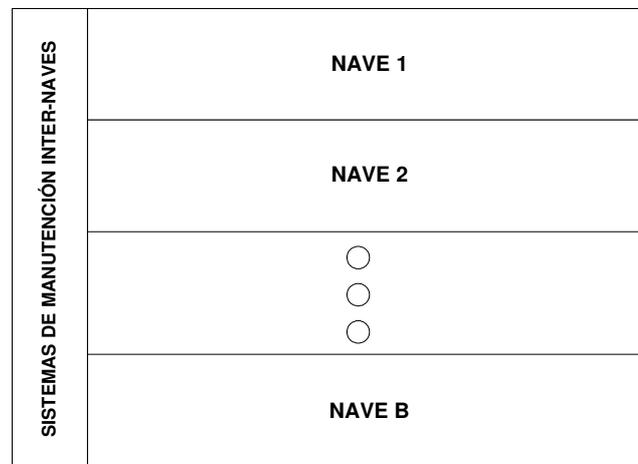


Figura 3.46: Implantación Multi-bay (Meller, 1997).

#### 3.5.1.4.- Métodos generales de construcción y mejora.

Los métodos generales consideran que el área representa una unidad donde no existen restricciones geométricas y el objetivo principal es localizar las posiciones relativas de las actividades. Estos métodos, como se observó, se clasifican según su forma de generar la solución en construcción, mejora e híbridos. La razón por la cual se incluyen dentro de este apartado 3.5.1, además de la importancia intrínseca para el estudio de la discretización, asignación y resolución del problema, es porque algunos de estos son punto de partida para los modelos de espacio multi-floor, que se describirán luego. Como hemos comentados anteriormente, estos métodos entran también en la clasificación por la técnica empleada para resolver el problema.

A lo largo de la historia, se han desarrollado programas informáticos que aplican estas consideraciones de construcción y mejora, utilizando para ello métodos heurísticos, donde los programas para asistir distribuciones de planta utilizan criterios para la asignación cualitativos o cuantitativos. Entre los programas informáticos podemos mencionar:

- GRAF.
- SHAPE.
- ALDEP.
- CORELAP.
- PLANET.
- PRE.
- COFAD.

- GRAFT (Computer Relative Allocation of facilities Technique).** Este algoritmo de mejora desarrollado por Armour y Buffa (1963), es hoy uno de los principales programas computarizados de ayuda para la resolución de problemas de distribución. El algoritmo parte de una distribución previa como solución inicial de un proceso de intercambio de actividades, donde la finalidad es buscar la distribución más económica, teniendo como entrada las distancias e intensidades relacionales. Al calcular el coste inicial que genera la primera distribución, intercambia las actividades de dos en dos, ya sean departamentos de áreas iguales o adyacentes, evaluando el coste respectivamente. Repite este proceso hasta que localiza la mejor solución posible. Existen en la actualidad, versiones que permiten considerar los factores de área y forma como los demás pisos en planta (Bozer et al., 1994).

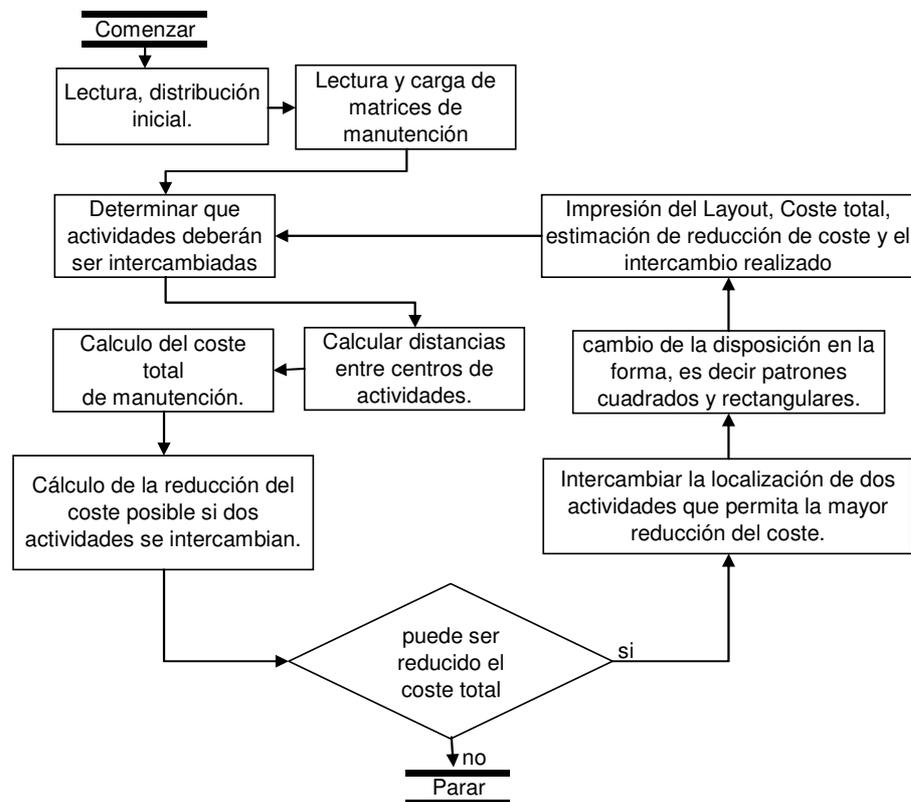


Figura 3.47: Diagrama de colocación del algoritmo GRAFT( Armour y Buffa, 1963; Buffa et al., 1994).

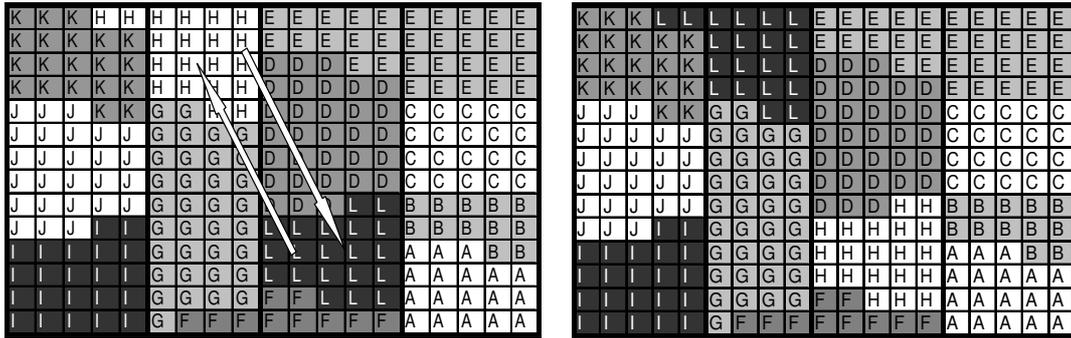


Figura 3.48: Intercambio de actividades de igual área CRAFT.

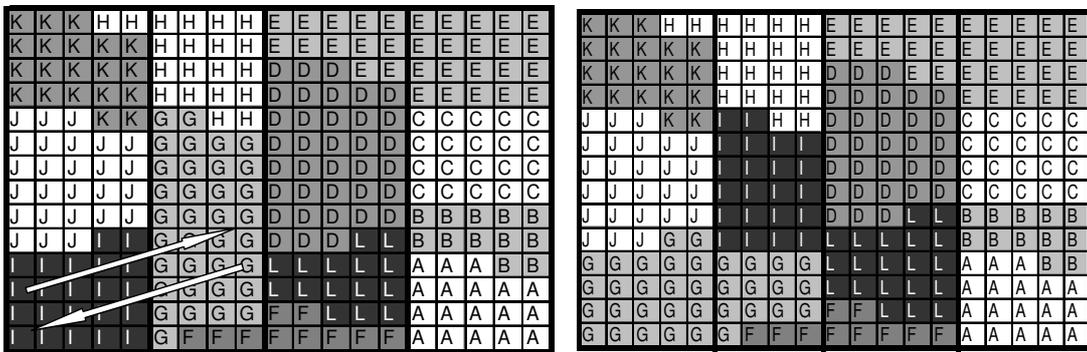


Figura 3,49: Intercambio de dos actividades adyacentes CRAFT.

- SHAPE.** Otra variación del GRAFT propuesta por Hassan y colaboradores (Hassan et al., 1986), es el SHAPE. En este desarrollo, el área total es dividida en unidades cuadradas donde se colocan las diferentes actividades o departamentos en función del área requerida, minimizando los costes originados por el movimiento de materiales entre actividades y lugares, tanto de entradas como de salidas. Para la asignación, el algoritmo asume que, para una distribución parcial, hay cuadrados en cuatro lados candidatos del área disponible en planta. La metodología compara las cuatro potenciales soluciones, y selecciona el conjunto de cuadrados para asignar la actividad que proporcione el menor coste.

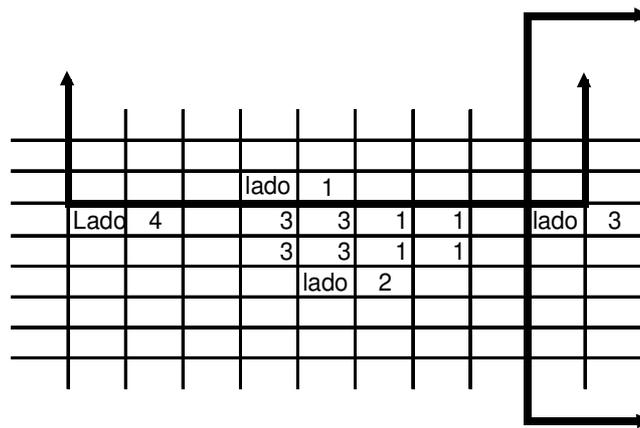


Figura 3.50: Lados candidatos de la distribución parcial (Hassan et al., 1986).

0	0	3	3	3	3	3	9	9	0	0
0	0	3	3	3	3	3	8	5	4	4
1	1	1	1	1	2	2	8	5	4	4
1	1	1	1	2	2	2	8	5	4	4
0	6	6	6	2	2	2	8	5	10	10
0	0	0	7	7	7	12	11	0	0	0

Figura 3.51: Distribución final SHAPE (Hassan et al., 1986).

- **ALDEP** (Automated Layout Design Program). Es un método básicamente de construcción que utiliza un algoritmo de barrido que selecciona aleatoriamente un departamento para situarlo en una esquina de la planta, colocando a los demás de forma sucesiva en función de las especificaciones de entrada. Fue desarrollado por Seehot y Evans (1967), siendo sus datos de entrada el área de planta del edificio y la situación de los elementos fijos. ALDEP, establece una implantación sin necesidad de la existencia de una previa, comparando las soluciones obtenidas en forma análoga como lo hace un programa de mejora. El procedimiento de mejora de este algoritmo posee tres técnicas:
  - Aleatoria: los departamentos del Layout son seleccionados de forma aleatoria. El layout se evalúa hasta que no exista la posibilidad de mejora de la función objetivo.
  - Mejor intercambio: se crea una solución aleatoria y se evalúan todos los posibles cambios de los departamentos. Aquella solución que mejore la función objetivo pasa a ser la próxima solución inicial.
  - Selección natural: se parte también de una solución inicial, para luego seleccionar dos actividades a ser intercambiadas. Si este intercambio

mejora la función objetivo, se seleccionan otros dos departamentos más. Si no existe mejora el proceso se repite.

Esta metodología en la revisión aleatoria emplea la tabla relacional de actividades que es obtenida a partir de S.L.P. Para la localización de un departamento respecto del ubicado, se emplea un ratio o código de cercanía establecido. Este algoritmo está diseñado para realizar zigzag en los contornos siguiendo un procedimiento de rastreo vertical para la ubicación las actividades. El área se completa empleando bandas verticales con una anchura de avance determinada y de longitud igual a la anchura del layout.

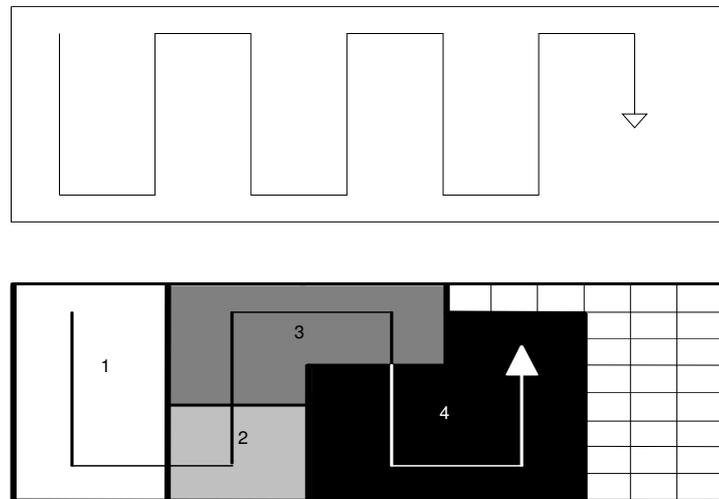


Figura 3.52: Metodología de asignación ALDEP (Seehot y Evans, 1967).

- **CORELAP (Computerized Relationship Layout Planning).** Este método de construcción sitúa en el centro de la distribución el departamento que está más interrelacionado con el resto. Mediante sucesivas iteraciones, va colocando los demás departamentos en función de la necesidad de cercanía con los ya ubicados (Lee y Moore, 1967). Para ello utiliza un ratio de ubicación que representa la suma de las intensidades relacionales entre cada nueva actividad a ubicar y sus vecinas. Emplea, también, la longitud de contorno, que representa las dimensiones de los contornos comunes de la actividad con los ya ubicados.

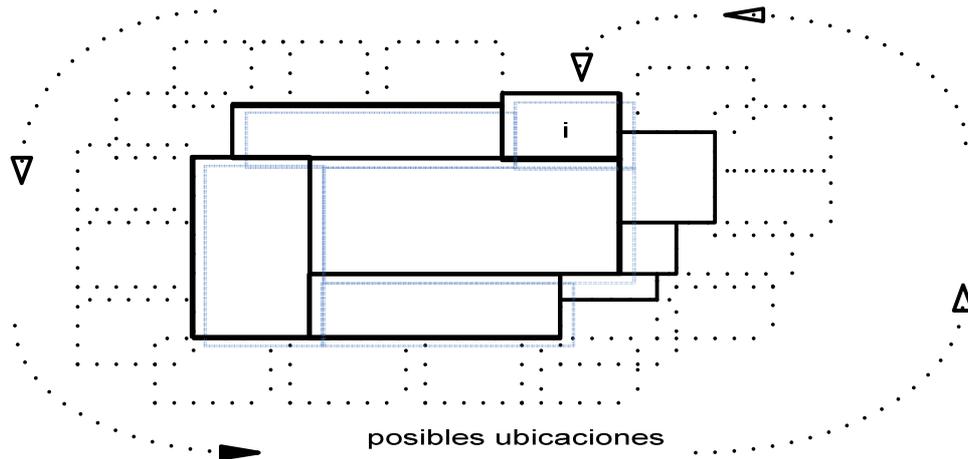


Figura 3.53: Técnica de colocación CORELAP (Lee y Moore, 1967).

La forma de los departamentos es rectangular o cuadrada pero fija.

La siguiente expresión empleada por el algoritmo, establece que la ubicación más idónea es aquella que permite un mayor valor del índice de colocación del departamento ( $i$ ) elegido para ser colocado ( $IC_i$ ).

$$IC_i = \sum_{j=1}^n V(r_{ij}) \cdot L_{ij}$$

Donde:

$V(r_{ij})$  = peso asociado a la intensidad relacional entre la actividad a ubicar " $i$ " y la  $j$ -ésima de las " $n$ " ya colocadas.

$L_{ij}$  = longitud de contorno común entre ambas.

- **PLANET.** Este algoritmo heurístico de construcción, que al igual que los anteriores (CORELAP, ALDEP), se basa en definir y seleccionar la actividad para la siguiente colocación y en qué parte de la distribución podrá ser añadida. El procedimiento consiste en dar prioridades de colocación siguiendo una espiral. Estando colocados los departamentos el algoritmo los ajusta automáticamente, (Apple y Deisenroth, 1972).

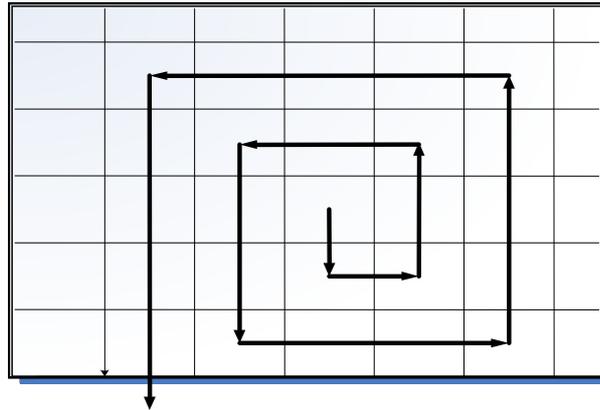


Figura 3.54: Rutina de asignación en Espiral PLANET.

- **PREP** (Plant Relayout and Evaluation Package). Este no utiliza los caminos rectos entre los centros de gravedad (centroides) de los departamentos. Este programa considera las diferentes direcciones reales recorridas por los materiales (Vallhonrat y Coromitas, 1991).
- **COFAD**, (Computerized Facilities Design”) (Tompkins y Reed, 1976). Este algoritmo de mejora incluye los costes originados por el movimiento de todas las alternativas. Mejora la distribución inicial empleando una metodología similar al CRAFT (este algoritmo es una modificación del GRAFT). El algoritmo determina el coste del movimiento de los materiales entre cada par de actividades, usando una alternativa factible del manejo de los mismos. Por lo tanto, el modelo determina si el diseño de la planta ha alcanzado un estado constante.

Se dice que el sistema ha logrado el estado constante, cuando el coste del sistema mantención y el número de los cambios, varían menos de un cierto porcentaje del coste total para el sistema de manejo y del número total de asignaciones. Si el estado constante es rechazado, entonces el modelo termina el procedimiento. Si ocurre lo contrario, entonces el costo del sistema de manejo de materiales seleccionado y el procedimiento anterior se repiten hasta que un estado constante sea rechazado.

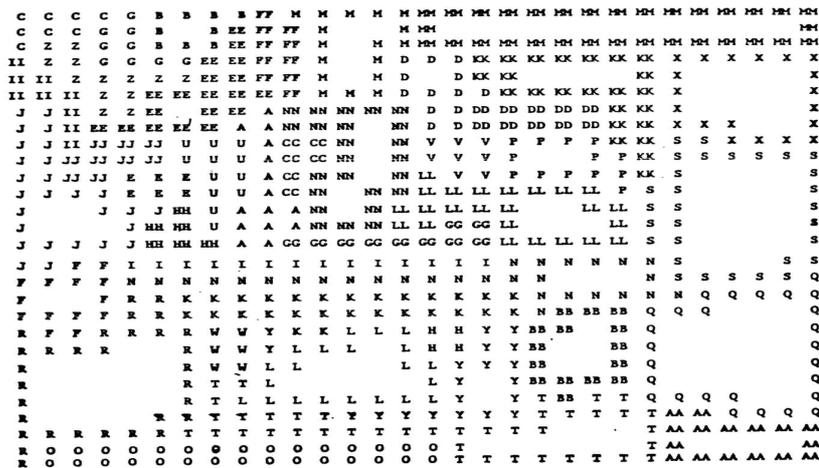


Figura 3.55: Distribución final COFAD, (Tompkins y Reed,1976).

### 3.5.1.5.- Modelos múlti-floor.

En algunos de los procesos productivos, nos encontramos con infraestructuras industriales compuestas por más de un nivel. Esto implica que si el material en el proceso recorre o recorrerá más de un piso, es necesario elaborar y aplicar modelos que contemplen este aspecto en el proceso de optimización. En la actualidad, se han propuesto varias metodologías para la resolución de estos problemas como: SPACECRAFT, CRAFT 3D, MULTIPLE, MULTI-HOPE, que son extensiones de la propuesta original (métodos generales de construcción y mejora), para incluir los costes de flujo de materiales entre departamentos de diferentes pisos.

- **SPACECRAFT.** Este desarrollo presentado por Johnson (1982), es muy similar al GRAFT, diferenciándose en que este considera los demás pisos de planta. Otra diferencia es la debida a las restricciones para asignar las actividades, que pueden ser opcionalmente especificadas al inicio del algoritmo. Divide los pisos en áreas rectangulares cada una de igual dimensión. Considera además la forma de la superficie de los pisos, movimiento de materiales vertical y los puntos de conexión entre los diferentes pisos. Requiere también de una solución inicial y el procedimiento de mejora se basa en intercambiar dos o tres departamentos contiguos de igual tamaño.
- **CRAFT 3D.** fue presentado por Cinar en 1975 (Bozer et al., 1994). Se trata de un modelo muy similar al SPACEGRAFT desarrollado a partir del GRAFT.

- MULTIPLE.** Bozer et al. (1994), Desarrollan un algoritmo que amplía el algoritmo de distribución de plantas CRAFT, para el problema de distribución con varios pisos. Utilizan las curvas de llenado (SFC) para asignar e intercambiar cualquier par de actividades. Introdúcen un nuevo control de forma de los departamentos y permite que las áreas de los mismos sean flexibles.

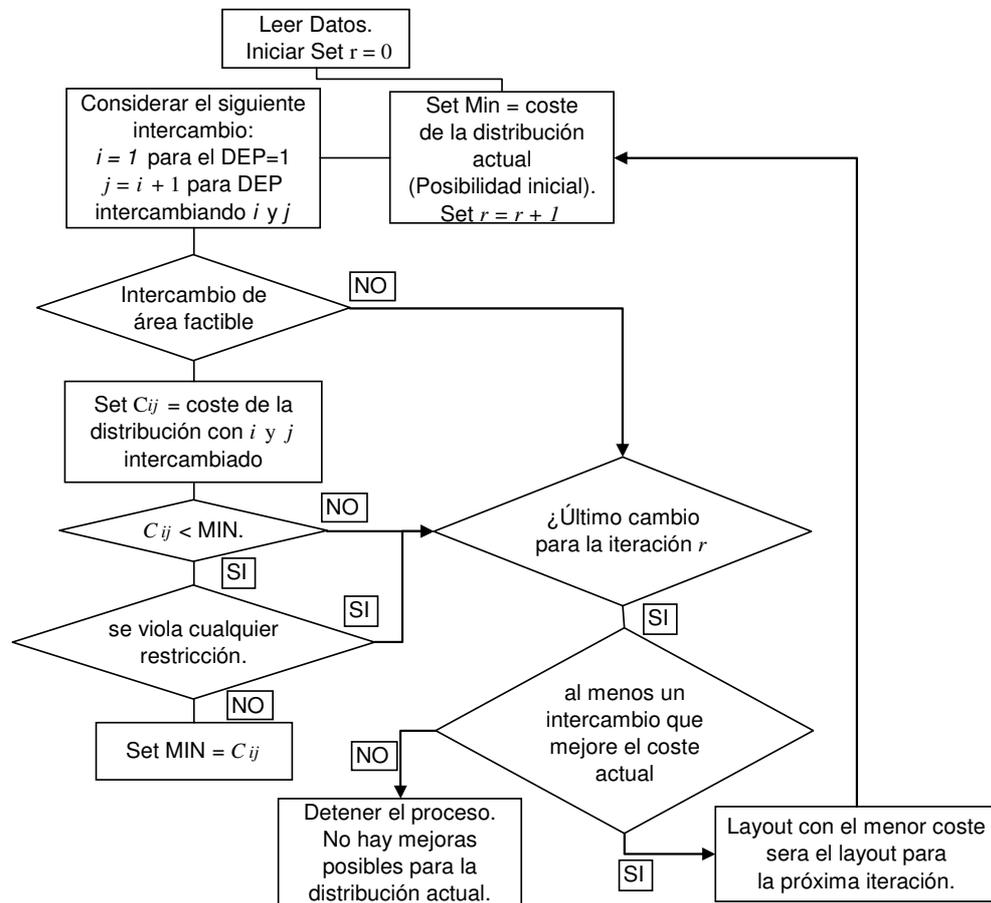
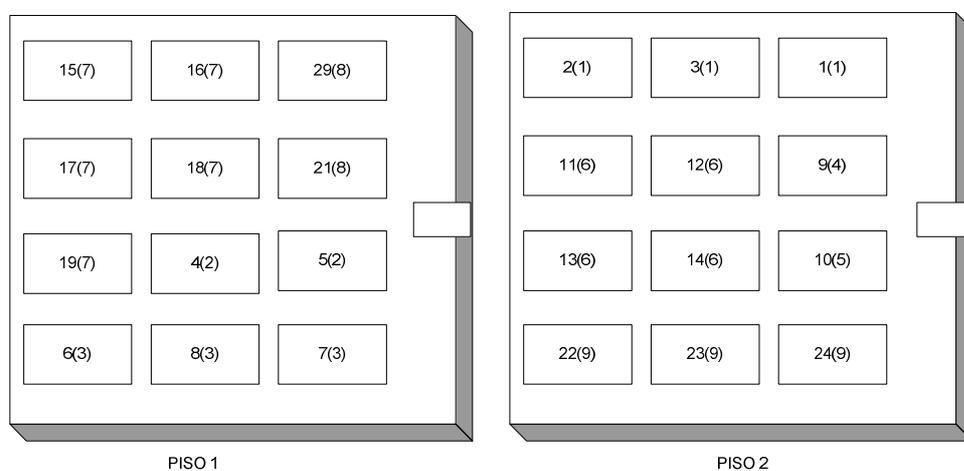


Figura 3.56: Algoritmo MULTIPLE (Bozer et al., 1994).

- Sue y Hadley (1995)(Abdinnour-Helm y Hadley 2000). Introdúcen una metodología heurística de dos etapas para el problema de distribución multi-floor. La primera etapa, consiste en el GRASP y la segunda en la búsqueda tabú. Como el coste de mantenimiento entre pisos es más costoso que entre departamentos de una misma planta, el GRASP se encarga de generar y asignar actividades para los pisos, procurando minimizar el coste vertical de mantenimiento. La segunda etapa, la búsqueda tabú, es la metodología de optimización que se encarga de evitar la caída en óptimos locales o parciales (ver capítulo 4). Posteriormente, publican en el año 2000 (Abdinnour-Helm y Hadley, 2000), un desarrollo similar que utiliza la misma metodología de búsqueda Tabú. La primera etapa, estará conformada por el mismo GRASP y un nuevo desarrollo heurístico, que consiste en un algoritmo exacto (hard mixed

integer programming) para modificar o mantener los requisitos particulares del problema. Emplean una matriz y una representación gráfica del flujo de materiales.

- **MULTI-HOPE**, fue desarrollado por Kochhar y Heragu (1998) para resolver el problema de distribución para varios pisos. Divide el recinto en una retícula de cuadros de igual área (Kochhar et al., 1998). Cada una de las actividades se asigna a un conjunto de estas unidades de forma que el área total de esas unidades es igual al área de los departamentos. La asignación de las actividades se realiza mediante una lista de asignación. Para la colocación de las actividades se emplea las curvas de llenado (SFC). (Ver apartado 3.3).



Enteros string - 151629171821190405060807020301111209131410222324

Figura 3.57: Distribución 2 pisos (Kochhar y Heragu, 98).

- **SABLE** fue propuesto por Meller y Bozer en 1996 (Kochhar y Heragu, 1998; Abdinnour-Helm y Hadley, 2000). Es un algoritmo desarrollado para resolver el problema de distribuciones para varios pisos. El área y forma tanto del recinto como de los departamentos es conocida. Utilizan las curvas de llenado para la asignación de actividades, y un algoritmo para generar un conjunto mucho más amplio de intercambios de las mismas. Como metodología de optimización utilizan el recocido simulado (ver capítulo 4).
- Barbosa et al. (2002), desarrollan un modelo para 3D, que considera en la formulación un número predeterminado de pisos. El modelo incluye la orientación de los equipos, conectividad de los mismos, es decir, sus entradas y salidas, restricciones de distancia para la seguridad y operatividad, formas físicas, espacio disponible, localización en los diferentes pisos, etc. (ver apartado 3,2,4,6).

- Kyu Yeul Lee et al. (2005), proponen otro modelo multi-floor, que tiene como objetivo minimizar el coste total asociado al movimiento de materiales entre las actividades, pero esta vez, considerando las paredes internas y los pasillos. La trayectoria más corta y la distancia entre dos actividades se calculan utilizando el algoritmo de Dijkstra de teoría de grafos, que representa la relación entre las actividades y los pasillos. Para esta propuesta, se incluye el factor de peso para compensar el coste total de transporte vertical de materiales y el requerimiento de adyacencia. Las actividades se consideran con áreas desiguales, con lo que el espacio de planta se discretiza para la asignación.

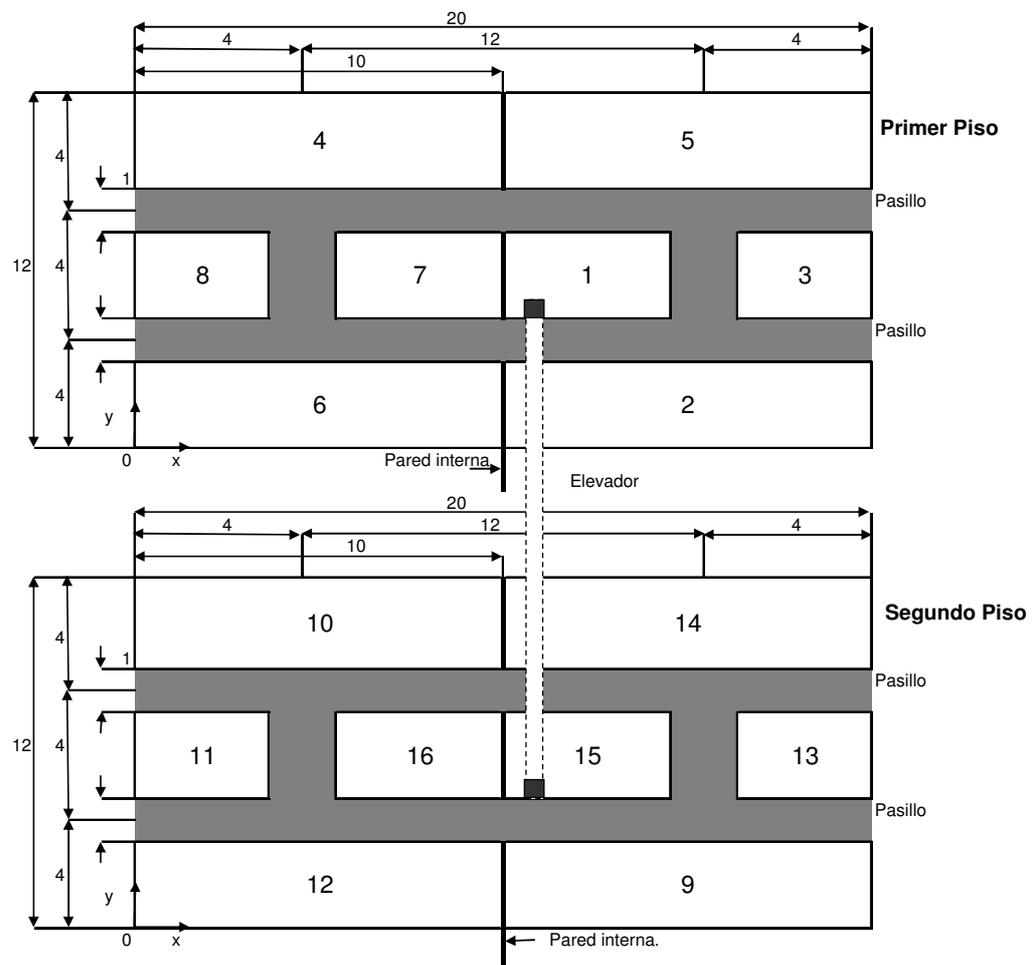


Figura 3.58: Distribución en planta multi-floor (Kyu-Yeul Lee et al., 2005).

### 3.5.1.6.- Modelos de manufactura flexible (células de fabricación) y dinámicos.

Como se ha comentado, hoy día es importante considerar cómo afectará las variaciones del entorno del producto al diseño de la distribución final. Investigaciones

recientes, han ampliado el campo de estudios de los problemas de distribución en planta considerando este aspecto. Entre las formulaciones desarrolladas están:

- **FMS** (Flexible Manufacturing System). El FMS implica el posicionamiento de las células de fabricación dentro de un área, para minimizar el coste del flujo de materiales entre ellas. Los sistemas de manufactura flexible son una extensión del MPL (Machine Layout Problem) que consiste en tres etapas (Das, 1993):
  - Seleccionar los equipos de producción y mantenimiento necesarios para la empresa.
  - Análisis económico y ejecución de las operaciones de producción.
  - Detallar la distribución de las máquinas dentro de las diferentes células de fabricación.

Los problemas FMS se diferencian de los tradicionales en que requieren un modelado específico. Una metodología empleada para formular este enfoque como problema de distribución en planta es el MIP (Mixed Integer Programming) programa entero mixto, desarrollado por Das (1993), que incluye las especificaciones de las coordenadas espaciales de cada célula de fabricación, la orientación de las mismas (vertical u horizontal) y la localización de los puntos de mantenimiento. Rajasekharan et al. (1998) emplea un algoritmo genético para la colocación y optimización del coste del movimiento de materiales entre las diferentes células de fabricación. (ver apartado 3.3).

- **DFPL** (Dynamic Facility Layout Problem). Este tipo de formulación es una extensión de los análisis estáticos. Los modelos dinámicos, consideran que para la distribución se asumen tiempos de productividad cortos, grandes variaciones de la cantidad de productos y el diseño de los mismos. Kochhar y Heragu (1999) desarrollaron un programa informático llamado DHOFE (Dinamic Heuristically Operate Placement Evolution) para resolver el DFPL, siendo este una extensión del programa MULTI-HOPE para el movimiento de materiales entre pisos (Kochhar y Heragu, 1998). El DHOFE en cuestión, actúa sobre dos periodos consecutivos de planificación. Si el interés del diseño de planta es organizar las cercanías de los departamentos para optimizar el flujo de materiales para el segundo periodo, el algoritmo busca la distribución que minimice los costes del movimiento de materiales en función de las nuevas variaciones, utilizando, a su vez, los costes de reubicación para buscar un equilibrio con los costes antes expuestos. (ver apartado 3.6).

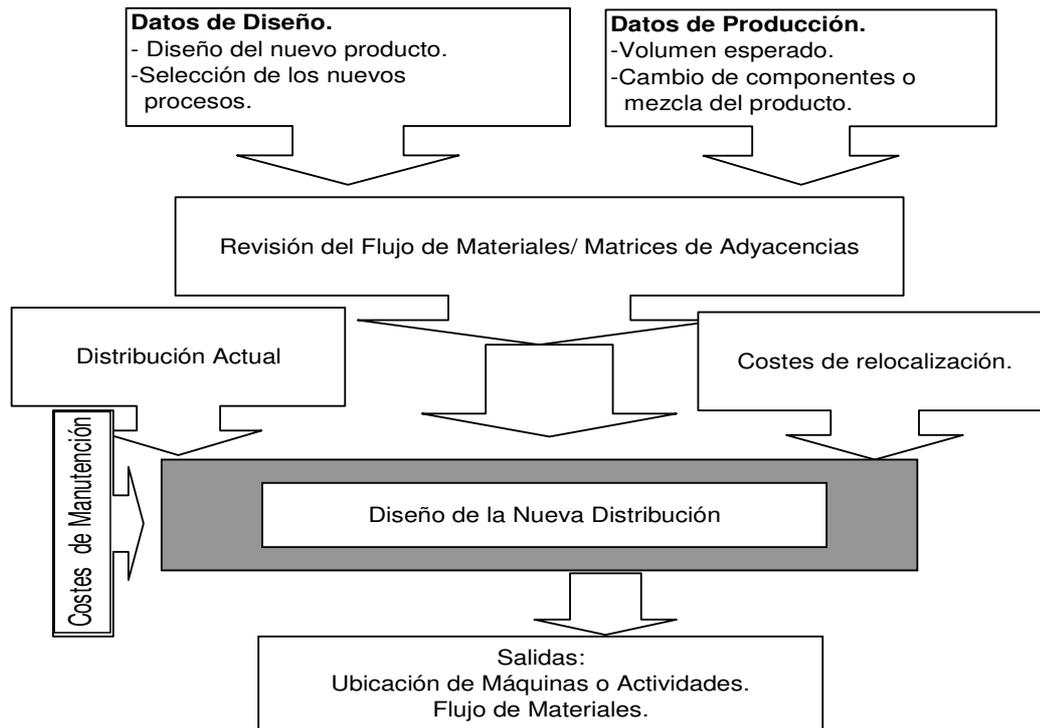


Figura 3.59: Metodología del Dynamic Facility Layout Problem (Kochhar y Heragu, 1999)

- **DPLP** (Dinamic Plan Layout Problem). A diferencia del anterior, este está basado en un horizonte de planificación multi periodos, es decir, considera el cambio del flujo de los materiales (cantidad - distancia - dirección) y los costes asociados al cambio de localización de los departamentos para los N periodos. Esta formulación implica, seleccionar una distribución estática para cada periodo N considerado (Rosenblatt, 1986).
- En Balakrishnan et al. (2003), siguiendo el estudio anterior de Rosenblatt (1986), proponen un modelo que tiene la finalidad de minimizar el coste total para los N periodos seleccionados. El modelo consiste, al igual que el de Kochhar y Heragu (1999), en buscar un punto óptimo entre los costes de mantenimiento y los costes asociados al cambio de localización de las diferentes actividades, pero esta vez para N periodos. Si los costes de cambiar de localización son relativamente altos, se cambiará la dirección del flujo de material para el próximo proceso, minimizando las reubicaciones para evitar los costes asociados a cambiar de puesto. Este último emplea un algoritmo genético híbrido para la localización de la solución óptima. (ver apartado 3.3).



Figura 3.60: Distribución para los N periodos (Balakrishnan, et al. 2003).

### 3.5.1.7.- Modelo 3D.

Barbosa et al. (2002), proponen un modelo que considera el principio cúbico de la distribución en planta. Presenta la formulación en dos etapas: la primera incluye los índices globales, índices del sistema, de los parámetros y de las variables. Los índices globales involucran las unidades y elementos de los equipos, puntos de entrada y salida de los mismos, sección de producción y número de pisos predeterminados. Los siguientes, incluyen datos para la orientación de los equipos. Entre los parámetros figuran los costes de movimiento de materiales en varias direcciones, coste de las conexiones entre los puntos entrada/salida, dimensiones de los elementos de los equipos con respecto a los ejes coordenados, distancia entre un elemento del equipo y los puntos entrada/salida, las distancias permitidas de los centros de producción con cada eje coordenado, etc. Las variables pueden ser tanto continuas como binarias, y representan las coordenadas geométricas de los equipos, centro de producción, distancias relativas de los puntos entrada/salida con los ejes coordenados. La segunda etapa, resuelve el problema de distribución en planta, como una formulación matemática de tipo MILP (Mixed Integer Linear Problem) que plantea la distribución en todo su conjunto y detalle. El modelo está basado en el desarrollo descrito por Barbosa et al. (2001), pero, esta vez considerando el eje coordenado z.

La finalidad del modelo es minimizar el coste total de la conectividad, incluyendo en la función objetivo, el coste de las conexiones y el coste de operación, causado por la transferencia de material entre esas conexiones.

Los datos de entrada para la formulación son: geometría y forma de los equipos, puntos de carga de los mismo, coste de las estructuras de conexión, limitaciones espaciales para la asignación de los equipos, distancias para la operatividad y seguridad de los mismos, características de las secciones de producción y localización multi-floor. Como resultado el modelo determina: La localización óptima de los equipos para los diferentes pisos y los puntos de conexión de los mismos con respecto a los ejes. Este modelo está sujeto a restricciones de no solapamiento, asignación y distancias necesarias para la seguridad y operatividad.

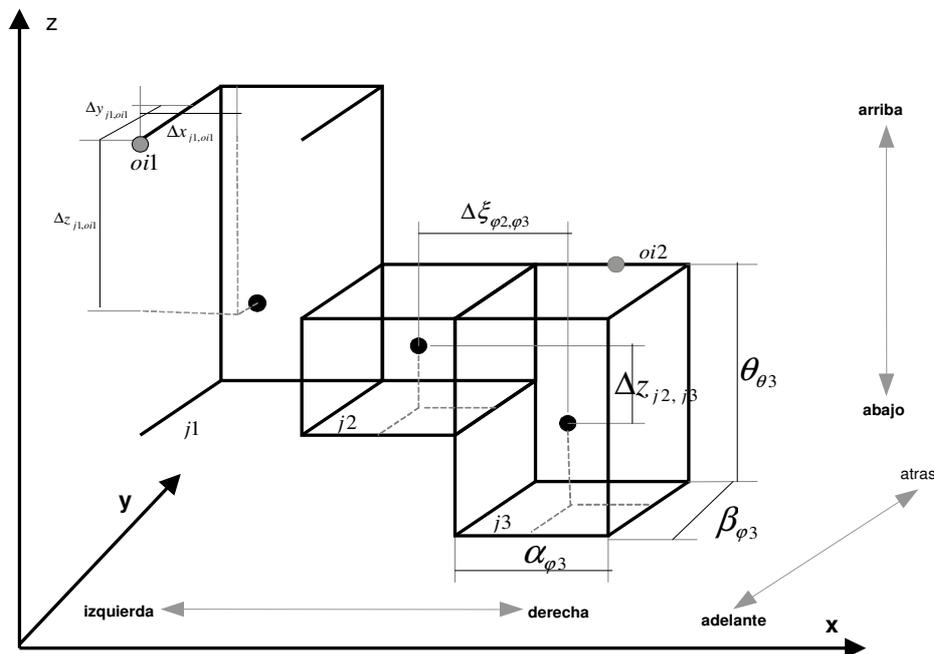


Figura 3.61: Unidades de equipos 3D (Barbosa et al., 2002).

### 3.5.1.8.- Método basado en la teoría de grafos (modelo topológico).

Esta metodología es un enfoque cualitativo diferente a los presentados hasta ahora. La mayoría de las metodologías formulan la distribución como un problema cuadrático de asignación. La teoría de grafos persigue una ordenación topológica, teniendo como objetivo, encontrar un grafo que represente las relaciones entre las diferentes actividades, y no así la geometría de las mismas. Buffa (1955) y Muther (1968), proponen para sus metodologías una representación en forma de grafo que fue el punto de partida para esta teoría. La primera aplicación al problema de distribución en planta la realizan Seppanen y Moore (1970). Las relaciones de las diferentes actividades pueden ser extraídas del diagrama relacional de actividades, donde las aristas serán los valores relacionales propuestos por Muther (1968) y los vértices las diferentes actividades del proceso productivo.

Un grafo  $G$ , es una representación topológica (figura 3.61) conformada por una serie de puntos (vértices  $v$ ) y semi-circunferencias (aristas  $a$ ), representándose el conjunto total como:

$$G=G(V,A)$$

Donde  $V$  es el conjunto de vértices  $V(G)$  y  $A$  el conjunto de aristas  $A(G)$ .

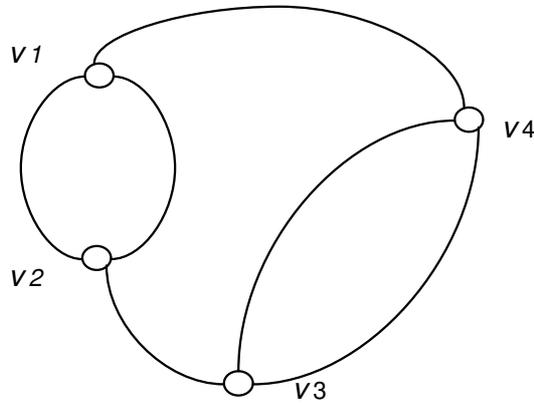


Figura 3.61: Un Grafo

Es menester que en el grafo no existan cruzamientos, y más aún en las actividades con mayor intensidad relacional. Para lograr maximizar el número o valor de adyacencias de forma eficiente, teniendo en cuenta la ponderación asociada a la relación entre actividades, es necesario que el grafo sea planar ponderado máximo (GPPM):

- Planar. Es planar si sus aristas se interceptan solo en los vértices, es decir, no hay cruzamiento de estas. Permite tener una distribución en planta sin superposición y cruzamiento.

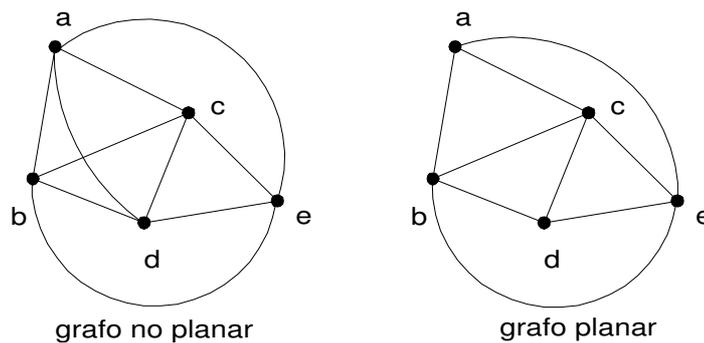


Figura 3.62: Planaridad de grafos

Pero existe un inconveniente para ésta condición, que sólo puede representar cómo máximo  $3 \cdot v - 6$  número de relaciones, lo que implica no cumplir con todos los requisitos relacionales y aumentando ésta con el número de actividades.

- Ponderado. Es ponderado cuando sus aristas tiene valores o pesos que pueden ser asociados a los parámetros de beneficio o coste.
- Planar Ponderado Máximo. Es un subgrafo con el máximo número de aristas sin perder la planaridad, y la suma de los pesos asociados a esas aristas es máximo.

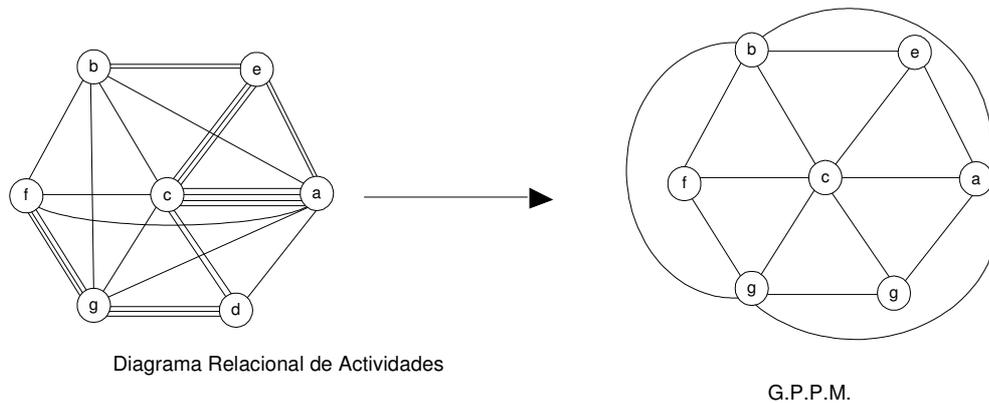


Figura 6.63: Grafo G.P.P.M

Para la aplicación de esta metodología en distribución en planta se debe seguir la siguiente metodología:

- Elaborar el diagrama relacional de actividades y a partir de este construir el GPPM.
- Construir un grafo dual. Para todo grafo planar  $G$  existe una dual  $G^*$  que también es planar. Este se confecciona colocando un punto en cada cara del grafo planar y uniendo los puntos cuyas caras tengan una arista en común. Para construir el grafo dual, se incluye una cara imaginaria exterior en el grafo planar.

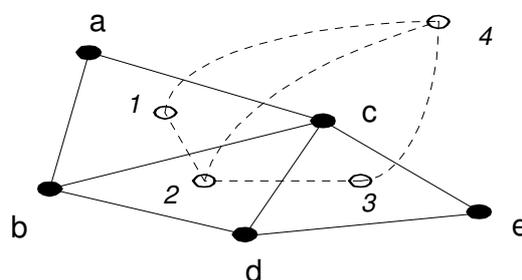


Figura 6.64: Grafo Dual

- Construir la distribución a partir del grafo dual, teniendo en cuenta las necesidades de espacios de las diferentes actividades.

Esta metodología se originó, cuando Leonar Euler estudió la forma de pasar por los puentes de la isla de Kueiphof en Koenigsberg (Pomerania), de tal forma de regresar al mismo punto de partida después de haber cruzado por los siete puentes pasando una sola vez por ellos.

### **3.6.- Distribución en planta y algoritmos genéticos.**

Como se comento en el capítulo anterior, los algoritmos genéticos son metodologías metaheurísticas de búsqueda, que consisten en simular la evolución de una población de individuos sometidos a una serie de condiciones, siendo la evolución de los mismos, resultado de un mecanismo de selección natural. Las técnicas metaheurísticas son, por lo tanto, estrategias de alto rendimiento para diseñar y mejorar procedimientos heurísticos muy genéricos. Las metodologías comentadas anteriormente como GRAFT (Armuor y Buffa, 1963), ALDEP (Seehof y Evans, 1967); CORELAP (Lee y Moore, 1967), etc, poseen limitaciones en cuanto a que la búsqueda de la solución óptima se realiza desde un único punto del espacio de soluciones, lo que origina habitualmente la caída en óptimos locales. Adicionalmente, la consideración de las restricciones geométricas era relativamente limitada, a pesar que se satisfacían los requerimientos de área por medio de la discretización del dominio.

En este apartado se estudiarán las diferentes propuestas de autores para la optimización por la aplicación de la metodología de los algoritmos genéticos. Es importante aclarar que la explicación en cuanto a la codificación y aplicación de los operadores, se desarrolla con más detalle en los apartados 4.1.1 y 4.4, respectivamente, del capítulo 4, destinado a profundizar en la metodología de los algoritmos genéticos y demás metaheurísticas.

#### **3.6.1.- Propuesta de Tam.**

Tam (1992), fue el primer autor que utilizó los algoritmos genéticos para la optimización en distribuciones de planta. Para generar y codificar las soluciones, el autor empleó la técnica de clustering (agrupamientos) y la de árboles de cortes con los siguientes operadores: u = up (arriba), b = botton (bajo), l = left (izquierda) y r = right (derecha). Tam define la adaptabilidad de los individuos al medio (soluciones), aceptando como hipótesis de partida, que tanto los espacios y la planta a distribuir tienen forma rectangular, y para cada actividad, definió un valor permitido de la relación alto/ancho ( $ri$ ) donde esta podrá desarrollarse. Adicionalmente, considera la orientación de las actividades pudiendo estas ser libres o no.

La finalidad de la propuesta, es minimizar el coste total de mantenimiento asignando espacios a las diferentes actividades en una planta de dimensiones conocidas. La función objetivo se puede escribir:

$$\text{Min } F = \sum_{s \in S} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n w_{ij} d_{ij}$$

Sujeto a:

$$r_i^{\min} \leq r_i \leq r_i^{\max}$$

$w_{ij}$  = coste por unidad de distancia del flujo de materiales entre las distancia  $i$  y  $j$ .

$d_{ij}$  = distancia rectilínea entre los centros de gravedad (centroide) de los espacios asignados entre las actividades.

$r_i$  = relación alto ancho del espacio asignado a la actividad  $i$ .

$r_i^{\min}$  = mínimo valor de la relación (alto/ancho) permitida para la actividad  $i$ .

$r_i^{\max}$  = máximo valor de la relación (alto/ancho) permitida para la actividad  $i$ .

Considerando las restricciones evaluadas como penalizaciones, la función se escribe como:

$$\text{Min } F = \sum_{s \in S} \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n w_{ij} d_{ij} + \mu \sum_{i=1}^n l_i$$

$\mu$  = coeficiente para ponderar el coste por el incumplimiento de las restricciones formales del problema, frente al coste derivado del flujo de materiales entre actividades.

$l_i$  = indicador del incumplimiento de las restricciones geométricas de la actividad  $i$ , y se calcula de forma diferente dependiendo de si, la orientación es libre, o no

El algoritmo desarrollado utiliza los operadores clásicos como los son selección, cruce (monopunto) y mutación (monopunto). Para el mecanismo de selección, emplea la ruleta basada en las posibilidades de los individuos en función de su adaptación. La adaptación de un individuo  $x$  de una población  $g$  cuyo fenotipo es  $f$  se define como:

$$\mu(f) = \text{Coste}_{(max)} - \text{Coste}_{(x)}.$$

Donde:

$\mu(f)$  = adaptación del individuo  $x$ .

$\text{Coste}_{(max)}$  = coste del individuo peor adaptado.

$\text{Coste}_{(x)}$  = coste del individuo  $x$ .

La probabilidad del individuo será:

$$P(x,g) = \mu(f) / \sum_{i=1}^x \mu(f)$$

Conocidas las probabilidades, estas se ordenan de mayor a menor para posteriormente calcular la probabilidad acumulada para aplicar la ruleta (ver capítulos 4 y 6).

### 3.6.2.- Propuesta multicriterio y macroevolutiva de Santamarina.

Santamarina (1995) propone un nuevo desarrollo a partir del modelo de Tam (1992), dado que este último ofrece fuertes restricciones por las hipótesis de partida. Adicionalmente, utiliza técnicas de clustering monotética, técnicas que sólo permiten la construcción de un árbol de corte que responden a necesidades de proximidad bajo un mismo criterio (coste derivado del flujo de materiales). En vista de la naturaleza multicriterio de las distribuciones que se ha comentado anteriormente, Santamarina justifica la utilización de árboles de cortes desequilibrados. Como introducción a su propuesta, la autora emplea la analogía entre los árboles de cortes y las diferentes especies, siendo cada especie una estructura diferente de árbol de cortes. Teniendo representadas las diferentes especies, se selecciona la que mejor se adapte al medio, y de esta se selecciona el mejor individuo (análisis macroevolutivo). Emplea el concepto de potencial de adyacencia, que representa la potencialidad de dos actividades a mantener frontera común para múltiples distribuciones en un mismo árbol de cortes. La función para evaluar la calidad del árbol de cortes (mejor especie), a partir del potencial de adyacencia, que sea capaz de contener la mejor solución es:

$$P(AC) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n P(i,j) \cdot \left[ \pm \sum_{u=1}^k \alpha_u f_{u,ij} \pm \sum_{v=1}^{k'} \beta_v t_{v,ij} \right]$$

Donde:

$\alpha_u, \beta_v$  = coeficientes de ponderación que representan la importancia relativa entre los factores cualitativos y cuantitativos.

$f_{u,ij}$  = valor de intensidad relacional entre las actividades  $i$  y  $j$  bajo el criterio cuantitativo  $u$ -ésimo.

$t_{v,ij}$  = valor de intensidad relacional entre las actividades  $i$  y  $j$  bajo el criterio cualitativo  $v$ -ésimo.

$k$  = número de criterios cuantitativos contemplados.

$k'$  = número de criterios cualitativos contemplados.

$\pm$  = signos que se eligen en función del significado utilizado para estimar la intensidad relacional.

$P(i,j)$  = potencial de adyacencia entre dos actividades pertenecientes al árbol de cortes. Es función de la profundidad de la actividad con respecto al nodo raíz común y puede tomar valores entre 0 y 1. Para el cálculo del potencial de adyacencia la autora emplea la expresión:

$$P(ij) = P(i).P(j).$$

Donde:

$P(i)$  = potencial de la actividad  $i$  relativo a la  $j$ .

$P(j)$  = potencial de la actividad  $j$  relativo a la  $i$ .

El potencial de una actividad, representa la capacidad de tener lados exteriores en un subdominio pendiente de un nodo común a ambas.

La autora estima  $P(i)$  como:

$$P(i) = \left[ \frac{4.3}{4^s} \right] = \left[ \frac{3}{4} \right]^{s-1}$$

Donde:

$s$  = número de nodos que recorridos desde la actividad  $i$  hasta el primer nodo común

La función para evaluar el mejor individuo en coste relacional, dado la multiplicidad de criterios es:

$$CR = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n d_{ij} \cdot \left[ \pm \sum_{u=1}^k \alpha_u f_{u,ij} \pm \sum_{v=1}^{k'} \beta_v t_{v,ij} \right] + \mu \sum_{i=1}^n f(li)$$

Donde:

$\alpha_u, \beta_v, \mu$  = coeficientes de ponderación que representan la importancia relativa entre los factores cualitativos, cuantitativos y criterio geométrico.

$d_{ij}$  = distancia rectilínea entre centros de gravedad de las actividades.

$f(li)$  = penalización del incumplimiento de las restricciones geométricas. Para cuantificar la penalización  $f(li)$  de las actividades, debido al incumplimiento de las restricciones geométricas, Santamarina propone el uso de funciones matemáticas que aumenten la penalización en función del incumplimiento ( $li$ ) estimado con la siguiente expresión:

$$I_i = \max \left[ 0, \left\{ \frac{\max(\text{alto}_i, \text{ancho}_i)}{\min(\text{alto}_i, \text{ancho}_i)} \max\left( r_i^{\max}, \frac{1}{r_i^{\min}} \right) \right\} \right]$$

Donde:

$r_i^{\max}$  = máximo valor del ratio alto / ancho permitido para la actividad  $i$ , en una orientación predominantemente vertical.

$r_i^{\min}$  = mínimo valor del ratio, permitido para la actividad  $i$ , en una orientación predominantemente vertical.

$\text{alto}_i$  = alto de la actividad  $i$ .

$\text{ancho}_i$  = ancho de la actividad  $i$ .

Es importante aclarar que esta segunda etapa, además de localizar el mejor individuo, selecciona el ratio ancho/alto ( $\theta$ ) de la planta más conveniente. Este estará representado por un número (ratio) en el último gen del cromosoma (ver capítulo 4).

Como operadores genéticos para la primera etapa, la autora utiliza el método clásico de ruleta para la selección. La finalidad es aumentar la probabilidad de las mejores especies a ser elegidas en función de su adaptabilidad, proporcionando también una pequeña probabilidad a otras y mantener así la diversidad. En cuanto al operador cruce lo utiliza monopunto. La aplicación de este operador para la propuesta puede originar soluciones inviables. Las soluciones inviables presentan actividades y cluster inexistentes o repetidos. Para que el cruce no origine estos problemas, ambas especies tienen que ser similares o estar emparentadas para crear un híbrido viable. El operador mutación, consiste en intercambiar de forma aleatoria el valor de dos genes. La finalidad de esta aplicación es evitar las especies inviables bajo la condición de que ningún cluster puede estar formado por elementos de mayor orden que el cluster en cuestión. Cuando el operador se aplica en un gen nodo, representa un cambio más acusado del individuo que favorece la diversidad, que un cambio en un gen actividad.

En la segunda etapa, el operador selección, cruce y mutación se aplica de la misma forma que en Tam (1992).

### 3.6.3.- Propuesta de Suresh et al.

Para el mismo año de 1995, Suresh y colaboradores (Suresh et al., 1995), utilizan también un algoritmo genético para minimizar el coste de manutención en un problema de distribución de instalaciones. Para los autores hay dos componentes de costes involucrados: los costes fijos y los costes variables. El fijo, consiste en el coste de asignar una actividad a una determinada localización (no lo consideran en esta propuesta). El coste variable es expresado en términos del movimiento de materiales y las distancias entre actividades. La función objetivo formulada como un QAP utilizada es:

$$\text{Min } C = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n f_{ij} (c_{ij} d_{ij})$$

Donde  $C$  es el coste variable total.

$f_{ij}$  = el flujo de materiales del departamento  $i$  al departamento  $j$ .

$d_{ij}$  = las distancia entre los departamentos  $i$  y  $j$ , considerando el centro y distancias rectilíneas.

$c_{ij}$  = el coste unitario de mover una unidad de trabajo o carga del departamento  $i$  al  $j$ .

La restricción para este problema es, que cada actividad solo puede ser asignada a una sola localización, siendo estas de área igual y cuadrada. Para la aplicación de la formulación, en vez de emplear árboles de corte, los autores utilizan una matriz que representa la planta de ocho localizaciones donde asignará las actividades. Se emplea un algoritmo genético simple o canónico, donde las soluciones o cromosomas están constituidos por números enteros que representan, como se ha dicho anteriormente, las actividades ubicadas en la distribución. En la figura a continuación (figura 6.65), el cromosoma o esquema que representa la distribución es: 76538412.

Posiciones en Planta				Departamentos Asignados			
0	1	2	3	7	6	5	3
4	5	6	7	8	4	1	2

Figura 6.65: Representación de localizaciones y actividades asignadas (Suresh et al., 2000).

Para la selección de los padres, utilizan como función aptitud, el coste final de la distribución. Aplica un operador de cruzamiento monopunto. Esta forma de aplicación del operador cruce para este caso en concreto, origina distribuciones inviables, por lo tanto, los autores crean un mecanismo para el intercambio de actividades duplicadas en los cromosomas hijos, es decir, intercambian las actividades repetidas de un cromosoma hijo a otro para crear soluciones factibles. El operador mutación, al igual que en el caso anterior, consiste en intercambiar al azar dos elementos del cromosoma.

### 3.6.4.- Propuesta y estudios de Tate y Smith.

Tate y Smith (1995), aplican un algoritmo genético para el problema cuadrático de asignación (QAP). La finalidad, es realizar un estudio del comportamiento del algoritmo genético y el problema cuadrático de asignación, ante las diferentes consideraciones del comportamiento del algoritmo. Como por ejemplo: empleo y porcentaje de aplicación de los operadores genéticos.

Los recintos para la asignación son rectangulares, y para la determinación de la distancia utilizan cualquiera de las siguientes distancias: la euclidiana o la Manhattan.

Emplean matrices de mantenimiento asumiendo que el flujo de materiales es simétrico. Para la ordenación, se realiza por filas y en zig zag y estableciendo, uno a uno, como ocurre con el QAP, la correspondencia entre las secuencias de actividades  $\{1,2,3,\dots,n\}$  y las posibles ubicaciones.

Aplican los operadores cruce, mutación con una probabilidad uniforme. los autores eligen no utilizar la ruleta de Golberg (1989) para la selección, y en su lugar, seleccionan los padres eligiendo un número al azar ajustado entre 1 y  $m^{1/2}$ , siendo  $m$  el tamaño de la población. Para el cruzamiento, emplean una técnica que permite crear diferencias potencialmente múltiples de la prole a partir de los mismos padres. La mutación empleada, al igual que en el caso anterior, consiste en elegir al azar dos puntos de la secuencia cromosómica e intercambiarlos. Como se ha comentado, los autores hacen estudios comparativos de las diferentes distancias, como también, las diferentes formas de aplicar los operadores, llegando a la conclusión que las aplicaciones tradicionales generarán buenos resultados, ya que métodos mucho más sofisticados de operadores podrían originar desviaciones de la búsqueda.

### **3.6.5.- Propuesta de Gupta et al.**

Gupta y colaboradores (Gupta et al., 1996), presentan un nuevo desarrollo constituido por tres modelos, que tiene la finalidad de conjugar la distribución en planta y la formación de las células de fabricación. Por medio de un algoritmo genético, busca las mejores soluciones empleando tres funciones objetivos, donde la primera consiste en minimizar el movimiento de materiales total entre células, la segunda en minimizar la variación de la carga de éstas y la tercera evalúa, simultáneamente, las dos anteriores. Consideran dos tipos posibles de distribución de células, para evaluar la influencia o impacto que producirán estas configuraciones. Las configuraciones utilizadas por los autores son de una sola fila y de doble fila.

La propuesta cromosómica, representa los números de células que contiene una determinada máquina. Utiliza el método de Goldberg (1989) como operador selección, y emplean un cruzamiento simple que asegura que las máquinas serán asignadas a las células vacías. Aplican una nueva técnica para la convergencia de las soluciones, basada en la divergencia del universo de soluciones para evitar los óptimos locales.

### **3.6.6.- Estudio de Mavridou y Pardalos.**

Para el año 1997, Mavridou y Pardalos (1997), hacen una revisión en relación a la optimización de las distribuciones de planta aplicando simulated annealing y algoritmos

genéticos, exponiendo también las características de ambas metodologías (Ver capítulo 4). En el trabajo de Mavridou y Pardalos, se hace un estudio de las técnicas de formulación más aplicadas para el problema de distribución en planta FLP (facility Layout Problem), siendo una de estas el ya comentado QAP. El FLP es un enfoque para la optimización combinatorial para la distribución en planta y recientemente de las células de fabricación en planta (FMS). En estas, el FMS resuelto como un FLP, incluye las especificaciones de las coordenadas de espacio de cada célula, la orientación de las mismas (vertical u horizontal) y en algunos casos, dependiendo del problema, la localización de los puntos de manutención (Pickup/Dropoff) ver (Rajasekharan, et al. 1998).

### 3.6.7.- Propuesta de Benson y Foote.

Benson y Foote (1997) desarrollan una metodología que aplica un algoritmo genético y la programación lineal. El modelo tiene la finalidad de optimizar la ubicación de las puertas o acceso (puntos de entrada/salida) en los departamentos, para minimizar el coste de manutención por el recorrido de los materiales en los pasillos, mientras toma en cuenta el tamaño y forma de los departamentos. La metodología publicada se basa en SPAAC shortest path along aisles and corridors (Trayectoria más corta entre pasillos y corredores), que en vez de utilizar distancias euclidianas o rectilíneas, emplean la distancia más corta entre la actividad  $i$  y  $j$  por el pasillo o corredor para evaluar el coste. Para la ubicación de los accesos que disminuya la distancia a través de los pasillos, formulan el problema por medio de la programación lineal (LP), que considera tanto los pasillos principales como los sub-pasillos (toma en cuenta una sola puerta por departamento). Para la resolución de la formulación, utilizan un algoritmo genético en cuya representación cromosómica, cada gen representa una posible ubicación de una determinada puerta o acceso al área de la actividad. Para la selección de los individuos que serán los padres en la próxima generación, definen una función aptitud  $F(i) = C^{sum} - C(i)$ , donde  $C(i)$  es el coste del cromosoma  $i$ , y  $C^{sum}$  vendría siendo el coste total de toda la población. Posteriormente, para la probabilidad de selección emplean la ruleta  $P^s(i) = F(i)/F^{sum}$ . El operador cruce es monopunto. La mutación consiste en seleccionar a dos sub secuencias del cromosoma para intercambiar sus posiciones.

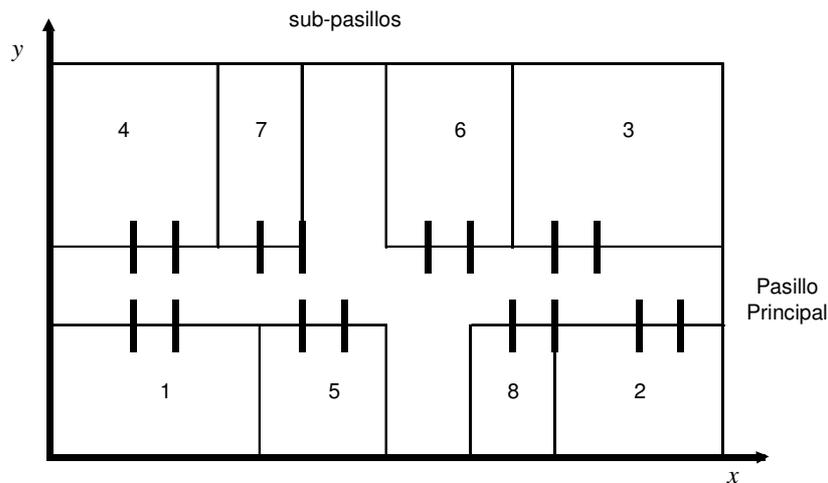


Figura 3.66: Ejemplo de distribución final de Benson y Foote (1997).

### 3.6.8.- Propuesta Tam y Chan.

En el año 1998, Tam y Chan (1998), utilizan el paralelismo implícito en los algoritmos genéticos (ver capítulo 4), para demostrar su potencial como herramienta de optimización. La propuesta explota el paralelismo de los algoritmos genéticos en los diferentes niveles de la distribución, lo que implica la definición de límites más ajustados y el establecimiento de prioridades que permiten la reducción del número de nodos en el árbol, consiguiendo la acotación del problema y resolviéndolo en tiempos razonables. El paralelismo o búsquedas locales en paralelo, tiene la ventaja que para los distintos individuos de una población se tendrán como resultado simultáneo los mejores para cada entorno particular, es decir, explora las diferentes regiones del espacio de solución en paralelo y evita así la caída en óptimos locales (Goldberg, 1989). Tam y Chan (1998) utilizan, esta vez, esquemas binarios y codifican el árbol de cortes en tres niveles:

- Codificación de la estructura del árbol de cortes. Para representar la estructura del árbol de cortes, el autor utiliza los valores binarios (0) y (1) que denotan los niveles internos y externos respectivamente.
- Codificación de los nodos internos. Los nodos internos representan la secuencia de las operaciones de cortes, donde cada uno se representa como cero (0) corte horizontal y uno (1) corte vertical.
- Codificación de los niveles externos. En el nivel externo cada valor es único. Se considera los valores como una secuencia de la permutación, donde los valores de la codificación están basados en una tabla de esa secuencia. La secuencia

$q_1q_2q_3\dots q_n$  es llamada tabla de la secuencia de permutación si  $i < j$  con  $p_i < p_j$ , y su dimensión es igual al número de actividades. El primer valor de esta secuencia debe ser cero y puede ser ignorado. La estructura de la secuencia de dichas permutaciones son almacenadas de forma binaria.

La finalidad de esta propuesta de codificación, es evitar que buenas soluciones candidatas queden excluidas por la simplificación del desarrollo propuesto en Tam (1992).

La función objetivo utilizada para la asignación, de forma que las actividades con una mayor intensidad en relación al movimiento de materiales sean colocadas próximas entre sí, mientras que se satisfacen las restricciones de área y de forma, es:

$$\text{Min sCs } F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n v_{ij} d_{ij} . x_k.$$

Sujeto a:

$$a_{\min}^i \leq a_i \leq a_{\max}^i \quad i, j = 1, 2, \dots, n.$$

Donde:

$v_{ij}$  = volumen del movimiento de materiales entre las actividades  $i$  y  $j$ .

$d_{ij}$  = distancia rectilínea entre los centroides de las actividades  $i$  y  $j$ .

$a_i$  = relación alto/ancho de la actividad  $i$ .

$a_{\min}^i$  = límite inferior de  $a_i$ .

$a_{\max}^i$  = límite superior de  $a_i$ .

Usando una función de penalización, el problema es reformulado como un problema de optimización libre o sin restricciones que se representa como:

$$\text{Min sCs } F = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n v_{ij} d_{ij} . + \sum_{k=1}^n w^{\alpha_k} \alpha_k$$

$$\alpha_k = \max\{0, [(a_k - a_{\max}^k), (a_{\min}^k - a_k), (a_k - (1/a_{\max}^k))((1/a_{\max}^k) - a_k)]\}.$$

Donde el primer término de  $F$ , se define como el producto de la distancia entre actividades y el volumen de desplazamientos  $v_{ij}$ . El segundo término representa las restricciones geométricas.

### 3.6.9.- Propuesta de AL- Hakim.

A pesar de lo comentado por Tam y Chan (1998) en relación con su codificación, AL- Hakim (2000a), publica un artículo donde demuestra las dificultades para la aplicación de los operadores genéticos clásicos (cruce y mutación) de la propuesta de Tam y Chan (1998). Según el autor, la implementación de estos en los niveles descritos por Tam y Chan, podrían originar soluciones inválidas. Para solucionar el problema, propone nuevos operadores, cruce diagonal con tres progenitores, el preservador (clonación) y el operador trasplante, desarrollado para intercambiar genes de un mismo cromosoma.

### 3.6.10.- Propuesta de Islier.

Islier en el año 1998 (Islier, 1998), publica un modelo de formulación multiplicativa, cuya función objetivo considera de forma conjunta, criterios de distancias, compacidad, flujo de materiales y necesidad de cercanía (emplea la tabla relacional de actividades TRA de Muther). Para la optimización por algoritmo genético, se emplean cromosomas de tres segmentos, donde el primero define la secuencia de actividades (utiliza un trazado de  $x$ -y oscilaciones en una superficie discretizada), el segundo el área de cada una y el último un ancho de banda. A cada uno de estos segmentos se le aplican los operadores de cruzamiento, mutación e introduce el operador inversión (ver capítulo 4) como un reparador para soluciones no factibles. En su formulación considera tres factores: factor de carga, factor de forma y un factor de desviación:

- El factor carga es el cociente entre la carga ideal de materiales y la real. Este cociente permanecerá entre cero y uno, y su incremento representará una reducción del transporte de materiales. El factor carga se define:

$$t = \frac{V}{\sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=2}^m c_{ij} \cdot f_{ij} \cdot d_{ij}}$$

- $V$  = Carga ideal (“*esta se obtiene al multiplicar la carga clasificada y el vector de flujo de materiales*”)(Islier, 1998).
- $m$  = números de departamentos.
- $c_{ij}$  = coste de manutención por unidad de distancia de la actividad  $i$  a la  $j$ .

- $f_{ij}$  = número de unidades a ser trasportadas entre las actividades  $i$  y  $j$  dentro de un periodo.
- $d_{ij}$  = distancia entre la actividad  $i$  y  $j$ .
- El factor de forma, mide la concentración de la geometría de una actividad, proporcionando así áreas departamentales compactas no separadas.

$$s = \frac{\sum_{i=1}^m r_i}{\sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^{co} \sum_{k=1}^m a_{ijk}}$$

- $S_k$  = conjunto de células del departamento  $k$ .
- $upk$  = distancia rectilínea del centro del departamento  $k$  al centro de la célula  $p$ .
- $a_{ijk}$  = indicador que es igual a 1 si la célula en la  $i$ -ésima fila y  $j$ -ésima columna en el plan de ubicación es colocado en el  $k$ -ésimo departamento.
- $b$  = número de filas en el plan de ubicación (discretización).
- $co$  = número de columnas en el plan de ubicación.
- $ri$  = momento de inercia del área del  $k$ -ésimo departamento.
- Factor de desviación mide la utilización efectiva del espacio:

$$h = 1 - \frac{\sum_{k=1}^m \left| A_k - \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^{co} a_{ijk} \right|}{\sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^{co} \sum_{k=1}^m a_{ijk}}$$

Donde  $A_k$  es el área del departamento  $k$ .

La función objetivo para la optimización final es:

$$\text{Max} \frac{t}{s \cdot h}$$

Sujeto:

$$\sum_{k=1}^m a_{ijk} \leq 1 \quad \forall i, j$$

$$\underline{A}_k \leq \sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^{co} a_{ijk} \leq \bar{A}_k \quad \forall k$$

$$\sum_{i=1}^b \sum_{j=1}^{co} \sum_{k=1}^m a_{ijk} \leq b \cdot co$$

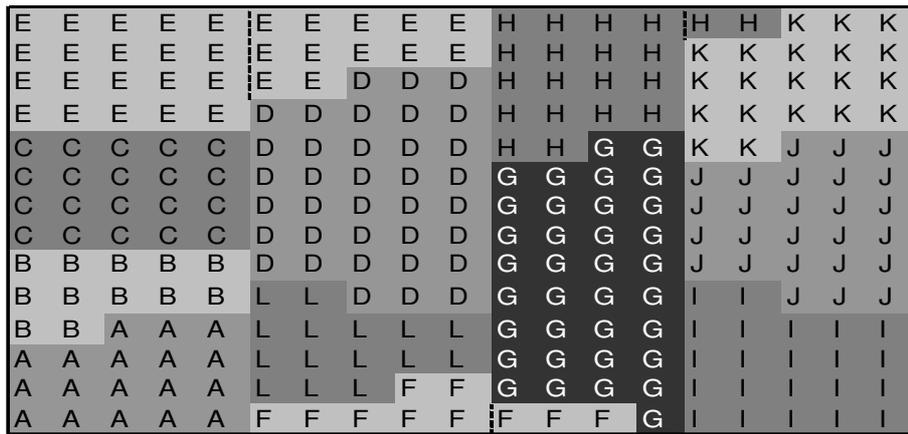


Figura 3.67: Distribución de planta de Islier (1998).

### 3.6.11.- Segunda Propuesta de AL-Hakim.

AL-Hakim publica también en el año 2000 (AL-Hakim 2000b), una discusión sobre la propuesta para la aplicación del algoritmo genético de Islier (1998). Este autor sugiere que la distribución en planta, puede ser representada sin necesidad de incluir el área de las actividades dentro del cromosoma, argumentando, que manteniendo la estructura del segmento 1 y variando las anchuras de banda (segmento 3), se generarán una cantidad de individuos suficientes al igual que en la propuesta de Islier. Adicionalmente, comenta que es redundante la utilización del segmento 2 para la aplicación de los operadores genéticos, ya que una aplicación de un operador en un punto del segmento 1 implicará el mismo en el segmento 2. Propone también, la aplicación de un operador llamado clonación, ya que la aplicación de los operadores utilizados por Islier (1998), pueden según Al-Hakim, hacer converger la población a un óptimo local. El operador clonación, opera como un espejo y puede ser en sentido vertical u horizontal de la distribución (ver capítulo 4).

### 3.6.12.- Propuesta de Cheng y Gen.

Cheng y Gen (1998), presentan una metodología híbrida conformada por un algoritmo genético y búsqueda aproximada, para resolver el diseño del layout en ciclo cerrado (figura 3.68). La finalidad del desarrollo, es determinar el orden o secuencia en serie de las máquinas presentes en el layout, representadas en una permutación  $(m_1, m_2, \dots, m_n)$ , para minimizar algunas medidas como el número y tiempo total de recargas para todas las partes y la congestión del sistema. El cromosoma utilizado representa la secuencia de máquinas presentes en el layout (9 1 2 3 4 5 6 7 8). Como operador selección, emplea la ruleta como mecanismo básico de selección para reproducir la próxima generación. El cruzamiento utilizado, emplea una técnica llamada cruce de empalme parcial PMX (Partially Mapped Crossover), que consiste primero en intercambiar trazos de los cromosomas padres, segundo implementando una relación de trazado, y tercero generando una solución viable. La mutación consiste en elegir varios genes del cromosoma para cambiar su alelo, manteniendo las soluciones viables, es decir, una secuencia sin valores repetidos.

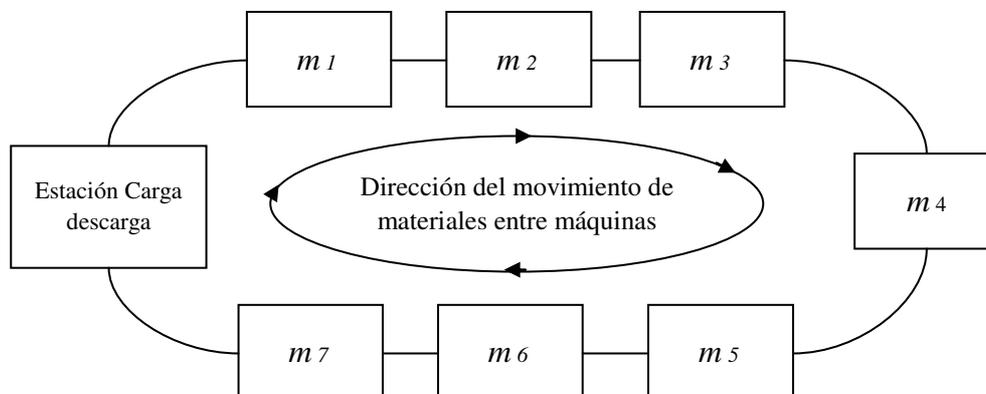


Figura 3.68: Representación de una distribución en ciclo cerrado (Cheng y Gen 1998).

### 3.6.13.- Propuesta MULTIHOPE de Kochhar y Heragu.

Kochhar y Heragu (1998) presentan un desarrollo para el diseño de planta donde se considera el movimiento vertical de materiales (flujo entre múltiples pisos), aplicando

para la optimización el algoritmo MULTI-HOPE (Multi-Floor Heuristically Operated Placement Evolution) desarrollado a partir del HOPE (Kochhar et al., 1998). MULTI-HOPE asume que cada piso de una distribución puede ser dividido en retículas o celdas cuadradas de igual área (método discreto). Según los autores, cada departamento o actividad es asignado a uno o varias de esas retículas cuadradas, de forma que el área total de ellas sea el área total de los departamentos o áreas de trabajo. Cada retícula es numerada de una forma secuencial 1 hasta N, donde N viene siendo la suma de las retículas requeridas para todos los departamentos. Así cada secuencia genética o cromosoma, consiste de una serie de números enteros, donde cada uno representa una de las N retículas cuadradas. Para la ordenación y codificación de este cromosoma los autores emplean también la técnica SFC (Space Filling Curve). En la generación de la población inicial, los autores utilizan un procedimiento aleatorio a partir de curvas de llenado predefinidas.

Kochhar y Heragu consideran que el flujo de materiales entre dos departamentos localizados en diferentes pisos presenta la característica de que el tiempo de transporte no es lineal, es decir, el desplazamiento entre un par de departamento de pisos diferente incluye:

- Distancia y tiempo para viajar del departamento origen al elevador seleccionado.
- Tiempo de espera del elevador seleccionado.
- Distancia vertical y tiempo de transportación al piso del departamento destinatario.
- Distancia y tiempo de viaje del elevador al departamento destino.

La función coste utilizada por los autores es:

$$\text{Coste} = \sum_{i=1}^n f_{ij}.d_{ij}.$$

Donde  $d_{ij}$  es  $h(|x_i - x_j| + |y_i - y_j|)$  si los departamentos o actividades  $i$  y  $j$  están localizadas en el mismo piso, y  $h(|x_i - x_j| + |y_i - y_j| + |x_j - x_l| + |y_j - y_l| + v|\delta_i + \delta_j|c_{ij})$  para departamentos de diferentes pisos.

$x_i, y_i$  = las coordenadas del departamento  $i$ .

$\delta_i$  = la coordenada vertical del piso  $i$ .

$f_{ij}$  = flujo de materiales entre el departamento  $i$  y  $j$ .

$h, v$  = coste de transportación vertical y horizontal de unidad de carga y distancia.

$C_{ijl}$  = factor coste para el transporte del material del piso  $i$  a  $j$  vía elevación  $l$ .

Para la aplicación del operador selección los

Para la aplicación del operador selección, los autores utilizan una función de aptitud (fitness), definida a partir de la función objetivo coste. Esta función aumenta la probabilidad de que los individuos mejor adaptados, menor coste, sean elegidos como padres para la próxima generación por el método de la ruleta (ver capítulo 4).

$$K(Cost)^{\alpha-1} e^{-((cost/b))}$$

Donde

$$\alpha = 0,5.$$

$$\beta = 1$$

$Cost$  = coste total

$K$  = a una constante.

El operador cruzamiento, emplea las mismas curvas de llenado usadas en la inicialización del proceso para crear soluciones factibles. Utilizan un operador de mutación adaptativo en función de la diversidad de la población actual, y del número de generaciones que han progresado. El operador mutación, selecciona al azar dos departamentos y los cambia de posición. Si ambos departamentos están localizados en un mismo piso, el cambio se realizará reordenando los departamentos en el área disponible. Si el intercambio se realiza en departamentos ubicados en diferentes pisos, el cambio se realiza solo si ambos departamentos tienen igual área.

### 3.6.14.- Propuesta de Rajasekharan et al.

Otra aplicación de los algoritmos genéticos para el problema de distribución, es la resolución de modelos de sistemas de manufactura flexibles (FMS). Estos han surgido en los años recientes, como se ha comentado anteriormente, dada la necesidad de dar respuesta a los diferentes cambios en la demanda y diseño de productos, diferenciándose de los tradicionales en que consideran la localización, orientación y los puntos de manutención (Pickup/Dropoff) de las células. La finalidad, es minimizar el coste debido al movimiento de materiales entre las diferentes células de manufactura (Rajasekharan et al., 1998). Estos problemas se desarrollan como un problema de distribución en planta, dentro del marco de formulación MIP (Mixed Integer Programing). MIP es la formulación que permite capturar todos los aspectos para el desarrollo del FLP, pero tiene la desventaja de ser difícil de resolver por métodos tradicionales, siendo necesaria la aplicación de una metodología robusta de solución como lo son los algoritmos genéticos. La formulación propuesta por Rajasekharan et al. (1998), asume que cada célula es rectangular y cada punto (Pickup/Dropoff) puede ser

colocado y orientado en cualquier posición de las células (ver figuras 3.68 y 3.69). El objetivo en sí, es determinar la secuencia espacial de las células de fabricación resuelta como un problema de distribución, empleando un algoritmo genético que aplica dos procedimientos heurísticos, (ver figura 3.70). Las restricciones son que no haya solapamiento de células y que la distancia de los Pickup/Dropoff a los depósitos sean distancias de contorno. Para la codificación utiliza las variables binarias que representan, para las primeras dos partes, el orden de las  $x$  e  $y$  coordenadas de dos puntos centrales, donde  $1.5(N^2 - N)$  es el tamaño del cromosoma binario. La última parte representa las interferencias. Aplican una técnica de reproducción en estado estacionario sin duplicados. Esta metodología consiste en crear un cierto número de hijos para sustituir a los padres, pero descartando hijos que sean duplicado de individuos actuales. El operador cruce es monopunto y su nivel de aplicación es controlado por un ratio de cruzamiento  $CR$ . La mutación consiste en intercambiar los valores de 1 a 0 o viceversa de un o varios genes. El número de genes que mutarán se eligen al azar, y para cada generación existe un ratio de mutación ( $MR$ ) que controla su número.

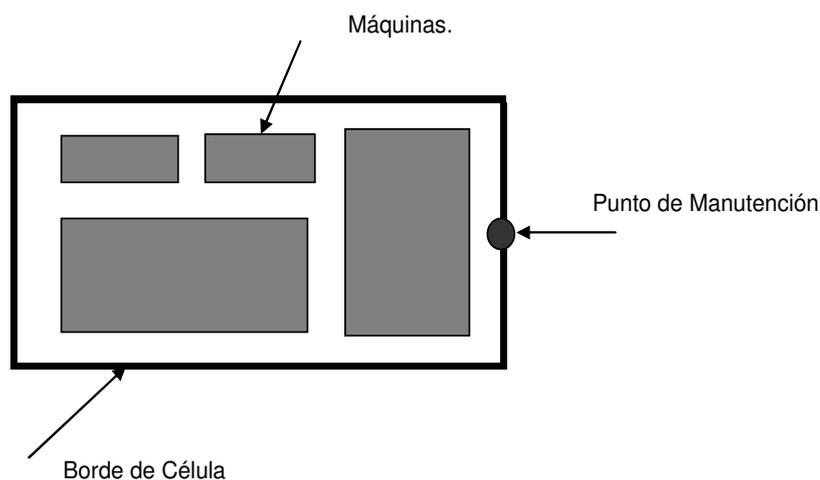


Figura 3.69: Representación de una célula de Rajasekharan et al. (1998).

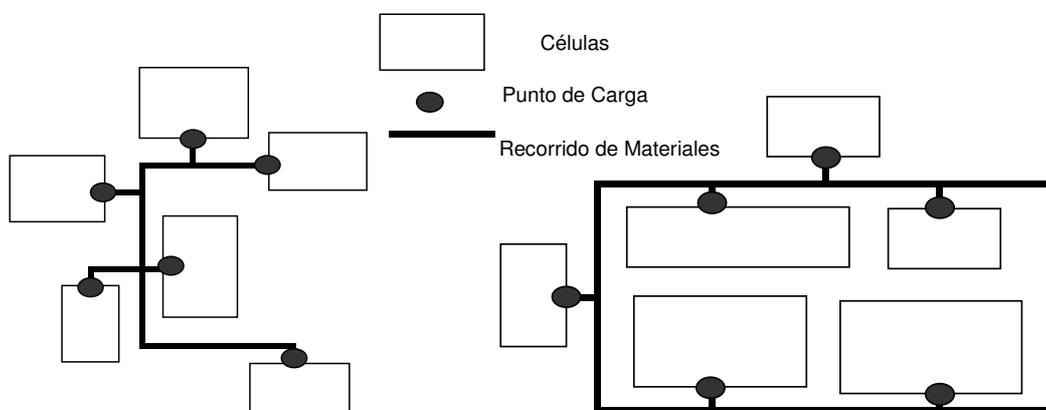


Figura 3.70: Posibles configuraciones de distribución de células (Rajasekharan et al., 1998)

En el proceso propuesto por el autor, las variables a utilizar de entrada son:

- La matriz de las densidades de los flujos o movimientos de materiales.
- La geometría de las células.
- La distancia entre Pickup/Dropoff y el centro de cada célula.

Luego el programa entra en una etapa de formulación del problema de distribución como un MIP, basada en las búsquedas de las posiciones relativas de las células en el espacio disponible. La formulación se resuelve por medio del algoritmo genético como se observa en la figura.

Al final las variables de salida para la evaluación de la distribución son:

- Las coordenadas de los centros de las células dentro del espacio de planta.
- La orientación de cada célula (vertical u horizontal).
- Las distancias y ubicación de los puntos de manutención Pickup/Dropoff.

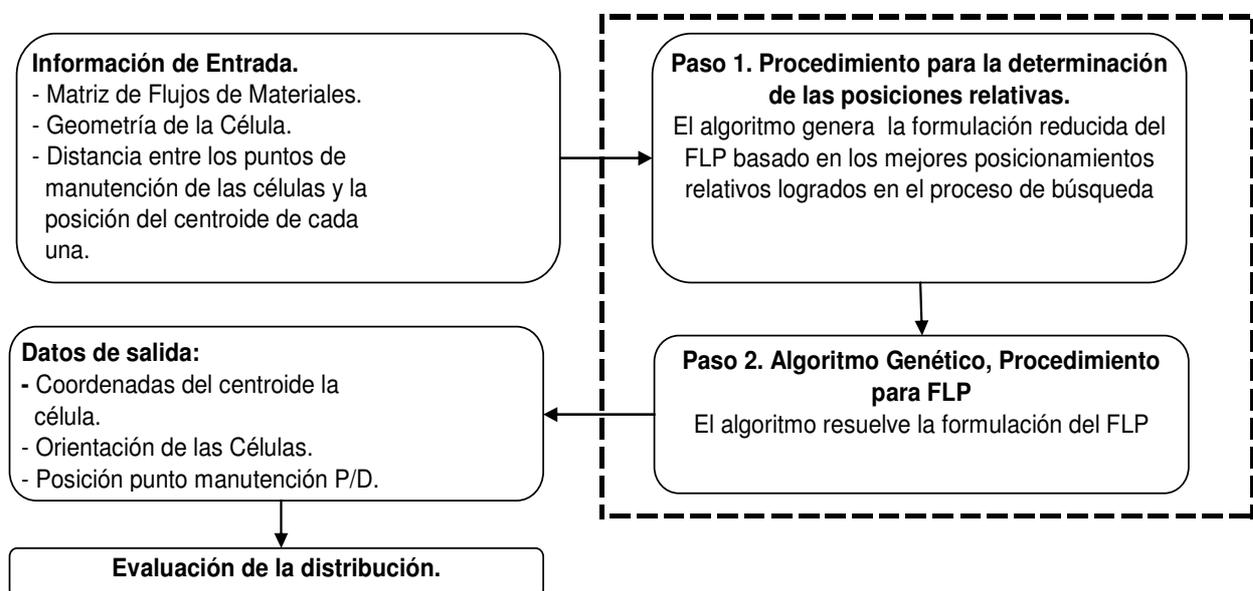


Figura 3.71: Algoritmo genético basado en un proceso heurístico de dos pasos para la resolución del FMS (Rajasekharan et al., 1998).

La notación empleada por la formulación MIP para este problema:

$n$  = número total de células en la distribución.

$i, j$  = índices de las células  $i, j = 1 \dots N$ .

$u_{ij}$  = densidad del flujo de materiales de la célula  $i$  a la  $j$ .

$\varepsilon_{ij}$  = coste por unidad de distancia y unidad de carga de la célula  $i$  a la célula  $j$ .

$w_i$  = ancho de la célula  $i$ .

$v_i$  = altura de la célula  $i$  ( $w_i \geq v_i$ ).

$O_i$  = compensación de los Pickup/Dropoff del centro de la célula  $i$ .

$W$  = ancho del espacio de planta.

$H$  = altura del espacio de planta.

$Z_i = 1$ , célula  $i$  es de posición vertical y 0 si la célula es horizontal.

$(x_i, y_i)$  = coordenadas espaciales del centro de la célula  $i$ .

$(p_{xi}, p_{yi})$  = coordenadas espaciales de los Pickup/Dropoff de la célula  $i$ .

$\lambda_{1i} = 1$  si el Pickup/Dropoff de la célula  $i$  está a la derecha del centro de la célula y cero lo contrario.

$\lambda_{2i} = 1$  si el Pickup/Dropoff de la célula  $i$  está debajo del centro de la célula y cero lo contrario.

$\lambda_{3i} = 1$  si el Pickup/Dropoff de la célula  $i$  está a la izquierda del centro de la célula y cero lo contrario.

$\lambda_{4i} = 1$  si el Pickup/Dropoff de la célula  $i$  está sobre el centro de la célula y cero lo contrario.

$\alpha_{ij} = 1$  si  $x_i \geq x_j$  ( el centro de la célula  $i$  está a la derecha del centro de  $j$ ) y cero lo contrario.

$\beta_{ij} = 1$  si  $y_i \geq y_j$  ( el centro de la célula  $i$  está a sobre el centro de  $j$ ) y cero lo contrario.

$\theta_{ij}$  = variable binaria de la interferencia de células.

$E_{ij}(F_{ij})$  = componente positiva (negativa) de  $x_i - x_j$ .

$G_{ij}(H_{ij})$  = componente positiva (negativa) de  $y_i - y_j$ .

$P_{ij}(Q_{ij})$  = componente positiva (negativa) de  $p_{xi} - p_{xj}$ .

$R_{ij}(S_{ij})$  = componente positiva (negativa) de  $p_{yi} - p_{yj}$ .

Para modelar la conveniencia Rajasekharan et al. (1998) definen  $\Lambda = \{(i, j) \mid i = 1, \dots, n; j = i + 1, \dots, n\}$  como el conjunto de células con los puntos pickup/dropoff a lo largo del lado corto o largo de la célula. La formulación de la función objetivo empleada por los autores es:

$$\text{Minimizar } \sum_{i=j}^n \sum_{j=i+1}^n \varepsilon_{ij} \cdot u_{ij} (P_{ij} + Q_{ij} + R_{ij} + S_{ij})$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$1.- x_i - x_j = E_{ij} - F_{ij} \quad (i, j) \in \Lambda$$

$$2.- y_i - y_j = G_{ij} - H_{ij} \quad (i, j) \in \Lambda$$

$$3.- E_{ij} \leq \alpha_{ij} M \quad (i, j) \in \Lambda$$

- 4.-  $F_{ij} \leq (1 - \alpha_{ij}) M \quad (i,j) \in \Lambda$   
 5.-  $G_{ij} \leq \beta_{ij} M \quad (i,j) \in \Lambda$   
 6.-  $H_{ij} \leq (1 - \beta_{ij}) M \quad (i,j) \in \Lambda$   
 7.-  $E_{ij} + F_{ij} - [(1 - Z_i)/2] \cdot w_i - (Z_i/2) \cdot v_i - [(1 - Z_j)/2] \cdot w_j - (Z_j/2) \cdot v_j \geq -M \theta_{ij} \quad (i,j) \in \Lambda$   
 8.-  $G_{ij} + H_{ij} - [(1 - Z_i)/2] \cdot v_i - (Z_i/2) \cdot w_i - [(1 - Z_j)/2] \cdot v_j - (Z_j/2) \cdot w_j \geq -M(1 - \theta_{ij}) \quad (i,j) \in \Lambda$   
 9.-  $px_i = x_i + (O_i \lambda_{1i}) - (O_i \lambda_{3i}) \quad i = 1, \dots, n. \quad (i,j) \in \Lambda$   
 10.-  $py_i = y_i + (O_i \lambda_{4i}) - (O_i \lambda_{2i}) \quad i = 1, \dots, n. \quad (i,j) \in \Lambda$   
 11.-  $\lambda_{1i} + \lambda_{3i} = Z_i \quad i \in \Pi_1$   
 12.-  $\lambda_{2i} + \lambda_{4i} = 1 - Z_i \quad i \in \Pi_1$   
 13.-  $\lambda_{1i} + \lambda_{3i} = 1 - Z_i \quad i \in \Pi_2$   
 14.-  $\lambda_{2i} + \lambda_{4i} = Z_i \quad i \in \Pi_2$   
 15.-  $px_i - px_j = P_{ij} - Q_{ij} \quad (i,j) \in \Lambda$   
 16.-  $py_i - py_j = R_{ij} - S_{ij} \quad (i,j) \in \Lambda$   
 $Z_i, \alpha_{ij}, \beta_{ij}, \theta_{ij}, \lambda_{1i}, \lambda_{2i} \in \{0,1\} \quad i = 1, \dots, n \quad (i,j) \in \Lambda$   
 17)  $0 \leq x_i, dx_i, px_i, E_{ij}, F_{ij}, P_{ij}, Q_{ij} \leq W \quad i = 1, \dots, n \quad (i,j) \in \Lambda$   
 $0 \leq y_i, dy_i, py_i, G_{ij}, H_{ij}, R_{ij}, S_{ij} \leq H \quad i = 1, \dots, n \quad (i,j) \in \Lambda$

De la 1 a la 6 son utilizadas para eliminar la muestra de valor absoluto de las distancias rectilíneas entre los centros de la célula  $i$  y el de la  $j$ . Las restricciones 7 y 8 para asegurarse de que no va a ocurrir el traslapeo entre cualquier parte de las células. La 9 y la 10, para la transformación de las distancias entre los puntos Pickup/Dropoff de la célula  $i$  y su centro. De la 11 a la 14 están relacionadas con la posición de un punto Pickup/Dropoff de la célula y su centro para diferentes configuraciones. Las restricciones 15 y 16 son usadas para eliminar las muestras del valor absoluto de las distancias entre los puntos Pickup/Dropoff de la célula  $i$  y los Pickup/Dropoff de la célula  $j$ . Y finalmente las tres últimas especifican los límites de cada variable.

La ventaja de este tipo de formulación, es que permite configurar de cualquier forma las células en planta, pero tiene el inconveniente que el único criterio para asignar las posiciones es el coste del movimiento de materiales.

### 3.6.15.- Propuesta de Castell et al.

Ese mismo año Castell y colaboradores (Castell et al., 1998), presentan un desarrollo analítico para la optimización de plantas químicas, que tiene la finalidad de minimizar la suma de los pesos de las longitudes en los tramos de tuberías entre diferentes unidades, empleando para ello factores de satisfacción. Asumen que, las tuberías pueden solo funcionar en direcciones norte/sur y este/oeste, y que todos los tramos de tubería provienen de un punto central de una unidad de proceso. Emplean distancias rectilíneas entre los centros de las unidades o actividades. Como restricción al proceso de optimización, las dimensiones de las unidades no deben sobresalir del área

indicada de planta y no debe haber traslapo de estas. Emplean un algoritmo genético para optimizar la planta, y un algoritmo reparador que asegura que se cumplen las restricciones.

### 3.6.16.- Propuesta interactiva de Rao et al.

Rao et al. (1999), proponen otra metodología para un desarrollo similar al de Gupta et al. (1996), basado en el rediseño de sistemas de manufactura de pequeñas piezas de acero de construcción prefabricada. Este desarrollo, es un diseño que integra los algoritmos genéticos y el software AUTOCAD, para minimizar los costes del movimiento de materiales entre las diferentes células de fabricación. Para la aplicación de la metodología, Rao y colaboradores (Rao et al. 1999), describen una serie de pasos lógicos que pueden ser utilizados en el diseño o rediseño de los sistemas de manufactura:

- Sistema de conceptualización (necesidades, restricciones y objetivos) .
- Sistema de estructuración (requerimientos).
- Sistema de implementación (definir detalles).
- Sistema de operación (definir secuencias de trabajo).
- Sistema de reconfiguración (configuración para el próximo periodo).

En el diseño de la distribución, los autores modelan el movimiento de material externo e interno de la célula de fabricación, siendo el último correspondiente a una combinación particular de las máquinas dentro de cada célula. Las funciones desarrolladas están definidas para cada problema. Para las distancias de recorrido dentro las células la función es:

$$I_i = \sum_{J=1}^m \sum_{k=1}^m M_{ijk}.d_{jk} \quad i = 1,2,3,\dots,n$$

Distancias de recorridos externos entre células:

$$N_{il} = \sum_{J=1}^M \sum_{k=1}^m O_{ijk}.d_{jk} \quad i,l = 1,2,3,\dots,n$$

$M_{ijk}$  = frecuencia del movimiento del material entre la máquina  $j$  y la máquina  $k$  de la célula  $i$ .

$d_{jk}$  = distancia de la máquina  $j$  y la máquina  $k$ .

$O_{ijkl}$  = frecuencia del movimiento de material entre la máquina  $j$  de la célula  $i$  y la máquina  $k$  de la célula  $l$ .

$n$  = número de células.

$m$  = número de máquinas.

La distancia total de recorrido:

$$g_i(t) = I_i + N_i = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^m (M_{ijk} + O_{ijkl}) d_{jk} \quad i = 1, 2, 3, \dots, n$$

La función aptitud para la selección (cromosoma  $i$  en la generación  $t$ ) es:

$$f_i(t) = 1/g_i(t) \quad i = 1, 2, 3, \dots, n. \text{ (ver capítulo 4)}$$

Sujeta a las siguientes restricciones para la formación de la célula:

$$I_i = \sum_{i=1}^m X_{ij} \leq ML \quad j_i = 1, 2, 3, \dots, m$$

$$I_i = \sum_{i=1}^m X_{ij} \geq 1 \quad j_i = 1, 2, 3, \dots, m$$

Donde ML es el máximo número de máquinas permitido en cada célula.

El módulo AUTOCAD interactúa recíprocamente con el módulo algoritmo genético en dos niveles: el primero genera combinaciones factibles de distribución de planta, y el segundo, evalúa la adaptabilidad de las distribuciones generadas en la salida del módulo AUTOCAD, y a partir de este regenera nuevos grupos de células. El módulo AUTOCAD consiste también en un algoritmo de colocación, el cual recibe la información de la agrupación de las células procedente del algoritmo genético. Este proceso interactivo, además de tomar en consideración las distancias entre las máquinas, toma en cuenta las frecuencias del movimiento del material.

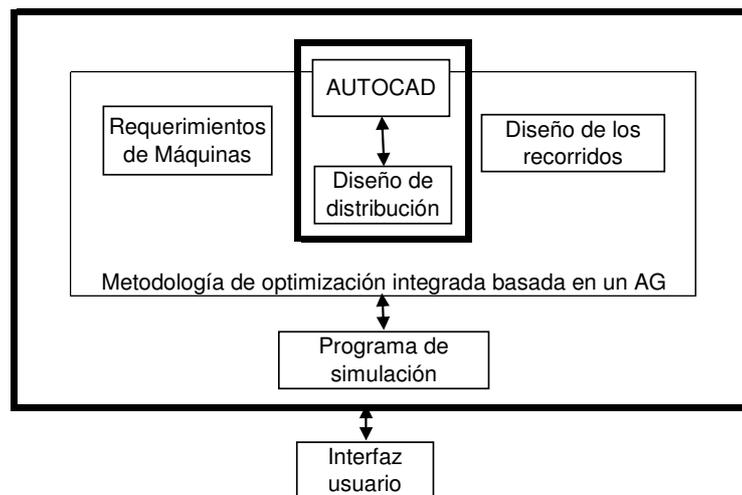


Figura 3.72: Representación del sistema integrado para el diseño de la distribución (Rao et al., 1999).

### 3.6.17.- Propuesta de Gau y Meller para los árboles de cortes y MIP.

Para ese mismo año, Gau y Meller (1999) presentaron un algoritmo, que al igual que el propuesto por Santamarina (1995) y Tam (1998), permite la relación de los algoritmos genéticos con los árboles de cortes GAST (Genetic Algorithm with a Slicing Tree Representation), pero esta vez, interactuando también con la metodología de formulación MIP. La finalidad de emplear la metodología MIP es relajar las restricciones de búsquedas presentes en los árboles de cortes. Los árboles de cortes son compatibles con la formulación MIP, en las variables binarias empleadas por este último. Las variables para la formulación de distribución MIP descritas por Gau y Meller en 1996 (Gau y Meller, 1999) son: longitud-media  $l_i^x$ , anchura-media  $l_i^y$  y los centros  $(c_i^x, c_i^y)$ , para cada departamento  $i$ . Estas variables son empleadas para restringir el solapamiento de los departamentos o actividades  $ij$ . Gau y Meller (1999) reformulan las variables binarias MIP para hacerlas más fácilmente relacionables con el desarrollo de su propuestas. Por lo tanto, la nueva formulación para los requerimientos de no solapamiento de actividades, denotación de las ubicaciones relativas de los departamentos y definición de los conjuntos binarios se presenta como:  $z_{ij}^x = 1$ , si  $i$  precede a  $j$  en la dirección  $x$ , y  $z_{ij}^x = 0$ , todo lo contrario, y así igual en la dirección  $y$ . La función objetivo para este desarrollo es:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij,cij} d_{ij}$$

Donde:

$f_{ij,cij}$  = flujo y la unidad de coste.

$d_{ij}$  = distancia del departamento  $i$  al departamento  $j$ .

Adicionalmente los autores en su trabajo, desarrollan y evalúan diferentes metodologías de optimización que emplean algoritmos genéticos y árboles de cortes. Desde los más simples como el BASE-GA, hasta los de estructura múltiple MULT-GA, EXT-GA y del EXT-GA los interactivos MIP-to-GA. De estos últimos desarrollan dos propuestas que tienen la ventaja de simular el mayor número de posibles distribuciones, pero su desventaja es el largo tiempo de resolución de la formulación MIP. Adicionalmente, los autores no observaron grandes mejoras cuando muchas de las variables binarias estaban fijadas para asegurar la resolución del MIP.

### 3.6.18.- Propuesta Matsuzaki et al.

Matsuzaki y colaboradores (Matsuzaki et al., 1999), presentan también un desarrollo que al igual que Kochhar y Heragu (1998), considera el problema de optimización de la distribución en planta para múltiples pisos. Este algoritmo, tiene la finalidad de minimizar los costes asociados con la manutención, tanto vertical como horizontal, empleando la siguiente función objetivo:

$$\text{Min} = \sum_i^N \sum_j^N f_{ij} (c_{ij}^H d_{ij}^H + c_{ij}^V d_{ij}^V) + E_n E_c$$

Donde:

$f_{ij}$  = número de transportes o desplazamientos del departamento  $i$  al  $j$ .

$c_{ij}^H$  = coste del transporte horizontal por día entre los departamentos o actividades  $i$  y  $j$ .

$c_{ij}^V$  = coste del transporte vertical por día entre los departamentos o actividades  $i$  y  $j$ .

$d_{ij}^H$  = distancia horizontal entre los departamentos  $i$  y  $j$ .

$d_{ij}^V$  = distancia vertical entre los departamentos  $i$  y  $j$ .

$N$  = número de departamentos.

$E_n$  = número de elevadores.

$E_c$  = coste de instalación de un elevador por día.

Adicionalmente, proponen dos funciones para determinar el máximo número de elevadores permitido y el coste de instalación, considerando para ello la capacidad en carga de los mismos.

Para la asignación de las actividades, al igual que Tam (1992) y Santamarina (1995), emplean la técnica de los árboles de cortes, pero esta vez introducen un nuevo operador, Down (abajo), para la asignación de las actividades en los diferentes pisos presente en la planta.

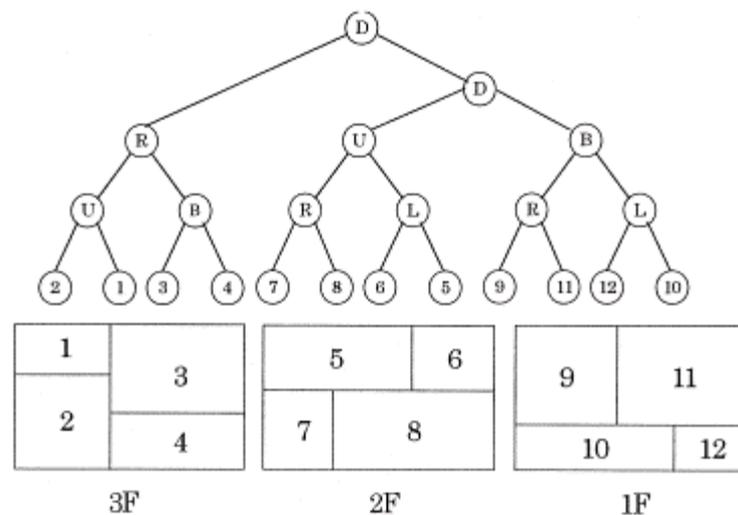


Figura 3.73: Árbol de cortes y layout de Matsuzaki et al (1999).

Proponen dos representaciones cromosómicas para una solución, donde la primera indica las diferentes distribuciones en cada piso y la otra binaria, la ubicación de los elevadores. Emplean un algoritmo híbrido conformado por un algoritmo genético y simulated annealing, donde el Algoritmo Genético tiene la finalidad de determinar la ubicación de los elevadores y el SA para localizar las diferentes distribuciones.

### 3.6.19.- Propuesta de Kochhar y Heragu (DFLP).

Otro desarrollo propuesto Kochhar y Heragu (1999), considera la recolocación de las actividades o estaciones de trabajo en un ambiente dinámico DFLP (Dinamic

Facility Layout Problem). Adicionalmente, toma en cuenta los demás pisos que integran la planta.

La nueva metodología propuesta, consiste en la revisión de las condiciones que deberán tener los procesos para el próximo periodo, y por consiguiente, diseña una distribución que minimice los costes asociados al cambio, mientras maximiza el potencial de ahorro en los costes debido al movimiento de materiales, es decir, considera el coste del cambio como sus beneficios y busca un equilibrio óptimo entre ambos. Según los autores, los costes del cambio de distribución son los siguientes:

- El coste incurrido por pérdida de producción.
- El coste del movimiento de los equipos de su posición original a la nueva (este incluye tanto la planificación, desmontaje, movimiento, construcción y coste de instalación).

La función coste que proponen, tiene dos componentes: el coste del movimiento de materiales y el coste originados por los cambios en la distribución.

$$Coste = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n f_{ij} d_{ij} + \sum_{i=1}^n w_i T_i$$

Donde:

$f_{ij}$  = flujo de materiales entre los departamentos  $i$  y  $j$  en el segundo período.

$w_i$  = costes de reubicación para el departamento  $i$ .

$T_i$  = es 1 sí el departamento  $i$  se ha movido de la posición que tenía en el primer periodo y cero lo contrario.

$d_{ij} = hcost(Lx_i - x_jI + Iy_i - y_jI)$  cuando los departamentos están ubicados en el mismo piso.

$d_{ij} = hcost(Lx_i - x_iI + Iy_i - y_iI + Lx_j - x_jI + Iy_j - y_jI) + [(vcost)/(c_i\delta_i\delta_j)]_x(I\delta_i - \delta_jI)$ . cuando los departamentos o actividades están ubicados en diferentes pisos.

$x_i, y_i$  = coordenadas de los departamentos o actividades  $i$  y  $j$ .

$x_l, y_l$  = coordenadas para el movimiento vertical  $l$  seleccionado para el movimiento de materias de  $i$  hasta  $j$ .

$\delta_i$  = nivel donde se ubica el departamento  $i$ .

$hcost$  y  $vcost$  = son los costes de los movimientos horizontales y verticales.

$c_l \delta_i \delta_j$  = factor de coste para trasportar el material del piso  $\delta_i$  al piso  $\delta_j$ , usando el elevador  $l$ .

Como función aptitud, utilizan el mismo desarrollo propuesto en Kochhar y Heragu (1998). Estos valores se representan en la ruleta, donde la solución que mejor se adapte, como se ha comentado anteriormente, tiene una probabilidad más alta de ser seleccionada para el cruzamiento (ver capítulo 4). Cada cromosoma correspondiente al segundo periodo, tiene un indicador de referencia asociado que nos indica el periodo inicial del que proviene. Al igual que en Kochhar y Heragu (1998), utilizan las curvas de llenado para inicializar el proceso. En este caso, el operador cruce, tiene la diferencia con la propuesta anterior, en que el algoritmo copia el indicador de referencia de la primera generación, para introducirlos en los cromosomas de la siguiente generación. El operador mutación introduce mayor diversidad por la aplicación de un operador mutación adicional, que es utilizado para crear un cambio arbitrario en el indicador de referencia de cada solución mutada.

El programa desarrollado Kochhar y Heragu (1999), (Ver Métodos Dinámicos), lleva el nombre de DHOPE (Huristically Operated Placement Evolution), siendo esta una extensión del algoritmo MULTI-HOPE, propuesto por los mismos autores en el año 1998. DHOPE considera la planificación de la distribución para dos periodos consecutivos, utilizando para la optimización, la metodología de los algoritmos genéticos y las funciones antes expuestas. La secuencia correspondiente al segundo periodo se determina empleando los operadores selección, reproducción y mutación del DHOPE.

### **3.6.20.- Propuesta de Hamamoto et al.**

Hamamoto y colaboradores (Hamamoto et al., 1999), proponen un desarrollo para la industria farmacéutica, que incluye un modelo de simulación que permite a un determinado usuario, seleccionar los objetivos considerados de importancia para cada layout, donde los departamentos son representados como bloques de la misma forma que el CORELAP. Utilizan un sistema de recorrido de bandas para la asignación de los departamentos.

Para la aplicación del algoritmo genético, emplean un cromosoma donde cada actividad es representada por un número, y la posición que este ocupa representa la posición en el layout. El operador cruce es de doble punto, y como mutación invierten la posición de dos genes de un mismo cromosoma. Fijan un tamaño de la población en 20 individuos, y para simular y evaluar los cromosomas utilizan un periodo de 4 meses de producción. Como función aptitud, emplean una expresión que está en función de

variables como: ratio de rendimiento de proceso, media y desviación estándar para ese ratio, tiempo de desplazamiento, media y desviación estándar.

### 3.6.21.- Propuesta y estudio de Lim et al.

Comenzando el nuevo siglo Lim et al. (2000), publican un desarrollo para resolver el problema cuadrático de asignación (QAP), que postula: dado un QAP de tamaño  $n$  descrito o representado por dos  $n \times n$  matrices, coste  $A = [a_{im}]$  y  $B = [b_{ij}]$ , tendrá como finalidad encontrar una permutación  $\pi$  de la secuencia  $M = (1,2,3,\dots,n)$  tal que minimice la función coste  $C(\pi)$  descrita a continuación:

$$Coste = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{i\pi(i)} b_{\pi(i)\pi(j)}$$

En la ecuación,  $\pi$  es un vector de la permutación  $\pi(i)$  que denota el  $i$ -ésimo elemento de  $\pi$ .

Este es un enfoque que sólo considera el criterio coste de manutención, pero el aporte de los autores es el estudio comparativo del funcionamiento de los algoritmos genéticos: estándar e híbridos. La finalidad del estudio es evaluar el impacto del proceso de búsqueda local de los algoritmos híbridos, algoritmos que tienen la ventaja de que en el proceso de simulación entra en juego gran cantidad del conocimiento del problema de distribución, con lo cual, se obtienen resultados más cercanos a la realidad que se quiere modelar. Además se aplican métodos locales de búsqueda a sub poblaciones de individuos, a las que posteriormente se les aplicarán los operadores genéticos.

### 3.6.22.- Propuesta de Azadivar y Wang.

Ese mismo año Azadivar y Wang (2000), presentan un desarrollo que considera la dinámica actual de los procesos productivos. En su propuesta, utilizan un modelo para un proceso dinámico desarrollado por Zhang (Tesis doctoral presentada ante la Kansas Stated University 1997)(Azadivar y Wang, 2000), desarrollo que parte del estudio publicado por Azadivar y Tompkins en el año 1999 y que emplea la formulación QAP. La propuesta publicada por Azadivar y Wang (2000), consiste en una metodología para la optimización basada en un algoritmo genético y un generador automatizado para la simulación, cuyo modelo opera en función de variables decisión cualitativas y cuantitativas. El modelo considera los tiempos de producción y los recursos requeridos, tiempos de retraso de la producción, etc.. Para la codificación de las soluciones, al igual

que Tam (1992), Santamarina (1995) y Matsuzaki et al. (1999), utiliza los árboles de cortes. La representación cromosómica tendrá  $m$  actividades y  $(m-1)$  posiciones ocupadas por los operadores de cortes. El algoritmo Genético emplea la mutación simple, operador inversión y un nuevo desarrollo del operador de cruce multipuntos (ver capítulo 4).

Las suposiciones para este problema de optimización son:

- El área de trabajo es rectangular y su orientación es conocida.
- En cada departamento solo se trabaja una parte a la vez (una sola actividad).
- Cada transporte lleva un solo tipo de material a la vez.
- Las secuencias de operaciones de las tareas son iguales para las partes o piezas similares.
- Como objetivo principal minimiza el tiempo de terminación de las partes producidas preservando las restricciones.

El estudio se aplicó para todo tipo de distribuciones, donde para un problema libre de distribución lo definen como: sea un conjunto de  $m$  actividades representadas como  $\{M_i\}$ ,  $i = 1,2,3,\dots,m$ , donde el área que cada una ocupa está restringida para ser rectangular y es caracterizada por su longitud  $l_i$  y anchura  $J_c$ , considerando también la longitud y anchura de sus separaciones ( $c_{li}$ ,  $c_{wi}$ ), con respecto a sus localizaciones. Como se ha comentado, para modelar y codificar la distribución, aplica la metodología de los árboles de cortes.

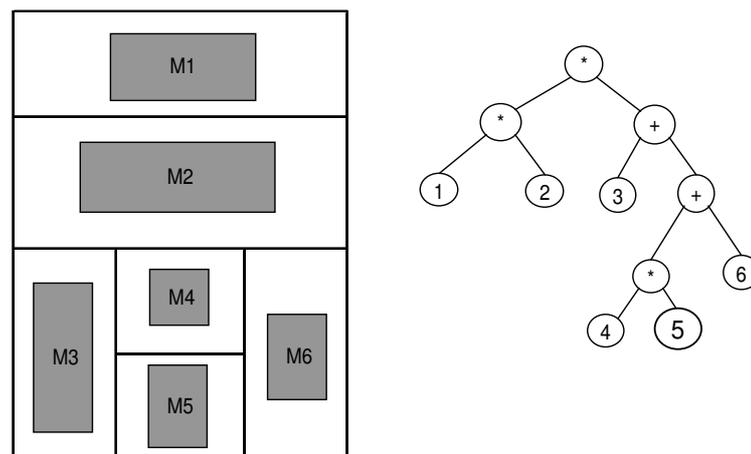


Figura 3.74: Distribución y árbol de cortes de Azadivar y Wang (2000).

En este caso el autor utiliza sólo dos operadores de cortes:

- ( \* ) significa arriba de.
- ( + ) significa a la derecha de.

### 3.6.23.- Propuesta de Wu y Appleton.

Wu y Appleton (2000), proponen un modelo que considera de forma simultánea para la optimización, la estructura de los pasillos para el movimiento de materiales y la distribución del layout.

Los autores emplean las técnicas de árboles de cortes descritas. Donde las líneas de cortes que se generan por la aplicación de los operadores, configuran los diferentes pasillos. Cada nodo de este árbol representa un bloque a un cierto nivel, y cada rama del mismo a un sub-bloque dentro de ese bloque. En la siguientes figuras 3.75 y 3.76 se muestra el árbol de bloques y la distribución respectivamente.

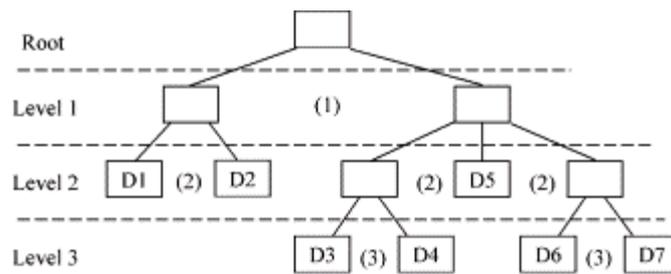


Figura 3,75: Árbol de cortes de una distribución (Wu y Appleton 2000).

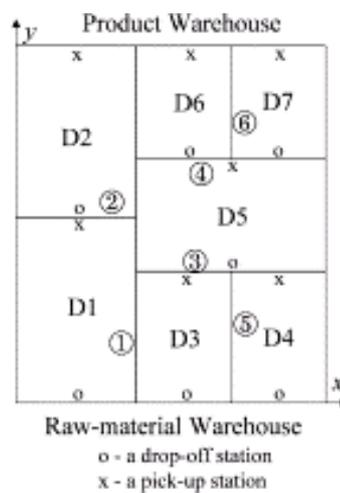


Figura 3.76: Distribución y líneas de cortes (Wu y Appleton. 2000).

Como se observa en el árbol, en cualquier pareja de bloques adyacentes de un mismo nivel, hay una línea de cortes común a ambos.

La metodología descompone el problema en dos etapas, donde la primera minimiza los costes asociados al flujo de materiales por los pasillos, mientras la segunda optimiza la estructura de los mismos. En la primera fase, el flujo de materiales se representa como un sistema de tres niveles (ver figura 3.77). El primer nivel, representa los requisitos de flujos definidos en un gráfico dirigido  $GL(E,N)$ . En este gráfico,  $N$  representa al conjunto de nodos donde cada uno indica las diferentes estaciones que pueden ser de entrada (D) o salida (P), de una sección.  $E$  es el juego de bordes que representa los flujos de las secciones. En la segunda etapa, se asigna un peso  $f_{ij}$  a cada borde  $(i,j)$  que representan los requisitos de intensidad del flujo entre el nodo  $i$  y el  $j$  del gráfico  $GL$ . El tercer nivel, representa, los posibles pasillos definidos mediante un grafo planar  $G_p(P,V)$ , donde  $P$  indica los posibles caminos, y  $V$  a las posibles intercepciones. Se le asigna pesos también a los posibles caminos e intercepciones.

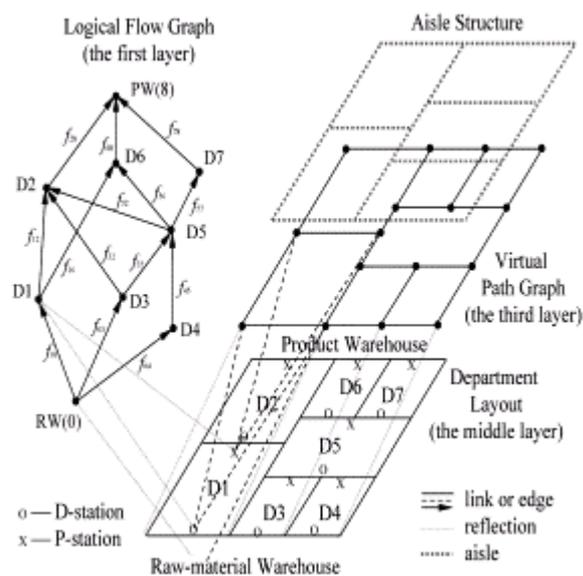


Figura 3.77: Sistema de flujo de materiales y estructura de pasillos (Wu y Appleton, 2000).

Para la optimización de la distribución utilizan un algoritmo genético, que emplea tres cromosomas. El primero representa una lista de los departamentos que se desean implementar. El segundo, está constituido por las secuencias de líneas de cortes que representan los diferentes pasillos del layout. Por último, el tercero está compuesto por una serie unidimensional que representa la orientación de cada actividad.

Como operadores genéticos, emplean los clásicos para el primer y tercer cromosoma. Pero para el segundo, proponen un nuevo proceso de inicialización, cruzamiento y mutación.

### **3.6.24.- Propuesta de Hicks.**

Posteriormente, Hicks (2003), describe una metodología que emplea las técnicas de agrupamiento (clustering methods) para identificar posibles y eficientes células de manufactura, para la aplicación en industrias de bienes de capital (Capital Goods Industry). Este tipo de industria (maquinaria de producción) elabora productos complejos, que a su vez se van modificando a lo largo del tiempo debido a unos requerimientos particulares. El estudio tiene como objetivo minimizar los movimientos de materiales para un horario de trabajo dado, e incluye la información geométrica de los recursos disponibles y las restricciones del edificio a utilizar. Entre las restricciones de estructuras (edificación) consideradas por el autor, están la de Campo Verde (no existen estructuras físicas) y Campo Marrón (las estructuras ya existen). Utiliza la propuesta de algoritmo genético de Goldberg (1989), pero esta vez, utilizando una función de reparación del cromosoma alfanumérico y el operador inversor. El cromosoma propuesto consta de tres partes que identifican el número de máquinas o actividades, el tamaño y la localización que tendrá.

### **3.6.25.- Propuesta de Gómez et al.**

Gómez et al. (2003), proponen un enfoque que considera también los pasillos entre las diferentes secciones. El algoritmo propuesto, incluye ciertas consideraciones en relación a la forma de las secciones obtenidas por la agrupación de los departamentos. También hacen un análisis de la metodología SLP, propuesta por Muther, para implementar tanto los requerimientos cuantitativos y los cualitativos (TRA) en el problema de implantación.

Las restricciones incluidas por estos autores en el análisis de este tipo de problema son las siguientes:

- La superficie de la planta es de forma rectangular.
- Los diferentes departamentos, serán también, por la restricción anterior, rectangulares. Las columnas (espacios) donde se ubicarán los departamentos pueden ser de anchuras fijas (igual dimensión de anchura) o variables (diferente dimensión de anchura) (figura 3.78).

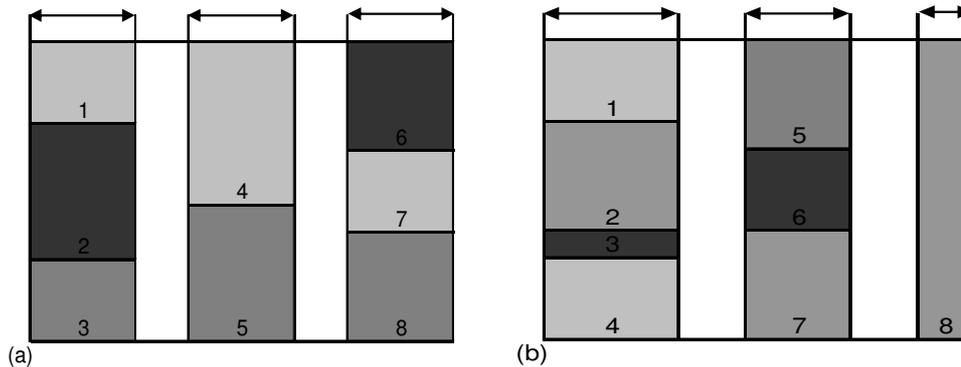


Figura 3.78: (a) departamentos de anchuras fijas y (b) departamentos de anchuras de dimensiones variables (Gómez et al., 2003).

- La relación entre dos departamentos puede ser considerada desde dos puntos de vista, dependiendo del criterio seleccionado para determinar o evaluar la calidad de la solución:
  - El primero considera la distancia entre departamentos (Ver formulación cuantitativa).
  - El segundo utiliza la matriz relacional entre departamentos propuesta por Muther (1968) (Ver formulación cualitativa).

Las funciones objetivos son:

1.- Para la distancia entre departamentos

$$\min = \sum_i^n \sum_J^n (f_{ij} c_{ij}) d_{ij}$$

Donde:

$d_{ij}$  = distancia entre los centros de los departamentos  $i$  y  $j$ .

$f_{ij}$  = el volumen o flujo de materiales (unidad de carga) del departamento  $i$  al  $j$ .

$c_{ij}$  = coste del movimiento de materiales de la actividad  $i$  a la  $j$ .

2.- Para la adyacencia de los departamentos.

$$\max = \sum_i^n \sum_J^n (r_{ij}) x_{ij}$$

Donde:

$x_{ij} = 1$  sí el departamento  $i$  y  $j$  son adyacentes, y cero cuando no.

$r_{ij}$  = valores numéricos asociados a la tabla TRA.

Si hay adyacencia entre dos actividades o departamentos, se asignará el valor del peso TRA de la relación; y si no lo son, no se cuenta en virtud de que  $x_{ij}$  es igual a cero.

Para considerar los pasillos, el algoritmo limita el área disponible en la planta mediante un factor de penalización para los departamentos, el cual es multiplicativo para el criterio de distancia y divisivo para el de adyacencia.

El algoritmo genético se emplea de la misma forma que Michalewicz (1996). Los autores, para la aplicación, proponen dos formas de codificación, dependiendo si el problema se considera: departamentos de anchura fija o departamentos de anchura variable. En el primer caso, se le asigna un número a cada actividad, así cada individuo se representará por una secuencia de números donde cada uno será una actividad.

En el segundo caso, la codificación consiste en dos sub secuencias. La primera será igual que la anterior, y la segunda será igual en dimensión que la primera, pero incluyendo una información adicional, necesaria para saber cuándo una actividad se mueve de una localización a otra de anchuras diferentes. Utilizan el método aleatorio por ruleta para la selección de los padres. Como operador cruce emplean dos metodologías: la primera consiste en un cruce monopunto simple, la segunda, consiste en copiar una determinada secuencia de un cromosoma y colocarla en la misma posición del otro (partial matching crossover). Emplean un operador reparador para la no duplicación de actividades, para generar distribuciones factibles. Para la mutación emplean dos tipos; la normal y la inversión de dos genes (order-based-mutation).

### 3.6.26.- Propuesta de Balakrishanan et al. (DPLP).

Para ese mismo año 2003, Balakrishanan y colaboradores (Balakrishanan et al., 2003), proponen un modelo basado en horizontes de planificación multi-periodos DPLP (Dynamic Plant Layout Problem). Este desarrollo considera que el flujo de materiales entre dos departamentos como sus localizaciones pueden variar para múltiples periodos, siendo cada periodo una distribución estática. La formulación matemática para el DPLP utilizada por Balakrishanan et al. (2003) es:

$$Coste = \sum_{t=1}^p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f_{tik} \cdot d_{jl} \cdot X_{tij} \cdot X_{tkl} + \sum_{t=2}^p \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n A_{tijl} \cdot Y_{tijl}$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n X_{tij} = 1, j = 1, \dots, n, t = 1, \dots, p,$$

$$\sum_{j=1}^n X_{tij} = 1, j = 1, \dots, n, t = 1, \dots, p,$$

$$Y_{tijl} = X_{(t-1)ij} X_{til}, i, j, l = 1, \dots, n, t = 2, \dots, p,$$

Donde:

$P$  = número de periodos en el horizonte de planificación.

$n$  = número de departamentos en la distribución.

$i, k$  = son departamentos o actividades en la distribución.

$j, l$  = son localizaciones en la distribución.

$f_{tik}$  = coste del desplazamiento de material del departamento  $i$  al  $k$  en el periodo  $t$ .

$dtjl$  = la distancia de la localización  $j$  a la  $l$  en el periodo  $t$ .

$Y_{tijl}$  = variable para cambiar el departamento  $i$  de la localización  $j$  para localizarlo en  $l$ , en el periodo  $t$ .

$X_{tij}$  = variable para localizar el departamento  $i$  en la localización  $j$  en el periodo  $t$ . Varía de 0 a 1

$A_{ijl}$  = coste del cambio de un departamento  $i$  de la localización  $j$  a la  $l$  en el periodo  $t$ .

La primera función, representa la suma de los costes de los movimientos de materiales y los costes de los cambios de distribución para el horizonte planificado. La segunda y tercera, indican que cada departamento debe ser asignado en una localización y cada localización debe ser ocupada en cada período. La última ecuación indica que la variable para localizar el departamento adquiere un valor 1 solamente si este cambia de puesto al final de un período.

La metodología empleada para la optimización es un algoritmo genético híbrido, que consiste en un nuevo desarrollo del DPLP a partir del DP (Dinamic Programming) propuesto por Rosenblatt en el año 1986 (Rosenblatt, 1986). Este consiste en utilizar el método GRAFT para generar mutaciones, y el de Rosenblatt para crear una población inicial. El cromosoma está formado por  $n$  segmentos donde cada uno representa una distribución estática (ver capítulo 4). Cada segmento representa también la ubicación de las diferentes actividades en planta. Estas se asignan de la misma forma que la propuesta de Suresh et al. (1995). El operador cruce utilizado es punto por punto, y consiste en que dos actividades (par de genes) en cada posición en dos cromosomas, son intercambiados independientemente del segmento en que estén.

### 3.6.27.- Propuesta de Kyu Yeul Lee et al.

Kyu Yeul Lee et al. (2003), proponen un modelo que tiene como objetivo minimizar el coste total asociado al movimiento de materiales entre actividades, considerando las paredes internas y los pasillos. La trayectoria más corta y la distancia entre dos actividades se calculan utilizando el algoritmo de Dijkstra de teoría de grafos de adyacencia, que representa la relación entre las actividades y los pasillos. La función objetivo empleada es:

$$F = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M f_{ij} \cdot d_{ij}$$

Sujeto a:

$$g1 = \alpha_i^{\min} - \alpha_i \leq 0, \quad (1)$$

$$g2 = \alpha_i - \alpha_i^{\max} \leq 0, \quad (2)$$

$$g3 = ai^{\min} - ai \leq 0, \quad (3)$$

$$g4 = ai - ai^{\max} \leq 0, \quad (4)$$

$$g5 = \sum_{i=1}^M ai - A \leq 0, \quad (5).$$

$$g6 = (x_j^r - x_s^{i.s.w})(x_s^{i.s.w} - x_i^l) \leq 0, \quad (6).$$

$$i, j = 1, \dots, M \text{ y } s = 1, \dots, P.$$

Donde:

$f_{ij}$  = movimiento de materiales de la actividad  $i$  a la  $j$ .

$d_{ij}$  = distancia entre los centros de las actividades  $i$  y  $j$ .

$M$  = número de actividades.

$\alpha_i$  = ratio de la actividad  $i$ .

$\alpha_i^{\min}$  y  $\alpha_i^{\max}$  = límites máximo y mínimo del ratio de aspecto  $\alpha_i$ .

$ai^{\min}$  y  $ai^{\max}$  = límite superior e inferior de del área asignada  $ai$ .

$A$  = área disponible.

$P$  = número de paredes internas.

$x_s^{i.s.w}$  = posición de la pared interna  $s$  (coordenada  $x$ ).

$x_i^l$  y  $x_j^r$  = coordenadas de los límites izquierdo y derecho de la actividad  $i$ .

Las expresiones 1 y 2 restringen que el ratio  $ai$  de la actividad  $i$  sólo varía entre los límites mínimo y máximo. Las ecuaciones 3 y 4 limitan a que el área  $ai$  de la actividad  $i$  varía entre los límites superior e inferior previamente acordados. La ecuación 5 expone que el área total de todas las actividades debe ser menor que el área disponible en planta. Y por último, la 6 representa que no deberá existir interferencia entre una determinada actividad y las paredes internas. Los datos de entrada al problema son:

- Número de actividades a ser colocadas.
- Área disponible y los límites de forma.
- Límites inferior y superior del área requerida para cada actividad.
- Límite máximo y mínimo del ratio requerido para cada actividad.
- Número y posición de las paredes internas.
- Movimiento de materiales entre actividades.
- Límites máximo y mínimo de la posición vertical y horizontal de cada pasillo.

Los autores implementan C++ para el algoritmo genético. El algoritmo genético propuesto, emplea cromosomas de cuatro segmentos muy similar al de Islier (1998). El primer segmento, representa la secuencia de las actividades a ser colocadas. El segundo, representa las áreas de las actividades. El tercero y cuarto son la posición vertical y horizontal respectivamente, de los pasillos en términos de distancias del origen coordenado (0). Introducen también una modificación al operador cruzamiento para los dos primeros segmentos, mientras que los dos últimos emplean cruzamiento simple o monopunto. Adicionalmente, al igual que Islier (1998) emplean el operador inversor como mutación. Agregan cambios a este operador inversor para además de intercambiar genes, cambiar los valores de estos de forma aleatoria. Emplean un operador modificación para mantener la integridad del tercer y cuarto segmento. La integridad consiste en que la suma de los valores de los genes del tercer y cuarto segmento, tiene que ser igual a la suma de los valores del tercer y cuarto segmento de los padres. Aplican también un operador refinación para controlar los espacios vacíos. La función de aptitud para la selección de los padres es el inverso de la función coste. Posteriormente utiliza el método de la ruleta.

### **3.6.28.- Propuesta Kyu-Yeul Lee et al (Múlti-Floor).**

Dos años más tarde los mismos autores, Kyu-Yeul Lee et al. (2005), desarrollan a partir del modelo anterior (Kyu-Yeul Lee et al., 2003), uno que considera además de lo

expuesto, los demás pisos que conforman la planta. Para esta propuesta, incluye el factor de peso para compensar el coste total de transporte vertical de materiales y el requerimiento de adyacencia. Emplea el algoritmo genético de la misma forma que en el caso anterior, pero esta vez aplica un quinto segmento al cromosoma que representa el número de actividades por piso.

### **3.6.29.- Propuesta de Ming-Jaan Wang et al.**

Para el año 2005, Ming-Jaan Wang et al. (2005), proponen un modelo para la resolución del problema de distribución en planta, considerando actividades con áreas desiguales y basado en el Coste Total del Layout (TLC). Esta formulación TLC incluye tres factores: el coste del flujo de materiales MFFC (material flow factor cost), factor de utilización del área AUF y factor de forma SRF. El primer factor, está relacionado con el coste de manutención de materiales, muy utilizado como función objetivo principal en la mayoría de problemas, como se ha observado a lo largo del trabajo. El segundo, depende del tamaño del área disponible. El tercero y último depende de la forma del recinto. Dada la naturaleza del problema considerado, los autores discretizan (retícula) el área disponible en planta y emplean las curvas de llenado (SFC) para la asignación de las actividades.

Para la búsqueda de la solución, al igual que Tam y Chan (1998), emplean un algoritmo genético paralelo. Para la aplicación del algoritmo, desarrollan una representación cromosómica similar a las propuestas por Islier (1998) y Kyu-Yeul Lee et al. (2003, 2005), que se diferencia de las anteriores en que el tercer y cuarto segmento representan: la longitud de planta (altura y anchura) y dirección de barrido de las bandas (vertical u horizontal). Para la aplicación del operador selección, definen una función de aptitud que consiste en el inverso de la función Coste Total del Layout. El operador cruce se aplica tanto monopunto como multipunto (ver capítulo 7).

### **3.6.30.- Propuesta de Diego-Más.**

En Diego-Más (2006), para que las soluciones obtenidas sean aplicables a la realidad, es necesario que estén sujetas y que cumplan con una serie de restricciones geométricas para que sean soluciones viables. Por lo tanto, es necesario, que cada departamento o localización considere las necesidades de espacio y forma de cada actividad. Una distribución será eficiente si los departamentos se ajustan a las necesidades de las actividades. Según el autor, las metodologías anteriores como la de Tam (1992) y Santamarina (1995) no consideran en la elaboración del árbol de cortes el criterio geométrico, y éste solo es considerado como restricción geométrica en la segunda etapa. La perspectiva del autor sugiere también que los métodos de dos fases

como el desarrollado por Santamarina, desvían a espacio de soluciones no viables, mientras los monofásicos no restringidos exploran todo un conjunto del espacio de búsqueda. Como se ha comentado, Santamarina no incluye el criterio geométrico en la primera fase, lo que podría originar que las mejores soluciones no cumplan con las restricciones geométricas en la segunda fase. Si se desarrolla una primera fase que explore todo el espacio en función de determinados criterios, la segunda etapa tendrá mayores posibilidades de lograr el óptimo global para esos criterios.

El autor presenta una metodología de dos etapas, que evalúa, de forma cuantitativa, la capacidad de un árbol de corte para obtener de él las distribuciones que cumplan con todas las restricciones impuestas, es decir, medir la aptitud geométrica del árbol para todo ratio de aspecto de planta considerado (potencial geométrico del árbol de corte). Para medir la geometría de la zona destinada a una actividad, define un ángulo entre la diagonal y la horizontal de cada actividad en el dominio. Conocido este ángulo, evalúa también el incumplimiento formal de las actividades, para posterior cálculo del potencial geométrico.

Como función objetivo para la evaluación del árbol de corte de la especie (primera etapa), emplea la función desarrollada por Santamarina (1995), pero esta vez considerando también el ya mencionado potencial geométrico del árbol. Para el cálculo del potencial geométrico, propone una metodología que parte de los árboles básicos (un sub-árbol formado por dos actividades) para sustituirlos por actividades equivalentes o ficticias. Las actividades equivalentes son la suma de las áreas de las actividades del sub árbol, para crear a su vez otros árboles básicos en el cálculo del potencial geométrico. La fusión del potencial de adyacencia y del potencial geométrico, para la primera función objetivo, la define como potencial del árbol.

En la primera etapa del algoritmo se modifican considerablemente los operadores genéticos, a pesar de que el proceso de codificación es el mismo al propuesto por Santamarina (1995). Los operadores empleados por Diego-Más (2006), tratan de solventar los problemas presentes en la propuesta de Santamarina, ya que estos sólo son eficientes para la búsqueda de árboles de cortes óptimos, desde el punto de vista del criterio relacional. Para la generación de la población inicial, se aplica el procedimiento aleatorio de producción de soluciones de Santamarina. Para la selección, emplea también la metodología de la ruleta. El operador cruce es monopunto, y analiza los puntos que hacen individuos factibles y no repetidos.

Emplea dos formas de aplicación del operador mutación, basado en el cambio del alelo de dos genes. La primera forma, consiste en elegir dos genes cuyos alelos se intercambian, evaluando si este intercambio produce una distribución viable geoméricamente; en caso contrario, se seleccionan dos genes más repitiendo el proceso hasta que se logre la viabilidad. La segunda forma introduce una fase de búsqueda local intensa, que consiste en determinar un nivel de convergencia de la población para evitar la caída en un óptimo local. Emplea estrategias elitistas que selecciona a los mejores árboles de manera directa y sin procesos aleatorios. El elitismo consiste en evitar la

perdida de orientación debida a la epistaxis, es decir, la pérdida de los individuos más aptos por la aleatoriedad del operador selección.

La segunda etapa o fase del algoritmo, consiste en la utilizada por Santamarina (1995), pero introduciendo mejoras y modificaciones para las particularidades de la primera fase. Esta fase emplea también, técnicas elitistas y una exploración local por ratios. La función objetivo, es la misma en el primer término asociado a los costes, diferenciándose en el segundo término que evalúa si se cumplen las restricciones geométricas impuestas a las áreas asignadas a las actividades. Para la codificación en la segunda etapa, se emplea un método que se diferencia en el modo de ordenar los genes al propuesto por Santamarina, y que consiste en ir añadiendo los genes al cromosoma en el orden en que aparecen los cluster (ver capítulo 4). Los operadores utilizados son los mismos que en Santamarina (1995). La probabilidad de mutación es del 50% y se aplica de forma aleatoria a todos los individuos incluidos la elite de esta segunda etapa.

### **3.6.31- Propuesta de Hauser y Chung.**

Hauser y Chung (2006), presentan un desarrollo cuyo objetivo es reducir la carga total de trabajo, usando una distribución en muelle cruzado en un proceso de producción de vehículos. Este modelo, por ejemplo, permite balancear los horarios de los operadores y el recorrido de los vehículos de mantenimiento. Para ello, y mediante el uso de un algoritmo genético, el modelo manipula la asignación de los carriles de mantenimiento para localizar el de menor recorrido. Emplea arreglos en forma de V, en I y en T, y una codificación cromosómica en función del número que identifica el carril, ya sea de línea de producción, de almacenado o de carga. El primer gen o número implica que éste estará más a la izquierda que el resto de los carriles en el área de trabajo y así sucesivamente, para un arreglo determinado. Siguiendo la teoría del problema cuadrático de asignación QAP visto anteriormente, asignan los carriles considerando que todos tienen el mismo tamaño y se conocen sus respectivas localizaciones. Estos autores Realizan un estudio en la empresa Toyota, acerca de la influencia de los operadores en la convergencia del algoritmo genético (ver capítulo 7).

### **3.6.32- Propuesta Sirinaovakul y Limudomsuk.**

Sirinaovakul y Limudomsuk (2007) al igual que Tam (1992), Santamarina (1995), Azadivar y Wang (2000), Wu y Appleton (2000), y Diego-Más (2006) aplican los árboles de cortes para la asignación de las actividades, por medio de algoritmo genéticos. A diferencia de los otros autores, el modelo propuesto, considera que las actividades son de forma fija, es decir, rectangulares, con la misma relación alto/ancho para todo el proceso. Estas actividades son alineadas y asignadas sin ningún tipo de

restricción geométrica sobre una determinada superficie, por lo tanto, obtienen plantas de forma no rectangular. Emplean los mismos operadores de corte para asignar las actividades, pero utilizan unos adicionales para alinear y orientar las actividades. La alineación consiste en colocar una actividad o conjunto de actividades a un lado de la otra, especificando su ubicación. La orientación consiste en especificar si la actividad se coloca horizontal o vertical.

Al igual que Santamarina (1995) y Diego-Mas (2006), utilizan dos etapas para la optimización, donde la primera determina el árbol de cortes adecuado en función de los pesos relacionales. Utilizan también la técnica de agrupamiento o clustering, que sin emplear algoritmo genético en esta etapa, determina el árbol óptimo en función del peso relacional entre las actividades. El objetivo de esta primera etapa, es encontrar un sistema de pares o clústeres cuya suma de valores relacionales proporcione un máximo global. Emplean la siguiente expresión:

$$\text{Max } \alpha = \sum_{j, i=1}^n w_{ij} .x_{ij}$$

Donde:

$\alpha$  = suma total de los valores para las agrupaciones.

$w_{ij}$  = peso relacional entre actividades o conjunto de actividades.

$n$  = número de actividades o conjunto de estas.

$x_{ij}$  = variable de asignación que toma los valores cero y uno si una actividad o conjunto de actividades son adyacentes o no.

En esta primera etapa del proceso de optimización, emplean tres pasos. Entre estos pasos, el primero consiste en crear un grafo emparejador cuyos vértices representan las actividades y las uniones los pesos relacionales. También se determinan de forma aleatoria los primeros cluster en función del valor global relacional. Posteriormente, siguen un proceso de evaluación de dos en dos para emparejar las actividades, que serán los cluster internos hasta finalmente construir el árbol de cortes (figura 3.79).

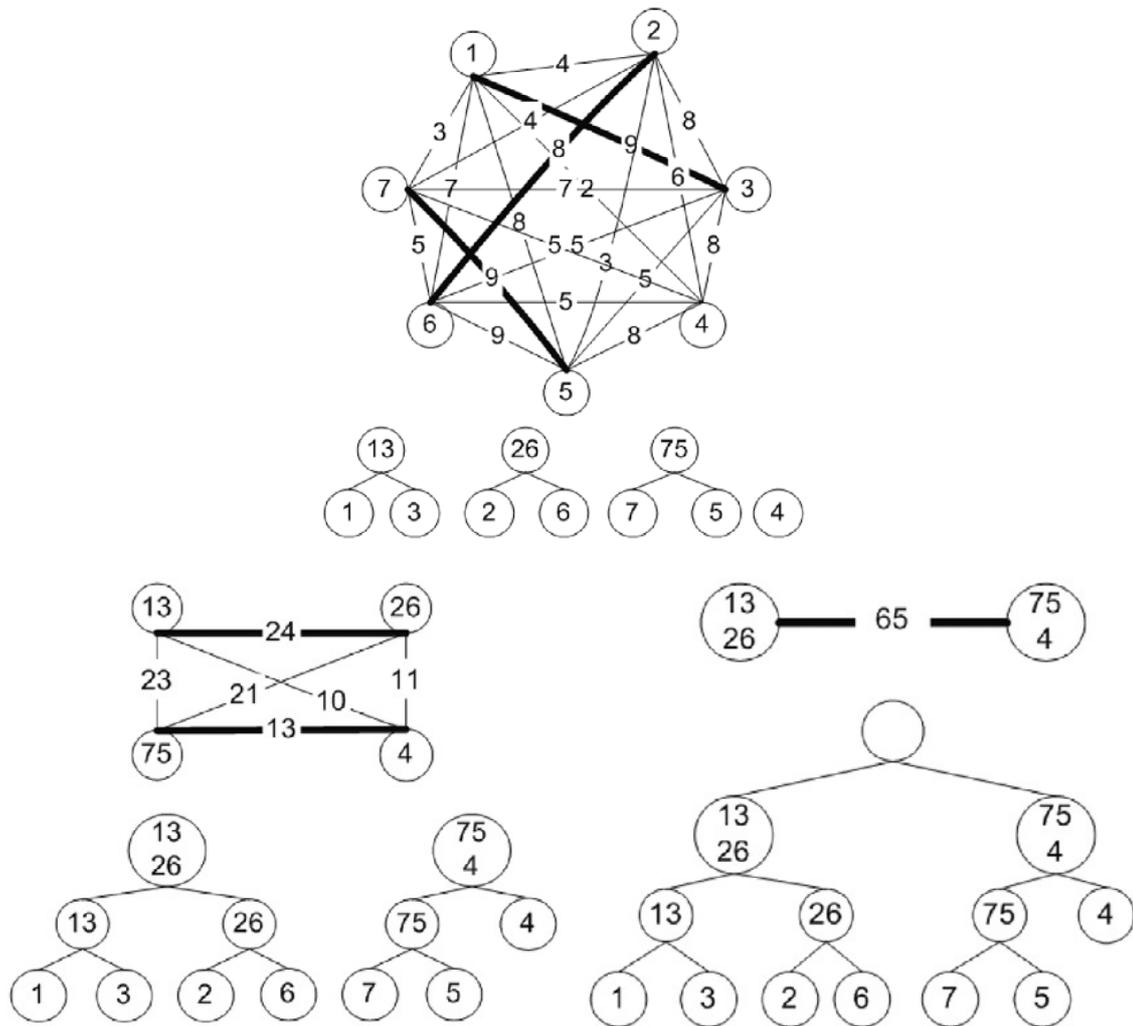


Figura 3.79: proceso de agrupación de Sirinaovakul y Limudomsuk (2007).

En conclusión, esta metodología es similar a las utilizadas por los autores anteriores, con la diferencia que emplea pseudo algoritmo heurístico para localizar el árbol óptimo. El algoritmo genético se usa en la etapa final para la búsqueda de la mejor solución. Utiliza la siguiente función objetivo:

$$\text{Minimizar } E = \frac{1}{2} \cdot \sum_{i=1}^n \sum_{j=i+1}^n w_{ij} \cdot (f_{ij} \cdot d_{ij})$$

Donde.

$E$  = coste de la distribución.

$w_{ij}$  = peso relacional de la actividad  $i$  a la  $j$ .

$f_{ij}$  = flujo de materiales de la actividad  $i$  a la  $j$ .

$d_{ij}$  = distancia entre las actividades.

Al igual que en las propuestas anteriores, para la primera población, se crean los individuos por medio de la manipulación de todos los operadores de cortes, alineación y orientación (ver capítulo 4 y 6) En el algoritmo empleado, seleccionan de la población el mejor valor de la función, para sustituir los peores de la siguiente generación. Utilizan un operador de cruce para cada etapa del cromosoma, cortes, alineación y orientación. De la misma forma muta un solo gen, para cada segmento del mismo.

### **3.6.33 - Propuesta de Chan et al.**

Chan y colaboradores (Chan et al., 2008), publican un nuevo desarrollo que al igual que Rao et al. (1999) consideran el movimiento de materiales tanto dentro de la célula como entre ellas (intracelular e intercelular). En este caso, los autores proponen una metodología basada en un algoritmo genético y dos modelos de optimización. El primero, resuelve el problema de asignación de las máquinas en cada célula como es agrupar en familias las partes a producir. La finalidad de este primer modelo es minimizar la suma entre el número de vacíos dentro de los bloques de la diagonal (cuadro constituido por número de máquinas vs. partes a fabricar) y los elementos fuera de ésta. El número de vacíos indica el movimiento intracelular total de la parte; mientras que número de elementos excepcionales indica el movimiento intercelular total. El otro modelo matemático, tiene la finalidad de optimizar los movimientos totales intracelular e intercelular, para configuraciones lineales, considerando la asignación de las células como un problema cuadrático de asignación (QAT).

El algoritmo genético actúa de forma separada para ambos modelos. Para la primera etapa, los autores proponen un cromosoma de tres segmentos; máquinas, partes a producir y recorrido o ruta del proceso. Cada gen, representa, respectivamente, para el primer segmento, una máquina a ser asignada a una determinada célula. Para el segundo segmento, una parte a ser fabricada en una determinada célula y el tercero y último segmento, un recorrido o ruta para el material. Para la segunda etapa, emplea un cromosoma dividido en dos segmentos intracelular e intercelular; a su vez, el primer segmento, se divide en subsecciones en función del número de máquinas asignadas a las diferentes células. Emplean los operadores de cortes y mutación por segmentos.

### **3.6.34 - Propuesta coevolutiva de Dunker et al.**

Dunker et al. (2003), presentan un algoritmo coevolutivo para la optimización de grandes distribuciones de planta. La coevolución es el resultado de las relaciones bióticas entre especies distintas a lo largo de múltiples generaciones, es decir, es el producto evolutivo de las interacciones vitales entre especies no emparentadas, por lo cual unas dependen en parte de las otras para evolucionar (ver capítulo 4). La finalidad, es mejorar la velocidad de búsqueda de los algoritmos genéticos simples.

El trabajo se basa en agrupar (aplica técnica de clustering) los diferentes departamentos dentro de grupos llamados especies, grupos que se desarrollan, intercambian información y compiten en diferentes áreas, mientras que la posición y dimensión de esas áreas o ambientes de trabajo evolucionan también. Estos proponen, para el agrupamiento, el uso de estructuras con características cualitativas y cuantitativas, dadas del razonamiento lógico para el problema de distribución. Para la formulación del problema, Dunker et al. (2003) seleccionan el MIP, empleado con menos variables binarias que Rajasekharan et al. (1998), que asume que lados de las células de fabricación (rectángulo) son paralelos al eje de sistema coordenado en el plano y que las dimensiones y forma iniciales de cada departamento son introducidos al inicio del problema. Los autores sugieren también, algunos desarrollos en los ejes  $x$  e  $y$  del cromosoma, para la aplicación de los operadores cruce y mutación.

# 4

Algoritmos Genéticos como  
Metodología de Optimización.



## **4.- Algoritmos genéticos como metodología de optimización.**

Como se ha observado a lo largo del trabajo, en los procesos actuales de optimización tanto de acciones de mantenimiento como de distribución de planta, normalmente nos encontraremos con funciones que presentan gran variedad de objetivos y una cantidad considerable de restricciones. Esto nos lleva a espacios de búsqueda muy complejos, con regiones de soluciones factibles y no factibles, además, el campo de solución presenta la posibilidad de que existan óptimos locales o parciales. La finalidad es localizar el óptimo global para el problema evitando así la caída en uno local. Para ello se ha propuesto la metodología de optimización de los algoritmos genéticos.

Los algoritmos genéticos, son una metodología de optimización basada en la analogía de la selección natural y genética, la cual fue desarrollada por Holland en el año 1975 (Goldberg, 1989). En el proceso de selección natural, los individuos más aptos de una población son los que sobrevivirán al entorno. La selección natural permite que las especies o individuos que sobrevivan con mayor éxito, se reproduzcan y dejen más prole con los mismos caracteres genéticos, originando la abundancia de individuos más convenientes para ese entorno. Por lo tanto, la selección natural, no consiste en un proceso de mejora sino de adaptar mejor los individuos a ese medio.

En el contexto que nos ocupa, el proceso de búsqueda del individuo más apto, se lleva a cabo a través de la actuación sobre los diferentes individuos que se obtienen a lo largo del proceso, los cuales llevan asociado un valor en una función matemática, es decir, la función objetivo para la optimización (ver capítulos 2 ,3, 5 y 6).

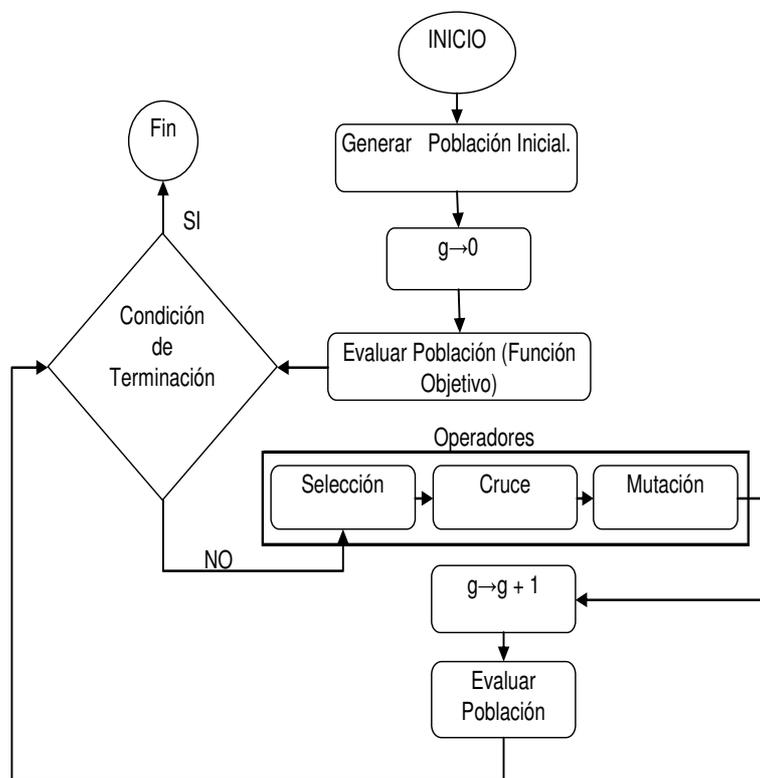
La metodología parte de una población inicial formada por un conjunto de individuos, donde cada uno de ellos, representa una posible solución al problema de optimización. A través de la aplicación de los llamados operadores genéticos: selección/reproducción, cruce y mutación, se encontrarán a lo largo del proceso evolutivo individuos más aptos, garantizando así que en las generaciones siguientes estos representen mejores soluciones. Este proceso iterativo concluye cuando se ha alcanzado cierto nivel de calidad establecido inicialmente, o cuando se llega a la convergencia de las soluciones (ver apartado 4.12).

Los algoritmos genéticos presentan una serie de ventajas con respecto a los métodos tradicionales, entre las que cabe mencionar, que sólo requieren una función objetivo asociada, siendo innecesaria otra información para su desarrollo, como gradientes o derivadas de la superficie de respuesta. Por lo tanto, los algoritmos

genéticos, utilizan reglas de transición probabilísticas y no deterministas (ver apartado 4.15). Adicionalmente, tienen la capacidad de buscar simultáneamente diversas regiones de un espacio de la solución, que permitan encontrar un sistema diverso de soluciones con los espacios no convexos, discontinuos, y multi-modales de las soluciones (ver apartado 4.13.1).

La construcción y aplicación de un algoritmo genético, para un problema de optimización, implica especificar algunos componentes como:

- Una representación para las soluciones potenciales del problema sobre la cual se define en espacio de búsqueda (codificación).
- Un método para generar la población inicial de soluciones potenciales.
- Una función objetivo que evalúe las soluciones en términos de su adaptación al entorno, es decir, la que asigna a cada individuo de la población, el valor de adecuación que indica la idoneidad de este con respecto al resto de la población (ver capítulo 2 y 3).
- Una actuación sobre los individuos (reproducción, cruzamiento y mutación), procurando que las modificaciones que resulten ventajosas se propaguen y las malas desaparezcan.
- Una condición de terminación que determine cuándo el proceso ha encontrado una solución óptima y no puede mejorar más la adaptación de los individuos al medio.



Figura, 4.1: Estructura básica de un algoritmo genético.

## 4.1.- Codificación.

Los algoritmos genéticos requieren para su aplicación de representaciones codificadas como un cromosoma. Cada cromosoma tiene varios genes que corresponden a los parámetros del problema en cuestión. En la naturaleza, los cromosomas se encuentran ubicados en parejas en el interior del núcleo celular, y los genes son una secuencia de nucleótidos, es decir, fragmentos de ADN en una determinada localización del cromosoma como se observa en la figura (figura 4.2).

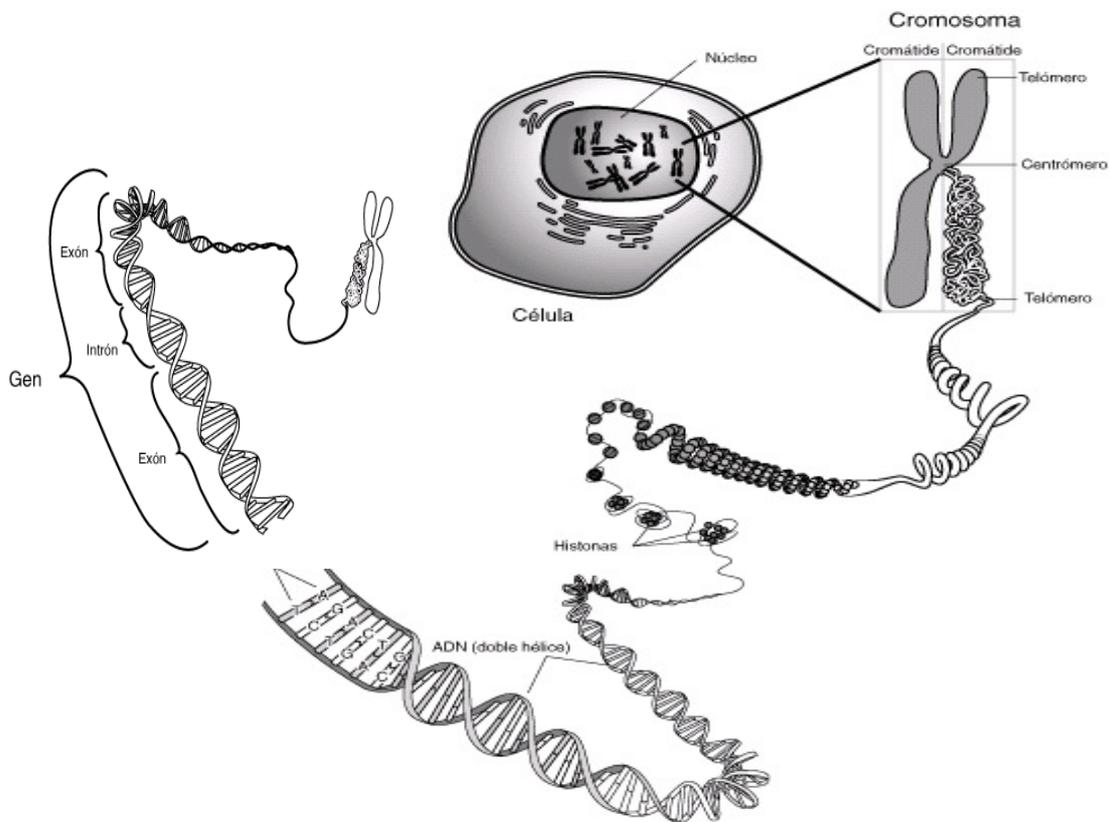


Figura 4.2: Célula, cromosoma y gen.

Para poder trabajar con estos genes en el programa, es necesario representarlos en una cadena  $n$  elementos (genes), es decir, una secuencia donde cada gen puede tomar cualquier valor dentro de un conjunto de longitud finita:

$$\theta = \{s_1, \dots, s_k\}$$

Este conjunto  $\theta$ , formará el genotipo del individuo (cromosoma), que se manifestará también como un fenotipo. El fenotipo representa las características tangibles u observables del individuo, es decir, los rasgos morfológicos.

Posteriormente, para evaluar la adaptación del fenotipo al entorno se emplea la función objetivo y las restricciones. Como se ha comentado, los cromosomas están constituidos por genes que son las  $N$  variables del problema, a su vez cada gen puede estar constituido por  $n$  dígitos cuyo valor representa un alelo. Alelo significa literalmente la forma alternativa, es decir, la variación alternativa de un determinado gen y por lo tanto de un rasgo característico. Como se observa en la figura 4.3, la variación del alelo, implica un color diferente en los ojos de la mosca en función del sexo.

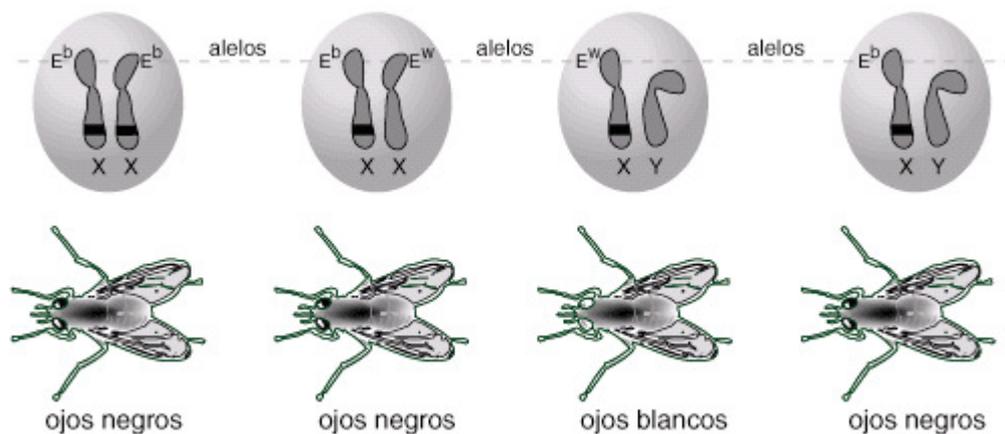


Figura 4.3: Influencia del alelo en los ojos de la mosca.

Dependiendo de la naturaleza del problema, se empleará codificación binaria (Beasley et al., 1993a, b; Rajasekharan et al., 1998; Dunker et al., 2003), real o decimal 0...9 (Muñoz, 1997b; Sánchez, 2000), números enteros (Suresh et al., 1995; Lazo y Pacheco, 1999; Kyu-Yeul Lee et al., 2003; 2005), alfanuméricos (Santamarina, 1995; Islier, 1998; Hicks, 2002).

Goldberg (1989), enunció dos principios que se deben cumplir en un proceso de codificación:

- Las soluciones deben ser expresadas en esquemas cortos y de bajo orden (ver apartado 4,12), es decir, bloques constructivos que expresen fijamente las características de los individuos.
- El conjunto de elementos para formar el cromosoma deberá ser mínimo y asegurando que representan el problema en cuestión.

### 4.1.1.- Ejemplos de codificación.

A continuación, demostraremos algunos ejemplos de la codificación empleada por algunos de los autores, que se han comentado en los capítulos anteriores.

#### 4.1.1.1.- Codificación desarrollada por Tam.

Para codificar las soluciones del problema de distribución en planta, Tam (1992) utiliza un conjunto de operadores de corte asociados a los problemas de distribución y el recorrido de preorden del árbol de cortes. El recorrido preorden consiste en visitar el nodo raíz, después el subárbol izquierdo y luego el derecho. Las variables utilizadas adquieren valores de: a (arriba), b (bajo), d (derecha), i (izquierda). Los números representan las actividades.

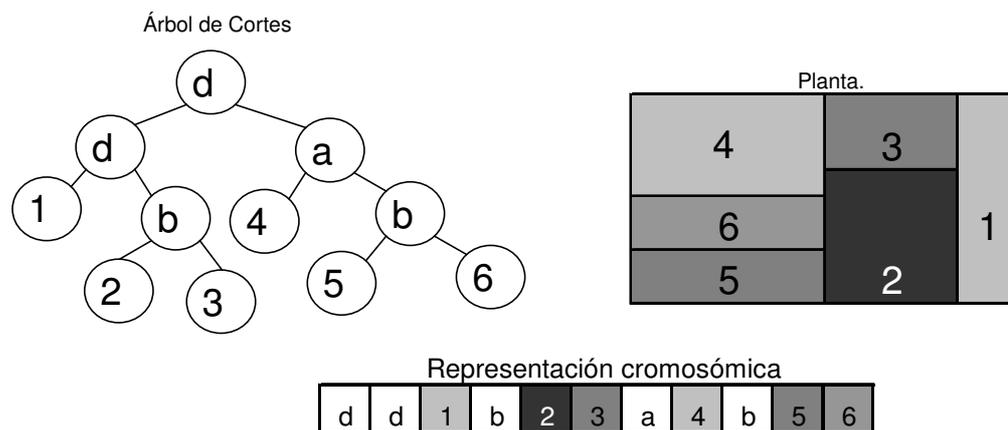


Figura 4.4: Árbol de cortes, distribución en planta y representación cromosómica de Tam (1992).

#### 4.1.1.2.- Codificación propuesta por Muñoz.

Como se ha observado en el capítulo 2, Muñoz (1997) propone modelos de indisponibilidad para optimizar la combinación de acciones de mantenimiento, para un componente o sistema dentro de 4 estrategias. La propuesta de codificación, consiste que un individuo (un genoma o estructura) representa una determinada estrategia o política de mantenimiento. Por lo tanto, cada gen representará una acción de mantenimiento que puede ser: pruebas de vigilancias, mantenimiento correctivo, preventivo, etc. Dentro del gen, cada alelo que le forma tomará un valor real que representa la frecuencia y duración de la actividad.

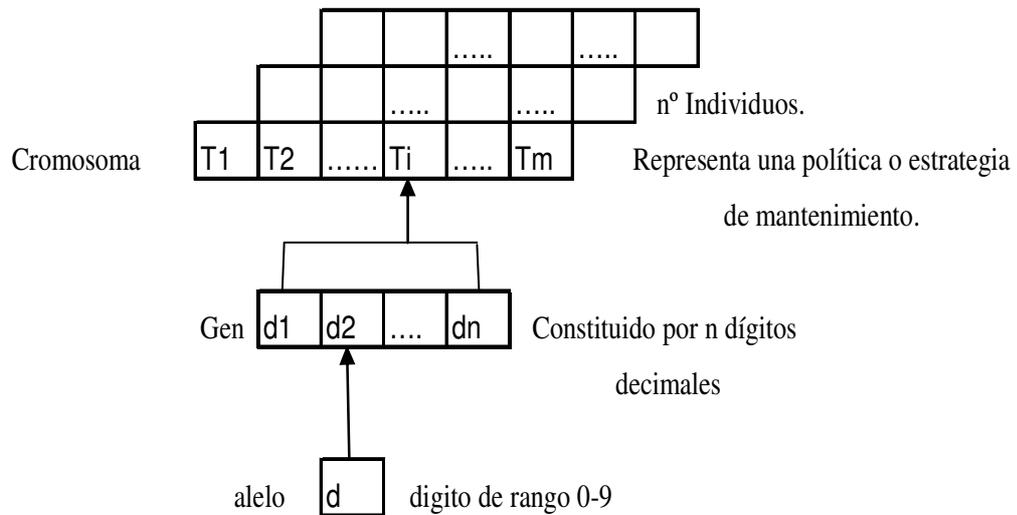
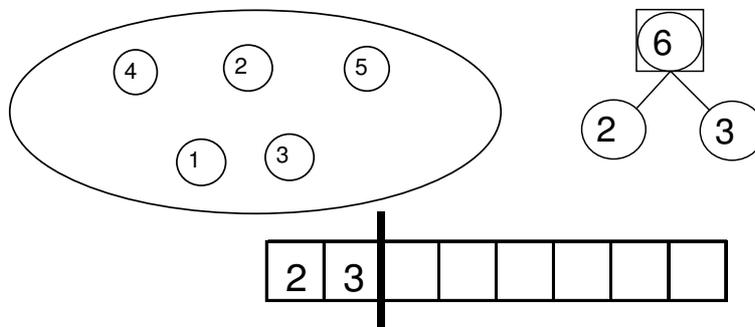


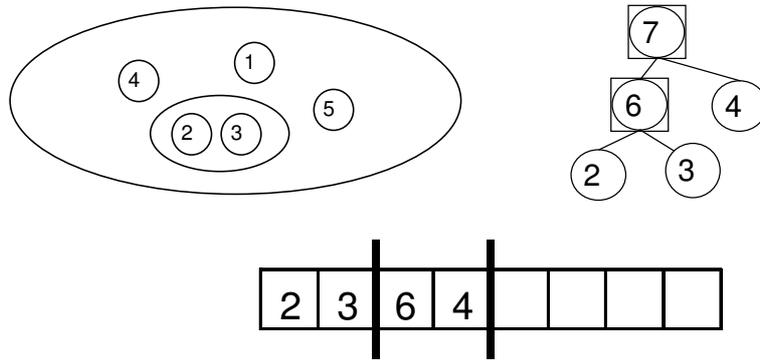
Figura 4.5: Representación cromosómica de Muñoz (Muñoz 1997).

#### 4.1.1.3.- Codificación desarrollada por Santamarina.

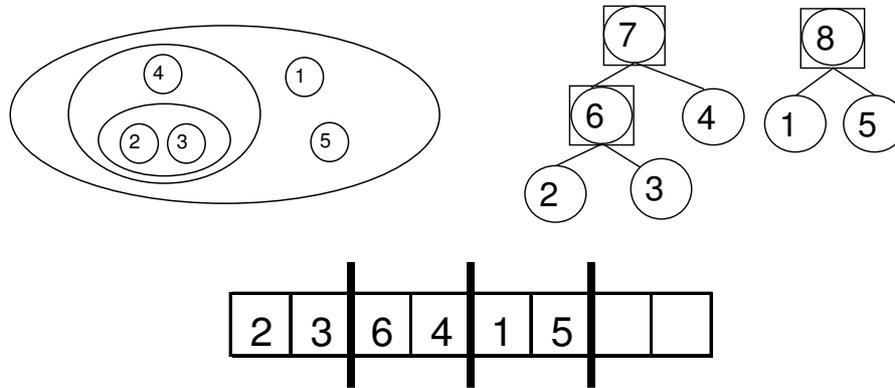
Al igual que Tam (1992), Santamarina (1995) utiliza los árboles de cortes para realizar la codificación y la asignación de actividades para el problema de distribución en planta, empleando para ello los clúster. A partir de éstos y de la secuencia de unión de las actividades, se formará el cromosoma de izquierda a derecha, codificando el árbol de corte en una secuencia de  $2 \cdot n - 2$  genes, donde  $n$  representa el número de actividades o departamentos involucrados. Para una especie (árbol de corte) el procedimiento es el siguiente:



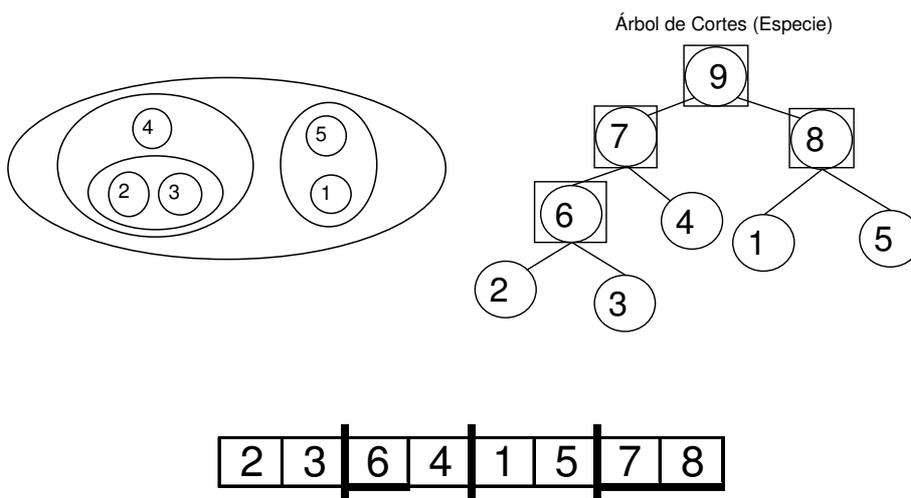
Primera unión: clúster 6 = clúster 2 unido al clúster 3.



Segunda unión: clúster 7 = clúster 6 unido al clúster 4.



Tercera unión: clúster 8 = clúster 1 unido al clúster 5.



Cuarta unión: clúster 9 = clúster 7 unido al clúster 8.

Figura 4.6: Clústeres, árboles de cortes y representación del cromosoma de la especie de Santamarina (1995).

Para un individuo, la codificación se realiza al igual que Tam (1992), en sentido preorden y por medio de la aplicación de los operadores de corte visto en apartados anteriores. El cromosoma contiene información sobre la posición relativa de las actividades. Adicionalmente, la autora introduce un último gen que representa la información sobre el dominio  $\theta$  y podrá variar entre  $r_i^{\min}$  y  $r_i^{\max}$ .

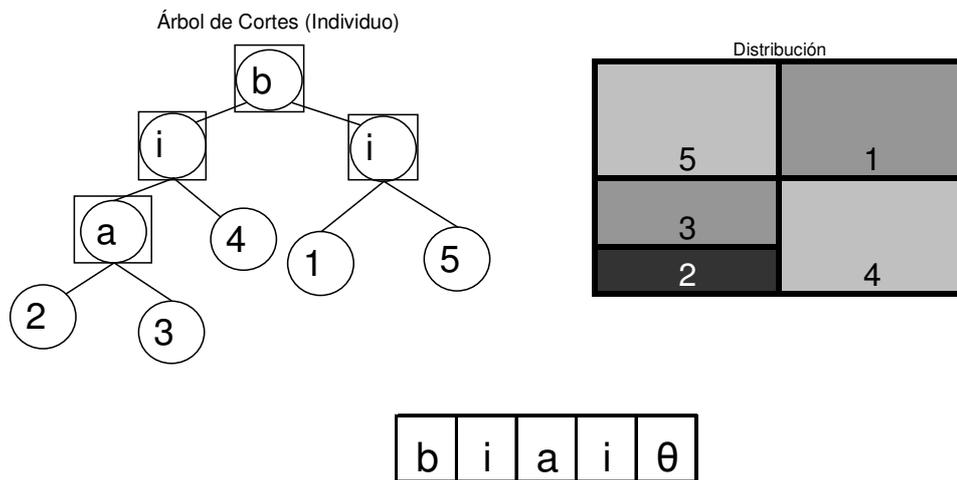


Figura 4.7: Árbol de corte, solución y codificación (Santamarina, 1995).

Azadivar y Wang (2000), Tam y Chan 1998, Gau y Meller (1999), emplean una metodología similar para codificar los árboles de cortes.

#### 4.1.1.4.- Codificación desarrollada por Suresh et al.

En Suresh et al. (1995), para el problema de distribución en planta en vez de aplicar la metodología de los árboles de cortes, emplean una matriz simple de asignación que representa la distribución en una planta rectangular. La posición que ocupa en la cadena cromosómica dependerá de la posición que ocupen en la planta.

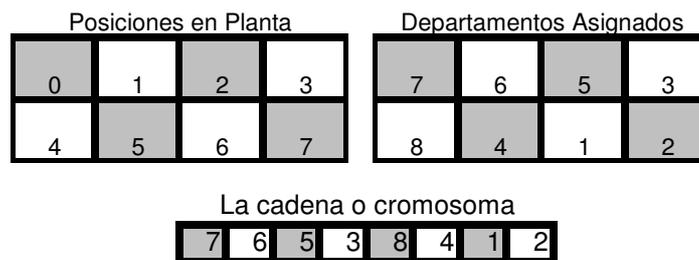


Figura 4.8: Matriz y representación cromosómica de Suresch et al. (1995).

#### 4.1.1.5.- Codificación desarrollada por Islier.

Islier (1998), para optimizar la distribución en planta (ver capítulo 3), utiliza el siguiente proceso de codificación: primero elige la secuencia de las actividades a distribuir siguiendo un recorrido zic zac (trazado x-y), luego define el área necesaria para que cada actividad se desarrolle, y por medio de la aplicación de la anchura de bandas, determina la distribución final. (Ver figura 4.8).

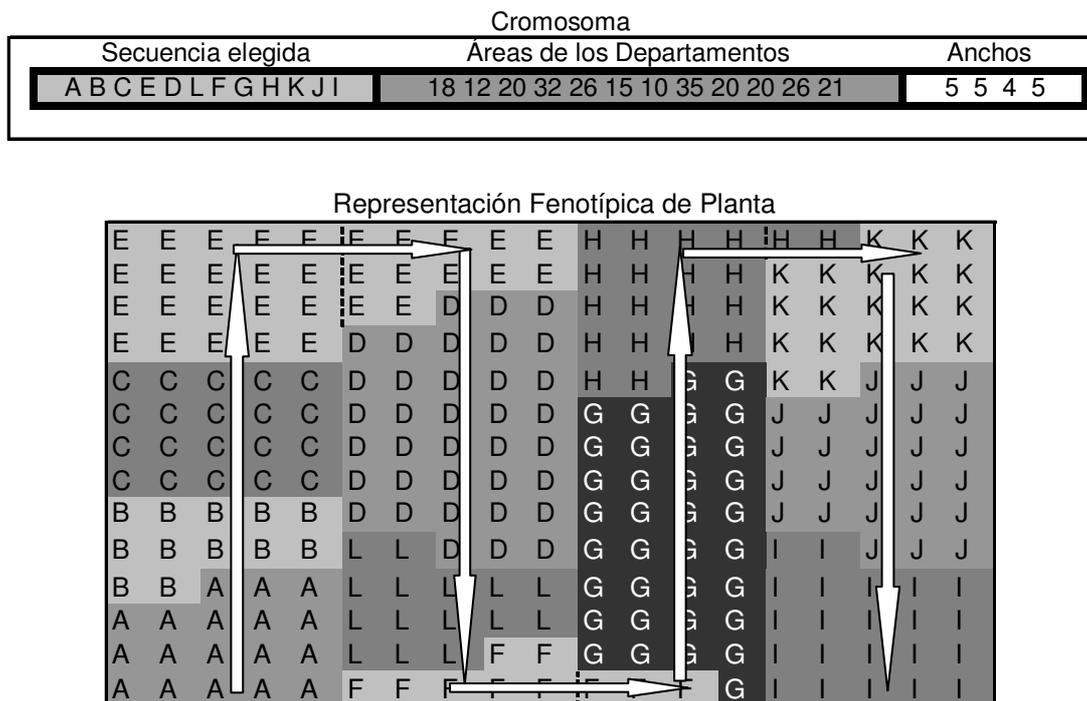


Figura 4.9: Cromosoma y planta de Islier (1998).

#### 4.1.1.6.- Codificación propuesta por Sánchez.

Para Sánchez (2000), la optimización de los intervalos de prueba, mantenimiento y máximos tiempos permitidos de inoperatividad, supone la utilización de parámetros reales. Los parámetros del modelo a optimizar se organizan dentro de una secuencia de variables reales enteras e independientes:

$$\mathbf{x} = \{x_1, \dots, x_l, \dots, x_n\} \in \mathbf{R}^n$$

Figura 4.10: Representación del cromosoma de Sánchez (2000).

Donde, a cada variable  $x_i$  (discreta y entera) se le pueden establecer restricciones explícitas que se deben cumplir al definir la secuencia. El rango de cada variable estará en función de los valores que puedan tomar los intervalos de prueba y mantenimiento en una situación real para un componente dado.

#### 4.1.1.7.- Codificación desarrollada por Lazo y Pacheco.

Lazo y Pacheco (1999), para optimizar la secuencia de mantenimiento en las máquinas y la distribución de las tareas para el personal, emplean una codificación en la cual un cromosoma representa una lista donde está expresada la secuencia de máquinas a ser intervenidas. Los cromosomas constan de 100 genes donde cada uno es una máquina.



Figura 4.11: Cromosoma de Lazo y Pacheco (1999).

Cada uno de estos genes del cromosoma de la figura 4.11, es colocado en una tabla-horario (figura 4.12) que representa las horas diarias de trabajo para el mantenimiento al mes. La secuencia consiste en que el algoritmo coloca cada máquina a partir de la hora 1 del mes, repitiéndose tantas veces como el número de horas necesarias para realizar el mantenimiento a dicha máquina, evitando dejar espacios vacíos. Para evitar los espacios vacíos, el algoritmo intenta colocar al siguiente gen en aquel espacio vacío, sólo si el número de horas coincide con las horas necesarias para realizarle mantenimiento.

	DIAS DEL MES									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9-8h	18	26	34	5	3	32	7	16	6	12
9-10h	18	26	34	5	3	32	7	16	6	17
10-11h	13	25	34	5	3	32	7	15	6	17
11-12h	13	25	23	9	11	22	19	15		
12-13h										
13-14h	24	33	4	30	14	31	29	28	2	1
14-15h	8	33	4	30	14	31	29	28	2	1
15-16h	8	33	4	30	27	31	29	28	2	1
16-17h	8	21	20	30	27	10	29	28		

Figura 4.12: Tabla Horario de Lazo y Pacheco (1999).

#### 4.1.1.8.- Codificación desarrollada por Balakrishnan et al.

Para aplicar la metodología de optimización para un modelo basado en horizontes de planificación multi-periodos DPLP, para el problema de distribución en planta (Dynamic Plant Layout Problem) (ver capítulo 3), Balakrishnan et al. (2003) utilizan el siguiente sistema de codificación para N periodos de planificación.

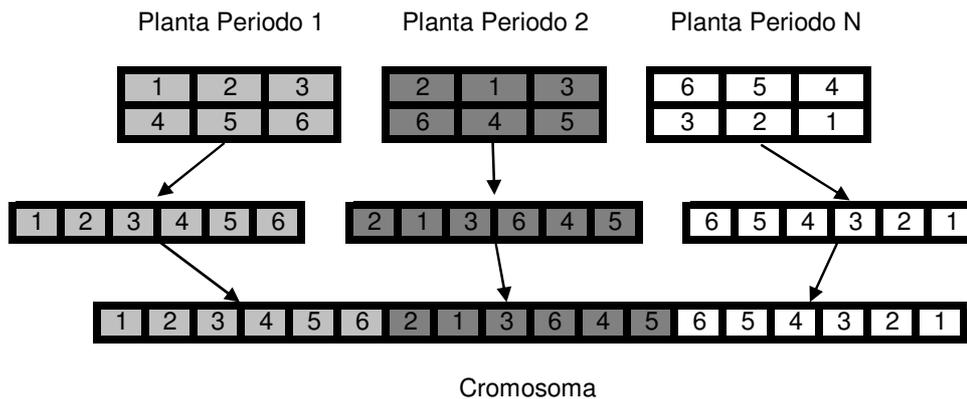


Figura 4.13. Representación de Balakrishnan et al. (2003).

El cromosoma representa las diferentes actividades distribuidas para el horizonte, y serán colocados en la cadena, dependiendo de la posición que estas ocupen en planta para los diferentes periodos N.

#### 4.1.1.9.- Codificación desarrollada por Paiton y Campell.

Como se ha observado en el capítulo 2, Paiton y Campell (1995) desarrollan un modelo que tiene por objetivo mejorar la fiabilidad de diseño de un PC, a partir del nivel de coste de implementación por componente, tasa de fallos y la redundancia en paralelo de algunos de los componentes que forman el sistema.

Este algoritmo utiliza un cromosoma donde cada gen representa un determinado componente (1...n), y dentro de este, cada alelo representa el nivel de coste de su implementación (los autores utilizan tres niveles 1 bajo, 2 medio y 3 alto). En la figura 4.12, la solución representa que el componente 1 tiene un nivel de coste de implementación 2, el componente 2 tiene un nivel de coste de implementación tres, etc.



Figura 4.14. Representación del cromosoma de Paiton y Campell (1995)

### 4.1.1.10.- Codificación empleada por Kyu-Yeul Lee et al.

Kyu-Yeul Lee y colaboradores (Kyu-Yeul Lee et al., 2003), proponen para el problema de distribución en planta considerando los pasillos y la pared interna, un cromosoma de cuatro segmentos muy similar al desarrollado por Islier (1998). Como se ha expuesto en el capítulo 3, el primer segmento representa la secuencia de las actividades a ser colocadas. El segundo representa las áreas de esas actividades. Y el tercero y cuarto son, respectivamente, la posición vertical y horizontal de los pasillos, en términos de la distancia a partir del origen coordenado. Por su puesto, para la asignación de las actividades y pasillos, se divide el recinto en N cuadrículas.

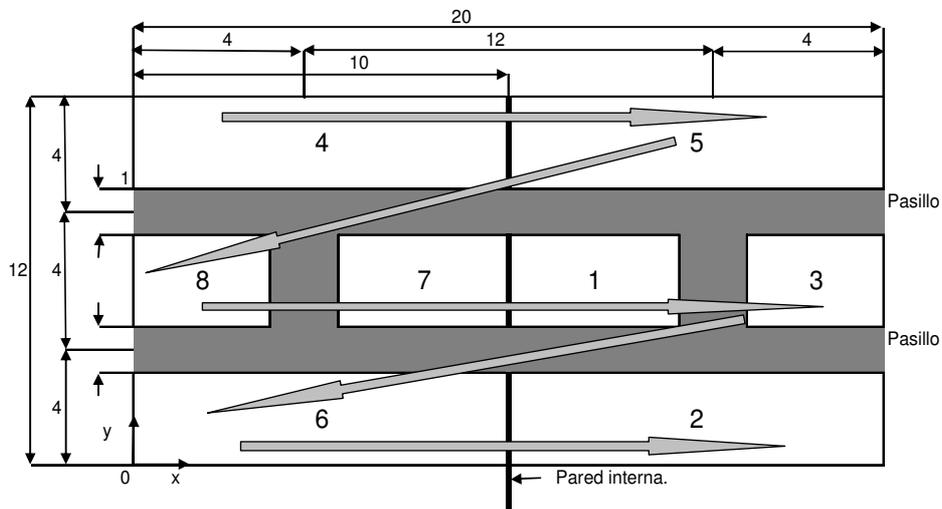


Figura 4.15: Distribución de Kyu-Yeul Lee et al. (2003)

Segmento 1							Segmento 2						Seg 3			Seg 4					
4	5	8	7	1	3	6	2	35	35	9	15	15	9	35	35	4	4	4	4	12	4
(secuencia de las actividades)							(Áreas de las facilidades)						(Localización pasillos)								

Figura 4.16: Representación cromosómica del layout de Kyu-Yeul Lee et al. (2003).

Y para una planta de dos pisos (Kyu-Yeul Lee et al., 2005).

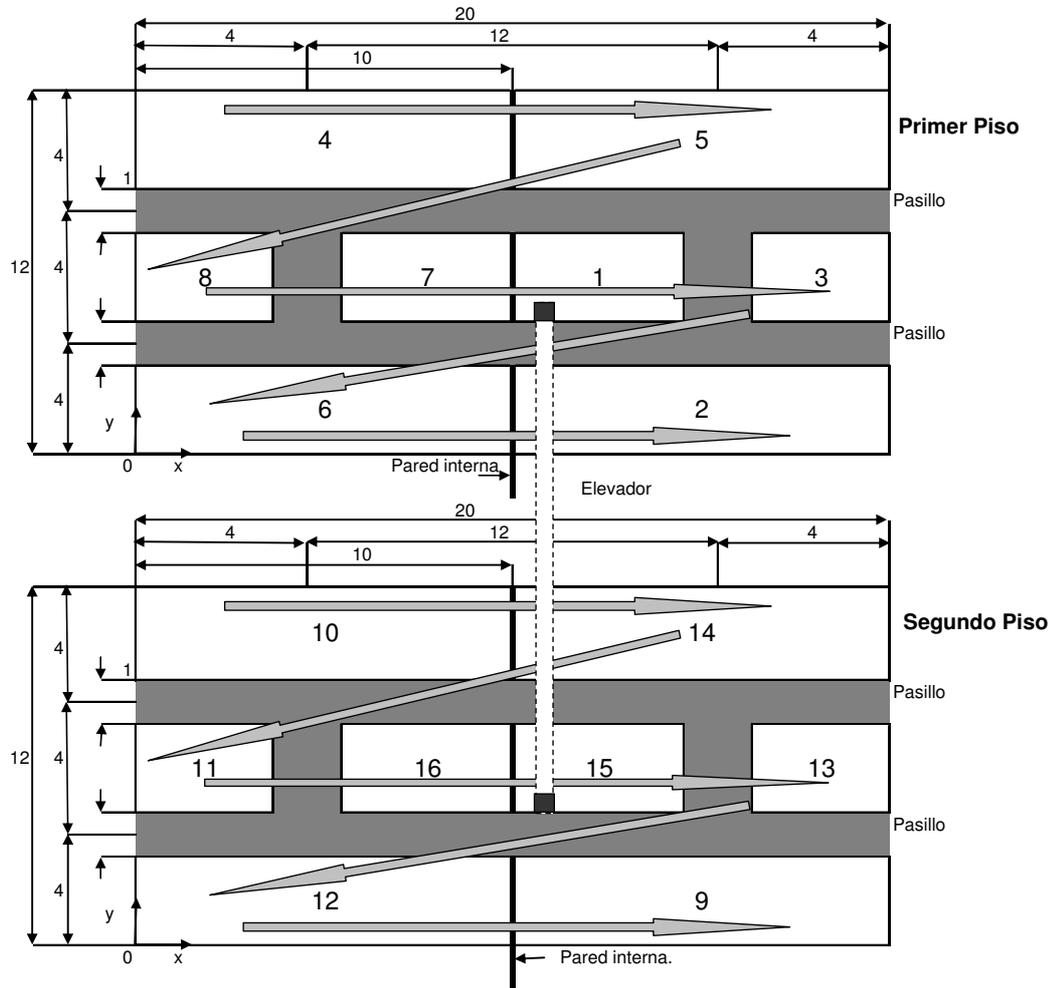


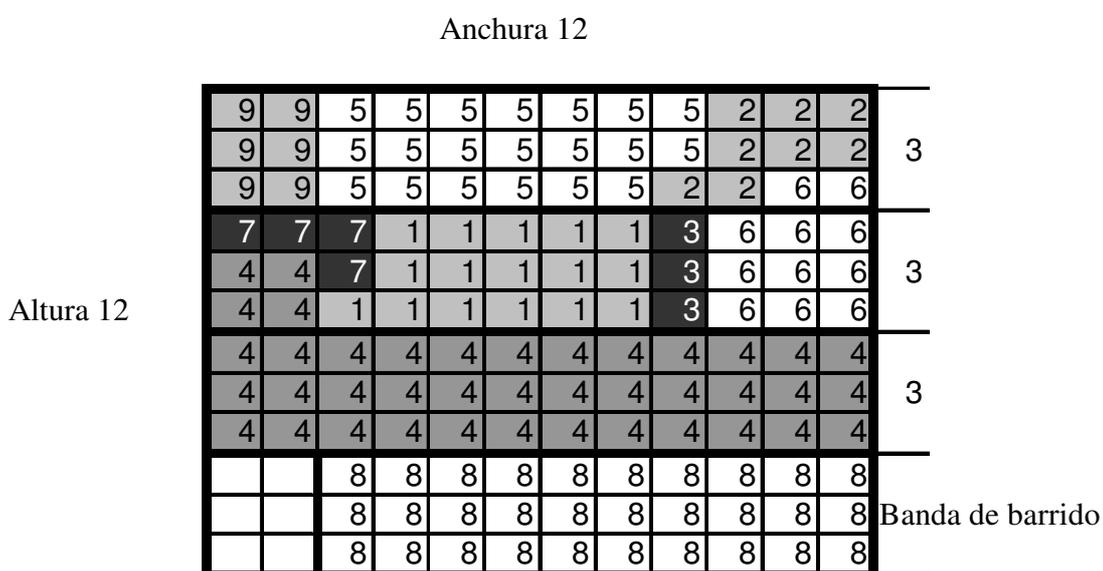
Figura 4.17: Distribución en planta multi-floor (Kyu-Yeul Lee et al., 2005).

Piso 1	Segmento 1												Segmento 2				Seg 3			Seg 4		Seg 5	
	4	5	8	7	1	3	6	2	35	35	9	15	15	9	35	35	4	4	4	4	12	4	8
	10	14	11	16	15	13	12	9	35	35	9	15	15	9	35	35	4	4	4	4	12	4	8
	(secuencia de las actividades)								(Áreas de las facilidades)								(Localización pasillos)						
	Número de actividades por piso																						
Piso 2																							

Figura 4.18: Representación cromosómica del layout multi-floor (Kyu-Yeul Lee et al., 2005).

### 4.1.1.11.- Codificación empleada por Ming-Jaan Wang et al.

Ming-Jaan Wang et al. (2005), desarrollan una representación cromosómica similar a las propuestas por Islier (1998) y Kyu-Yeul Lee et al. (2003, 2005). Se diferencia de las anteriores en que los tres últimos segmentos representan la longitud de la planta (altura y anchura), dirección de barrido de las bandas o sub áreas (vertical u horizontal) y anchura de esas bandas de barrido respectivamente. Para la codificación se utiliza un trazado x-y en un recinto reticulado.



Segmento 1 Secuencia de actividades	Segmento 2 Requerimientos de área	Seg 3 Altura y Ancho de planta	Seg 4 Dirección de banda	Seg 5 Anchura de banda
9 5 2 6 3 1 7 4 8	6 20 8 11 3 16 2 40 30	12 12	1	3

1 representa Horizontal  
2 representa Vertical

Figura 4.19: Planta y representación cromosómica de Ming-Jaan Wang et al. (2005).



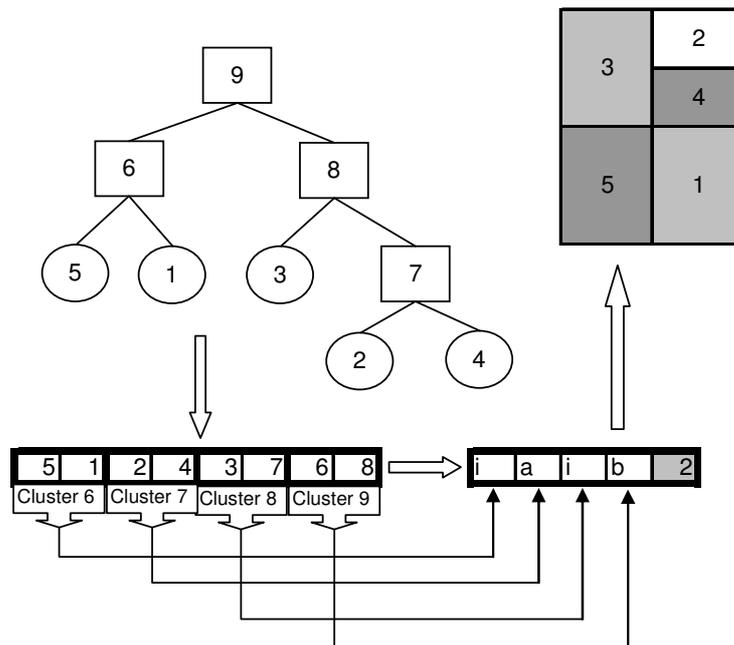
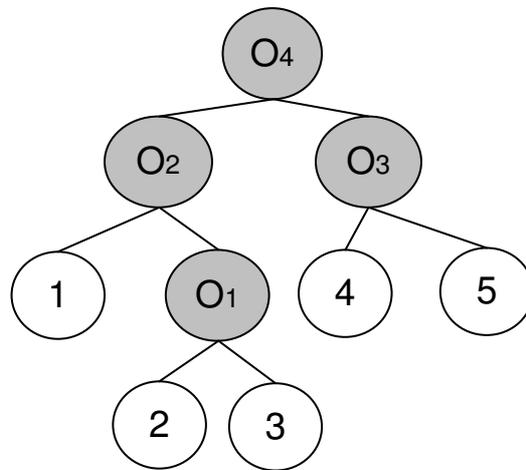


Figura 4.21: Codificación de la distribución de un árbol de cortes para un individuo (Diego-Más, 2006).

#### 4.1.1.14.- Proceso de codificación de Sirinaovakul y Limudomsuk.

A continuación se describe el proceso seguido para la codificación, realizado por Sirinaovakul y Limudomsuk (2007), para la optimización de la distribución en planta por medio de árboles de cortes y técnicas de agrupamiento (figuras 4.22 y 4.23). En la figura 4.22, el operador de definición de posición Op1, indica la operación de corte para asignar las actividades 2 y 3, donde la actividad 3 puede estar localiza en la parte superior, inferior, a la izquierda o a la derecha de la actividad 2. Op2 indica que las actividades 2 y 3 se pueden localizar arriba, abajo a la izquierda o a la derecha de la actividad 1. De forma similar para Op3, y Op4. Para el alineación relativa entre las actividades, A1 indica la posición entre la actividad 2 y 3, donde la 3 podrá estar en una alineación inferior, media o superior con respecto a la 2. A2 indica el lugar donde las actividades 2 y 3 se localizan, pudiendo ser en la parte inferior, centro o superior del lado de la actividad 1. A3, y A4 son análogos. Para la orientación las actividades, Or1 indica que la orientación la actividad 1 puede ser vertical u horizontal. Or2 para la orientación de la actividad 2 y así sucesivamente.



Expresión preliminar del árbol. 1 2 3 O1 O2 4 5 O3 O4

Genotipo preliminar . Op1 Op2 Op3 Op4 A1 A2 A3 A4 Or1 Or2 Or3 Or4

Figura 4.22.: Proceso para la codificación de Sirinaovakul y Limudomsuk (2007).

Finalmente, en la siguiente figura 4.23, se presenta la codificación para la distribución en planta, donde la secuencia RBTR representa las operaciones (Op) de cortes para la distribución. El primer operador R, indica que la actividad 3 se localiza en el lado derecho de la 2. El segundo operador, B, indica que el par de actividades 2 y 3, se localizará en la parte inferior de la actividad 1. El tercer operador, T, indica que la actividad 5 se localiza arriba de la actividad 4. R, indica que el par de actividades 4 y 5 se localiza al lado derecho de la combinación de actividades 2, 3 y 1. La segunda parte, BBMT, representa al operador para la alineación relativa (operadores A). El primero, B, indica que la actividad 3 se alinea en la parte inferior de la actividad 2. El segundo operador, B, indica que el par de actividades 2 y 3 se alinean en la parte inferior del lado de la actividad 1. El tercer operador, M, indica que la actividad 5 se alinea en el centro del lado de la actividad 4. T, indica que el par de actividades 4 y 5 se alinea hacia arriba del conjunto formado por las actividades 2,3 y1. La tercera parte del cromosoma (operadores Or), UDUUU, representa la orientación vertical u horizontal de las actividades 1, 2, 3, 4 y 5 que son, respectivamente, 90, 0, 90, 90 y 90.

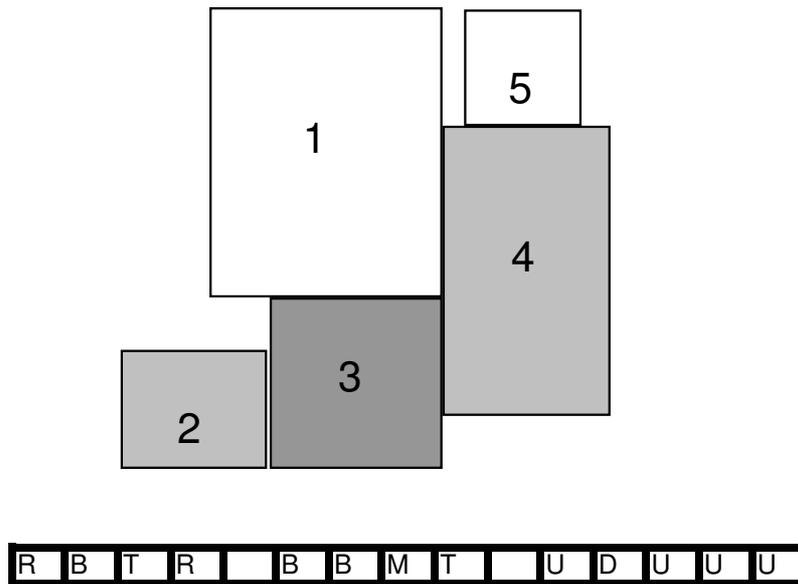


Figura 4.23: Distribución en planta y cromosoma final (Sirinaovakul y Limudomsuk, 2007).

#### 4.1.1.15.- Codificación de Chan et al.

Como se ha observado en el capítulo 3, Chan y colaboradores (Chan et al., 2008), para el problema de optimización en la asignación de células, considerando los movimientos internos y externos a éstas, proponen un par de configuraciones genotípicas para cada una de las fases de su metodología. En este apartado, sólo mencionaremos el cromosoma de la primera fase. Este primer cromosoma está constituido por tres segmentos, donde cada uno representa respectivamente: una máquina a ser asignada a un determinada célula, una parte a ser fabricada en una célula y un recorrido o ruta del material o piezas.

	Seg. 1			Seg. 2				n° de ruta	Seg. 3			
	Máquinas			Piezas o partes					Recorrido de Pieza			
	M1	M2	M3	P1	P2	P3	P4		Rp1	Rp2	Rp3	Rp4
n° de Célula	2	1	3	2	1	1	3	3	4	1	1	

Figura 4.24: Representación genotípica de Chan et al. (2008).

## **4.2.- Función objetivo (evaluación).**

Unos de los aspectos que resultan cruciales en el comportamiento de los algoritmos genéticos, es la determinación de una adecuada función de adaptación u objetivo. Lo que interesa es construir una función objetivo que verifique que para dos individuos o más, que se encuentren cercanos en el espacio de búsqueda, sus respectivos valores en las funciones objetivo sean muy similares.

Una regla general para construir una buena función objetivo, es que esta debe reflejar el valor del individuo de una forma "real", pero, en muchos problemas de optimización combinatorial, donde existe gran cantidad de restricciones, buena parte de los puntos del espacio de búsqueda representan individuos no válidos. Para este planteamiento en el que los individuos están sometidos a restricciones, se han propuesto soluciones restrictivas llamadas penalizaciones (Ver apartado 4.7).

## **4.3.- Población inicial.**

La selección de un conjunto de individuos de la población inicial, se realiza habitualmente de forma aleatoria, debiendo ofrecer una gran diversidad de material genético. No obstante, la población inicial puede obtenerse mediante el uso de diferentes técnicas heurísticas, dependiendo del problema a optimizar. El tamaño de la población depende principalmente de la topología del espacio de búsqueda. Si el tamaño de una población resulta insuficiente para resolver el problema de optimización, aparecerán convergencias prematuras del algoritmo, es decir, se localizará un individuo que representa un óptimo local. El caso contrario, resultará en un procedimiento extremadamente largo y costoso desde el punto de vista informático. Se han realizado diversos estudios con la finalidad de lograr un tamaño de población idóneo para la mayoría de los problemas de optimización, llegándose a la conclusión, de que una población comprendida entre 50 y 100 individuos es la adecuada (Goldberg, 1989).

Para obtener nuevas poblaciones a partir de las iniciales, se utilizan los ya mencionados operadores genéticos (selección, cruzamiento y mutación). El operador selección es análogo a los procesos de competición para el logro de una pareja, el cruce para el apareamiento en la recombinación de los genes, y la mutación representa las variaciones en la carga genética de algunos individuos, por errores en la transmisión durante la división celular. Existen también otra serie de operadores que se aplican en función del problema, y que se describirán más adelante.

## 4.4.- Operador selección.

Una vez inicializado el proceso evolutivo, el algoritmo comienza con la selección de algunos individuos de la población inicial para ser los padres en el proceso de reproducción. Siguiendo la filosofía de la naturaleza, los mejores individuos deben reproducirse más. Esto implica que se debe establecer un sistema por medio del cual sean elegidos, con más frecuencia, aquellos individuos que representen, para la N-iteración, la mejor solución [mejor valor en la función adaptación o aptitud (ver escalado)(Fogel, 1994). Los mecanismos de selección de los mejores individuos, basados en el valor supremo de cada intervalo propuestos por Muñoz et al. (1997) son:

- Lineal:

$$\zeta_j = \zeta_{j-1} + N - (j - 1)$$

Donde:

$\zeta_j$  = es el valor supremo del intervalo de iteración j-ésimo asociado al individuo j-ésimo.

$N$  = es el número de individuos de la población.

- No lineal:

$$\zeta_j = \zeta_{j-1} + (N - (j - 1))^2$$

- La exponencial:

$$\zeta_j = \zeta_{j-1} + E[\exp(N - (j - 1))]$$

En estos casos se le atribuye un gran peso a los primeros elementos de la ordenación, decreciendo rápidamente al bajar el orden. Esto permite darle poco peso a los intermedios y muy poco a los últimos. El paso siguiente, es seleccionar al individuo con la distribución de probabilidad desarrollada con cualquiera de los tres métodos descritos anteriormente, u otros. El individuo seleccionado será aquel asociado al intervalo donde el punto en cuestión ha caído, es decir, el generador de números aleatorios lanza valores pertenecientes a un intervalo (Ver ruleta de Goldberg 1989).

Otra metodología empleada para seleccionar a los padres es la selección por torneo, que es un método estocástico de muestreo basado en la ruleta de Goldberg (1989). Donde se eligen subgrupos de individuos de la población, y los miembros de

cada subgrupo compiten entre ellos. Sólo se elige a un individuo de cada subgrupo para la reproducción.

El método de la ruleta Goldberd, consiste en asignar un mayor campo, a los individuos mejor adaptados para el j-ésimo intervalo de iteración, logrando con esto darle mayor probabilidad de ser seleccionados para el proceso de reproducción. Este procedimiento de selección se repite tantas veces como sea necesario. Una vez elegidos los candidatos, estos formaran parte de la descendencia para el próximo periodo de iteración. Para asignar la probabilidad de que un individuo sea seleccionado, se puede emplear la siguiente expresión:

$$P(s, g)_{\text{selección}} = \varphi(i) / (\sum_{i=1}^n \varphi(i)).$$

Donde:

$\varphi(i)$  = corresponde al valor de aptitud para dicho individuo (evaluación función objetivo).

$g$ = índice que indica la generación que está siendo considerada por el algoritmo.

$P(s, g)$ : Probabilidad de que el individuo (solución)  $s$ , perteneciente a la generación  $g$  -ésima, sea incluido en el grupo de reproductores para formar los descendientes de la generación  $(g + 1)$  -ésima.

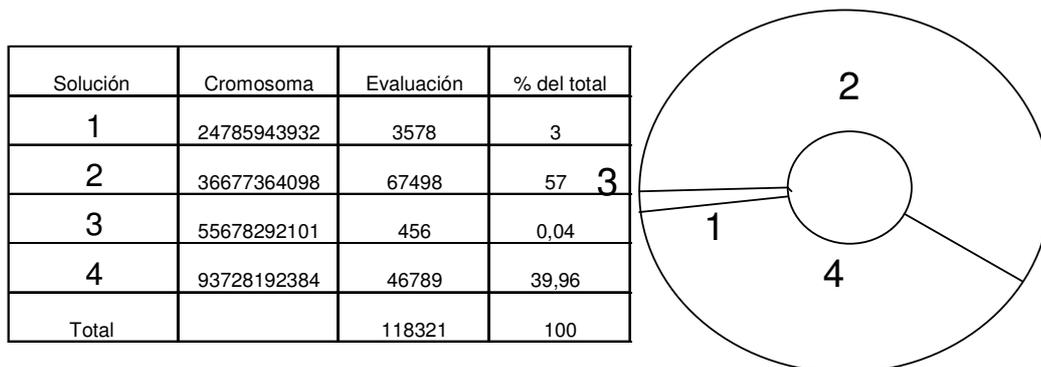


Figura 4.25: Sistema de ruleta de Goldberg.

Podemos mencionar otras metodologías recientes (Marczyk, 2004):

- Selección escalada. Al incrementarse la aptitud media de la población, la fuerza de la presión selectiva también aumenta y, por lo tanto, la función de aptitud (ver escalado) se hace más discriminadora. Este método puede ser útil para la

posterior selección, cuando todos los individuos tengan una aptitud relativamente alta y sólo les distingan pequeñas diferencias en la aptitud.

- Selección por rango: a cada individuo de la población se le asigna un rango numérico basado en su aptitud, y la selección se basa en este ranking, en lugar de las diferencias absolutas en aptitud. La ventaja de este método es que puede evitar que individuos muy aptos ganen dominancia al principio a expensas de los menos aptos, lo que reduciría la diversidad genética de la población y podría obstaculizar la búsqueda de una solución aceptable.
- Selección jerárquica: los individuos en cada generación, son evaluados en múltiples rondas de selección. Las evaluaciones de los primeros niveles son más rápidas y menos discriminatorias, mientras que los que sobreviven hasta los niveles más altos son evaluados más rigurosamente. La ventaja de este método, es que reduce el tiempo total de cálculo al utilizar una evaluación rápida y poco selectiva para eliminar la mayoría de los individuos que se muestran poco o nada prometedores.

Es importante aclarar que el mejor individuo, además de ser seccionado para reproducirse con otros, también será forzado a reproducirse consigo mismo o perpetuarse. Esto permite tener un clon del líder para asegurar su existencia para el próximo periodo de iteración, hasta que sea sustituido por un mejor individuo que lo supere. Al individuo o conjunto de individuos (de 1 a 2 en una población de 50) con mejor aptitud se le denomina élite. Esta élite perdura en la siguiente generación mientras que el proceso de selección se aplica a los otros individuos de la población, permitiendo esto una exploración más profunda del entorno de soluciones alrededor de la élite, es decir, una explotación. El inconveniente es que para poblaciones muy pequeñas, se puede presentar convergencias prematuras por la disminución de la diversidad.

## 4.5.- Operador cruce.

La aplicación de este operador tiene la finalidad de crear nuevos individuos por medio del cruce (apareamiento) de los mejores, garantizando así que se explore otros espacios cercanos del campo de soluciones (explotación). Debido al proceso de selección, los mejores individuos son los que participarán más activamente en el cruce, ya que como se ha observado en el apartado anterior, tienen mayores probabilidades de pasar su código genético a las generaciones siguientes. El cruzamiento no debe consistir únicamente en una combinación de soluciones, sino que esta debe ser verdaderamente beneficiosa para el problema de optimizar.

No resulta fácil comprobar si las nuevas soluciones estarán mejor adaptadas al entorno que sus progenitores. Por lo tanto, se hace necesario, identificar los bloques o grupos de genes, en las cadenas paternas, que hacen posible el desarrollo de soluciones más adecuadas, para luego transmitirlos a sus próximos descendientes (ver bloques o esquemas).

Un mecanismo sencillo que ha sido ampliamente utilizado, consiste en elegir aleatoriamente una posición del genoma (cadena de genes) de los padres, para luego cortar e intercambiar los segmentos en los que han quedado divididos, consiguiendo con esto el nuevo individuo.

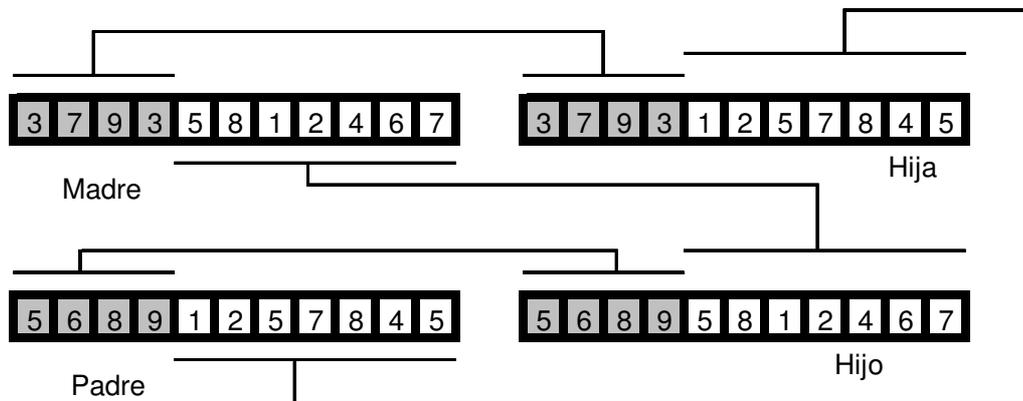


Figura 4.26: Operador cruce.

El inconveniente de esta técnica, es que posibilita a que cualquiera de los hijos no herede la combinación de genes presentes en los padres; que permiten que estos sean soluciones decisivas, es decir, se puede perder buena información genética para la solución.

Para tratar de remediar este problema, se ha desarrollado una técnica que consiste en utilizar varios puntos de cruce (cruce multipunto) en lugar de utilizar uno solo (Alcaraz y Wang, 2000). Esta técnica permite así mantener la combinación de esquemas decisivos (ver apartado 4.11). Pero es importante aclarar que si se aplica en una cantidad excesiva de puntos de cruce, se corre el riesgo de romper estos esquemas.

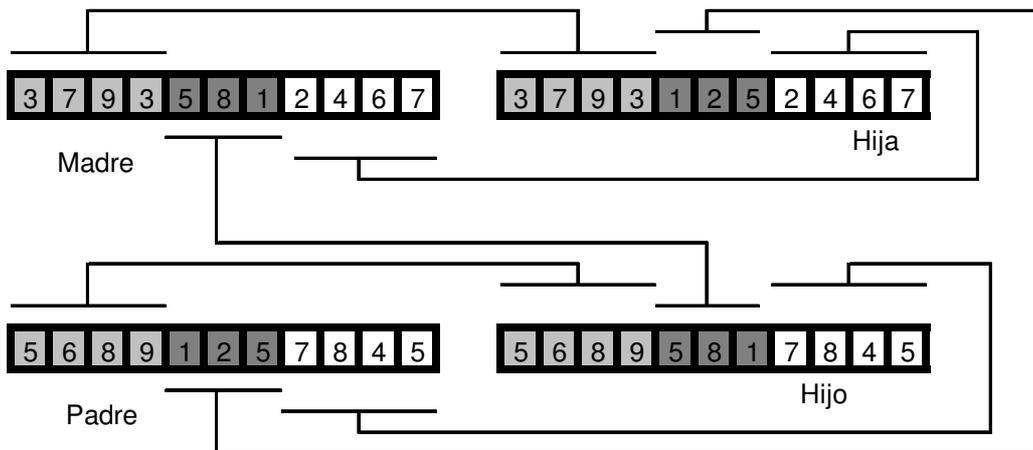


Figura 4.27: Operador cruce multipuntos

A medida que el proceso evolutivo avanza, las soluciones iniciales pueden ir desapareciendo para ser sustituidas por otras de mejor calidad. No obstante, en algunos casos puede existir una variabilidad considerable en las soluciones finales, originando esto la pérdida total de la orientación en la búsqueda. Por lo tanto, no todas las estructuras de las siguientes generaciones se obtienen por cruzamiento, siendo necesario emplear otras técnicas menos clásicas.

## 4.6.- Operador mutación.

Una vez finalizado el proceso de cruce empieza el proceso de mutación. La finalidad de la aplicación de este operador, es permitir la variación de la información genética del individuo. Esta alteración de la estructura genética, permite una accesibilidad a todos los puntos del espacio de búsqueda (exploración), facilitando así que no se pierda la diversidad y evitando que se entre en óptimos locales.

El procedimiento clásico de aplicación del operador, consiste en elegir aleatoriamente un punto de la cadena, para luego cambiar el valor del gen por otro que satisfaga las restricciones explícitas del problema.

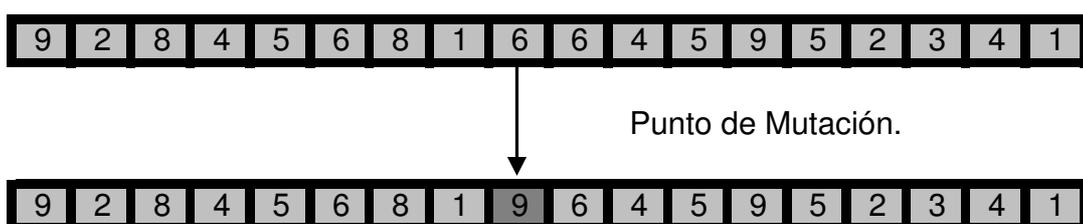


Figura 4.28 Operador mutación.

Existen también otras formas de aplicación como el intercambio de genes, es decir, se intercambia la posición de los genes de dos en dos.

Para no perder el sentido de la búsqueda por la variabilidad excesiva que se puede presentar en las cadenas, se establece inicialmente cierta probabilidad de mutación  $p(m)$ . Esta probabilidad representa el porcentaje de genes que aleatoriamente mutarán a lo largo de todas las generaciones.

## 4.7- Operador inversión.

El operador inversión, consiste en intercambiar dos o más genes de un individuo con la finalidad de crear otro con unas características específicas. La finalidad es explorar campos del espacio de búsqueda no contemplados en la población actual (Islie, 1998; Kyu-Yeul Lee et al., 2003; 2005).

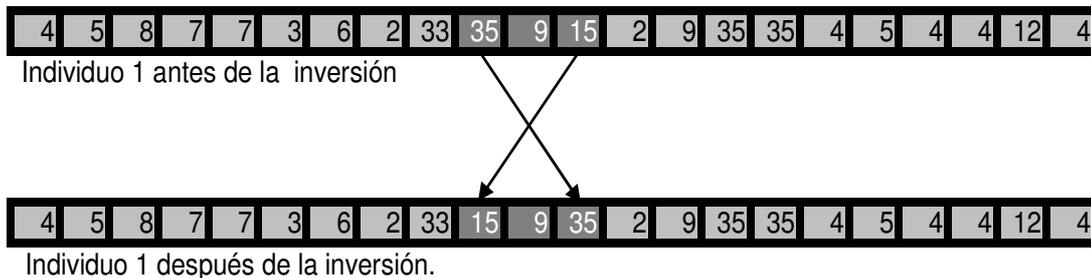


Figura 4.29: Representación del operador inversión.

## 4.8.- Operador clonación.

Como se ha comentado en el apartado operador selección, el mejor individuo permanece para la próxima generación, es decir, un clon asegurará su existencia para el próximo periodo de iteración, hasta que sea sustituido por un individuo mejor. No obstante, existen aplicaciones de este operador como la propuesta de AL-Hakim (2000), que sugiere para el problema de distribución en planta, dos formas de implementación: vertical y horizontal.

E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	H	H	H	H	H	H	K	K	K
E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	H	H	H	H	H	H	K	K	K
E	E	E	E	E	E	E	E	D	D	D	H	H	H	H	H	K	K	K
E	E	E	E	E	E	D	D	D	D	D	H	H	H	H	H	K	K	K
C	C	C	C	C	C	D	D	D	D	D	H	H	G	G	K	K	J	
C	C	C	C	C	C	D	D	D	D	D	G	G	G	G	J	J	J	
C	C	C	C	C	C	D	D	D	D	D	G	G	G	G	J	J	J	
C	C	C	C	C	C	D	D	D	D	D	G	G	G	G	J	J	J	
B	B	B	B	B	B	D	D	D	D	D	G	G	G	G	J	J	J	
B	B	B	B	B	B	L	L	D	D	D	G	G	G	G	I	I	J	
B	B	A	A	A	A	L	L	L	L	L	G	G	G	G	I	I	I	
A	A	A	A	A	A	L	L	L	L	L	G	G	G	G	I	I	I	
A	A	A	A	A	A	L	L	L	F	F	G	G	G	G	I	I	I	
A	A	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	G	I	I	I	

A	B	C	E	D	L	F	G	H	K	J	I	5	5	4	5
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Figura 4.30: Distribución en planta y cromosoma.

A	A	A	A	A	F	F	F	F	F	F	F	F	G	I	I	I	I
A	A	A	A	A	L	L	L	F	F	F	G	G	G	G	I	I	I
A	A	A	A	A	L	L	L	L	L	L	G	G	G	G	I	I	I
B	B	A	A	A	L	L	L	L	L	L	G	G	G	G	I	I	I
B	B	B	B	B	L	L	D	D	D	D	G	G	G	G	I	I	J
B	B	B	B	B	D	D	D	D	D	D	G	G	G	G	J	J	J
C	C	C	C	C	D	D	D	D	D	D	G	G	G	G	J	J	J
C	C	C	C	C	D	D	D	D	D	D	G	G	G	G	J	J	J
C	C	C	C	C	D	D	D	D	D	D	G	G	G	G	J	J	J
C	C	C	C	C	D	D	D	D	D	D	H	H	G	G	K	K	J
E	E	E	E	E	D	D	D	D	D	D	H	H	H	H	K	K	K
E	E	E	E	E	E	E	D	D	D	D	H	H	H	H	K	K	K
E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	H	H	H	H	K	K	K
E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	E	H	H	H	H	H	H	K

E	C	B	A	F	L	D	H	G	I	J	K	5	5	4	5
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Figura 4.31: Distribución y cromosoma clonación vertical.

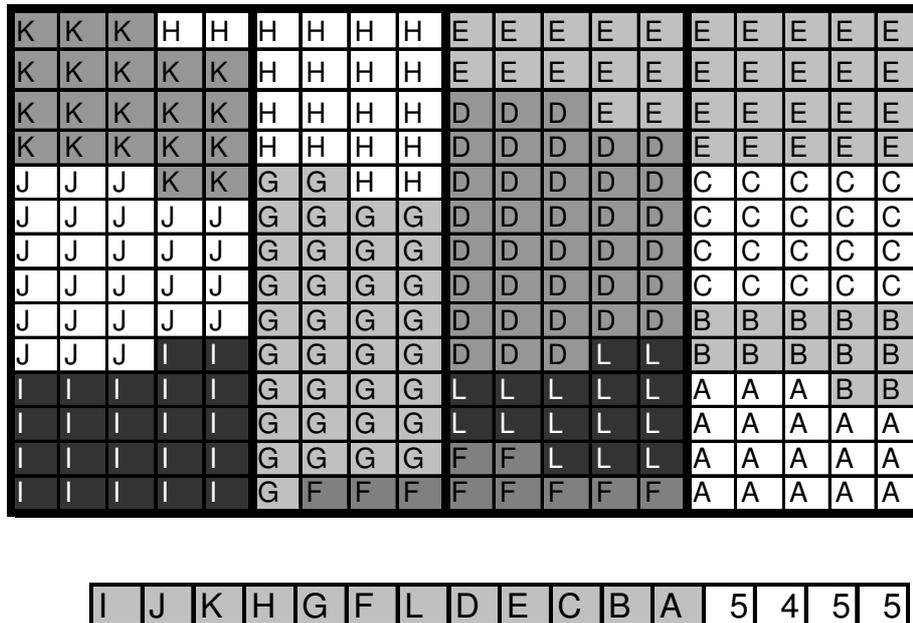


Figura 4.32: Distribución y cromosoma clonación horizontal.

## 4.9.- Penalizaciones y reparación.

Para todas las soluciones procedentes de la aplicación de la función objetivo sometidas a las restricciones, existen diversas soluciones para tratar a los individuos que no las cumplan. Estas técnicas son utilizadas para que aquellas soluciones inviables no sean considerados como individuos de la población (descartadas), o sean reconstruidos por medio de un operador reparador. El operador reparador tiene que ser desarrollado en función de cada problema, es decir, no existe una forma genérica de aplicación, pero tiene la ventaja de hacer las soluciones inviables en viables manteniendo la información presente en estas y preservando buenos esquemas. La penalización se puede realizar en función del grado de violación de las restricciones, y de la generación en la que se encuentre el algoritmo. Dependiendo del grado de violación de las restricciones una mayor penalización puede ser aplicada. La finalidad es disminuir la probabilidad de reproducción y supervivencia.

Joines (1994), Michalewicz (1996), y Carlson (1995), citados por Martorell et al. (2000) y Matías (2003), proponen una diversidad de funciones de penalización para estos individuos, de las que describimos una de las más utilizadas:

$$P(\rho, \Phi, i) = K(g, \rho) \cdot SVG(\Phi, i).$$

Donde:

$P$  y  $\Phi$  son parámetros a fijar.

$K(g, \rho)$  = función que establece la presión ejercida sobre un individuo no viable dependiendo de la generación en la que se encuentre (mayor presión a más generaciones).

$SVG(\Phi, i)$  = suma de todas las restricciones irrespetadas.

## 4.10.- Escalado.

Una vez evaluadas las soluciones o individuos de la población, el algoritmo entra en la etapa de escalado. La finalidad del escalado según Goldberg (1989) es:

- Primero: evitar que en las primeras generaciones aparezcan soluciones muy buenas entre las soluciones medias o malas, lo que llevaría a que en pocas generaciones la población estaría conformada por individuos de muy buena calidad, provocando la posible convergencia prematura del algoritmo.
- Segundo: evitar que se presente, en un determinado momento de la evolución, una situación en la que aunque la población presenta una diversidad significativa, el valor medio de las aptitudes de los individuos está próximo al de los mejores individuos, y por lo tanto las diferencias en las aptitudes necesarias para que existan una mejora desaparecen y el proceso se convierte en una elección al azar entre todos los individuos de la población.

Los problemas que se han descrito, se resuelven realizando un escalado de la función objetivo ya penalizada, lo que lleva a definir una función de aptitud (*fitness*) para la aplicación del operador selección. Esta última función evalúa la aptitud de cada individuo  $i$ , representada por  $\varphi(i)$ , a partir del valor alcanzado por este respecto a la función objetivo, después de la penalización  $\acute{I}(i)$ , según la expresión:

$$\varphi(i) = a \cdot \acute{I}(i) + b$$

Donde:  $a$  y  $b$  son los coeficientes que se calculan para cada generación de tal manera que se verifique:

- Que los valores medios de la evaluación y la función aptitud deben coincidir.
- $\varphi(i)_{\max} = C \cdot \varphi(i)_{\text{med}}$ . Donde  $C$  es un parámetro de control.

Existen otras formas de escalado como lo es el truncado, que utiliza la desviación típica de los valores de la función objetivo, y el escalado potencial, que eleva a la potencia  $n$  cercano a uno, el valor de la función evaluación u objetivo.

También tenemos el desplazamiento, que permite obtener funciones de aptitud cuyo conjunto de imagen sea siempre positivo.

## **4.11.- Aplicación de los operadores genéticos.**

En toda ejecución de un algoritmo genético hay que decidir con qué rango de valores se va a aplicar cada uno de los operadores genéticos (ver apartado 4.20 y capítulo 7). El rango de aplicación de cada operador, estará dada en función del tipo de problema a optimizar. Teniendo en cuenta los efectos de cada operador, estos tendrán que aplicarse con cierta frecuencia o no. En general, la frecuencia con la que se emplean los operadores no varía durante la ejecución del algoritmo, pero hay que tener presente que cada operador es más efectivo en un momento dado de la ejecución. Según los autores Goldberg (1989) y Fogel (1994), en la fase denominada de exploración, el más eficiente es la mutación, que permite indagar otras zonas alejadas del espacio de soluciones; y para que la población converja (explotación), los operadores selección y el cruzamiento son los adecuados.

El operador selección permite aumentar la cantidad de individuos mejor adaptados pero no así la diversidad, mientras que el cruce hace una búsqueda exhaustiva del espacio cercano de soluciones. Hay que tener presente, que un aumento de la probabilidad de aplicación del cruzamiento podría implicar que bloques representativos (ver apartados 4,13; 4.13.3 y 4.20) de buenas soluciones desaparezcan. Pero una alta tasa de aplicación del operador mutación, daría como resultado un incremento de la diversidad que hace aleatoria la búsqueda, pero permitiendo la incorporación de información genética perdida durante el desarrollo del algoritmo.

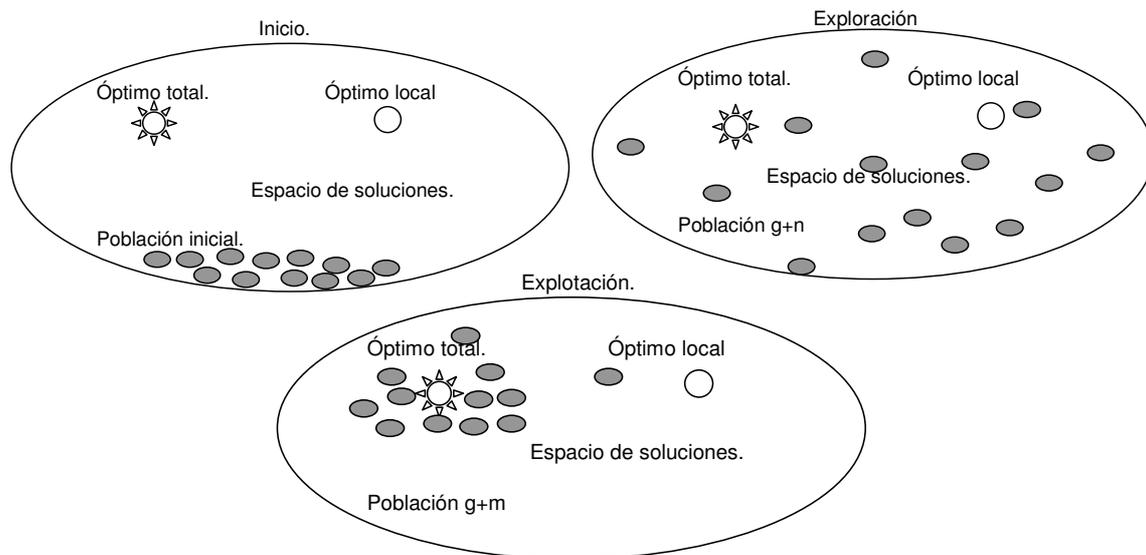


Figura 4.33: Aplicación de los operadores

No obstante existen técnicas adaptativas que aplican estos operadores en una cantidad dependiente de la generación en la que se encuentre el algoritmo, y de la cantidad de individuos presente en esa generación.

## 4.12.- Condición de terminación.

Todo el proceso desarrollado dentro del algoritmo genético se repite hasta que se cumpla con un determinado criterio de terminación. El criterio de terminación especifica las condiciones que se han de cumplir para considerar que el algoritmo ha logrado una solución buena, o ha agotado el número de intentos de búsqueda sin éxito. Existen diversos criterios de terminación entre los cuales está el de Beasley et al. (1993, a, b), el cual consiste en limitar el número de generaciones, de tal forma que el algoritmo termine el proceso una vez alcanzado ese número máximo de generaciones, así no lograra una solución óptima o la lograra en una generación anterior. Otro criterio es la convergencia de la mayor parte de individuos como los utilizados por Kanematsu et al. (1990) y Li, Sheng-Tun et al. (2002).

### 4.12.1.- Criterios de convergencia.

Algunos de los criterios descritos en la literatura para la convergencia son el on-line y off-line (Beasley et al., 1993a). La convergencia on-line consiste en la evaluación iteración tras iteración, del valor medio de la función objetivo para el 95 % de toda la población, comparado con el valor que produce el mejor individuo para esa población. El criterio de convergencia off-line, consiste en la comparación del valor actual del mejor individuo de la población, con el valor promedio del mejor individuo a lo largo de las generaciones. Se dice por lo tanto, que habrá convergencia si estos valores difieren en menos de un cierto infinitésimo.

### 4.13.- Esquemas.

Los algoritmos genéticos no procesan cadenas de caracteres de iteración a iteración, sino lo que procesan en realidad son esquemas (Goldberg, 1989; Beasley et al., 1993a,b). Un algoritmo genético no puede reconocer todos los puntos del espacio de búsqueda, pero puede muestrear un número suficiente de regiones de alta calidad del espacio, donde a un conjunto de sub-cadenas similares en valor y posición se denomina esquemas ( $H$ ).

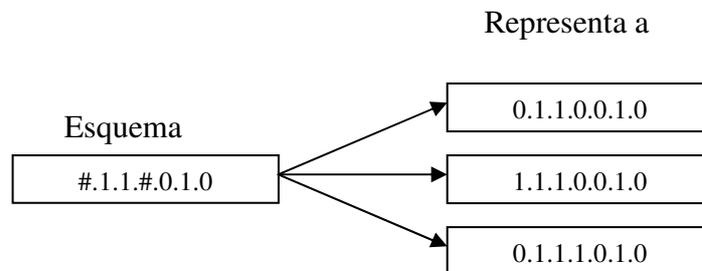


Figura 4.34: Representación de los esquemas.

Un esquema  $H$  es una subcadena constituida por  $k'$  componentes ( $k' \leq k$ ) en la que cada uno se define sobre el conjunto  $\{\theta \cup \#\}$ . El símbolo # representa cualquier elemento del conjunto  $\{\theta\}$ .

$$H = (h_1, h_2, \dots, h_i, \dots, h_k) / \forall h_i, h_i \in \{\theta \cup \#\}$$

Por lo tanto, el tamaño del espacio de los esquemas es:

$$(\theta + 1)^k$$

La longitud de un esquema se denota como  $\delta(H)$  y es la distancia entre la primera y última posición fija del esquema. Como ejemplo, dado el esquema 1.4.5.#.3#.#.#.# el puesto de la última posición es 5 y la primera 1, por lo tanto la longitud es:

$$\delta(H) = 5 - 1 = 4$$

El orden del esquema se denota como  $o(H)$  y es el número de posiciones fijas en el patrón. Del ejemplo anterior el orden del esquema:

$$o(H) = 1.4.5.#.3#.#.#.# \text{ es } 4.$$

Esta noción es útil para calcular la probabilidad de supervivencia del esquema al operador mutación y al operador cruce.

Al número de cromosomas que en una determinada generación son representaciones de un esquema  $H$ , se le denomina  $m(H)$ .

Holland (Goldbert, 89), realizó un estudio de la evolución de los esquemas durante el proceso de los algoritmos genéticos, llegando a los dos resultados teóricos que se detallan:

- El paralelismo implícito de los algoritmos genéticos.
- Teorema de Holland o teorema de esquema (teorema fundamental de los algoritmos genéticos).

### **4.13.1.- Paralelismo implícito.**

De acuerdo a las estimaciones hechas por Mahfourd y Goldberg (1995), mientras que un algoritmo genético procesa  $n$  cadenas para cada generación, en realidad está procesando un número de esquemas del orden del cubo de la población  $O(n^3)$ , es decir,

el algoritmo realiza un estudio de varios esquemas en paralelo en función de  $n^3$ . Este proceso es conocido como paralelismo implícito.

#### 4.13.1.1.- Algoritmos genéticos, métodos paralelos.

Considerando esta característica del paralelismo implícito, los algoritmos genéticos no requieren un esfuerzo adicional para construir un marco computacional en paralelo. Por lo tanto, esta característica puede ser explotada completamente para ganar la eficiencia y velocidad requeridas.

Hay un gran número de técnicas basadas en métodos paralelos para mejorar la velocidad y eficiencia de los algoritmos genéticos. Entre los métodos de paralelización que podemos mencionar está la migración (Man et al., 2000). El método migración, consiste en crear sub poblaciones que son tratadas de forma independiente por el algoritmo, para de esta manera realizar un estudio de los diferentes grupos próximos a los posibles óptimos y permitir la acotación del problema a estos óptimos. Pero cada cierto número de generaciones se intercambia información (migración) entre estas sub poblaciones, permitiendo con esto la diversidad genética. Esta estrategia de migración, junto con la selección artificial, fueron utilizadas por Giddens y Yadav (1994) para simular fenómenos macroevolutivos o evolución a nivel de especies independientes.

#### 4.13.2.- Teorema fundamental de los algoritmos genéticos o teorema de Holland.

Este teorema se refiere al número de estructuras representativas que existirán o sobrevivirán en la generación siguiente, una vez empleados los operadores genéticos descritos anteriormente, (Holland, 1975) citado por (Goldberg, 1989).

##### Operador selección.

$$m(H, t + 1)_s = m(H, t) \frac{f(H, t)}{\overline{f_m}}$$

Donde:

$m(H, t + 1)_s$  = número de cadenas representativas del esquema  $H$  que formarán parte del grupo de reproductores seleccionados en  $t$  para formar la generación  $t + 1$ .

$m(H, t)$  = número de cadenas representativas del esquema  $H$  en la generación  $t$ .

$f(H,t)$  = calidad media de todas las cadenas representadas por el esquema  $H$ , en ese instante.

$f_m$  = calidad media de toda la población y se representa como:  $f_m = \sum f_i/n$ .

### Operador cruzamiento.

$$P_{Sc}(H) = \left\{ 1 - \frac{P_c \cdot [\delta(H)]}{(\xi - 1)} \right\}$$

Donde:

$P_{Sc}(H)$  = probabilidad que el esquema sobreviva después de la aplicación del operador cruzamiento, en la generación  $t + 1$ .

$\delta(H)$  = longitud del esquema  $H$ .

$\xi$  = longitud de las cadenas utilizadas para codificar los individuos del problema.

$P_c$  = probabilidad de cruzamiento.

### Operador Mutación.

$$m(H,t + 1)_m = (1 - p_m)^{o(H)}$$

Donde:

$m(H,t + 1)_m$  = número de cadenas representativas del esquema  $H$  que sobrevivirán a la mutación. Debido a que cada mutación es estadísticamente independiente, un esquema sobrevive cuando cada una de sus posiciones fijas sobrevive, es decir, es menester que en ninguno de los elementos que le componen se de la mutación.

$o(H)$  = orden del esquema  $H$ .

$p_m$  = probabilidad de que los elementos del esquema no varíen. Y para valores de  $p_m$  muy pequeños la expresión se simplifica:

$$m(H,t + 1)_m = 1 - p_m \cdot o(H)$$

Por lo tanto, la cantidad de cadenas representativas de un esquema, una vez empleados los operadores básicos de forma conjunta se representa por:

$$m(H,t + 1) \geq \frac{m(H,t) \cdot [f(H,t)]}{f_m} \cdot \left\{ 1 - \frac{P_c \cdot [\delta(H)] - P_m \cdot o(H)}{(\xi - 1)} \right\}$$

### **4.13.3.- Bloques.**

Goldberg (1989) enuncia que: un algoritmo genético presenta un comportamiento de búsqueda casi-óptimo a través de la yuxtaposición de esquemas que presentan buen comportamiento y tienen orden bajo y longitud definida pequeña. Dichos esquemas reciben el nombre de bloques. Por lo tanto, los bloques representan esquemas de longitud corta y bajo orden que aumentan la calidad de cualquier individuo del que forman parte.

Un criterio de codificación, será aquel que forme bloques que representen buenas cadenas. Sin embargo, dependiendo de la naturaleza de la función objetivo y del tipo de codificación empleado, puede darse el caso de que a partir de bloques de buena calidad se generen soluciones de mala calidad. Según Contero (1995), este tipo de función objetivo se denomina función objetivo defectuosa.

### **4.14.- Desarrollo de especies y coevolución.**

En la mayoría de las aplicaciones de los algoritmos genéticos, se obliga a todos los individuos, o soluciones de un problema de optimización, a evolucionar dentro de una población. Una forma eficiente para acelerar el rendimiento de un algoritmo genético, es construir uno que genere especies (Pazos, 1996). Las especies o sub poblaciones son creadas de forma automática cuando el algoritmo identifica que dos áreas o más del espacio de búsqueda están siendo exploradas. Para determinar cuándo una población está lo bastante diversificada como para identificarla como especie en un problema de distribución en planta, se emplea la técnica de los clúster (Santamarina, 1995; Dunker et al., 2003) o cuando estos individuos pasan un determinado límite donde se les pueda clasificar como especie aparte.

La ventaja de esto con respecto a una aplicación tradicional, radica en que el primero permite que sean exploradas áreas significativamente diferentes. También permite que cada especie converja más rápidamente para dar una temprana indicación de áreas de posibles buenas soluciones.

Dunker y colaboradores (Dunker et al., 2003), proponen un algoritmo, comentado en el capítulo 3, basado en la teoría de la coevolución o evolución concertada. Los procesos coevolutivos son el resultado de las relaciones bióticas entre especies distintas a lo largo de las generaciones, es decir, son el producto evolutivo de las interacciones vitales entre especies no emparentadas, por lo cual unas dependen en gran medida de las otras para evolucionar. Cuando una especie ocupa un entorno, automáticamente está condicionada por una serie de factores abióticos (ajenos a la vida) y bióticos (relacionados con la vida).

Los abióticos, como por ejemplo el clima, influyen en esas especies y le fuerzan a adaptarse a esos factores para asegurar la supervivencia. Los bióticos, como los de competición, caza, de grupo, etc., están fijados por las relaciones que la especie mantiene con otras. Como se ha observado en el trabajo de Dunker et al. (2003) para distribuciones en planta, los autores, en función de criterios de agrupamiento, desarrolla diferentes especies que interactúan (bióticos), a su vez el ambiente donde se desenvuelven es cambiante (abióticos).

## 4.15.- Hibridación de los algoritmos genéticos.

Según Rahmat-Samill y Michielssen (1999), definimos hibridación algorítmica, como la combinación de dos algoritmos de comportamiento distinto para que cada uno aporte sus ventajas al proceso de búsqueda. Un algoritmo genético híbrido será, por lo tanto, la combinación de un algoritmo genético con otro para realizar una búsqueda más eficiente en el espacio soluciones.

Una búsqueda eficiente en el espacio de soluciones, puede implicar la incorporación del conocimiento específico del problema a resolver. Esta incorporación del conocimiento del problema, puede llevarse a cabo de forma directa dentro del mismo algoritmo genético, como por ejemplo, emplear una codificación cuyos genes definan todos los parámetros del problema o por hibridación. Por hibridación se entiende, la aplicación de un algoritmo no perteneciente a la estructura interna del algoritmo genético, para mejorar en calidad y tiempo la búsqueda local.

Las hibridaciones más comunes son aplicación de métodos explotatorios, como lo pueden ser: la agregación simulada y el método del pseudogradiante (Lim et al., 2000). Otras hibridaciones entre los algoritmos genéticos y las metaheurísticas de búsqueda que podemos mencionar son:

- Algoritmos genético y búsqueda tabú. (Glover, 1995; Li Sheng-Tun et al., 2002).
- Algoritmo genético y simulated annealing (Mahfound y Goldberg, 1995).
- Algoritmo genético y simulación Monte Carlo (Marseguerra y Zio, 2000; Marseguerra et al., 2002).

Además tenemos también:

- Algoritmos genéticos con lógica difusa. (Lagholz y Kandel, 1994).
- Algoritmo genético con PLS (Partial Local Search) y FLS (Full Local Search)(Lim et al., 2000).

En resumen el algoritmo genético puro presenta carencias en los métodos de búsqueda local, pero con la aplicación de otro el algoritmo manifestará un mejor comportamiento, es decir, la utilización conjunta compensará las deficiencias que poseen los algoritmos en solitario.

## **4.16.- Otras metodologías de optimización.**

Como se ha comentado en los capítulos 2 y 3, existen otras metodologías para la optimización, entre las que podemos mencionar:

- La búsqueda tabú (Tabu Search).
- Simulated annealing.
- Simulación Monte Carlo.
- Redes neuronales.

### **4.16.1.- La búsqueda tabú.**

La búsqueda tabú, tiene sus orígenes en la década de los años setenta, siendo presentada por primera vez por Glover (1986) y mejorada después por el mismo autor en el año 1989 (Glover, 1989, a,b).

Esta técnica consiste en otra metodología de optimización metaheurística, que al igual que los algoritmos genéticos, guía un procedimiento de búsqueda local para explorar todo el espacio más allá de los óptimos locales. Se fundamenta, en la explotación de diversas estrategias inteligentes para la resolución de problemas basados en procedimientos de aprendizaje (Machado et al., 2001).

El procedimiento es el siguiente: en cada iteración, el algoritmo debe realizar una elección apropiada del camino a seguir para lograr la mejor solución. Para realizar el proceso de elección, el algoritmo debe basarse en el conocimiento adquirido a lo largo del proceso, es decir, debe analizar en cada momento las diferentes alternativas existentes con relación a los pasos dados anteriormente en el espacio de búsqueda. Por lo tanto, este algoritmo se dota de una memoria donde se almacenan los últimos movimientos realizados y que puede ser utilizada para recordar aquellos que hacen caer de nuevo en soluciones ya exploradas. Este algoritmo considera ciertos movimientos "tabú", de forma que no puedan ser aceptados durante un cierto tiempo o un cierto número de iteraciones. Si este algoritmo no aplicara su memoria y no recordara los

puntos por los que ha pasado, quedaría atrapado en un ciclo cerrado. La memoria utilizada por el algoritmo se puede dividir en (Glover, 1989,a,b):

- **Memoria a corto plazo:** La estrategia para rechazar soluciones en el algoritmo, en su forma más simple, se denomina memoria a corto plazo, debido a que la búsqueda que se realiza es local, utilizando para ello la memoria y los movimientos prohibidos en la lista tabú. Para problemas más complejos se pueden considerar estrategias de memorias a plazos más largos como los que se comentarán a continuación.
- **La memoria a medio plazo:** tiene como objetivo registrar los atributos más comunes de un conjunto de soluciones seleccionadas durante un cierto período de búsqueda, que tengan más probabilidades de llevar hacia mejores zonas para explorar de forma intensa. El proceso de intensificación conserva y compara los mejores atributos durante un determinado intervalo de iteraciones, imponiendo restricciones al problema que centralicen el proceso de búsqueda en determinadas áreas del espacio. Es importante aclarar que la finalidad de almacenar atributos es darle más eficiencia al algoritmo que la que se obtiene con todo el conjunto de soluciones. Esta generalización puede perder cierta información, haciendo que soluciones no visitadas pero con atributos iguales que las visitadas sean incluidas en la lista tabú. Para minimizar este problema se emplean los criterios de aspiración que permiten, en determinados casos, sacar de la lista tabú a una solución para incluirlas en las aceptadas.
- **La memoria a largo plazo:** diversifica la búsqueda sobre regiones poco exploradas del espacio para evitar la caída en óptimos locales. Una forma clásica de diversificación consiste en reiniciar periódicamente la búsqueda desde puntos elegidos aleatoriamente. Un método más acorde con el algoritmo propone registrar los atributos de los movimientos más utilizados penalizándolos a través de una lista tabú a largo plazo, es decir, se penalizan aquellos atributos que se han dado con frecuencia en las mejores soluciones y se permite la aparición de aquellos pocos explorados.

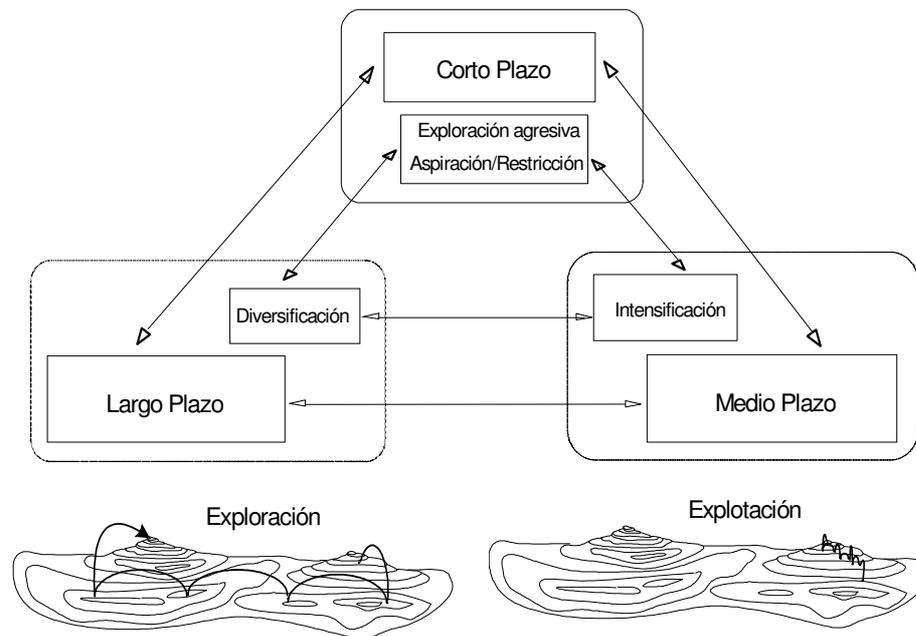


Figura 4.35: Relación entre los diferentes tipos del memoria.

#### 4.16.1.1.- Elementos básicos.

Los elementos básicos de la búsqueda tabú se describen a continuación (Glover, 1989, a,b):

- **Selección de una solución inicial  $X_0$ .** Un factor muy importante a tener en cuenta es la posible influencia que tenga la calidad de una posible solución para comenzar la búsqueda. Con una solución inicial buena, generada de forma algorítmica, es posible evolucionar, a corto plazo, hacia soluciones mejores, pero también podría perjudicar si esta dirige la búsqueda hacia regiones de soluciones menos eficientes.
- **Elección del entorno  $V(x_0)$ .** Para evolucionar hacia otras soluciones, el algoritmo de búsqueda tabú selecciona éstas de un entorno de soluciones. Hay que definir, por tanto, un concepto de solución próxima de  $x_0$  para proceder a seleccionar una nueva solución dentro de dicho entorno. Lo más habitual es la selección completa ( $V(x_a)$ -{lista tabú}), evaluando cada una de las soluciones y quedándose con la mejor que no sea tabú.
- **Elección del tamaño de la lista tabú ( $L$ ).** se toman valores dependientes del tamaño del problema a optimizar. La buena determinación de este parámetro del algoritmo se ejecuta a través de la observación de la calidad de las soluciones y de los comportamientos cíclicos. Un tamaño demasiado pequeño producirá una

búsqueda intensiva en un espacio pequeño de soluciones, y muy grande implicará la búsqueda en bastas regiones del espacio debido al mayor número de movimientos prohibidos. En cualquier caso, constituye un parámetro importante cuya influencia dependerá de la evolución del algoritmo, es decir, podrá ser variable para adaptarse a determinados intervalos del proceso de búsqueda.

- **Elección de los atributos para almacenar en la lista tabú.** Almacenar la descripción completa de las últimas soluciones exploradas, y comprobar si cada movimiento se encuentra en la lista, puede ocupar mucho tiempo. Como alternativa se puede almacenar un atributo representativo del movimiento. Los atributos que se consideren, así como la forma de almacenarlos, dependerán en cierta medida del problema a resolver.
- **Nivel de Aspiración.** Si todos los movimientos de la lista tabú se restringen, se evita entrar en ciclos, pero se pueden perder movimientos que acerquen a mejores soluciones. Por lo tanto, el nivel de aspiración supone un criterio para aceptar soluciones que están incluidas en la lista tabú. El procedimiento consiste en determinar cuándo puedan ser reemplazada la lista tabú, eliminando así una clasificación tabú aplicada a un movimiento determinado. Una base para uno de estos niveles aparece introduciendo en concepto de influencia, que mide el grado de cambio inducido en la estructura de la solución. Se distinguen aspiraciones que revocan la clasificación tabú de un determinado movimiento, y aspiraciones de atributo que revocan el estado tabú de un atributo.
- **Criterio de finalización.** Se puede establecer un número máximo de iteraciones, o un número máximo de pasos como se ha planteado con los algoritmos genéticos.

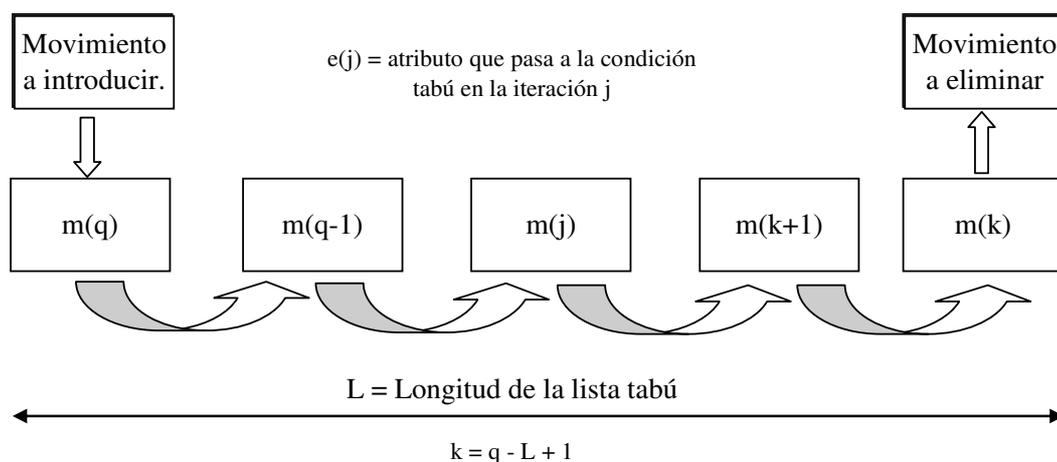


Figura 4.36: Actualización de la lista tabú.

La figura 4.36 muestra la estructura de la lista tabú, que representa una forma de almacenamiento de los movimientos más recientes y por lo general está asociada a la memoria a corto plazo, donde cada iteración ( $j$ ), es actualizada para incluir un nuevo atributo  $m$ . La longitud de la lista ( $L$ ) es limitada, por lo tanto, cada cierto número de iteraciones, por lo general igual a  $L$ , esta debe rechazar de ella a un determinado movimiento para incluir otro y actualizar así la lista.

#### **4.16.2.- Simulated annealing (recocido simulado)**

Esta técnica se basa en las ideas publicadas por Metropolis et al. (1953), que consisten en simular el proceso que sufre un material sólido cuando es introducido en un líquido a altas temperaturas hasta conseguir la fundición de éste, y luego es dejado enfriar lentamente hasta la fase sólida nuevamente. Cuando un sólido es calentado hasta llevarlo a fase líquida y luego es enfriado para llevarlo a sólido, sus características estructurales dependerán de la velocidad de enfriamiento. La velocidad de enfriamiento influye en la formación de las estructuras reticulares de la cementita y perlita en aceros al carbono.

Más tarde, Kirkpatrick y colaboradores (Kirkpatrick, et al. 1983), propusieron que este tipo de simulación podría utilizarse para resolver problemas de optimización. Esta metodología al igual que la descrita anteriormente es secuencial, es decir, en cada iteración se obtiene una solución a partir de una anterior, repitiéndose el proceso hasta que se satisfaga una condición de terminación. Por lo tanto, la similitud con los algoritmos genéticos radica en que ambas técnicas son algoritmos evolutivos. La simulated annealing utiliza un proceso de evolución termodinámica para buscar un estado de mínima energía, mientras que los algoritmos genéticos como se ha observado, parten del principio Darwiniano.

El proceso empleado por esta metodología es el siguiente: como punto de partida se tiene la solución  $z$ . Luego de forma aleatoria elegimos una solución cualquiera perteneciente al conjunto  $\mathbf{z} \in V(z)$ , conjunto obtenido de la solución  $z$ . La nueva solución  $\mathbf{z}$  es aceptada como la nueva solución siempre y cuando sea mejor que  $z$ . Pero no obstante si  $\mathbf{z}$  es peor que  $z$ , existe cierta probabilidad de ser aceptada como solución actual. Esta probabilidad de elegir una solución inferior depende del valor objetivo de  $\mathbf{z}$ , como de un parámetro  $t$ , denominado temperatura (Alcaraz, 2001; Kathryn y Belardimino, 2003). En las primeras etapas del proceso la temperatura es alta y por lo tanto esta probabilidad también lo es. Esto implica que el algoritmo se encuentra en una etapa de exploración del campo de soluciones. En las etapas finales donde la temperatura es baja, se sustituye la exploración por la explotación. En resumen, cuando

disminuye la temperatura disminuye la probabilidad de elegir soluciones que representan mayores estados de energía.

Por lo dicho anteriormente se infiere, que la elección del parámetro de temperatura es crítico en el comportamiento del algoritmo, donde se debe fijar su valor inicial como su velocidad de enfriamiento. La velocidad de enfriamiento influye en la eficiencia del algoritmo. Si se selecciona una velocidad de enfriamiento extremadamente rápida el algoritmo correrá el riesgo de entrar en un óptimo local. Lo contrario hará que el algoritmo sea extremadamente lento informáticamente hablando.

Cómo ejemplo, en los problemas de optimización de la implantación, la energía del sistema representa el coste relacional de planta, y la configuración del sistema representa la distribución en sí. La temperatura es un parámetro que es utilizado para dirigir el proceso de optimización y varía a lo largo del proceso.

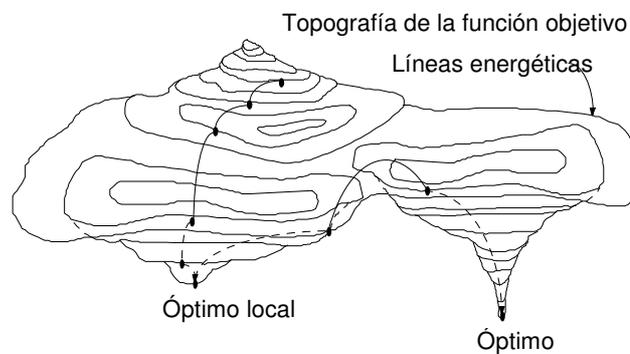


Figura 4.37: Proceso de búsqueda en la topología de la función objetivo.

#### 4.16.2.1.- Símil termodinámico.

Según Kirkpatrick et al. (1983), hay una relación entre la mecánica estadística que estudia el comportamiento de los sistemas con muchos grados de libertad en equilibrio termodinámico y los problemas de optimización.

La mecánica estadística es la base fundamental de la física de la materia condensada. La física de la materia condensada, estudia el elevado número de átomos que conforman una pequeña cantidad de materia. Un aspecto de la mecánica estadística es el estudio del comportamiento de los sistemas a muy bajas temperaturas.

Cada configuración de un sistema (materia) está definida por un conjunto de posiciones de los átomos  $\{r_i\}$ , ponderada por un factor de probabilidad de Boltzmann:

$$P\{r_i\} = \frac{e^{-\frac{E(\{r_i\})}{K_B \cdot T}}}{\sum_{\forall i} e^{-\frac{E(\{r_i\})}{K_B \cdot T}}}$$

Donde:

T = temperatura.

$E(\{r_i\})$  = energía de la configuración.

$K_B$  = constante de Boltzmann.

Metropolis y colaboradores en 1953 (Metropolis et al., 1953), propusieron una metodología para estudiar las propiedades de una sustancia. Empleando la simulación Monte Carlo en su estudio, consideró una sustancia compuesta por un número finito y determinado de moléculas **M**. Analizando las variaciones energéticas de las nuevas configuraciones atómicas, forzaba la evolución del sistema hacia estados de equilibrio termodinámico o estados de mínima energía en los que se cumplía la ley de Boltzmann. Por lo tanto, se lograba la evolución de un sistema hacia los estados de equilibrio al fijar como criterio para la aceptación de las nuevas soluciones, si la energía era menor con una probabilidad representada en la siguiente expresión:

$$e^{-\frac{\Delta E}{kT}}$$

Donde:

$\Delta E$  = variación de la energía (energía inicial - final).

K = constante de Boltzmann

T = temperatura.

Dado un estado  $i$  con energía  $E_i$ ,  
 genera un nuevo estado  $j$  mediante un mecanismo de perturbación  
 (pequeña distorsión del estado  $i$ ).  
 calcula la energía del nuevo estado  $E_j$ .  
 si  $(E_j - E_i) \leq 0$   
 entonces acepta el estado  $j$  como estado nuevo  
 sino, acepta el estado con probabilidad:  $\exp\left(\frac{E_i - E_j}{k_B \cdot T}\right)$

Figura 4.38: Algoritmo Metropolis

Como se ha descrito anteriormente, partiendo de una temperatura elevada y haciendo disminuir ésta a lo largo del procedimiento, obligaba al sistema a alcanzar los diferentes estados de equilibrio en cada una de las temperaturas por las que va pasando, hasta conseguir la congelación total del sistema.

Observando la figura 4.39, el algoritmo realiza una serie de iteraciones a partir de una temperatura inicial, previamente fijada. En cada escalón se realizan varias iteraciones hasta que se verifica el criterio de equilibrio termodinámico, y así sucesivamente, hasta cumplir con el criterio de terminación o congelación. Este punto de congelación representa la solución al problema de optimización.

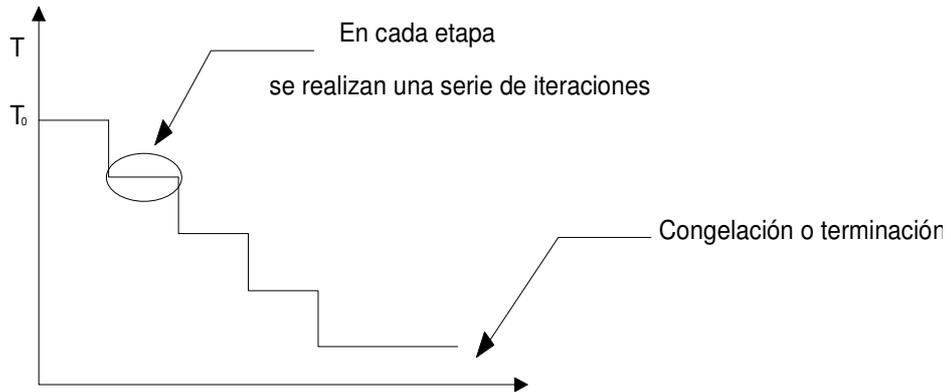


Figura 4.39: Evolución del algoritmo Simulated Annealing.

La temperatura de un determinado escalón se define en función de la temperatura que existía en el escalón anterior. Ver expresión a continuación:

$$T_{M+1} = f(T_M)$$

#### 4.16.2.1.1.- Determinación de la temperatura inicial.

La temperatura inicial  $T_0$  según Kirkpatrick et al. (1983), puede determinarse de forma empírica al comenzar por aquella temperatura en la que el ratio  $\chi$  sea superior a un determinado porcentaje de aceptación de soluciones previamente establecido.

$$\chi = \frac{\text{soluciones evaluadas}}{\text{soluciones aprobadas}}$$

Kouvelis en el año 1992 (Kouvelis, 1992), propone una expresión que calcula el incremento del coste medio de una serie de transacciones, fijando de antemano el valor  $x_0$  para determinar la temperatura inicial por medio de la expresión:

$$T_0 = \frac{\overline{\Delta C}^{(+)}}{\ln(\chi_0^{-1})}$$

#### 4.16.2.1.2.- Criterio de terminación.

La condición de parada o terminación del proceso de optimización, se puede establecer de las siguientes formas:

- Fijando un número determinado de valores de temperaturas  $T$ .
- Estableciendo como condición que la solución debe ser mejor en cada escalón de temperatura.
- Establecimiento un margen o rango mínimo de aceptación, que pare el proceso en caso de no alcanzarse la solución óptima.

#### 4.16.2.2.- Estructura de un algoritmo de simulated annealing.

Los parámetros se pueden dividir en específicos y genéricos (Mavridou y Pardalos, 1997):

- Parámetros específicos:
  - Espacio de soluciones ( $z$ ).
  - Una función objetivo o coste.
  - Un mecanismo de generación que permita el movimiento de una solución a otra.
- Parámetros genéricos:
  - Temperatura inicial.
  - Velocidad de enfriamiento.
  - Criterio de terminación.
  - Criterio de equilibrio.

### 4.16.2.3.- Implementación del algoritmo.

La aplicación de un algoritmo de recocido simulado, consiste en una transformación continua de la configuración actual en alguna de sus configuraciones próximas. Este procedimiento se puede aplicar matemáticamente con cadenas de Markov, es decir, el algoritmo de recocido simulado puede ser modelado matemáticamente usando cadenas de Markov, que representan la condición de equilibrio termodinámico en cada estado, y cuyo parámetro de control es la temperatura. Se dice que el algoritmo cumple con la condición de equilibrio para una determinada temperatura, cuando la cadena alcanza la longitud establecida para esa temperatura. Una cadena de Markov es una secuencia de eventos, donde la probabilidad del resultado de un evento depende sólo del resultado del evento anterior.

La convergencia asintótica de este algoritmo es aproximada, es decir, el algoritmo es asintóticamente una metodología de optimización y cualquier aplicación del mismo resulta aproximada. Como prueba a esta afirmación, el número de iteraciones en cada escalón de temperatura (ver figura 4.39) sólo puede ser finito, es decir, un número finito de valores de  $T$ . Por lo tanto, la implementación del algoritmo puede aplicarse como una secuencia de cadenas de Markov de longitud finita. La longitud de la cadena determinará el número de iteraciones en cada temperatura. Debido a estas aproximaciones, no se puede garantizar que el algoritmo converja al mínimo global con probabilidad 1, es decir, el número de transiciones en cada escalón de temperatura sólo puede ser finito bajo la siguiente condición:

$$\lim_{k \rightarrow \infty} T_k = 0$$

La determinación de la longitud de la cadena  $l_n$  (la  $n$ -ésima cadena de Markov) se puede hacer eligiendo un valor dependiente del tamaño del problema, como es el caso de Kirkpatrick et al. (1983) que proponen  $\bar{L} = n$ , siendo  $n$  el número de incógnitas del problema.

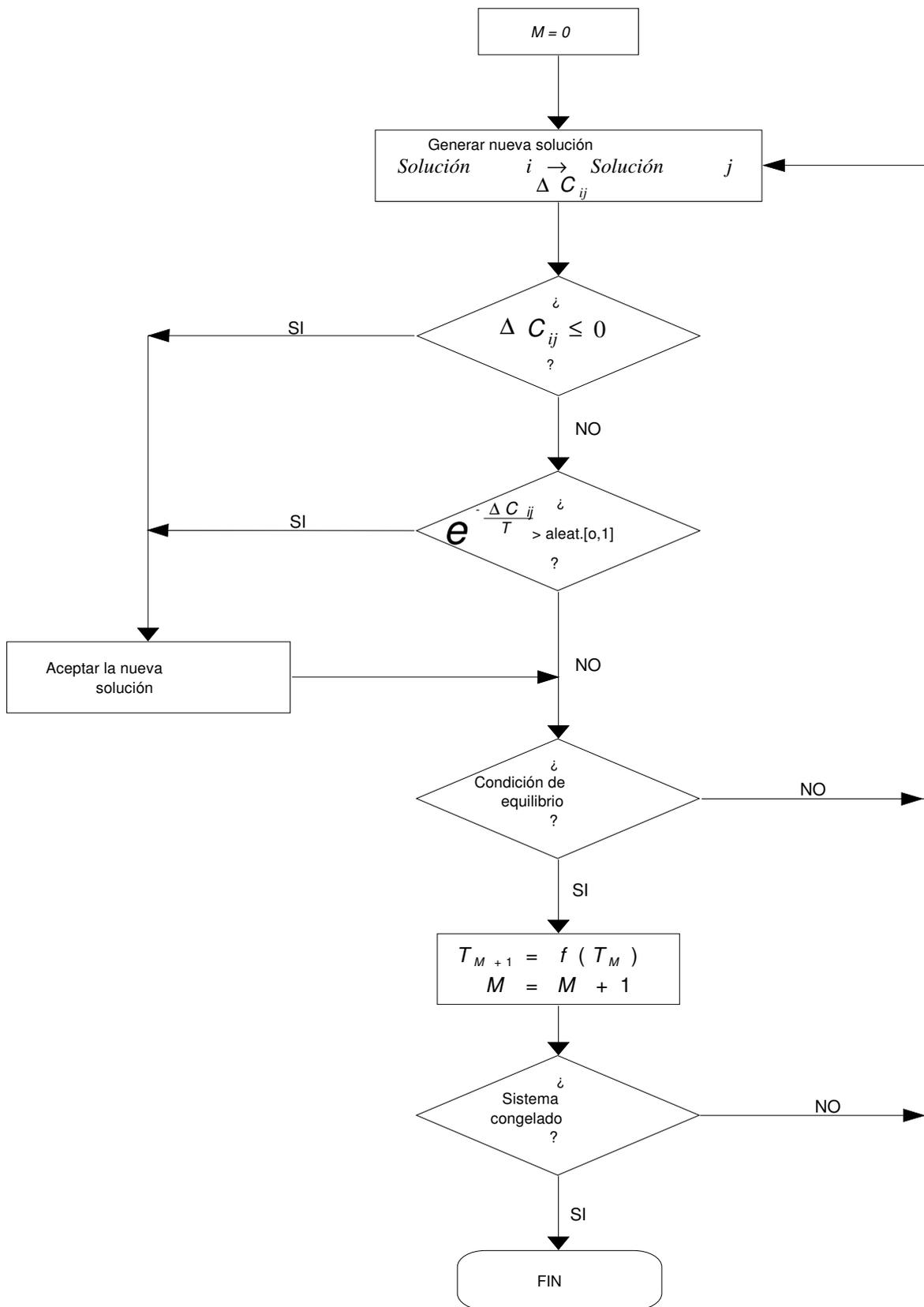


Figura 4.40: Aplicación de un recocido simulado a un problema de optimización.

Una vez lograda la condición de equilibrio, se debe hacer evolucionar la temperatura a estados de mínima energía empleando para ello un grado de enfriamiento  $\alpha$ . A continuación una expresión lineal y otra potencial para el enfriamiento:

$$T_M = \alpha \cdot T_{M-1}$$

$$T_M = \alpha^M T_0$$

Donde  $\alpha$  puede variar entre 0,4-0,99.

### 4.16.3.- Simulación Monte Carlo.

La simulación Monte Carlo es un método numérico que permite resolver procesos de naturaleza matemática o física, usando modelos probabilísticos que representan las variables aleatorias del sistema (Creus, 1991; Gallardo, 2004).

Esta metodología tiene sus orígenes en el desarrollo de la bomba atómica, que incluía un estudio del comportamiento estocástico de la difusión de neutrones (Carrasco y Sanchis 2000). El nombre Monte Carlo proviene de un casino cuyo nombre lo utilizaron los científicos nucleares como contraseña para el trabajo secreto realizado en los Álamos. Es tradicionalmente utilizado en los siguientes tipos de problemas:

- Simulación de sistemas con comportamientos estocásticos (incertidumbre en componentes mecánicos).
- Para obtener valores promedios, integración de funciones o resolución de ecuaciones diferenciales.
- Y generalmente problemas de simulación de sistemas donde no se conocen las condiciones de contorno. Por ejemplo, la evolución del tráfico en una ciudad, depende de un gran número de variables de difícil control y de las que sólo se dispone de valores estadísticos.

El método de Monte Carlo consiste en tomar una solución válida, provocar una pequeña variación aleatoria y, si la nueva configuración es mejor que la anterior y cumple las restricciones el algoritmo se queda con la nueva, si no, se queda con la anterior. El procedimiento es el siguiente: a través de técnicas de muestreo como la definición y aplicación de variables aleatorias  $\alpha$  y funciones de densidad de probabilidad  $f(\alpha)$ , para cada serie de cálculo, se considera la equivalencia de la realización de una jugada con su correspondiente puntuación  $\alpha$ . Este juego que se

realiza, está proyectado de tal forma que el valor esperado de la puntuación es aquella cantidad tanto numérica o física deseada por el jugador. Por lo tanto, el juego se ejecuta tantas veces  $N$  y de acuerdo con un teorema de límite central, la puntuación media se aproxima al número esperado que es una variable aleatoria  $X$ , llamada estimador y cuyo valor medio se estima de los valores obtenidos en cada jugada (Creus, 1991).

El mayor inconveniente de esta metodología radica en su naturaleza aleatoria, lo cual hace que los resultados estén afectados por incertidumbres estadísticas, con la consiguiente necesidad de aumentar el número de juegos y el tiempo de cómputo.

#### 4.16.4.- Redes neuronales.

Las redes neuronales, son una metodología de resolución de problemas basado en un modelo informático que representa las conexiones de las neuronas del cerebro. Una red neuronal consiste en capas de unidades procesadoras llamadas nodos, unidas por conexiones direccionales formadas por varias capas: una capa de entrada, una capa de salida y cero o más capas ocultas intermedias. Si se presenta un patrón inicial en la capa de entrada, los nodos se estimulan y transmiten una señal a los nodos de la siguiente capa a la que están conectados. Si la suma de todas las entradas que penetran en una de estas neuronas virtuales es mayor que el umbral de activación de la neurona, esta se activa y transmite su propia señal a las neuronas de la siguiente capa. El patrón de activación, por tanto, se propaga hacia delante hasta que alcanza a la capa de salida donde es devuelto como solución a la entrada presentada. Al igual que en el sistema nervioso de los organismos biológicos, las redes neuronales aprenden y afinan su rendimiento a lo largo del tiempo, mediante la repetición de rondas en las que se ajustan sus umbrales, hasta que la salida real coincide con la salida deseada para cualquier entrada dada. Este proceso puede ser supervisado por un experimentador humano, o puede correr automáticamente utilizando un algoritmo de aprendizaje, Mitchell (1996) citado por Marczyk (2004). Se han utilizado algoritmos genéticos para construir y entrenar a redes neuronales (Freeman, 1994; Pasoz, 1996). Por ejemplo, la función que representa la entrada y salida vendría siendo la función objetivo del problema.

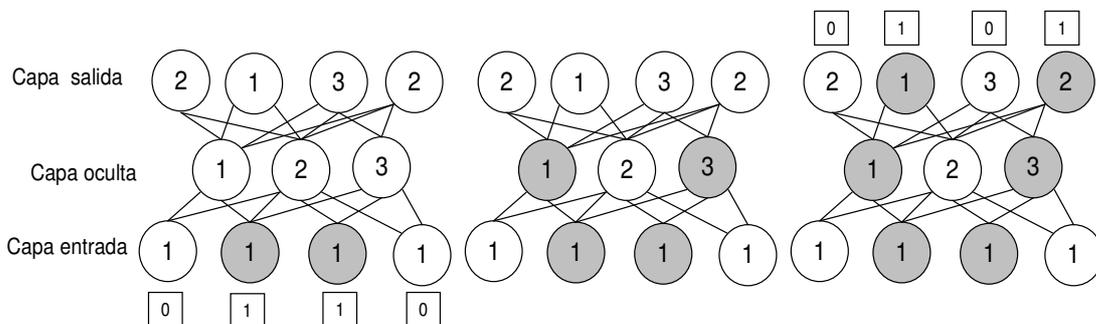


Figura 4.41: Representación de redes neuronales

En la figura (4.41) se observa una red neuronal sencilla, con una capa de entrada que consiste de cuatro neuronas, una capa oculta consistente en tres y una capa de salida con cuatro neuronas. El número de cada neurona representa su umbral de activación y sólo se excitará si recibe al menos esa cantidad de entradas.

## 4.17.- Por qué utilizar los algoritmos genéticos.

Unas de las principales diferencias entre los algoritmos genéticos y otros algoritmos secuenciales como la búsqueda tabú, simulated annealing y la simulación Monte Carlo, es que los primeros manejan, en cada iteración, un conjunto de soluciones, mientras que los últimos, una única solución. Esto se resume al hecho que las otras metodologías de optimización utilizan para el proceso de búsqueda una solución inicial, que van mejorando en sucesivas etapas del proceso, es decir, en cada etapa se modifica la última solución y se determina si esta es aceptada o no para continuar con el proceso de búsqueda. Por lo tanto, la solución última está condicionada por la solución inicial, siendo necesario repetir el proceso iterativo varias veces para eliminar así el determinismo implícito de estas metodologías (Goldberg 1989). La aplicación de un conjunto de soluciones en los algoritmos genéticos, permiten que el proceso se desarrolle de forma *probabilística*, eliminando, por lo tanto, el determinismo en la búsqueda de una solución. Adicionalmente, las metodologías tradicionales necesitan de gran cantidad de información como gradientes o derivadas de ciertas funciones, para evitar la caída en óptimos locales.

Otra razón para utilizar los algoritmos genéticos como metodología de optimización, es su habilidad para manipular muchos parámetros simultáneamente (Konak et al., 2006). Como se ha observado en los capítulos anteriores (2 y 3), muchos problemas de optimización no pueden definirse en términos de un único valor que hay que minimizar o maximizar, sino que deben expresarse en términos de múltiples objetivos (optimización combinatorial). Los algoritmos genéticos son muy buenos resolviendo estos problemas, en particular, si se emplea el paralelismo que les permite producir múltiples soluciones, igualmente buenas, para el mismo problema, donde, posiblemente, una solución candidata optimiza un parámetro y otra optimiza uno distinto.

Como se observó en el apartado (4.13), los algoritmos genéticos identifican bloques representativos (esquemas) que contienen información genética común de los individuos más adaptados al entorno. Esto permite que durante el proceso de desarrollo o evolución del algoritmo, éste delimite el espacio de soluciones para que aquellos individuos más aptos sobrevivan y transmitan esos esquemas a las siguientes generaciones.

## 4.18.- Algoritmos meméticos.

Otra metodología metaheurística evolutiva son los algoritmos meméticos (Burke y Smith; 1998 a,b; Jacques et al., 2001). La característica común de estos algoritmos, es el uso de una búsqueda basada en poblaciones que intentan utilizar todo el conocimiento existente del problema, empleando para ellos los memes. Los memes, a diferencia de los genes que transmiten información genética, transmiten la información acumulada en las memorias de los individuos, captada generalmente por imitación, enseñanza o por asimilación, por lo tanto, en vez de transmitir información biológica transmiten conocimiento. La idea de estos algoritmos es mejorar la capacidad de búsqueda local de los algoritmos genéticos a través de la inclusión de un subalgoritmo de acumulación del conocimiento a lo largo de las generaciones (exploración automática).

Dicho de otra forma, los algoritmos meméticos realizan mejoras individuales de las soluciones con procesos de cooperación (transmisión del conocimiento) y competiciones de tipo poblacional. Los algoritmos meméticos mantienen en todo intervalo una población de diversas soluciones al problema de optimización. Cuando una población de soluciones se considera en su conjunto, esta pasa a ser una generación. Cada generación consiste en la actualización de una población, usando para ello la recombinación de las características de algunos individuos seleccionados.

Al igual que los algoritmos genéticos, la generación de nuevas soluciones tiene lugar mediante la aplicación de los operadores selección, cruce y mutación. El proceso de selección es el encargado de llevar a cabo los procesos de cooperación entre individuos o soluciones. El operador de mutación generará un nuevo individuo mediante la modificación parcial de otro existente.

Una de las características más importantes de los algoritmos meméticos, es que definen un meta-operador, basado en la aplicación iterativa de un operador de mutación arbitrario. Estos conservan los cambios que mejoran la calidad del individuo, debido a esa iteración del operador mutación.

En los algoritmos meméticos la población se divide en regiones, donde la evaluación, selección y cruce son aplicadas a cada una de ellas. Este proceso se conoce como optimización local o exploración autónoma, mencionada con anterioridad.

Los algoritmos meméticos y los algoritmos genéticos comparten las siguientes similitudes (Yepes, 2002):

- Hacen uso de una población de soluciones.
- Mejoran la población iterativamente.

- En cada iteración seleccionan las mejores soluciones, para genera otras configuraciones.
- La recombinación crea nuevas opciones.

Sin embargo, la diferencia entre los algoritmos meméticos y algoritmos genéticos, es que las evaluaciones se realizan sobre óptimos locales, es decir, cada solución antes de ser evaluada, es mejorada por medio de una técnica heurística.

## 4.19.- Lógica difusa o borrosa.

Muchos problemas de optimización se presentan como un problema difuso, donde no es posible determinar límites claros en los parámetros del problema de optimización. En el caso del mantenimiento predictivo, como se ha comentado, no resulta fácil definir los límites que determinan hasta que punto podemos decir que estamos en un estado de alarma para el cambio del componente, a partir de los parámetros adquiridos por el captador y la firma de buen de funcionamiento.

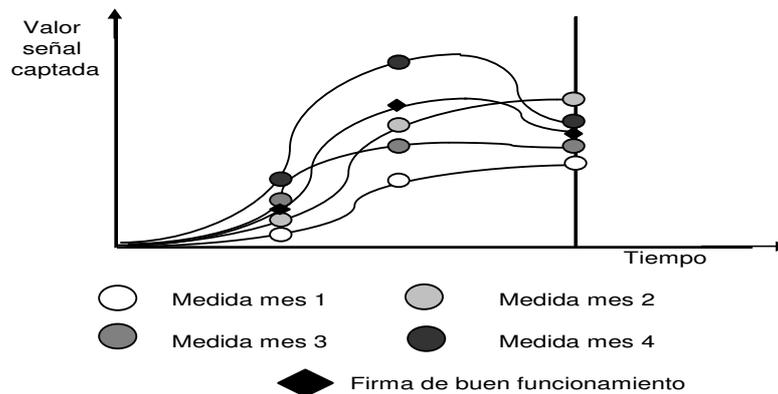


Figura 4.42: Representación de las señales adquiridas en cuatro intervalos mensuales con la firma de buen funcionamiento.

En la figura (4.42) se observa, que a pesar de que se define una firma que representa un estado de buen funcionamiento, comparada con las demás firmas adquiridas posteriormente, no resulta muy clara la definición de límites de aceptabilidad a partir de ellas, quedando sujeta al conocimiento o experiencia del personal el momento oportuno del cambio de componente. Adicionalmente, las adquisiciones (firmas) pueden ser promedios de varias medidas hechas en un mismo instante del mes.

El problema de la indefinición, se presenta también con considerable evidencia en las formulaciones multicriterio para la distribución en planta, ya que se enfrenta a la

subjetividad de los decisores a la hora de expresar sus preferencias de proximidad (Deb y Bhattacharyya, 2003). Por lo tanto, este tipo de problemas se pueden abordar por medio de la lógica difusa o borrosa.

Es un tipo de lógica reconoce más allá que los simples absolutos de todo o nada. En la formulación, pueden presentarse las proporciones con grados de veracidad o falsedad. Por ejemplo, la sentencia "hoy es un día despejado", puede ser 100% verdad si no hay nubes, 70% verdad si hay pocas nubes, 50% verdad si existe neblina y 0% si llueve todo el día.

La lógica difusa o borrosa está fundamentada en la teoría de los conjuntos difusos publicada por Zadeh (1965). Según esta teoría, el grado de ubicación de un elemento en un conjunto viene determinado por una función de pertenencia (figura 4.43). La función de pertenencia permite definir valores en las áreas intermedias de las evaluaciones convencionales de la lógica precisa, es decir, entre los intervalos [0,1]. Como ejemplo sea  $\mu_{\alpha}(x)$  una función de pertenencia de  $x$  al conjunto  $\alpha$  entonces:

- $\mu_{\alpha}(x)$  está entre 0 y 1.
- Si  $\mu_{\alpha}(x) = 1$ ,  $x$  pertenece totalmente al conjunto  $\alpha$ .
- Si  $\mu_{\alpha}(x) = 0$ ,  $x$  no pertenece a el conjunto  $\alpha$ .

Por medio de la lógica difusa, pueden formularse matemáticamente nociones o expresiones imprecisas, para que sean procesadas por ordenadores, para así cuantificar expresiones humanas comunes. Por lo tanto, se puede decir también, que la lógica difusa es un intento de aplicar la forma de pensar humana a la programación de los ordenadores. Como otro ejemplo (figura 4.43), la velocidad puede ser caracterizada por variables lingüísticas como baja, media y alta. Variables que toman, en función del criterio de velocidad del decidor, los siguientes valores:

- Baja, menos de 40 km/h.
- Media, cerca de 55 km/h.
- Alta, más de 70 km/h.

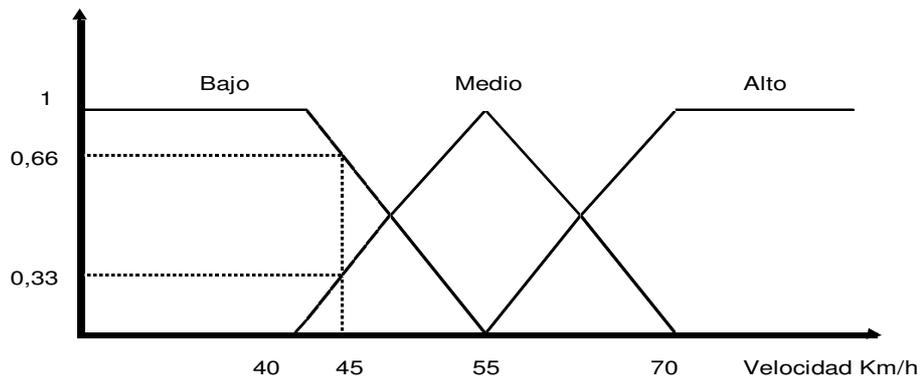


Figura 4.43 funciones de pertenencia.

Si la velocidad es 45 Km/h existen grado de pertenencia 0,6, 0,3 y 0 a los conjuntos difusos bajo, medio y alto respectivamente.

#### 4.19.1.- Operaciones básicas de la lógica difusa.

Dados dos conjuntos difusos  $\alpha$  y  $\beta$ , dependientes de  $x$ , con funciones de pertenencia  $u_\alpha$  y  $u_\beta$ , respectivamente, se pueden definir las siguientes operaciones básicas de esta lógica.

- Unión. La función de pertenencia de la unión de  $\alpha$  y  $\beta$  se define como:

$$u_{\alpha \cup \beta} = \max\{u_\alpha(x), u_\beta(x)\}$$

- Intersección. La función de pertenencia de  $\alpha$  y  $\beta$  es:

$$u_{\alpha \cap \beta} = \min\{u_\alpha(x), u_\beta(x)\}$$

- Complemento. La función de pertenencia del complemento de  $\alpha$  se define como:

$$\bar{u}_\alpha(x) = 1 - u_\alpha(x)$$

- Producto cartesiano. Dados los conjuntos  $\alpha_1, \dots, \alpha_n$  con un universo  $x_1, \dots, x_n$ , se define el producto cartesiano como un conjunto difuso  $X_1 \times \dots \times X_n$  con la siguiente función de pertenencia:

$$u_{\alpha_1 \times \dots \times \alpha_n}(x_1, \dots, x_n) = \min\{u_{\alpha_1}(x_1), \dots, u_{\alpha_n}(x_n)\}.$$

## **4.20.- Antecedentes experimentales de los Algoritmos Genéticos.**

Algunos investigadores coinciden en que cuantas más ejecuciones se realicen o más individuos compongan la población, mayor es la información utilizada en el proceso. Grefenstettes (1986), expone que un nivel alto de aplicación del operador mutación y cruce, para un número alto de individuos, mejora la variabilidad. Matías (2003) sugiere que, un número alto de generaciones deriva en mejores resultados, debido a que un número bajo de éstas puede truncar la evolución del algoritmo. Pero es conveniente establecer un límite o rango, ya que en el estudio de Matías (2003), para un número de generaciones grande, el algoritmo se estanca, debido a que todos los individuos tienen aptitudes similares, y como consecuencia directa aumenta el tiempo de cómputo sin mejores resultados. Muñoz (1997) emplea 70 evoluciones para que converja el algoritmo a buenas soluciones. Como se ha comentado anteriormente, valores altos para la aplicación de los operadores cruce y mutación, pueden romper esquemas de buenas soluciones, por lo que la elección de estos parámetros resulta complicada (ver capítulo 7).

Sánchez (2000) y Martorell et al. (2000), emplean en la optimización de la función riesgo y coste, para los requisitos de vigilancia y mantenimiento en componentes, una población de 100 individuos para 50000 generaciones, con una probabilidad de cruce del 60% y del 30% para la Mutación. Utilizan, también, un porcentaje de reemplazamiento para eliminar las peores soluciones y construir una población en número igual que la anterior.

Marseguerra y colaboradores (Marseguerra et al. 2002), en su modelo de optimización multiobjetivos, para maximizar el beneficio neto del sistema y la disponibilidad media del mismo, fijan los siguientes parámetros: número de individuos y generaciones 100, probabilidad de cruce 100%, y probabilidad de mutación 1%.

Para el problema de distribución en planta por medio de árboles de cortes, Azadivar y Wang (2000), realizan un ensayo para una planta de ocho actividades y dos carros de transporte. En el estudio, consideran, los diferentes subconjuntos de procesamiento y los diferentes tiempos de operación para cada parte. A diferencia de los demás desarrollos de distribución en planta, que consideran los costes de mantenimiento, la finalidad de éste es determinar una planta que minimice el tiempo medio del ciclo de producción. Evalúan el tiempo de convergencia hacia una solución de mínimo tiempo, empleando los siguientes parámetros: un tamaño de población de 30 individuos, una tasa de cruce de 0.6 o 60%, una de mutación de 0.008 y 50

generaciones. Observaron que a la vigésimo quinta generación se conseguía un buen resultado.

El experimento propuesto por Balakrishanan y colaboradores (Balakrishanan et al., 2003), para un modelo basado en horizontes de planificación multi-periodos DPLP (Dinamic Plant Layout Problem), consistió en definir seis situaciones para evaluar la eficiencia de su desarrollo, para diferentes dimensiones del problema. Las situaciones empleadas fueron las siguientes: 6, 15 y 30 actividades para 5, 6 y 30 periodos. Emplearon una tasa de mutación del 5% y del 10% para el cruce. Con respecto al número de generaciones emplearon 1000.

Santamarina (1995), para el problema de distribución en planta, en cambio, realizó varios experimentos con la finalidad de determinar los parámetros más adecuados para el problema considerado, tomando como referencia los resultados obtenidos por otros autores. La autora comenta, que para la fase de especie (ver capítulo 3), un porcentaje bajo de aplicación de los operadores de cruce y mutación, dificulta la localización de nuevas especies, debido a que el modelo puede generar soluciones inviables. Por lo tanto, recomienda probabilidades de cruce y mutación del 100% para la primera etapa.

Para el individuo comprueba, que conforme aumenta la probabilidad de mutación, se puede perder cierta orientación en la búsqueda. Adicionalmente observa, que aplicando una probabilidad del 1% en la mutación había una alta variabilidad, producto de la exploración del operador cruce. Como conclusión, comenta, que las probabilidades de mutación y cruce no representan un problema, ya que la orientación se recupera en próximas generaciones, por la naturaleza paralela de los algoritmos genéticos comentada anteriormente.

Realiza también, un estudio de las estrategias elitistas, llegando a la conclusión que estas técnicas dificultan la exploración, ya que la búsqueda se realiza solo a la élite.

Diego-Más (2006), ejecuta también varios experimentos paramétricos para cada etapa del algoritmo en el problema de distribución en planta considerando el control geométrico, y obteniendo como resultado, para la etapa especie, la robustez del algoritmo frente a los cambios en los valores de los parámetros genéricos. En la etapa individuo, realizó varios experimentos donde pone de manifiesto que una variación en el número de generaciones como en el de los parámetros no repercute en peores resultados para su problema particular.

Suresh et al (1995), también para el problema de distribución en planta, propone una serie de experimentos donde varían el tamaño de la población de 40 a 160, en intervalos de 20, para una planta de quince actividades. Variaron la tasa del operador mutación de 0.25 a 1, en intervalos de 0.25, y para la de cruce de 0.5 a 0.68. No observaron importantes variaciones en la calidad de la solución en función del tamaño de la población. Pero si, con relación a la tasa de cruce y mutación, que para su problema particular escogieron 0.68 para el cruce y 1 para la mutación. Comprobaron

que 1 superaba a otros valores, aunque algunas veces la mejor solución se lograba con valores inferiores. Hicieron estudios comparativos con otros autores.

Muñoz (1997), para la optimización de las estrategias de mantenimiento, realiza un estudio paramétrico, con y sin restricciones, para evaluar la convergencia de su algoritmo ante la variación del espacio de búsqueda. Ejecuta el primer experimento manteniendo el número de variables, pero variando el valor de la mutación y el cruce. Emplea poblaciones fijas de 100 individuos. Posteriormente, ejecuta el mismo experimento, pero esta vez variando el número de individuos y dejando fijo la mutación (4,5%). Seguidamente, varía el número de variables del problema y repite exactamente igual los experimentos. A partir de repetir exactamente éstos diez veces, determina un número medio de iteraciones para la localización de la mejor solución.

Observó, que cuanto mayor es el número de variables, menor es la tasa de cruce y mutación requerida para un cierto tamaño de población, debido a que con un mayor número de variables, la longitud del cromosoma es mayor, lo que supone mayor información y por lo tanto mayor diversidad.

Para el estudio con las restricciones, demostró experimentalmente que el algoritmo convergía de forma similar con los mismos parámetros antes empleados. La presencia de restricciones implicaba la misma topología del espacio de búsqueda pero menor extensión.

Kochhar y Heragu (1998) en su desarrollo MULTI-HOPE (Multi-Floor Heuristically Operated Placement Evolution), definen dos versiones del algoritmo: MULTI-HOPE (Small) y MULTI-HOPE (Large). Las versiones están basadas en el número de individuos que intervienen en la población, es decir, 20 y 100 respectivamente. La finalidad del estudio, era evaluar el impacto de técnicas elitistas o de réplica en la convergencia de las soluciones, para estas dos versiones, en presencia de diferentes números de generaciones. Observaron que las soluciones no mejoraban para 100 generaciones consecutivas en el MULTI-HOPE (Small), siendo necesario repetir 20000 de estas. Para el MULTI-HOPE (Lager) bastaron 400 y con un menor porcentaje de réplica. Emplearon también, diferentes técnicas de mutación, incluida una adaptación en función de la evolución del algoritmo.

En el modelo de distribución del layout en ciclo cerrado, Cheng y Gen (1998), realizaron un ensayo para evaluar la influencia de los criterios empleados en la optimización. Estos criterios están relacionados con la congestión del sistema productivo. Evaluaron también el impacto de la implementación de los operadores genéticos. Primero, fijan los parámetros y luego manipularon el operador cruce y mutación. Comprobaron la criticidad del operador mutación para su problema.

Lazo y Pacheco (1999), para optimizar la secuencia de mantenimiento y la distribución de las tareas para el personal, variaron la probabilidad de mutación (0.8%-20%), con la finalidad de reducir el tiempo de cómputo y la convergencia (ver apartado 7.2.1). Observaron, que aplicando un valor para la mutación del 20%, las máquinas más

críticas, es decir, las que tenían mayor tiempo sin recibir el mantenimiento, lo recibían primero. Esto se debe según los autores, a que se explora un mayor campo de soluciones que cuando se emplean valores de 0.8%.

Lim y colaboradores (Lim et al., 2000), realizaron varios ensayos para comprobar la eficiencia de los algoritmos genéticos híbridos, para la optimización de la distribución en planta, resuelta como un problema cuadrático de asignación (QAP). Fijando los parámetros, compararon los resultados de un algoritmo genético simple con los híbridos. Posteriormente, evaluaron los dos sub. algoritmos propuestos que conforman los híbridos. Estos algoritmos son: búsqueda local parcial (FLP) y búsqueda local total (FLS). Comprueban que el FLP aporta mejores soluciones. Los resultados presentados en su publicación fueron: tiempo medio de cómputo, número medio de generaciones para la mejor solución, valor medio de la función objetivo obtenida por todos los algoritmos, diferencia entre el valor medio conseguido y el conocido, mejor valor de la función objetivo obtenida en todos los algoritmos y la diferencia entre el mejor valor conseguido para la función y el conocido.

Alcaráz (2001), realiza un experimento computacional para estudiar también el comportamiento de los diferentes parámetros. La finalidad, fue comparar los operadores estándar para selección, cruce y mutación descritos en la literatura, con sus propuestas para el problema específico de programación de proyectos con recursos limitados. El trabajo del autor, consistió en mejorar la parte informática para este tipo de problema. Efectuó un estudio de la influencia del tamaño del proyecto, es decir, del número de actividades que lo componen, como de las generaciones que se ejecutan.

Adicionalmente, realizó otros estudios haciendo experimentos cruzados entre los diferentes tipos de operadores, tanto los del estado del arte como los propuestos, para los diferentes números de actividades y generaciones. La finalidad, fue conseguir la combinación de tipos de operadores que aportaban mejores resultados. También, evaluó, la influencia de las probabilidades de cruce y mutación. Empleó para este experimento 50% y 80% para el cruce, y 1% y 5% para la mutación. Concluyó que los mejores resultados se lograban empleando una probabilidad de cruce del 80% y 5% para la mutación.

Hauser y Chung (2006), comparan también dos métodos de cruce para su problema de distribución en muelle cruzado: la recombinación del borde (ERX) y el cruce parcial (PMX). El tamaño de la población y el número de la generación fueron variados entre 100 y 1000. Comprobaron la eficacia de dos niveles de probabilidad de mutación (10 y el 50%) y tres niveles de probabilidad de cruce (10, 50 y 100%). Para cada ensayo realizaron 100 iteraciones o evoluciones.

Matías (2003), para el diseño de redes de distribución de agua, tomando en cuenta la fiabilidad, implementó varios experimentos para analizar la sensibilidad a la variación de los parámetros y metodologías de aplicación de los operadores. En primer lugar, realiza un estudio relacionado con la población inicial, haciendo poblaciones fijas o

variables para diferentes tipos de redes (empleó tres tipos en su estudio). Las poblaciones fijas correspondían a un mismo intervalo de valores pseudoaleatorios, mientras que las variables, a varios de éstos. En su trabajo observó, que las poblaciones variables presentaban mejores resultados que una población fija. Aunque este comportamiento, según el autor, puede variar en función del tipo de instalación y la codificación utilizada.

En segundo lugar, estudió la sensibilidad o influencia al método de reproducción, donde varió los demás parámetros y evaluó qué método de selección era el que aportaba mejores resultados. Los métodos empleados fueron: ruleta, ruleta mejorada, torneo a dos, constante (steady), métodos de intervalos fijos y el método de intervalos fijos múltiples. Observó, que el tipo de método influía en el resultado final de implementación. Finalmente recomienda para su problema, el torneo a dos y el método de intervalos fijos múltiples.

En tercer lugar estudia la influencia del operador cruce, y al igual que en el caso anterior, implementó varios métodos de cruzamiento (simple, doble y múltiple). En éste estudio, varió la tasa del operador cruce entre los valores 50, 60, 70, 80, 90 y 100%. No observó diferencias considerables en las diferentes metodologías de cruce, pero si en el porcentaje de aplicación, donde los valores altos, es decir, 80 a 100% eran los que tenían mejor comportamiento.

En cuarto lugar analiza la influencia del operador mutación, para lo cual utilizó también diferentes métodos del operador. Implementó varias tasas de mutación, en función del el tamaño del individuo.

En quinto lugar analiza la influencia del tamaño de la población. Dependiendo del tipo de red de distribución de agua, aplica diferentes tamaños de la población manteniendo fijos el resto de los parámetros. Para el caso uno, utilizó los tamaños de población de (10, 20, 40, 80, 160), (10, 25, 50, 100, 250) y (10, 50, 100, 250, 500) respectivamente. Llega a la conclusión, que tamaños menores generaban peores resultados. No obstante, observó también, algunos desajustes en grandes poblaciones debido a que pequeñas poblaciones con individuos más aptos, convergía mejor que una de mayor tamaño pero con peores individuos.

En sexto lugar hace un análisis al número de generaciones. Al igual que en el caso anterior, para las tres redes de estudio, ha implementado los siguientes números de generaciones o de repeticiones: (5, 10, 40, 80, 160), (10, 25, 50, 100, 250) y (10, 50, 100, 250, 500). Observa que incrementando el número de generaciones obtenía mejores resultados hasta un límite de estas.

Gómez et al (2003), para la distribución en planta considerando los pasillos, realizaron un ejemplo de implementación, primero para seis actividades y segundo para veinte. Para el primer experimento, aplican los siguientes valores genéricos: número de generaciones 100, probabilidad de cruce 0.7, tamaño de la población 100 y una probabilidad de mutación de 0.01. Al igual que en caso anterior, evalúan dos métodos

de cruce y mutación. Para los de cruce emplearon el simple monopunto y el partial matching crossover (ver capítulos 3). Para la mutación, el normal y la inversión (order-based-mutation). Para el segundo, realizan los mismos experimentos. Para este tipo de problema de mayor dimensión, los parámetros utilizados fueron: número de generaciones de 5000, tamaño de la población de 300, operador cruce y mutación igual que el experimento anterior.

En la propuesta de Ming-Jaan Wang et al. (2005), para la optimización de distribución en planta, basada en el Coste Total del Layout (TLC) bajo tres factores (coste del flujo de materiales MFFC, factor de utilización del área y factor de forma), proponen un experimento para evaluar cómo influye la forma y el área del dominio inicial en el TLC y MFFC. Ejecutan tres ensayos, para los cuales utilizan como datos de partida los empleados por Tompkins et al. (1996), Islier (1998) y (Armour y Buffa (1963). Fijan para las tasas del operador cruce y mutación los valores 20% y 20% a 2% respectivamente, mientras que para el tamaño de la población utilizaron 100, 500 y 1000. Emplearon estos mismos valores para diferente número de generaciones. Como conclusión del estudio, dominios de ubicación rectangulares alargados originan mayores costes, mientras que los que tienden a ser cuadrados los minimizan.

Sánchez (2000b), para optimizar la expansión de un sistema de recursos hídricos, propone ensayos para evaluar la influencia de la complejidad de la función objetivo, en la convergencia del algoritmo hacia soluciones óptimas. Emplea primero, un polinomio simple con una constante de normalización. Con el empleo de los operadores básicos, obtuvo un resultado consistente hacia el óptimo. Posteriormente, elige otra función más compleja, que posee un máximo de inflexión y que considera, por supuesto, un espacio de búsqueda más amplio con soluciones que no son siempre respuesta al problema. El autor explica que, la longitud de la cadena, rige en la consecución de un máximo en funciones monótonas ascendentes (simple). Es decir, no aparecen problemas de desvíos del valor máximo. En cambio, ese aumento del máximo valor, se puede perder cuando la función no es simple.

Emplea también un criterio modificador para reparar a un cromosoma binario que representa estados del problema. Realiza experimentos paramétricos, para evaluar el comportamiento del conjunto de cromosomas con el criterio modificador. Concluye, que es importante diversificar, las generaciones de individuos y emplear tasas del operador cruce entre 60 y 90%.

Es conveniente mencionar, que no puede considerarse absolutamente revisado o documentado todo lo relacionado con la parametrización de los algoritmos. Los ensayos descritos en los diferentes trabajos y publicaciones, abordan diferentes problemas con resultados muy particulares, donde el comportamiento de los parámetros es diferente en función de la naturaleza del modelo. Además y lo más importante, todos los ensayos no cubren todo el abanico posible de resultados y solo presentan una porción que se considera relevante para el problema de estudio (ver capítulo 7).

# 5

## Distribución en Planta y Mantenimiento



## **5.- Distribución en planta y mantenimiento.**

En el diseño de una distribución en planta, resulta necesario considerar una serie de factores que permitan el correcto y seguro funcionamiento del proceso productivo. Entre estos factores está el mantenimiento, mediante el cual se conservarán los equipos que forman la cadena de producción.

Uno de los principales problemas que se presenta a la hora de definir y diseñar un sistema productivo, es el conflicto que surge entre los departamentos de diseño y mantenimiento, dado que la consideración del mantenimiento, en la mayoría de los casos, implica costes adicionales, como a su vez, el diseño se decanta por la optimización de la producción como interés principal, en detrimento del mantenimiento. Pueden, también, existir conflictos entre los departamentos de producción y mantenimiento, debido a que la aplicación de una determinada acción de mantenimiento, puede generar paros momentáneos del proceso, debiéndose realizar estas acciones de mantenimiento para horas no laborables.

No hay que olvidar, como ha sido comentado en el capítulo 2, que implícitamente, un paro total de un equipo originará un coste a la empresa, tanto por el daño al equipo mismo, como el coste que origina el paro en la producción. Por lo tanto, es necesario plantearnos la búsqueda de un punto de equilibrio entre el mantenimiento y el diseño de la implantación. Este punto deberá contemplar las necesidades de producción por medio de una correcta distribución en planta, y considerar también las diferentes necesidades del mantenimiento, sin perjudicar o perjudicando lo menos posible el desarrollo del proceso de producción.

Se plantea, entonces, resolver un problema de optimización conjunto entre la distribución y el mantenimiento, es decir, un problema de optimización combinatorial que implica la definición de una función objetivo que contemple las necesidades comentadas anteriormente (ver capítulo 6). Los temas de diseño de distribución en planta considerando el mantenimiento, no han sido abordados conjunta y detalladamente, sino que algunos autores lo comentan muy superficialmente, como un servicio necesario a considerar en el diseño de las distribuciones (Moore, 1969; Appler, 1977; Muther, 1981; Vallhonrat y Coromitas, 1991; Kochhar y Heragu, 1999; Azadivar, 2000; Ontiveros, 2004).

En la literatura relativa al tema, existen modelos que incluyen el mantenimiento para la configuración de una distribución por redundancia, pero sin considerar los costes de manutención por el posicionamiento de las actividades (Cantoni et al., 2000;

Tavakkoli-Moghaddam et al., 2008). Existen también, algunos enfoques para células de fabricación bajo ciertos requerimientos de producción, pero sin considerar los costes de manutención ni del mantenimiento (Shang, 1995, Shang y Tadikamalla, 1998; Azadivar, 1998; Azadivar y Shu, 1999b). Igualmente, Pettersen y Segerstedt (2008), proponen un modelo que genera historiales de producción virtuales basados en estructuras (WIT), mediante la configuración del layout para los almacenamientos intermedios (Buffer) y puntos de producción, considerando también el tamaño de los Buffer, los tiempos para reparaciones y paros en los equipos.

El modelo comentado de Cantoni et al. (2000), está basado en un algoritmo genético y la simulación Monte Carlo para el diseño óptimo de una planta, bajo los requerimientos de fiabilidad y economía. En este trabajo, el diseño de la configuración consiste en seleccionar y distribuir ya sea en serie y/o paralelo, un determinado número de equipos para mejorar la fiabilidad. A mayor número de equipos en paralelo, es decir redundantes, mayor fiabilidad, pero con el inconveniente de que genera mayores costes por la instalación de los equipos adicionales y viceversa. Por lo tanto, la finalidad del modelo es maximizar la fiabilidad media  $A$  y el beneficio neto  $G$ , sobre un tiempo de operación, en un desarrollo que considera los costes de instalación  $CA$ , coste de reparación  $CR$ , coste por pérdidas de producción  $CD$  y costes por accidentes  $CAA$  (para los autores, un accidente representa un fallo en un determinado equipo sin redundancia). Todo esto está resumido en la siguiente función objetivo:

$$G = P - (CA + CR + CD + CAA).$$

Donde  $P$  es la ganancia por la operatividad de planta. Cada uno de los restantes siguientes términos se describen en Cantoni et al. (2000).

Para la simulación crean un número específico de eventos para cada configuración del sistema, es decir, implementan una serie de pseudos experimentos para estimar a lo largo del tiempo de operación, los valores medios y las desviaciones estándar de los tiempos fuera de servicio (paro de planta), el tiempo para reparar un determinado componente, la probabilidad de fallo-accidente y la fiabilidad instantánea  $At$ . La razón de utilizar dos metodologías de optimización, además de las expuestas en el capítulo 4, radica en que la simulación Monte Carlo evalúa en fiabilidad y coste el funcionamiento del sistema-planta, mientras el algoritmo genético determina la asignación óptima (equipos redundantes). Este es un buen enfoque para la optimización de la implantación de componentes o equipos en redundancia, pero tiene el inconveniente de que no considera el flujo de materiales de manutención con sus respectivos costes, como tampoco las condiciones ambientales que afectan a los equipos. Adicionalmente, no incluye el mantenimiento preventivo, considerando solo la reparación del equipo en fallo sin especificar bajo que condición se inicia este. Los equipos redundantes se consideran todos operativos, con lo cual la fiabilidad es determinada de forma analítica

para todo el conjunto. Como se verá en el capítulo 6, la redundancia garantizará que cuando falle un equipo, el redundante en espera, entrará en servicio, para mantener la operatividad de planta, es decir, la fiabilidad del redundante será la misma que la del equipo principal. En la figura se representa una solución para tres nodos (actividades):

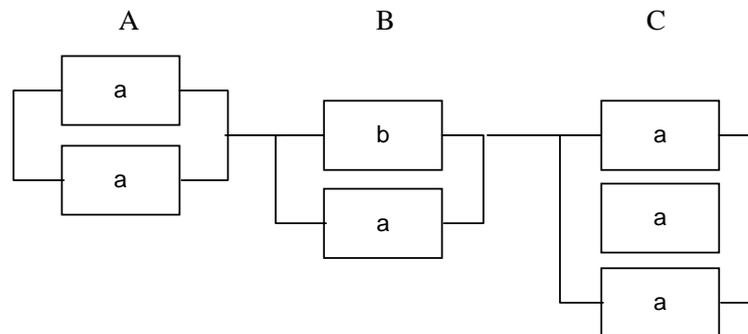


Figura 5.1: Configuración de Cantoni et al. (2000).

Siguiendo un estudio similar, Tavakkoli-Moghaddam y colaboradores (Tavakkoli-Moghaddam et al., 2008) proponen un modelo para determinar la asignación de equipos redundantes tendiente a ganar en fiabilidad y seguridad, al tiempo que minimiza los costes de instalación de los equipos adicionales. Como mecanismo de solución, implementan un algoritmo genético, para lo cual diseñan un cromosoma de tres niveles que identifica tanto los tipos de asignación redundante, tipo de componente y su cantidad.

Como operador cruzamiento, crean, de forma aleatoria, un cromosoma indicador de las mismas dimensiones pero en números binarios, donde se intercambian los genes de los padres en función de este cromosoma binario. El operador mutación, selecciona al azar un gen de cada nivel y lo cambia de forma aleatoria. Emplean para ello una matriz conformada por valores índices que varían entre 0-1. Utilizan también un nuevo operador llamado mutación Max-min, que selecciona aleatoriamente un gen del mejor y peor cromosoma de la población, el cual se altera luego aleatoriamente en un índice de la mutación entre 0-2.

Como se observó en el capítulo 2, Azadivar (1998) plantea un modelo de optimización que considera las diferentes políticas de mantenimiento y parámetros de diseño del proceso productivo, como la localización y tamaño de los buffer. La finalidad de su propuesta, es optimizar el nivel de servicio para mantener una estructura de trabajo en proceso (WIP). Los buffer proveen de espacios para el inventario en proceso, y su localización y dimensión implicarán diferentes políticas de mantenimiento (emplea un algoritmo genético como metodología de optimización).

Más tarde, Azadivar y Shu (1999b), proponen otro desarrollo pero esta vez en JIT just-in-time (justo a tiempo) en células de fabricación. Este modelo considera los factores característicos de los equipos y del proceso, como niveles que definen la intensidad o frecuencia de esos factores. El objetivo de esta propuesta, es optimizar el nivel de servicio (políticas de mantenimiento) para minimizar los paros y por lo tanto los retrasos en los tiempos de producción. Los factores característicos y niveles utilizados por el autor son:

- Número y tipo de productos terminados. Es un indicador del tamaño del sistema productivo.
- Número de operaciones por productos. Es otro indicador del tamaño del sistema productivo.
- Complejidad del trabajo. Es un indicador de las complejidades implícitas en el proceso o configuración del sistema.
- Tiempo medio entre fallos (MTBF). (Ver capítulo 2). Es uno de los principales indicadores de mantenimiento.
- Recurso de disponibilidad. (Ver capítulo 2). Es definido como  $MTBF/(MTBF+MTTR)$ .
- Severidad de daños. Es definido como el tiempo medio para reparar el sistema (MTTR). (Ver capítulo 2).
- Carga de producción. Es definido como la relación entre el tiempo de empleo y los tiempos fuera de servicio.
- Tipos de distribución de probabilidad con respecto al tiempo de procesamiento.
- Restricciones con respecto al nivel de funcionamiento requerido.
- Coeficiente de variación del MTBF.
- Coeficiente de variación del MTTR.
- Carga de reparación. Es la relación entre los recursos de producción y los recursos de mantenimiento.
- Demanda urgente.
- Longitud de buffer permitida. Factor que reduce los tiempos fuera de servicio.
- Relación mantenimiento preventivo/correctivo.
- Probabilidad de corrección por mantenimiento. Es un indicador de la calidad de los procesos de mantenimiento.

Los niveles:

- Valor alto.
- Valor bajo.

Como metodología de optimización, emplea configuraciones o estructuras de ajuste de tipo 1H2H3L, donde los números representan los factores y las letras los respectivos niveles (long, high). Esta información se extrae de un grafo (figura 5.2) donde se definen los estados del producto (nodos) y los respectivos procesos (flechas). Las letras sobre las flechas indican los recursos utilizados en cada proceso. Es importante aclarar que los buffer podrán ser ubicados en cualquier nodo, es decir, junto a un estado del producto y su ubicación final dependerá del resultado de la optimización.

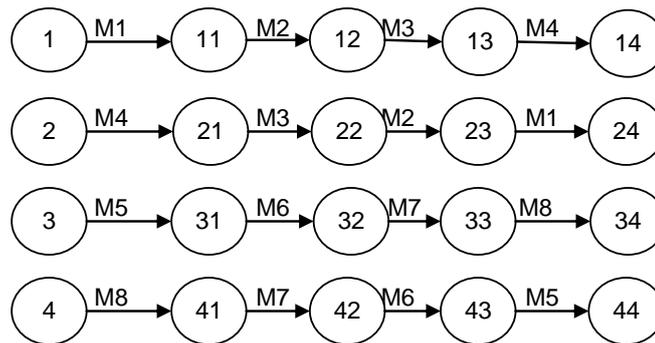


Figura 5.2: Ejemplo de una configuración 1H2H3L (Azadivar y Shu, 1999b).

Shang y Tadikamalla (1998) proponen un desarrollo para el diseño multicriterio en células de fabricación. La finalidad de la propuesta, es maximizar la eficiencia del proceso bajo diferentes condiciones de operación y producción. En su estudio, los autores utilizan los siguientes factores del proceso (respuestas esperadas):

- Tiempo de desplazamiento.
- Tiempo en espera.
- Trabajo en proceso (WIP).

Y para una planta dada, los factores son:

- Estabilidad de demanda.
- Configuración de célula.
- Longitudes e intervalos de manutención.
- Dimensiones.

A estos últimos factores se les considera variables controlables del problema de optimización. Al igual que en el caso anterior aplica niveles de intensidad y frecuencia (bajo o alto).

Como metodologías de optimización, utiliza los métodos de Taguchi y el RSM (Response Surface Methodology):

- El método de Taguchi, más conocido como de respuesta superficial, es un desarrollo que reduce las variaciones de salida del proceso debidas a variables incontrolables (Shang, 1995). Las variables incontrolables, para los autores, son el MTBF (tiempo medio entre fallos) y el MTTR (tiempo medio para reparar) que representan el nivel de ruido, es decir, lo que es indeseable. Como técnica aplica el Graph Orthogonal Array, que representa un medio para crear un conjunto de objetos de una misma clase que interactúa con otras.
- El RSM (Response Surface Methodology) es una colección de técnicas matemáticas y estadísticas que son usadas para el modelado y análisis del problema, en donde una respuesta de interés es influenciada por varias variables (controlables e incontrolables). La finalidad es optimizar estas respuestas. Para el proceso de simulación se le asignan diferentes pesos a estas respuestas esperadas WPM (Weighted Performance Measure), para así tener los resultados de cada simulación, en función de las preferencias deseadas por los expertos. La metodología aplicada para la asignación de pesos es el AHP (Analytical Hierarchy Process)(ver capítulo 3). Un diseño robusto es aquel en donde la variabilidad en los valores de salida es mínima.

## **5.1.- Aspectos de la distribución para incluir el mantenimiento.**

A priori se pueden definir algunas condiciones o aspectos, que en función del tipo de mantenimiento a emplear, o a los criterios de diseño preliminar, son necesarios incluir en la distribución en planta. Estos aspectos suelen implicar consideraciones espaciales adicionales en el diseño de la implantación.

Entre estos podemos mencionar:

- Ubicación de los espacios necesarios para el almacenamiento de repuestos y de equipos de diagnóstico.
- Espacios necesarios para las actividades de mantenimiento.
- Redundancia de equipos.
- Espacios necesarios para los centros de diagnóstico.

- Distribución de los equipos atendiendo las condiciones ambientales.

### **5.1.1.- Ubicación de los espacios necesarios para el almacenamiento de repuestos y equipos de diagnósticos.**

Ante la aparición de fallos aleatorios y para garantizar la continuidad del proceso productivo, es siempre importante disponer de repuestos para solventar los problemas del paro repentino. Los almacenes deben albergar los repuestos necesarios para el buen funcionamiento de los equipos de producción y seguridad. También en el caso de una política de mantenimiento preventivo por condición, es necesario contar con los espacios necesarios para los sistemas de diagnóstico, y si el espacio lo permite, almacenar todos los repuestos y materiales necesarios para las inspecciones preventivas programadas. Para Lie Chein Lin y Gunter (1999), los espacios requeridos para el almacenamiento, representan índices cuantitativos para el grupo de criterios asociados al coste de manutención. Además, los autores consideran necesario incluir en planta espacios adicionales para:

- La utilización adecuada de la maquinaria.
- El almacén. Este almacén incluye: la recepción de materiales, el trabajo en proceso WIP, el almacenamiento intermedio, los productos semi acabados, productos acabados, productos defectuosos y equipos fuera de uso.
- Las necesidades de los operarios (cafetería, oficinas, etc.).
- Los pasillos de circulación. Estos tienen que permitir el flujo eficiente de operarios y de equipos para hacer funcionales a los departamentos.
- Las futuras expansiones.

Es importante aclarar que al igual que los costes de manutención en la distribución en planta, el movimiento de herramientas para el mantenimiento, repuestos y equipos de diagnóstico, generaran un coste asociado al desplazamiento. Por lo tanto, se deberá considerar la mejor localización de estos en función de reducir los costes del proceso productivo y de las políticas de mantenimiento que aplicará la organización.

Las frecuencias de aplicación de mantenimiento influirán en la localización de los almacenes, debido a que en función de estas y a los costes del desplazamiento del material de mantenimiento, repercutirán en mayor o menor grado en el beneficio final total.

Los almacenes pueden influir en un modelo como una distancia adicional que separa dos actividades, es decir, contribuyen a una distancia en la manutención. Por lo

tanto, su ubicación en el proceso de producción debe ser cercana a los equipos críticos EC (Figura 5.3).

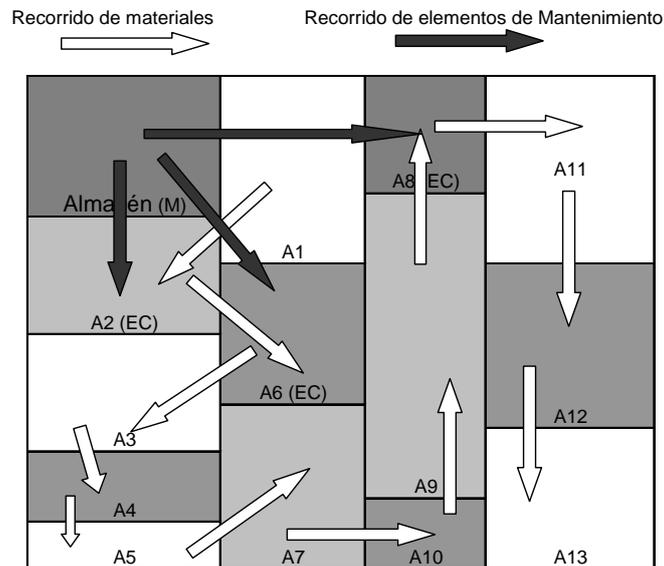


Figura 5.3: Representación de una distribución considerando un almacén para mantenimiento.

### 5.1.2.- Espacios necesarios para las actividades de mantenimiento.

Es importante considerar los espacios que se necesitan para el desarrollo de las políticas de mantenimiento. Esto supone incluir:

- Espacios para la utilización de herramientas y equipos de diagnóstico (en el caso de ser trasladables). Muchos equipos podrían ser trasladados a un taller o almacén para alguna reparación.

El traslado de las herramientas y los equipos de diagnóstico, implica el diseño de pasillos que permitan un flujo eficiente y seguro de los operarios.

Para Lie Chien Lin y Guter (1999) hay dos tipos de pasillos: el primero es aquel que pertenece a la estructura del edificio, y el segundo el que se coloca una vez realizado el estudio de la distribución en detalle. Este último, puede ser modificado por requerimientos de producción o mantenimiento.

Siguiendo este procedimiento, Pérez (2003) representa los pasillos en la distribución en detalle, después de una interpretación de la distribución en planta.

- Espacios para desmontajes in situ durante las inspecciones preventivas y mantenimiento correctivo, para manipular tanto las herramientas como piezas desmontadas.

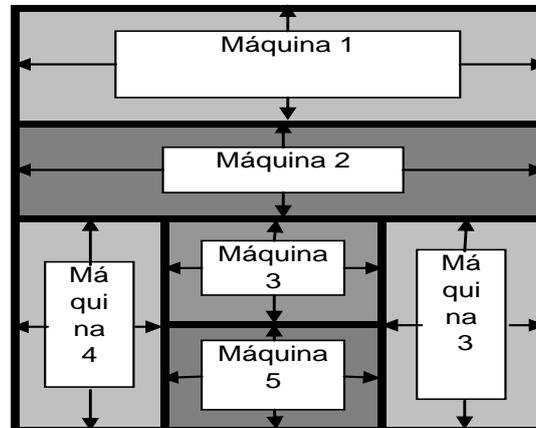


Figura 5.4: Distribución con separación entre la localización y el área o maquinaria de trabajo.

### 5.1.3.- Redundancia de equipos.

La redundancia se puede definir como la existencia de caminos alternativos, o la capacidad en exceso sobre las que se requieren en condiciones normales de operación, que se utiliza cuando un componente o sistema falla, en condiciones normales de trabajo.

El objetivo principal es evitar la parada del proceso productivo debida a la aparición de un fallo catastrófico en la vía principal, a través de la incorporación de la adicional.

La redundancia implica considerar un espacio adicional en la distribución, y es muy utilizada en el diseño de sistemas para garantizar la fiabilidad de equipos vitales y complejos. Se emplea con frecuencia en plantas generadoras de energía eléctrica y abastecedoras de agua (Paiton y Campell, 1995; Burke y Smith, 1999; Sotelo y Borán, 2002; Matías, 2003). Una de las ventajas de poseer equipos redundantes, es que se facilita la programación de acciones preventivas de mantenimiento, pudiéndose realizar paradas programadas de un equipo sin detener el proceso productivo. Cuando definamos la fiabilidad de planta, este concepto podrá ser utilizado.

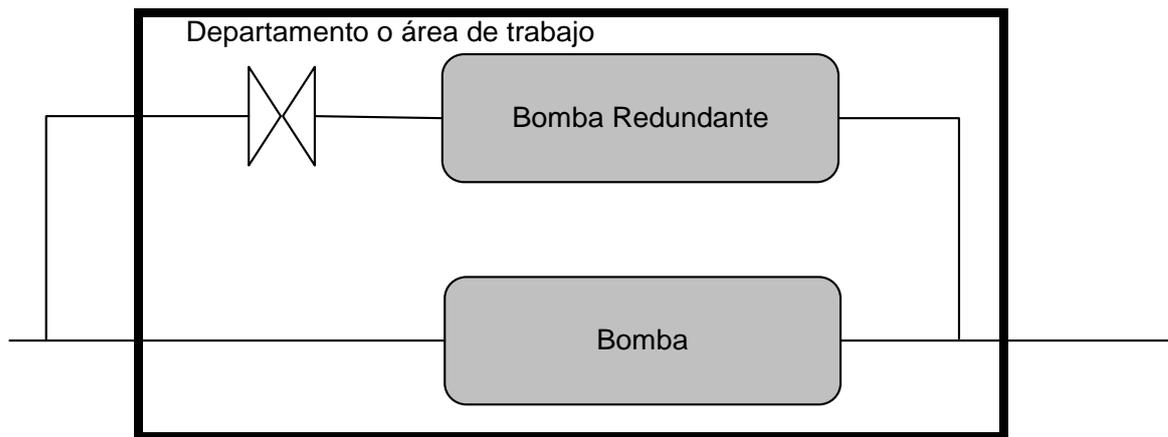


Figura 5.5: Representación de la redundancia en un sistema de distribución de agua.

#### **5.1.4.- Espacios necesarios para los centros de diagnóstico.**

En el caso de que se utilice una política de mantenimiento preventivo por monitorización continua, será necesario considerar un área para localizar los centros de diagnóstico. Los centros de diagnóstico, son espacios donde llegan las señales captadas en los sensores de todos los equipos para su posterior tratamiento. Por lo general se utilizan en grandes plantas industriales en donde la seguridad y la continuidad de los procesos son vitales para la producción; como es el caso de plantas petroleras, centrales termoeléctricas y nucleares.

En estos centros de diagnóstico, se vigilan constantemente las señales o parámetros críticos del funcionamiento de los sistemas que integran la planta, y a partir de las variaciones observadas se programan las intervenciones preventivas. En algunos casos no es necesario considerar estos espacios, dado que los centros de diagnóstico y seguimiento pueden estar alejados de la planta, y por medio de señales telemétricas se procede a la evaluación del estado de los equipos. Posteriormente se le informa al equipo de mantenimiento las irregularidades detectadas. Estos espacios pueden ser tratados también como almacenes, como se ha comentado al comienzo.

### **5.1.5.- Distribución de los equipos atendiendo a las condiciones ambientales.**

Como se ha observado en el capítulo 2, las condiciones ambientales son determinantes en la durabilidad y fiabilidad de los equipos. Esto implica la definición de actividades para colocar los equipos de forma que la acción de los agentes ambientales del entorno no le afecten, y si lo hacen, tomar las acciones correspondientes para atenuarlas. Por lo tanto, y a partir de la determinación de las características ambientales y los requerimientos de los equipos, se debe diseñar una distribución que minimice los efectos de estos agentes, y a su vez, buscar un equilibrio entre los costes de manutención, mantenimiento y producción.

Como se ha comentado en el capítulo 3, algunos autores recomiendan considerar tanto el confort de los operarios como su seguridad, lo que implica diseñar la distribución bajo este enfoque. Esto supone tener presentes aspectos como la iluminación, ventilación, humedad y otros factores en el recinto de trabajo, que permitan, además de un ambiente adecuado, unas condiciones idóneas para la reducción de contaminantes, sustancias tóxicas y la preservación de los materiales del proceso. La calidad del ambiente interior se determina por medio de las condiciones técnicas, químicas o físicas que pueden existir en el entorno de trabajo, que causen consecuencias indeseadas a los equipos, materiales u operarios. Para mantener un nivel de seguridad e higiene, es necesario determinar los requerimientos mínimos de renovación de aire e iluminación.

Es importante aclarar que los factores ambientales dentro de planta se ven influenciados en cierta forma por las condiciones bioclimáticas externas, es decir, las condiciones naturales del medio. Por lo tanto, la ubicación geográfica de la implantación (latitud y orientación), junto con las características climáticas, como nubosidad y vientos, determinarán, en función del diseño del edificio, las condiciones imperantes en el interior del mismo (Koenig et al., 1978). Es posible aprovechar estas condiciones para un diseño de la estructura, que contemple estos aspectos (Santamarina 2002).

Lie Chien Lin y Gunter (1999), agregan una serie de factores denominados índices cualitativos al grupo de criterios ambientales, los cuales pueden estar presentes en una planta y que de una forma u otra, afectan a los elementos integrantes del proceso productivo. El peso de estos criterios se asigna de forma subjetiva o por comparación de pares, pudiendo ser estos valores exactos o lingüísticos. El estudio de Lie Chein Lin y Gunter (1999) proporciona un procedimiento general que contempla los siguientes pasos:

- Identificar los criterios (ver figuras 5.6 y 5.7).
- Identificar las circunstancias genéricas (ver figura 5.8).
- Identificar cualquier prioridad, si existe, entre las circunstancias genéricas.
- Identificar las consideraciones para prevenir hechos indeseables.
- Asignar un rango de importancia deseado para cada consideración. Propone las escalas 5,4,3,2 y 1 para importancia crítica, considerable, fuerte, moderada y poca, respectivamente. Estas pueden ser modificadas por cada usuario. Para el cálculo del rango total deseado propone:
  - $\sum_i (\text{rango deseado } i) \cdot (\text{número de consideraciones en ese rango})$ .
- Estimar el rango actual total de importancia.
  - $\sum_i (\text{rango actual } i) \cdot (\text{número de consideraciones en ese rango})$ .
  - Por ejemplo, si la consideración de luz suficiente para un área de trabajo tiene un rango deseado de 5, y sólo el 80 % de esa área está iluminada, el rango actual es 4.
- El índice cualitativo para un criterio es igual a  $[(\text{rango actual total}) / (\text{rango total deseado})]$ . El rango de importancia asignado reemplaza el papel del peso del criterio.

Entorno Circundante		
Criterios:	Topografía y Topología	Ambiente comunidad
Circunstancias Genéricas	1.- Condiciones naturales del lugar y construcción.	1.- Impacto de la congestión del tráfico y ruido.
	2.- Acceso de vehículos y patrón de circulación.	2.- Gestión de la basura y control de la polución.
	3.- Conexiones con el transporte externo y equipamiento.	3.- Aspecto de las características externas o vistas posibles.

Figura 5.6: Cuadro para el entorno circundante (Lie Chien Lin y Gunter 1999).

Calidad del Ambiente.			
Seguridad Humana	Confort en el trabajo	Características de seguridad	Accesos para Mantenimiento
1.- Accidentes en el edificio.	1.- Luz	1.- Hurto fuera del edificio.	1.- Compatibilidad de la construcción del edificio con los equipos de manutención
2.- Cruce de vehículos y personas	2.- Ruido.	2.- Hurto dentro del edificio	2.- Espacio para las acciones de mantenimiento.
3.- Interfaces Hombre, Máquina/material.	3.- Ventilación.	3.- Precaución especial con áreas peligrosas	3.- Localización de las actividades de mantenimiento.
	4.- Ergonomía		4.- Complejidad del equipo de manutención.
	5.- Accesos		

Figura 5.7: Cuadro para la calidad del ambiente (Lie Chien Lin y Gunter 1999).

Las figuras tablas representadas, corresponden a la estructura del grupo de criterios ambientales de Lie Chien Lin y Gunter (1999).

El término topografía indica las condiciones naturales en el lugar donde está el edificio, y la topología representa cómo la forma y la estructura del edificio se adaptan a las limitaciones topográficas. A continuación se presenta una figura tabla donde se muestran las circunstancias genéricas que afectan a estos criterios.

Tres circunstancias genéricas para los criterios topográficos y topológico.	
Circunstancias	Ejemplos
Condiciones naturales del lugar y construcción	1.- Ríos y colinas
	2.- Dirección del sol y del viento.
	3.- Cantidad de precipitación y nieve.
	4.- Fundaciones existente, líneas de drenaje, torres eléctricas, etc.
	5.- Modos de conexión entre diferentes edificio.
Acceso de vehículos y patrón de circulación.	1.- si hay espacios inadecuados en los lugares de recepción y envío los vehículos tendrán que esperar en la vía publica hasta que el espacio esté disponible.
	2.- El número de vehículos en una planta industrial puede ser de 40, por lo tanto es necesario separar los lugares de recepción y envío.
	3.- Cuando hay mucho tráfico se prefiere un patrón unidireccional de circulación.
Conexiones con el transporte externo y equipamiento	Las conexiones con rieles, carreteras, embarcaciones y otros accesos.

Figura 5.8: Cuadro de las circunstancias genéricas para los criterios topográficos y topológicos (Lie Chien Lin y Gunter 1999).

Las condiciones ambientales afectan también la eficiencia de operación de los equipos. Como ejemplo citamos un conjunto de turbinas axiales acopladas a compresores centrífugos, en un proceso para la extracción de crudo (GAS-LIFT), en el cual a una de ellas, por su ubicación y a determinadas horas del día, la dirección del

viento hace que readmita los gases producto de la combustión, originando que su eficiencia termodinámica sea baja y su deterioro alto. El deterioro será significativo y se notará por el desgaste más acusado de los alabes. Otro ejemplo que se puede citar son los equipos sensibles a altas temperaturas, vibraciones, corrosión, radiación, etc. Por lo tanto, resulta necesario distribuir los equipos atendiendo a esta necesidad.

Santamarina (2002) sugiere que además de optimizar la distribución en planta, es importante el diseño de una estructura que aproveche al máximo la luz solar y la ventilación natural para el ahorro de energía eléctrica, debido a la no utilización de equipos no activos de iluminación y ventilación. Los equipos no activos son aquellos que no consumen ningún tipo de energía, siendo por lo tanto sistemas sostenibles con largos ciclos de vida. Siguiendo este orden, la autora desarrolla un modelo para la distribución en planta que incorpora un planteamiento integral del diseño del edificio, considerando criterios de ahorro energético, confort de los operarios y adaptación a las condiciones bioclimáticas reinantes en el exterior. La finalidad del modelo, además de optimizar la implantación, pretende optimizar variables asociadas con la dimensión tanto del edificio como de las ventanas (fase anteproyecto), para mejorar el rendimiento energético y reducir el coste de construcción del edificio dentro de la viabilidad del mismo. Por lo tanto, a su propuesta anterior (Santamarina, 1995), agrega funciones adicionales que contemplan estos aspectos. La autora incluye, en la función objetivo a nivel de individuo (ver capítulo 3), la penalización asociada al no cumplimiento de las restricciones establecidas para el sistema de iluminación natural y la penalización asociada al no cumplimiento de las restricciones establecidas para el sistema de ventilación natural. Para la búsqueda de la mejor solución, al igual que la propuesta anterior, utiliza un algoritmo genético. En esta propuesta agrega a la codificación anterior a nivel de individuo, 6 genes adicionales que representan: la altura del edificio  $h_p$ , la configuración del mismo (utiliza tres A, B y C), altura de las ventanas laterales  $h_{vi}$ , longitud de ventana lateral  $L_{vi}$ , ancho de ventana superior  $h_{ve}$  y longitud de ventana superior  $L_{ve}$ . Los valores máximos de las alturas y anchuras de los ventanales, vienen determinados por las soluciones comerciales.

La ventilación natural dentro de un edificio es el resultado de la acción del viento exterior, de las diferencias de presión interna y externa, orientación del edificio y de los efectos térmicos (Timmons y Baughman, 1981; Zhang, et al. 1989; Boulard et al., 1998, Boulard et al., 1999; Yuguo Li y Delsante, 2001), como también de la configuración del edificio y de las ventanas. También influye en la ventilación natural los demás edificios del entorno (Yi Jiang y Qingyan, 2002).

Las diferencias de presión se originan a partir del efecto eólico, por el golpe del aire en una estructura y por la configuración y cantidad de los orificios ventanales (Yuguo Li et al., 2000).

El efecto térmico produce corrientes de aire a pesar de que no exista viento externo (condición de la propuesta de Santamarina 2002). El efecto térmico se debe a la diferencia de las temperaturas interior y exterior, como también por las diferencias de

temperatura del aire dentro del edificio (Boulard, et al. 1998). La temperatura influye en la densidad del aire, a mayor temperatura la densidad es menor y por lo tanto el aire tiende a subir.

Se han desarrollado modelos para simular estos efectos, como el propuesto por Koenig et al. (1978), que tiene la finalidad de caracterizar los efectos de la dirección del viento, la geometría del edificio y la configuración de los orificios para el control y comparación con las variables experimentales presentes en la ventilación natural. Zhang et al, (1989) publican un modelo analítico que tiene como objetivo calcular la temperatura y la ventilación interna, a partir de la velocidad del viento externo, su dirección, dimensión de los ventanales, configuración del edificio y temperatura externa. El modelo incluye el efecto térmico como un estudio comparativo entre las variables experimentales y las calculadas. Yuguó Li et al. (2000) presentan un programa informático multizonal, basado en las diferencias de las presiones interna y externa para el cálculo de la temperatura del aire dentro en un edificio, considerando también las variaciones en la presión entre las diferentes zonas del recinto. El modelo considera las diferentes dimensiones de los ventanales u orificios. Boulard et al. (1999), nos presentan un procedimiento para el modelado y caracterización de la ventilación natural por los efectos de temperatura, dentro de un invernadero. En el ensayo experimental se miden los patrones del flujo del aire y las temperaturas en el interior del invernadero realizado a escala. La finalidad del estudio es tener mayor información sobre el comportamiento de la ventilación natural, en función de los gradientes térmicos. El invernadero a escala y su simulación permitió a los autores desarrollar un programa de termofluidodinámica para este tipo de construcción.



# 6

## Metodología Propuesta.



## **6.- Metodología propuesta.**

Como se ha comentado en apartados anteriores, en el diseño y desarrollo de un sistema productivo, resulta importante tomar en cuenta un conjunto de factores que faciliten el funcionamiento fiable y eficiente del mismo. La fiabilidad, es el resultado de la aplicación de acciones que garantizan la operatividad de los equipos, dentro de unos límites económicos aceptables. La eficiencia del proceso, es el resultado de una ordenación de las actividades o departamentos que garanticen un flujo ordenado y satisfactorio bajo los requerimientos de manutención, y otros criterios necesarios en la distribución. Hoy por hoy, no se ha propuesto una metodología que contemple ambos aspectos en el diseño de una implantación, es por eso que en este trabajo se propone un primer modelo para la integración de los mismos.

En este capítulo, se presenta un modelo para la optimización basado en un problema combinatorial, cuya finalidad es buscar un punto óptimo que minimice tanto los costes relacionales y de manutención, por el posicionamiento de las actividades en la distribución en planta, como de los posibles costes por la aplicación del mantenimiento a los equipos correspondientes a las actividades. Como punto de partida, se tomarán algunas de las consideraciones comentadas en el capítulo anterior, y otras adicionales específicas para este modelo.

Podemos comentar a manera de hipótesis introductoria, que es posible incorporar las consideraciones de mantenimiento para un modelo de distribución, por medio de la definición de funciones matemáticas que contemplen los costes esperados relacionados al mantenimiento y de la redundancia que implica espacios adicionales en la distribución (ver capítulo 5). Los espacios requeridos para redundancia, pueden ser considerados y evaluados como una relación dimensional dentro de la distribución, que penalice el incumplimiento geométrico para ella, en el caso que se utilice. Las diferentes soluciones de distribución en planta, influyen tanto en los costes relacionales como del mantenimiento, debido al desplazamiento de componentes desde el almacén, a la redundancia y por la posible presencia de equipos que generan un ambiente degradador dentro de la distribución. La utilización de parámetros o indicadores característicos, nos permitirá evaluar el desempeño del mantenimiento y el riesgo sobre un horizonte de tiempo. La agrupación de equipos a objeto de realizarles el mantenimiento, permite reducir los costes por número de actuaciones, permitiendo a su vez, minimizar los costes totales esperados por mantenimiento dentro de la distribución.

## 6.1.- Descripción de la metodología del modelo.

Como paso previo a la descripción detallada de la propuesta, tanto en lo que se refiere al mantenimiento (apartado 6.2.1) y de la distribución (apartado 6.2.2), comentamos de forma global y esquemática, la metodología del desarrollo para la determinación de una solución óptima.

El modelo de distribución, además de determinar la implantación para minimizar **los costes de manutención y/o relacionales**, proporciona la adaptación de ésta a la redundancia, las distancias entre las actividades y de las actividades al almacén. Posteriormente, en el modelo de mantenimiento, se evalúan los costes de instalación de los equipos y los costes de desplazamientos de materiales de mantenimiento desde un almacén. Se determina, también, los costes por la aplicación de las acciones de mantenimiento, para cada equipo de las actividades, sobre un horizonte de tiempo  $t$  utilizado para la planificación. Los costes presentes para minimizar un **coste esperado total del mantenimiento**, serán, por lo tanto, los comentados anteriormente, los posibles costes por paro de planta (apartado 6.2.1.7) y los costes por actuación al conjunto de equipos (apartado 6.2.1.3).

Se observará más adelante que los costes de mantenimiento, ya sea preventivo o correctivo en cada actividad, están en función del número de actuaciones  $n_{ai}$ , del coste de aplicación medio horario y sus respectivas duraciones. El número de actuaciones o intervenciones  $n_{ai}$ , representa a una actuación  $a$ , repetida  $n$  veces sobre un horizonte  $t$ , para el equipo o equipos de la actividad  $i$  (ver apartado 6.2.1.1).

Como se detalló en el capítulo 2 y se hará en apartado (6.2.1.5) de este capítulo, la tasa de fallos se modifica por la existencia de un ambiente degradador en planta, originado por el externo bioclimático y en algunos casos, por los mismos equipos, que puede influir también en los costes finales del mantenimiento.

El modelo de mantenimiento permite optimizar el número de actuaciones  $n_{ai}$  para cada equipo, procurando que estos sean similares a los otros equipos para realizar la intervención al mayor número de éstos, y minimizar el coste esperado total del mantenimiento (apartado 6.2.1.3).

Por medio de la aplicación del algoritmo genético se optimiza la distribución, el número de actuaciones  $n_{ai}$  y la redundancia  $R_i$ , para determinar la solución que genera el **mínimo coste total relacional de planta**. El coste total relacional de la planta es la suma de los costes relacionados a la distribución y los esperados totales del mantenimiento.

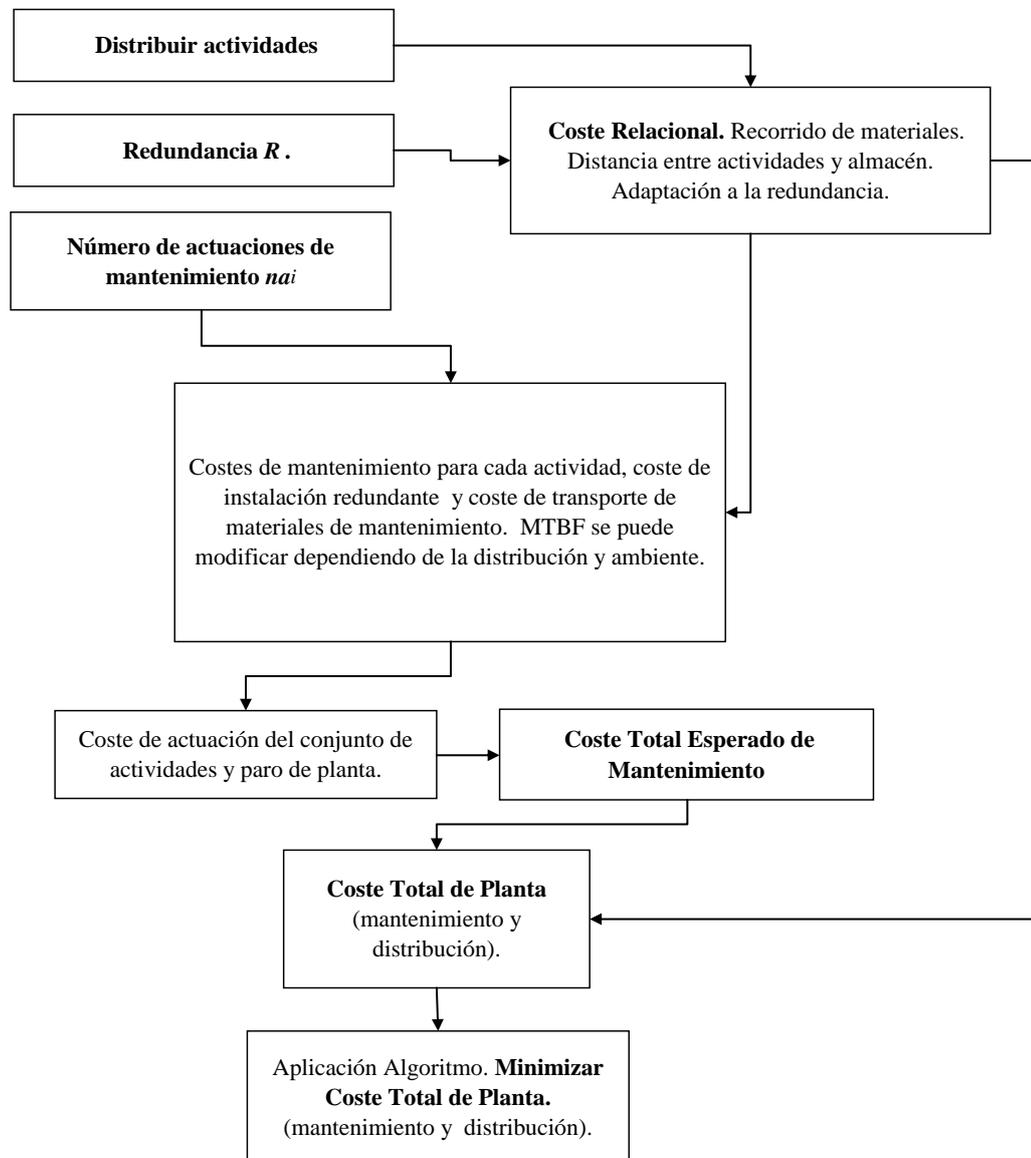


Figura 6.1: Esquema general de la propuesta.

## **6.2.- Consideraciones del modelo.**

Comentaremos a continuación, las consideraciones presentes en el modelo y los planteamientos que justifican su implementación. Este modelo se aplica en la etapa de prediseño del proceso productivo, para evaluar los posibles costes y para la toma de decisiones, tanto en la distribución del layout como en la implementación de las acciones de mantenimientos.

### **6.2.1.- Consideraciones del mantenimiento.**

En este apartado, se abordan las características que contemplará el modelo para la optimización del mantenimiento, y sus particularidades de aplicación dentro del modelo conjunto.

De los niveles de actuación aplicados en la optimización del mantenimiento estudiados en el capítulo 2, usaremos el desarrollo de planta. Esto se debe a que además de considerar un conjunto de equipos dentro de la distribución, estos son independientes entre sí funcionalmente, es decir, cada uno realiza una función diferente en un área determinada y el paro de un equipo no representa el paro de otro. Adicionalmente, la finalidad del modelo, es optimizar el número actuaciones de mantenimiento, para de esta manera minimizar el coste total por la implementación, al conjunto de equipos presentes en la distribución. Cada equipo, por lo tanto, representará un elemento independiente que recibirá una determinada acción de mantenimiento en un instante  $a$ , y su relación con otros equipos dependerá sólo del instante de intervención (apartado 6.2.1.3), de la distancia entre ellos (apartado 6.2.1.5) y de los paros de la planta por mantenimiento correctivo (apartado 6.2.1.1).

#### **6.2.1.1.- Mantenimiento y coste de implementación.**

Para las actividades de mantenimiento, se establece un horizonte de tiempo  $t$  (figura 6.2) en el cual se hace la valoración de la implementación a partir del coste. Esto en función de variables como: los intervalos de aplicación de las acciones de mantenimiento, duración como el tiempo medio para reparar (MTTR) y otros parámetros, sujeta a la condicionante de tiempo medio entre fallo o de buen funcionamiento (MTBF). Al conjunto de equipos, se le aplicarán igual o diferentes

números de actuaciones ( $n_{ai}$ ) para el horizonte ( $t$ ), así como también serán diferentes, los tiempos medios de buen funcionamiento (MTBF) y tiempos medios de reparación (MTTR), es decir, cada equipo tiene sus propias características medias independientes de operación. Para las acciones de mantenimiento se supone una efectividad del 100% ( $\varepsilon = 1$ ) (Muñoz, 1997), y una tasa de fallos lineal y constante. Esta simplificación,  $h =$  constante, puede valorarse como cierta si consideramos una tasa por fallos aleatorios de las tres vistas en el capítulo 2 (tasa de fallos infantil, aleatoria y por envejecimiento). Para McCormick (1981), cuando se desconoce la evolución de los fallos en  $t$ , por lo general se aproxima a una tasa de fallos constante. Este autor sugiere, también, que los fallos infantiles usualmente son bajos, por lo que el MTBF se determina en la recta de fallos aleatorios, es decir, tasa de fallo constante.

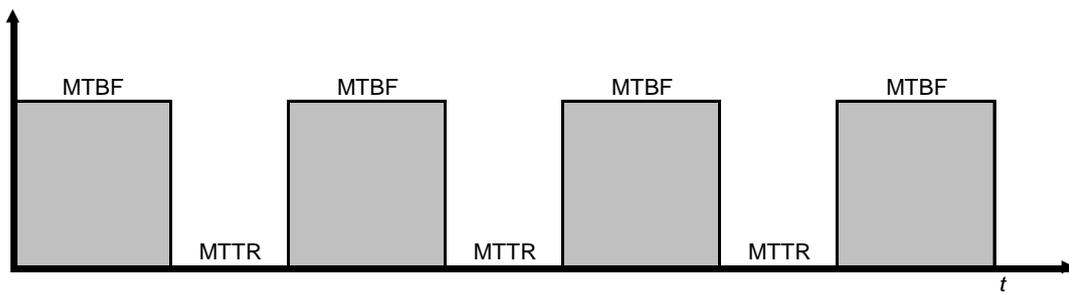


Figura 6.2: Comportamiento medio de un equipo sin mantenimiento preventivo/predictivo para el horizonte  $t$ .



Figura 6.3: Tasa de fallos lineal pseudo constante (elementos mecánicos).

En los elementos mecánicos, la tasa por fallos aleatorios (figura 6.3) en realidad es pseudo constante, a diferencia de los componentes electrónicos que si tienen una tasa constante. Como se ha observado en el capítulo 2, la tasa de fallos ( $\lambda$  o  $h$ ) se puede definir como el número de componentes o equipos que han fallado en un intervalo de

tiempo dado, respecto al número de componentes que funcionan correctamente desde el principio de ese tiempo considerado.

$$h(t) = [n_i(t)/N_i(t)]/\Delta t.$$

Donde:

$n_i(t)$  = números de piezas en funcionamiento en  $t$ .

$N_i(t)$  = número de piezas que fallan durante el  $\Delta t$  hasta  $t$ .

La influencia que ejercen los agentes ambientales en el proceso de degradación y por lo tanto en la tasa de fallos, debe ser considerada y modelada (ver apartado 6.2.1.5 y figuras 6.17 y 6.19).

Como se observa en la figura 6.2, el tiempo medio de buen funcionamiento, MTBF, nos servirá como referencia para la valoración de las intervenciones. Según lo dicho en el capítulo 2, el MTBF es el parámetro más representativo para la determinación de las leyes estadísticas de fallos. El MTBF indica el intervalo de tiempo donde será más probable que ocurra el fallo, una vez que ha sido puesto en servicio el equipo o máquina. Se posiciona como un punto central en la distribución normal de densidad de fallos (figura 6.4), punto que representa la media, en el tiempo, de los fallos para una determinada población del mismo equipo. Además, la utilización de este indicador se justifica en que representa la intersección, con la ley normal, de las curvas de probabilidad de fallos  $F(t)$  y la de fiabilidad  $R(t)$ , punto en el cual la fiabilidad  $R(t)$  decrece y la probabilidad de fallo  $F(t)$  crece (figura 6.5). También hay que decir que el MTBF, como valor medio, es utilizado para estimar una determinada cantidad de fallos para un próximo periodo de operación. Recientemente, Akabarov y colaboradores (Akabarov et al., 2008), estiman, mediante estudios estadísticos de datos recolectados en un sistema de producción, que el mejor momento de actuación preventiva oscila alrededor del MTBF.

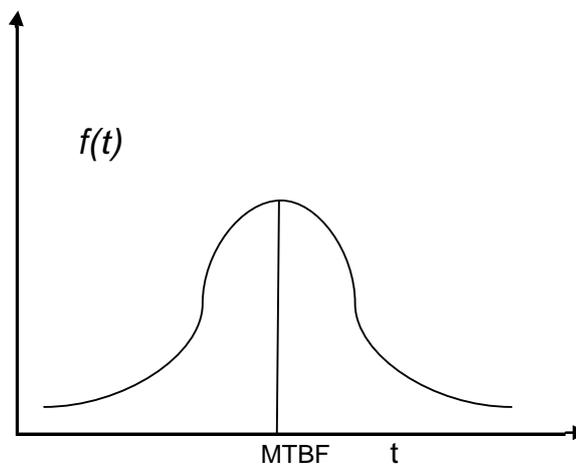


Figura 6.4: Distribución de la probabilidad de densidad de fallos de un equipo (ley normal).

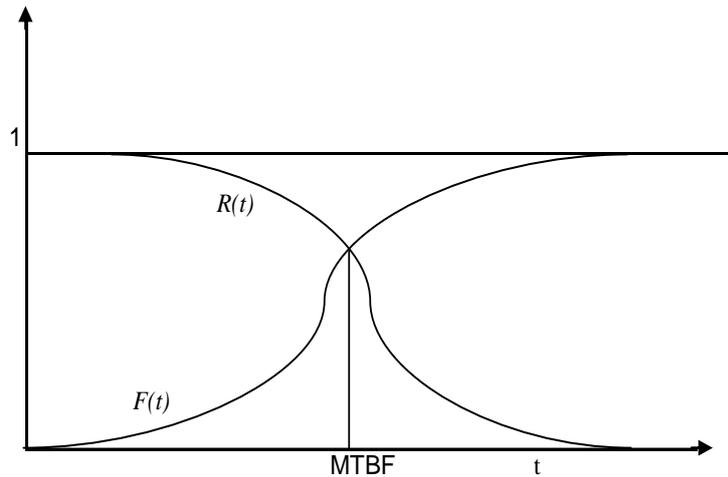


Figura 6.5: Curvas de fiabilidad  $R(t)$  y probabilidad de fallo  $F(t)$ .

$$R(t) = 1 - F(t).$$

La curva de probabilidad de fallos  $F(t)$ , se obtiene a partir de la integración en el tiempo de la curva densidad de fallos  $f(t)$ .

$$F(t) = \int_0^t f(t) dt$$

De realizarse la intervención  $a$  justo en MTBF, tendríamos una probabilidad de fallo del 50%, por lo tanto, el MTBF sería el límite máximo permitido con esta condición de riesgo. Se pueden usar valores límites más pequeños que el MTBF, es decir  $MTBF - \Delta t$ , para disminuir la probabilidad de fallo, pero aumenta posiblemente los costes del preventivo debido al sobre-mantenimiento e induce a una estimación muy conservadora para el correctivo. Adicionalmente, como se verá más adelante, por la naturaleza del modelo, será poco frecuente caer justamente en los MTBF, existiendo un intervalo  $\Delta t$  desde la actuación  $a$  hasta el MTBF (ver figura 6.8). Con la formulación del coste esperado del preventivo, el sobre-mantenimiento será delimitado para obtener un equilibrio entre probabilidad de fallo y éste.

Es importante decir, que la dispersión en los fallos influye mucho en la probabilidad y en el instante adecuado para la intervención. Una densidad mayor  $[f(t)A]$  alrededor de MTBF facilita la implementación del mantenimiento preventivo, que una con una alta dispersión  $[f(t)B]$  (figura 6.6). En vista de la calidad actual de los procesos de manufactura, hoy día la dispersión de los equipos es baja, y se definen claramente alrededor de los MTBF y más en especial en equipos críticos como los presentes en plantas petroleras, nucleares o sistemas aeronáuticos. Por lo tanto, asumiremos que los

equipos tienen dispersiones en la distribución de fallos bajas, lo que significa que podrán fallar en intervalos muy cercanos al MTBF.

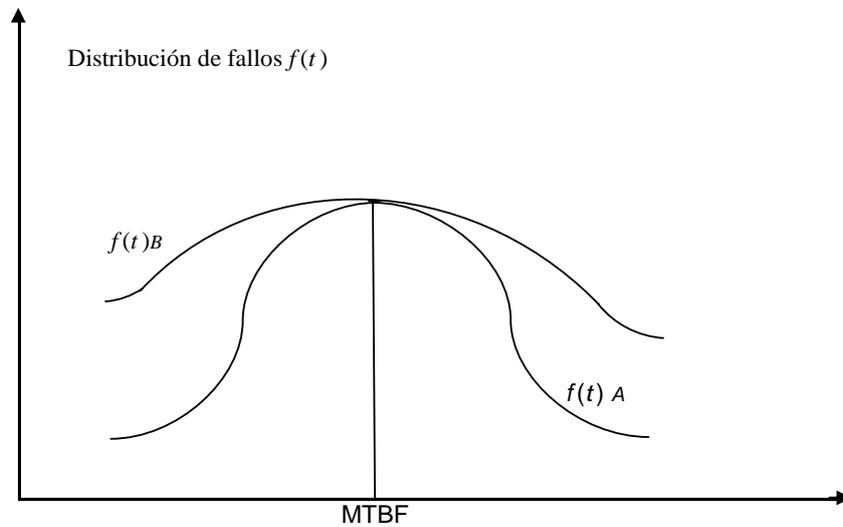


Figura 6.6: Distribución de fallos de dos poblaciones de equipos.

Por lo tanto, a partir del MTBF podremos considerar, en caso de no realizar un mantenimiento preventivo/predictivo o intervención a tiempo, la posible aparición de un fallo. Dicho de otra forma, más allá del punto límite MTBF, el modelo considera situación de riesgo de fallo, por la alta probabilidad de que este ocurra, incidiendo en los costes esperados del correctivo, y el posible paro de la planta por no contar con equipo redundante (figura, 6.7). El algoritmo puede aceptar un determinado nivel de paro de los equipos, con sus respectivos costes esperados para la producción, si estos representan costes menores debido a la instalación de equipos redundantes, así como por una aplicación excesiva del preventivo.

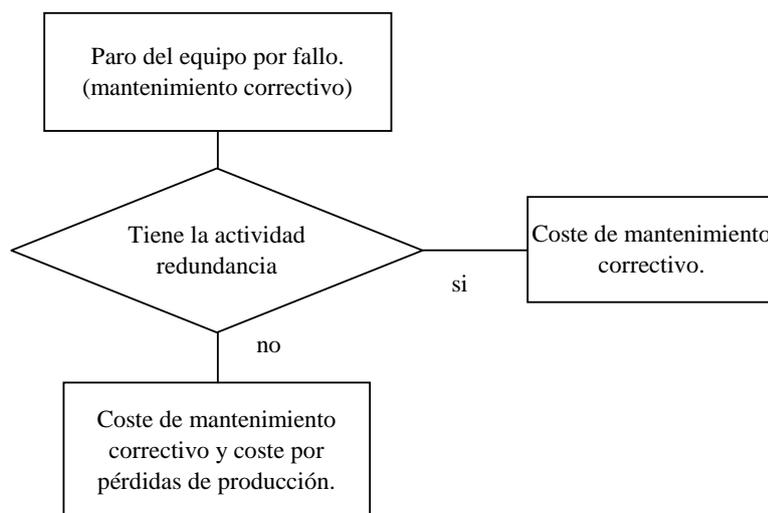


Figura 6.7: Situaciones de mantenimiento correctivo.

Hay que aclarar, según lo dicho, que superado el MTBF no implica necesariamente el fallo inmediato del equipo, a pesar de tener una probabilidad alta de que este ocurra, como también puede ocurrir un fallo antes del MTBF, a pesar de tener una probabilidad muy baja de que aparezca. Por lo tanto, la aplicación propuesta, **corresponde a un modelo para evaluar el riesgo, en una etapa de prediseño y que sirve para la toma de decisiones, a partir del estudio de la optimización de los posibles costes que tendría que asumir la organización por la aplicación de las actividades de mantenimiento, y los posibles costes por tener la planta parada, como resultado de esa implementación, siendo el suceso iniciador del mayor riesgo la superación en el tiempo del MTBF.** Dada la naturaleza estocástica del mantenimiento (ver capítulo 2), estos problemas se desarrollan bajo un ambiente de incertidumbre, por lo tanto, los resultados de los modelos de optimización de las acciones de mantenimiento, corresponden a valores esperados por la aplicación de un conjunto de acciones (Vassiliadis y Pistikopoulos, 1998).

Como se ha observado en el capítulo 2, la indisponibilidad es la probabilidad de que el equipo no esté operable o que esté en estado de fallo. Es decir, es la función de riesgo la cual se define, para el mantenimiento correctivo, como la frecuencia de aplicación de la acción, por la duración media de esta actividad en horas. En nuestro caso de estudio, en vez de utilizar la frecuencia, empleamos  $nci$  ( $nai$  correctivo) y MTTR como duración media del correctivo.

$$u_c = nci.(MTTR).$$

$u_c$  representa el número de horas posibles que nuestro equipo podría estar fuera de servicio por la aplicación del correctivo para un horizonte de planificación  $t$ , pero que no generaría el posible paro de la planta si tiene redundancia, es decir, la indisponibilidad para la planta será nula y por lo tanto de nuestro interés. No se emplea el término  $u$  para el preventivo/predictivo, ya que para éste mantenimiento no se considera paro prolongado del equipo, por lo que  $u_m$  es nulo. Esto puede ser considerado como verdadero, si asumimos una fracción de la duración igual o casi igual a cero, donde el equipo está indisponible por la realización del preventivo (Martorell et al., 1995; 1996).

La indisponibilidad  $u$  es más empleada para evaluar el riesgo en componentes de sistemas por medio de análisis TOP, y más específicamente en sistemas de seguridad en instalaciones críticas; como centrales nucleares (ver capítulo 2).

El objetivo del modelo es optimizar el número de actuaciones de mantenimiento a un conjunto de equipos de planta, teniendo como premisa no superar el MTBF de éstos, al menos que la relación de coste lo amerite. La optimización de las tareas repercute en el coste total de implementación del mantenimiento; a su vez, la minimización de las posibles acciones correctivas repercute en la disminución de fallos catastróficos, que

dependiendo del equipo podrían originar daños tanto a operarios como al medio ambiente.

Podemos apuntar con más detalle, que el horizonte  $t$  nos posibilita, junto con el número de actuaciones para la actividad  $i$  ( $n_{ai}$ ), determinar el intervalo de mantenimiento  $f_{ai}$  en unidades de tiempo, para comparar con el  $MTBF_i$ , también en esas unidades de tiempo, para valorar la intervención. Aclaramos que  $n_{ai}$  puede ser  $n_{mi}$  para cuando origina posible mantenimiento preventivo, es decir, anterior a  $MTBF_i$  y  $n_{ci}$  correctivo cuando es posterior a  $MTBF_i$ .

$f_{ai}$  se obtiene de:

$$f_{ai} = t / n_{ai}$$

Se puede pensar, que si conocemos el MTBF, basta con aplicar el mantenimiento en ese punto  $a$  donde  $f_{ai} = MTBF_i$  o  $MTBF_i - \Delta t$ . Pero es importante aclarar, que los instantes de actuación  $a$ , se organizan para aplicar el mantenimiento al mayor número de equipos de planta, es decir, en un mismo instante  $a$ , realizar el mantenimiento a la mayor cantidad posible de éstos para reducir el coste total del mantenimiento. (Ver apartado 6.2.1.3).

Como se verá en la figura 6.10 del apartado 6.2.1.3, al aplicar directamente  $f_{ai} = MTBF_i$ , si los equipos tienen  $MTBF_i$  diferentes pertenecerán a grupos diferentes, lo que incrementaría los costes de actuación. A su vez, es difícil establecer intervalos de tiempo para agruparlos por el MTBF, siendo muy subjetiva la implementación.

Si se emplea  $f_{ai} = MTBF_i - \Delta t$  seguiríamos con el problema para la agrupación de equipos, como también, no planificaríamos a futuro, los instantes adecuados para minimizar el coste del preventivo y el sobre-mantenimiento.

**Y lo más importante es que exista, para la correcta implementación del algoritmo genético, una representación simultánea entre el mantenimiento y la distribución, siendo necesario incluir un elemento de las acciones de mantenimiento y de la redundancia en el cromosoma, para la identificación, junto con los de la distribución, de posibles buenos esquemas para la optimización** (ver apartado 6.2.3.1). **Esto permite, también, ampliar el espacio de búsqueda para explorar una mayor superficie de soluciones.**

Hay que comentar también, que el MTBF puede variar debido a la influencia de un ambiente agresivo, pudiendo aumentar su tasa de fallos con la consiguiente disminución del MTBF (ver apartado 6.2.1.5). Al utilizar el número de actuaciones  $n_{ai}$  dentro del algoritmo, la manipulación aleatoria de los valores  $n_{ai}$ , permite ajustar los instantes de intervención o actuación para buscar un equilibrio con los costes.

Estas son las razones por el cual, vemos conveniente, emplear  $n_{ai}$  sobre un horizonte  $t$ , que nos permitirá ajustar grupos, determinar diferentes instantes de

actuación para evaluar costes y hacer mejor la planificación a futuro. Adicionalmente, tiene la ventaja de realizar el mantenimiento a intervalos o periodos constantes.

A manera de ejemplo, se puede apreciar en la figura 6.8, que con un horizonte de  $t = 16000$  horas y un número de actuaciones  $n_{ai} = 6$  ( $n_{mi} = 6$ ), se obtiene un intervalo de tiempo  $f_{ai} = f_{mi}$  (preventivo) de aplicación de 2667 horas, que está muy por debajo del MTBF, con lo cual estaríamos sobre manteniendo el equipo e incidiendo en el coste final del mantenimiento preventivo. Un  $n_{ai} = 4$  ( $n_{mi} = 4$ ) originará una  $f_{mi} = 4000$  horas, es decir MTBF, lo que implica que actuamos en el instante límite de alto riesgo. Con  $n_{ai} = 3$  o 2, es decir  $n_{ci} = 3$  o 2, superamos el MTBF, con lo cual estaríamos en la presencia de un posible fallo aleatorio, por tener una probabilidad muy alta de que ocurra.

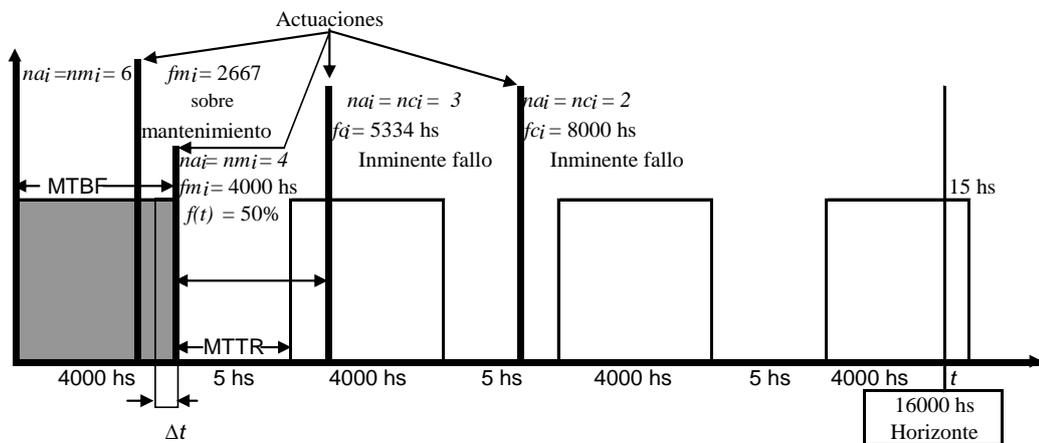


Figura 6.8: Representación de un caso para un equipo de la actividad.

Es importante comentar también, que otra razón por la cual se aplica  $n_{ai}$  en vez de valores de  $f_{ai}$ , radica que es mucho más fácil codificar dentro del conjunto de valores con pocos dígitos,  $[1,2,3,4,5,6,7,8,9...n]$ , que utilizar valores de más dígitos,  $[1000,1001, 1002...1011...50000 \text{ hs}]$  (figuras 6.13, 6.14, 6.15 y 6.23) que dificultan el diseño del proceso aleatorio. Adicionalmente, al dividir el horizonte en partes iguales para obtener periodos constantes, la aplicación es robusta, ya que con menos elementos y de menor valor empleados para codificar, obtendríamos una gama amplia de  $f_{ai}$  para todo el conjunto de equipos. A su vez, como se ha comentado, esta forma de implementación facilita la identificación de grupos para la aplicación del mantenimiento (ver apartado 6.2.1.3). Vassiliadis y Pistikopoulos (1998), obtienen como resultado de su modelo de optimización, unas series o cadenas que representan, respectivamente, la secuencia de acciones de mantenimiento a un conjunto de componentes y los instantes de actuación en números enteros positivos.

Es conveniente que el horizonte  $t$  sea lo suficientemente amplio, es decir, muy superior en unidades de tiempo con respecto al mayor MTBF, para así ajustar mejor los instantes de actuación alrededor de los MTBF de los equipos, por la aplicación de  $n_{ai}$

altos. Como por ejemplo, si divididos un horizonte  $t_1$  en 24 o 23 intervalos, se ajustará mejor que dividir un horizonte  $t_2$  en 2 o 3 intervalos, siendo  $t_2$  mucho menor que  $t_1$ .

El MTTR se utiliza para el cálculo del posible coste por la aplicación del mantenimiento correctivo. Como se ha comentado en el capítulo 2, una actividad de mantenimiento preventivo está bien dimensionada por realizar la actividad dentro de límites de tiempo aceptables. Pero el mantenimiento correctivo representa una actuación mucho mayor (MTTR), con la consecuencia de que supera esos tiempos permitidos y por lo tanto genera pérdidas de producción por el paro de planta.

Los costes por aplicar un mantenimiento correctivo pueden resultar superiores debido a daños más severos que pueden ocurrir en el equipo, por lo tanto, se considerará mayor el coste del correctivo.

A continuación se definen las expresiones para el cálculo del mantenimiento preventivo y del correctivo.

Para el cálculo de los costes por aplicación del mantenimiento preventivo la expresión propuesta es:

$$C_{mmit} = nmi \cdot [C_{mmi} \cdot dmi + cpu \cdot (MTBF_i - fai)].$$

Donde:

$C_{mmit}$  = coste del mantenimiento preventivo del equipo de la actividad  $i$  para el horizonte  $t$ .

$C_{mmi}$  = coste del mantenimiento preventivo medio por hora del equipo de la actividad  $i$ .

$nmi$  = número de acciones preventivas para el equipo de la actividad  $i$ . Esto ocurre cuando  $nai$  (número de actuaciones para la actividad) está en posible mantenimiento preventivo.

$dmi$  = duración media de la actividad preventiva para el equipo de la actividad  $i$ , en horas.

$cpu$  = coste por pérdidas de utilidad por mantenimiento preventivo excesivo para la organización.

$MTBF_i - fai$  = diferencia entre el tiempo medio de buen funcionamiento e inicio de la actividad de mantenimiento preventivo en la actividad  $i$ . Cuanto mayor sea esta diferencia mayor será la estimación por pérdida de utilidad.

Y para el conjunto de actividades de la distribución, la función propuesta para el coste de mantenimiento preventivo será:

$$C_{mmt} = \sum_{i=1}^n (nmi \cdot [C_{mmi} \cdot dmi + cpu \cdot (MTBF_i - fai)]).$$

$n$  = número de actividades en la distribución.

Para el mantenimiento correctivo es:

$$C_{mci} = n_{ci} \cdot C_{mci} \cdot MTTR_i.$$

Donde:

$C_{mci}$  = Coste del mantenimiento correctivo del equipo de la actividad  $i$ .

$n_{ci}$  = número de acciones correctivas al equipo de la actividad  $i$ . Igual que en el caso anterior, se le llama así cuando  $n_{ai}$  origina posibles acciones correctivas.

$C_{mci}$  = coste de mantenimiento correctivo medio horario del equipo de la actividad  $i$ .

$MTTR_i$  = tiempo medio de reparación del equipo de la actividad  $i$ .

Y para toda la distribución la propuesta será:

$$C_{mct} = \sum_{i=1}^n (n_{ci} \cdot C_{mci} \cdot MTTR_i).$$

Y el coste por tener la planta parada la función propuesta es:

$$C_{pp} = C_{pput} \cdot (MTTR_t + \Delta t_{fallo}).$$

Donde:

$C_{pput}$  = coste medio horario por pérdidas de producción.

$MTTR_t$  = tiempo de reparación del equipo o equipos siniestrados no redundantes.

$\Delta t_{fallo}$  = diferencia en el tiempo desde que ocurre el fallo hasta el momento que se inicia la reparación para todos los equipos.

En el caso en que se presente mantenimiento correctivo en dos o más equipos, en actividades con equipos no redundantes, es necesario, como se ha comentado, considerar el MTTR de los equipos responsables del paro. Pueden ser consideradas dos posibilidades o formas de implementación:

- Posibilidad 1: considerar el MTTR total como la suma de los MTTR de los equipos sobre el horizonte  $t$ . Es perfectamente aplicable cuando no coincidan en el tiempo los paros (figura 6.9).

- Posibilidad 2: que los MTTR coincidan en algún intervalo sobre el horizonte  $t$ , considerándose el MTTR total como la diferencia en tiempo entre el último instante del paro en el horizonte y el primero (figura 6.10).

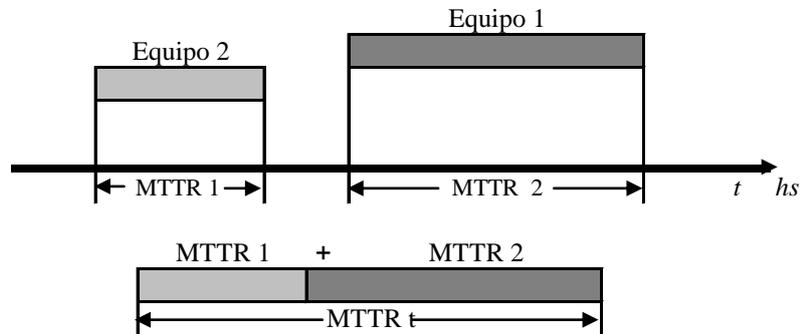


Figura 6.9: Representación del posibilidad 1.

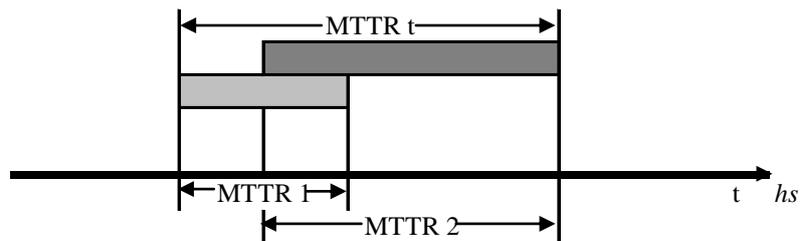


Figura 6.10: Representación del posibilidad 2.

### 6.2.1.2.- Redundancia y coste de instalación.

Como se ha comentado, el modelo contemplará los costes de instalación de un equipo solo o redundante. La redundancia implicará un coste de instalación adicional, pero tiene la ventaja, de que si ocurre un fallo no implicará el paro del sistema productivo y por lo tanto sus respectivos costes (ver figura 6.7). La redundancia está sujeta a las restricciones espaciales y geométricas de la distribución en planta, es decir, un departamento o actividad con equipos redundantes demandará una mayor área como una determinada asignación (ver apartado 6.2.2). La redundancia se puede representar en el cromosoma (ver figura 6.21), como otro segmento cuyo gen representa la actividad distribuida en planta, y el alelo que podrá variar entre 1 y 2. Si el equipo es redundante (2) y lo contrario (1). La expresión para el cálculo de este coste es:

$$C_{ii} = C_{iu}.R_i$$

Donde:

$C_{ii}$  = coste de instalación de la actividad  $i$ .

$C_{iu}$  = coste de instalación del equipo.

$R_i$  = Toma los valores 1 o 2

Y para toda la distribución en planta el coste de instalación propuesto será:

$$C_{iit} = \sum_{i=1}^n C_{iu}.R_i$$

Se deberá realizar mantenimiento preventivo al equipo redundante, para garantizar su operatividad en el próximo intervalo de trabajo. Este se incluirá en los costes del correctivo de la actividad en cuestión, como un mantenimiento preventivo (figura 6.11). Hay que decir, que al equipo redundante siempre se le realizará mantenimiento preventivo, a menos que  $f_{ai}$  sea muy alta, en cuyo caso ambos equipos entran en mantenimiento correctivo. Esta solución quedará penalizada en el algoritmo (ver apartado 6.2.1.7).

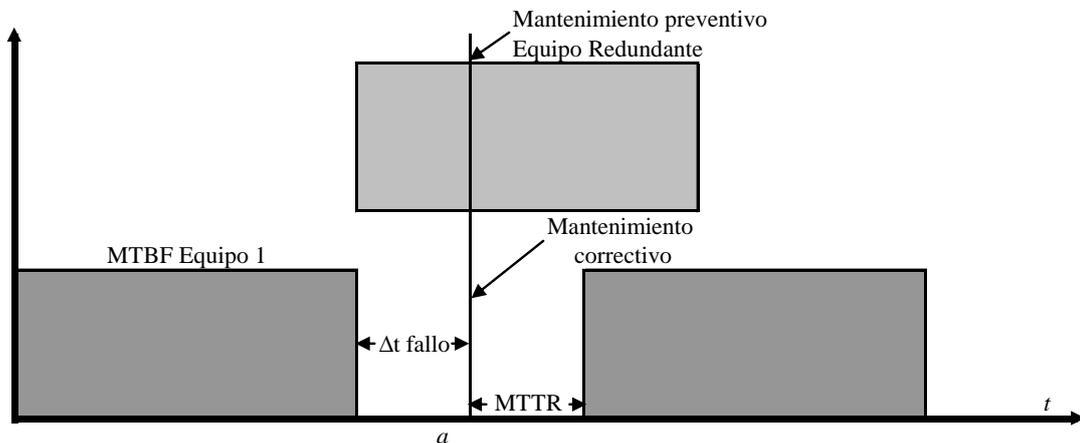


Figura: 6.11: Mantenimiento del equipo redundante.

Se propone la siguiente expresión para el cálculo de los costes del mantenimiento correctivo-preventivo de una actividad con equipo redundante:

$$Cmcmi = nci.Cmci.MTTRi + nmir.Cmmir.dmir.(Ri - 1).$$

$$Cmcmi = nci.(Cmci.MTTRi + Cmmir.dmir.(Ri - 1)).$$

Donde:

$Cmcmi$  = Coste total del mantenimiento correctivo del equipo de la actividad  $i$  con mantenimiento preventivo del equipo redundante.

$(nci = nmir)$  = número de acciones correctivas o preventivas a los equipo de la actividad  $i$  en caso de equipos redundantes.

$Cmci$  = coste del mantenimiento correctivo medio horario del equipo de la actividad  $i$ .

$MTTRi$  = tiempo medio de reparación del equipo de la actividad  $i$ .

$Cmmir$  = coste de mantenimiento preventivo medio horario del equipo redundante de la actividad  $i$ . Este será igual a  $Cmmi$ .

$dmir$  = duración media de la actividad preventiva del equipo redundante de la actividad  $i$ . Este será igual a  $dmi$  que tendría el equipo en solitario.

$Ri$  = Toma los valores 1 o 2.

Se podría pensar que si estamos en mantenimiento correctivo es razonable colocar un equipo redundante, pero hay que aclarar que debido al MTTR y tiempo para el inicio de la actuación  $\Delta t_{fallo}$ , un acción correctiva se puede convertir en preventiva para un horizonte de  $t$ . Por lo tanto la instalación adicional podría resultar inviable (ver apartado 6.2.1.4).

### 6.2.1.3.- Grupos para la intervención.

Para que las actividades de mantenimiento interfieran lo menos posible con el proceso productivo, debido a la presencia de los operarios y materiales de mantenimiento, es conveniente hacer, en un mismo instante  $a$ , el mantenimiento al mayor número de equipos posibles, como ha sido comentado (ver apartados, 6.1 y 6.2.1.1). Esto permitirá reducir el coste de mano de obra directa o contratada, es decir, el coste de actuación por aplicación de operarios. El algoritmo puede ordenar grupos de 1, 2, 3 o  $n$  actividades, debiendo ser lo menor posible el número de grupos  $G$ , así como sus actuaciones o intervenciones  $nai$ . Para equipos con MTBF diferentes y reunidos en un mismo grupo, una actuación  $a$  podría originar un sobre mantenimiento en un equipo y una alta probabilidad de fallo en otro (figura 6.12). Por lo tanto, se debe determinar la mejor combinación mínima de grupos  $G$  y número de actuaciones  $nai$ , que eviten situaciones similares.

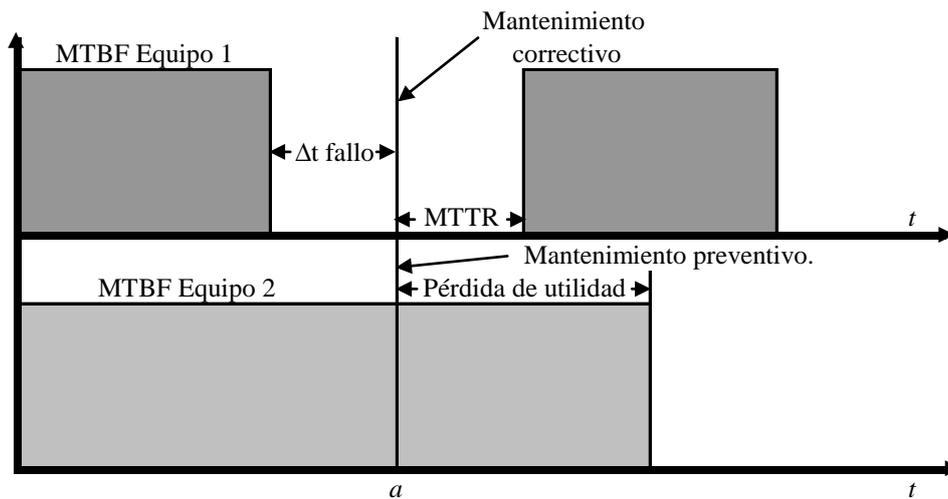


Figura 6.12: Representación de una actuación que involucra dos equipos de diferente MTBF.

Es importante aclarar que, cuando nos referimos a un instante  $a$ , para este problema, puede ser un intervalo de tiempo finito donde sea posible, con un número determinado de operarios u operario, realizar el mantenimiento al grupo de equipos

Resulta necesario la definición de una expresión para la función objetivo que contemple estas consideraciones. Para minimizar los grupos, el número de actuaciones y calcular el coste de actuación por grupos, se propone la siguiente expresión:

$$C_{att} = G.Cat. \sum_{g=1}^G [ (na_{g1}) ].$$

Donde:

$Cat$  = coste de actuación unitario.

$G$  = número de grupos constituidos en el cromosoma (ver figura 6.11).

$na_{g1}$  = número de actuaciones por grupo (igual a  $na_i$  de las actividades pertenecientes al grupo).

Esta expresión será menor si  $G$  es menor, es decir, una solución donde  $G = 1$ , significa que todas las actividades están agrupadas en un solo conjunto y el mantenimiento se hará al mismo intervalo de tiempo. Para valores mayores de  $G$ , el mantenimiento de los equipos se hará a destiempo, con la consiguiente presencia adicional de los operarios y materiales. El término entre corchetes, incluye la influencia del número de actuaciones  $na_i$ .

La agrupación de las actividades se representan directamente en el cromosoma número de actuaciones ( $na_i$ ) (figura 6.13, 6.14, 6.15 y 6.23), donde dos genes con el

mismo alelo (*nai* iguales) representan una agrupación. A partir de la aplicación del algoritmo, se identifican los posibles grupos de intervención. Como se observa en la figura 6.13, existen 2 grupos constituidos por dos actividades que recibirán mantenimiento a los mismos instantes  $a$ , es decir, las actividades A1 y A9 forman un grupo, y A2 y A3, otro. El resto forman grupos constituidos por una sola actividad, tal y como se observa también en la figura 6.14.

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
3	5	5	7	2	6	4	9	3

Figura: 6.13: Agrupación de actividades en un cromosoma.

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
3	5	1	7	2	6	4	9	8

Figura 6.14: Agrupación de actividades en un cromosoma.

Una solución ideal (figura 6.15), sería aquella que cubriera todas las necesidades del mantenimiento de los equipos para un mismo instante de actuación  $a$ , es decir, todas las actividades formarían un grupo de actuación con igual número de intervenciones *nai* para el horizonte. En la práctica esto pudiera no ser posible, debido a que los equipos poseen MTBF diferentes, con lo cual se originaría posibles sobre mantenimientos en unos equipos y sub mantenimientos en otros (figura 6.12).

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
3	3	3	3	3	3	3	3	3

Figura 6.15: Agrupación de actividades en un grupo.

Como se ha observado en el capítulo 2, Vaurio (1995) también organiza todas las actividades de mantenimiento de los componentes de una planta, a partir de la agrupación en conjuntos, en función de la similitud de las tareas necesarias para cubrir las causas de fallos. Volkanovskia y colaboradores (Volkanovskia et al., 2008), en cambio, consideran esta posibilidad en su modelo para la optimización del mantenimiento en centrales eléctricas, como una restricción de mano de obra disponible para un determinado número de unidades, a las que se le puede realizar mantenimiento simultáneamente por el mismo equipo operarios.

En nuestro modelo se cubrirán todas las posibles causas de fallos (acciones preventivas) para un equipo, en una sola intervención  $a$ , incluyendo también el mantenimiento a los diferentes equipos del grupo.

#### 6.2.1.4.- Influencia del tiempo de inicio y tiempo medio de reparación MTTR.

Debido a la presencia de un tiempo de reparación MTTR considerado para el mantenimiento correctivo, y de un  $\Delta t_{fallo}$  para iniciar la actuación  $a$ , repetida  $nai$  veces a la largo del horizonte  $t$ , una actuación  $a$  puede cambiar de correctiva a preventiva (figura 6.16). Esto no ocurre si  $fai$  es menor que el  $MTBFi$  en la primera actuación  $a$ , ya que al actuar dentro del intervalo  $MTBFi$ , este se desplazará  $MTBFi$  unidades después del mantenimiento, para  $\varepsilon = 1$  (ver capítulo 2).

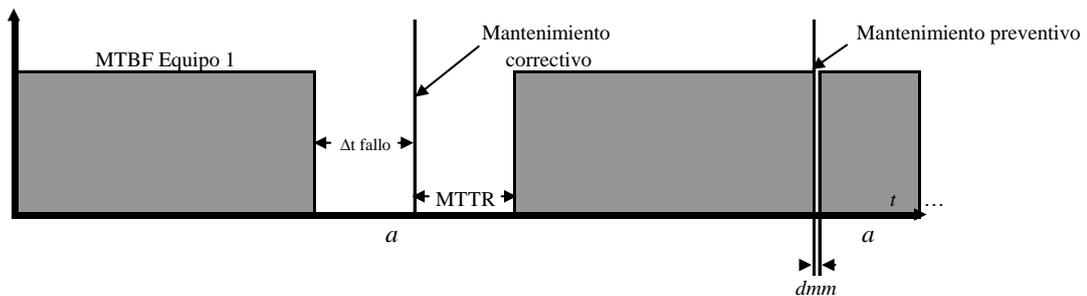


Figura 6.16: Variación del tipo de mantenimiento.

#### 6.2.1.5.- Condiciones ambientales de planta.

En los capítulos 2 y 5 se estableció que las condiciones imperantes en el ambiente de planta, son determinantes en la fiabilidad y durabilidad de los equipos. Estas condiciones pueden ser producto de la acción de agentes bioclimáticos y de los contaminantes. Por lo tanto, es necesaria la definición de acciones tendentes a proteger los equipos de forma que estos agentes, presentes en el entorno, no le perjudiquen, y si lo hacen, ejecutar las acciones pertinentes para atenuar sus efectos. Entre estas acciones podemos incluir, la realización de un plan de mantenimiento en función de estos factores.

Esto se puede realizar por medio de un desarrollo que considere un mayor nivel de degradación (variaciones del MTBF), y por lo tanto un mantenimiento más oportuno.

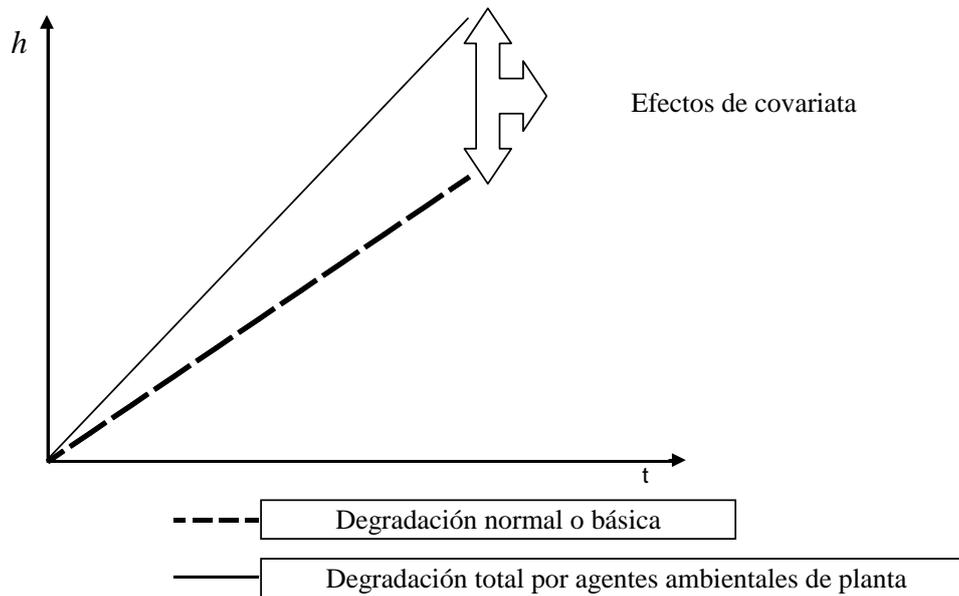


Figura 6.17: Representación de la relación entre la tasa de fallos en condiciones normales y la debida a las condiciones ambientales (ver capítulo 2).

También se estableció en el capítulo 2, que existen dos enfoques que abordan este problema, a saber: los modelos de vida acelerada y los de azar proporcional. En los modelos de vida acelerada, la función de fiabilidad se verá afectada por un vector de variables cuyo efecto es modificar la velocidad con la cual un componente se degrada en el tiempo (Ansell y Phillips, 1994; Guida, 1995). Los de azar proporcional, resultan de multiplicar la tasa de fallos por el factor de la función vínculo (Kumar y Klefsjö, 1994; Ansell y Phillips, 1997; Martorell et al., 1999b; Llatas, 2004). Empleando este último en nuestro caso, se evaluará el efecto de las condiciones del ambiente, debido a los agentes externos climáticos y a los equipos que por sí mismos pudieran generar un entorno desfavorable. Como por ejemplo, las calderas o equipos de incandescencia que generan calor, o las máquinas rotativas que producen vibraciones o gases, y que afectan de una forma u otra a los equipos adyacentes.

Se define, por lo tanto, una expresión en función de la distancia, para el cálculo de la variación de la tasa de fallo. Al aumentar la tasa de fallos  $h$  se disminuye en una proporción  $t$  el MBTF, para el equipo considerado. La ecuación base que se aplicará en el modelo es (ver capítulo 2):

$$h(t,d) = h_0(t) \Psi(d)$$

Donde:

$h(t,d)$  = tasa de fallos modificada por el efecto de los agentes.

$h_0(t)$  = degradación base o tasa de fallos inicial.

$\Psi(d)$  puede ser proporcional a un modelo exponencial  $e^{ad}$ , donde (a) es un factor que en nuestro caso representa un agente agresivo (temperatura (*te*), radiación (*r*), humedad (*hu*), vibraciones (*v*), etc.) y (d) variable numérica independiente de *t*, que en nuestro estudio es la distancia entre los equipos de la actividad expuesta *i* y la agresora (a). Podemos escribir la tasa de fallos modificada como:

$$h(t,d)i = h_0(t)i \cdot e^{\{a_1 \cdot (1/dia_1) + a_2 \cdot (1/dia_2) + a_3 \cdot (1/dia_3) + \dots + a_n \cdot (1/dia_n)\} + amb + \dots + ambn}.$$

Donde:

$a_1 \cdot (1/dia_1)$  = al factor para la degradación por el inverso de distancia de la actividad *i* al equipo generador de entorno.

$a_2 \cdot (1/dia_1)$  = al segundo factor para la degradación, por el inverso de la distancia de la actividad *i* al equipo generador y así sucesivamente.

*amb* = factor para la degradación por el entorno ambiental externo o bioclimático.

Como se observa en la expresión, la influencia del agente es inversamente proporcional a la distancia, es decir, a mayor distancia el efecto es menor y viceversa, siendo la función más representativa la exponencial. Además, si en  $e^{ad}$ ,  $ad = 0$ , entonces  $e^0 = 1$ , es decir, corresponde a la condición base o sin degradación. Se pueden emplear otras funciones como las cuadráticas o lineales, si el efecto no se desea muy acusado. Si se desea un poco más de precisión, se puede utilizar el modelo de Weibull o el Gamma, pero estos son complicados. Estas funciones, asociadas a estos modelos, pueden ser formuladas o determinadas a partir de las relaciones existentes entre los equipos, necesidades u objetivos del mantenimiento.

Las variables utilizadas para estos modelos, pueden ser determinadas y ajustadas experimentalmente por medio de ensayos acelerados para la degradación, o por extrapolación de las condiciones nominales de funcionamiento.

Es importante aclarar, que la mayoría de estos problemas son producto de los agentes bioclimáticos como la corrosión debida a la humedad, etc. No obstante, en algunas industrias, se dan casos que por el tipo de instalación y de equipos utilizados, ocurren adicionalmente estos fenómenos asociados a los equipos. Pero los modelos existentes están más asociados a estudios a nivel de componente o sistemas (ver capítulo 2).

A continuación y como ejemplo, se presenta una tabla donde se describen las distancias entre las diferentes actividades, considerando a su vez, las que producen un posible entorno perjudicial.

		genera T			genera V	
		A1	A2	A3	A4	A5
genera T	A1	0	d21	d31	d41	d51
	A2	"	0	d32	d42	d52
	A3	"	"	0	d43	d53
	A4	"	"	"	0	d54
genera V	A5	"	"	"	"	0

Figura 6.18: Matriz de las distancias entre las diferentes actividades y las que producen un entorno degradador.

Entonces para el equipo de la actividad A1 la tasa de fallo es:

$$h1 = h_0 \cdot e^{[0.(1/d21) + \text{factor (T).(1/d31)} + 0.(1/d41) + \text{factor(V).(1/d51)}] + \text{amb.}}$$

Esta tasa de fallo se calcula de forma independiente para todos los equipos, y su valor final influirá en el tiempo medio de buen funcionamiento MBTF, es decir, disminuye el tiempo donde será más probable que ocurra el fallo. Es importante comentar, como se observa en la formulación, que para este modelo específico, consideramos que la sensibilidad de los equipos a los agentes aceleradores es igual, es decir, influyen de igual manera en el tiempo de desgaste en cada equipo. Un modelo que relaciona de forma sencilla la tasa de fallos con el MTBF, es la ley exponencial o Weibull con  $\beta = 1$  (ver capítulo 2), que considera una tasa de fallos lineal y pseudo constante en el tiempo, como se observa en la curva de la bañera (figura 6.19):

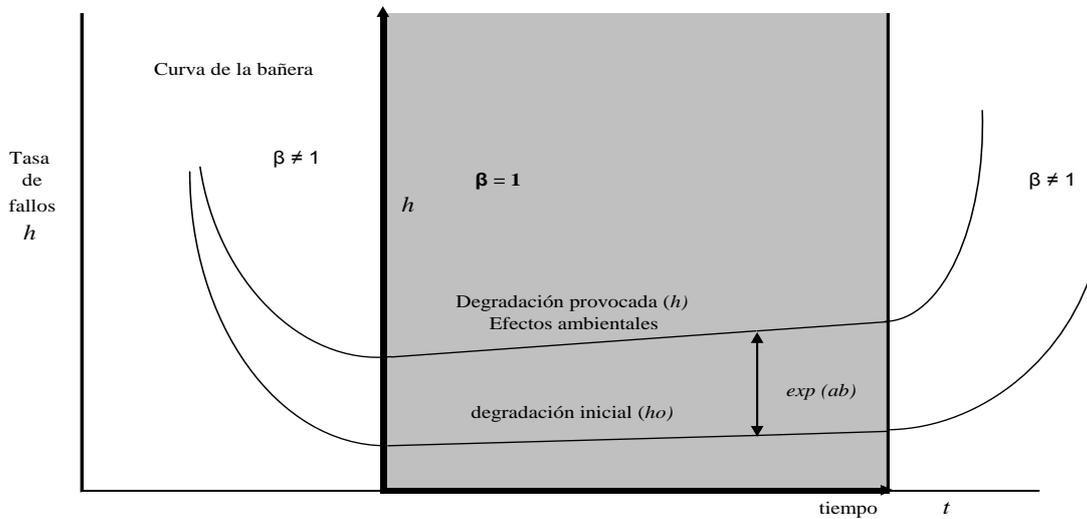


Figura 6.19: Tasa de fallos aleatorios para la función que sigue una ley exponencial o Weibull con  $\beta = 1$ .

Donde MTBF es:

$$\begin{aligned}
 \text{MTBF} &= \int_0^{\infty} t \cdot f(t) \cdot dt = \int_0^{\infty} h t \cdot \exp(-ht) dt = -t \cdot \exp(-ht) \Big|_{t=\infty}^{t=0} = \int_0^{\infty} \exp(-ht) dt = \\
 &0 + (1/h) \int_0^{\infty} \exp(-ht) dt = (1/h) \exp(-ht) \Big|_{t=\infty}^{t=0} = \text{MTBF} = (1/h) =
 \end{aligned}$$

al inverso de la tasa de fallo  $h$ .

A partir del MTBF dado al inicio del algoritmo, determinamos una tasa de fallo inicial  $h_{oi}$ , luego determinamos por la inversa de  $h$  el MTBF nuevo. Esta simplificación es utilizada por Paiton y Campbell (1995) para calcular el MTBF de un sistema, a partir de las tasa de fallos de sus componentes (ver capítulo 2).

El MTBF para cada equipo variará en función de las diferentes condiciones en planta, y por lo tanto, los costes de aplicación de las diferentes acciones de mantenimiento.

Siguiendo un procedimiento más complejo, como la ley de Weibull con  $\beta \neq 1$ , se puede determinar, también, de una serie de parámetros, la tasa de fallos y el MTBF correspondiente, de las siguientes expresiones (ver capítulo 2):

$$h(t) = (\beta/\eta)[(t - \gamma)/\eta]^{\beta-1}$$

y

$$MTBF = A \eta + \gamma.$$

Donde (A) es un parámetro tabulado en función de  $\beta$ . Para los ajustes de  $\gamma$ ,  $\beta$  y  $\eta$  que varían en función de  $t$ , es necesario aplicar el papel de Allan Plait (Macián et al., 2000). Para la implementación de esta técnica, es indispensable conocer el tiempo de buen funcionamiento TBF, y no el MTBF, de toda una muestra de equipos de una misma clase, y, a partir de esta, se determina la curva  $F(t)$ , que luego permite, por medio de un procedimiento gráfico, el cálculo de  $\gamma$ . Este procedimiento considera que todos los parámetros, incluido  $h$ , varían a lo largo del tiempo, siendo por lo tanto de difícil aplicación para un modelo a nivel de planta. No siempre se tienen disponibles los TBF que se requieren, siendo la más habitual el MTBF aportado por el fabricante. Se puede hacer una simplificación considerando un valor constante de los parámetros, pero esta no aportaría mejores resultados que cuando se emplea una exponencial para los fallos aleatorios.

### 6.2.1.6.- Almacén de mantenimiento.

Se contemplará la ubicación de un almacén de mantenimiento, y su localización final dependerá de los costes asociados al desplazamiento de materiales de mantenimiento, y del coste que representa su presencia para los movimientos de materiales de manutención entre actividades (ver capítulo 5). Un departamento destinado al almacén de materiales, influirá en las diferentes distancias del recorrido de materiales del proceso en una planta rectangular (ver consideraciones de distribución en planta). Se considera que los flujos de traslado de materiales de mantenimiento, estarán en función de la distancia y del número de actuaciones o intervenciones  $n_{ai}$  para un equipo de una actividad  $i$ . La expresión para los costes de desplazamiento de materiales de mantenimiento propuesta es:

$$C_{dmci} \text{ o } C_{dmmi} = W_{ai}.d_{ia}.(n_{mi} \text{ o } n_{ci}).R_i$$

Donde:

$Cdmmi$  o  $Cdmci$  = coste de desplazamiento de materiales de mantenimiento preventivo o correctivo en su caso.

$Wai$  = coste de desplazamiento, por unidad de distancia, de materiales de mantenimiento de la actividad  $i$ .

$dia$  = distancia entre el almacén de materiales de mantenimiento y la actividad  $i$ .

$nmi$  o  $nci$  = frecuencia de aplicación del mantenimiento para la actividad  $i$ .

$Ri = 2$  si la actividad es redundante y 1 lo contrario.

Para toda la planta será

$$Cdmc \text{ o } Cdmm = \sum_{i=1}^n Wai \cdot dia \cdot (nmi \text{ o } nci) \cdot Ri.$$

$n$  = número de actividades en la distribución.

### 6.1.2.7.- Restricciones, reparación y penalización.

Las restricciones del modelo de mantenimiento, consisten principalmente, en que una actividad en mantenimiento preventivo no deberá tener redundancia; y que una actividad en mantenimiento correctivo, no deberá tener correctivo en la redundante.

Por la naturaleza aleatoria del modelo, podrían darse casos en que una actividad tenga redundancia para la condición de mantenimiento preventivo. Se aplica, por lo tanto, un operador reparación que hace  $Ri = 1$ , lo que permite obtener una solución viable. Adicionalmente, se multiplica el mantenimiento preventivo bajo esta condición por un factor de penalización debido a la redundancia que genera un área adicional innecesaria.

$$Cmmit = nmi \cdot fprp \cdot [Cmmi \cdot dmi + cpu \cdot (MTBFi - fai)].$$

Y para la planta:

$$Cmmt = \sum_{i=1}^n (nmi \cdot fprp [Cmmi \cdot dmi + cpu \cdot (MTBFi - fai)]).$$

Donde:

$Cmmit$  = coste del mantenimiento preventivo del equipo de la actividad  $i$  para el horizonte  $t$ .

$Cmmi$  = coste del mantenimiento preventivo medio por hora del equipo de la actividad  $i$ .

$nmi$  = número de acciones preventivas para el equipo de la actividad  $i$ . Esto ocurre cuando  $nai$  (número de actuaciones para la actividad) está en posible mantenimiento preventivo.

$dmi$  = duración media de la actividad preventiva para el equipo de la actividad  $i$ , en horas.

$cpu$  = coste de las pérdidas de utilidad debidas al mantenimiento preventivo excesivo para la organización.

$MTBFi - fai$  = diferencia entre el tiempo medio de buen funcionamiento e inicio de la actividad de mantenimiento preventivo.

$fprp$  = factor de penalización por la redundancia en preventivo total. Éste toma el valor de 1 cuando  $R(i) = 1$  y cualquier otro  $[1, \infty]$  cuando  $R(i) = 2$ .

Para el segundo caso, se emplea una penalización que incremente considerablemente el coste del mantenimiento correctivo. Previamente se pensó en eliminar éstas soluciones de la población, pero podrían originar pérdidas de buenos esquemas para próximas generaciones (ver capítulo 4). Hay que tener presente, que el mantenimiento puede variar a lo largo del horizonte, como se observó en el apartado 6.2.1.4. Por lo tanto, se penaliza la solución de correctivo con redundancia en todo el horizonte. En este caso, a diferencia de la que se verá en el siguiente apartado de distribución en planta (apartado 6.2.2), la penalización toma sólo dos valores, correspondientes a cumplimiento o incumplimiento. Esto nos obliga a plantearnos una función que cuando se cumpla tome un valor que anule la penalización, y en caso contrario asigne cualquier otro. Se propone la siguiente función de penalización para esta clase de incumplimiento:

$$f(lcr) = Xcr.Cmcip. \quad Xcr \in [0, \infty].$$

Para la planta

$$f(lcr)_p = \sum_{i=1}^n Xcr.Cmcip.$$

Donde:

$Xcr$  = factor de penalización, que puede variar entre los valores  $[0, \infty]$ .

$Cmcip$  = coste del mantenimiento correctivo del equipo redundante que se expresa como:

$$Cmcip = nci.Cmci.MTTRi.(Ri - 1).$$

Al ser  $R(i)$  igual a 1 o no estar el equipo redundante en mantenimiento correctivo, es decir,  $fai \leq 2.MTBFi$   $Cmci$  se hace 0.

### 6.2.1.8.- Modelo propuesto para los costes esperados totales del mantenimiento.

La finalidad del modelo, a nivel de mantenimiento, es minimizar los costes de instalación ya sea redundante o no, el coste de aplicación del mantenimiento preventivo, coste del mantenimiento correctivo, coste de desplazamiento de materiales de mantenimiento, coste por grupos de actuación, penalización y el posible coste por tener la planta parada por un fallo.

Definiendo las expresiones anteriores, si:

$$Cmcmi = nci.(Cmci.MTTRi + Cmmir.dmir.(Ri - 1)),$$

$$Cii = Ciu.Ri$$

$$Cmmit = nmi.fprp [Cmmi.dmi + cpu.(MTBFi - fai)].$$

$$Cdmci \text{ o } Cdmmi = Wai.dia.(nmi \text{ o } nci).Ri$$

y

$$Xcr.Cmcip.$$

Entonces el coste de mantenimiento, instalación, desplazamiento y penalización de una actividad  $i$   $Cmii$  es:

$$Cmii = [nci.(Cmci.MTTRi + Cmmir.dmir.(Ri - 1)) + nmi.fprp [Cmmi.dmi + cpu.(MTBFi - fai)] + Ciu.Ri + Wai.dia.(nmi \text{ o } nci).Ri + Xcr.Cmcip].$$

Y el coste para una determinada planta será:

$$Cmiip = \sum_{i=1}^n [nci.(Cmci.MTTRi + Cmmir.dmir.(Ri - 1)) + nmi.fprp.[Cmmi.dmi + cpu.(MTBFi - fai)] + Ciu.Ri + Wai.dia.(nmi \text{ o } nci).Ri + Xcr.Cmcip]$$

Sujeto a:

$$\text{Si } R(i) = 1 \text{ entonces } fprp = 1$$

$$\text{Si } R(i) = 1 \text{ entonces } Xcr.Cmcip = 0.$$

$$\text{Si } fai \leq 2.MTBFi \text{ entonces } Xcr.Cmcip = 0.$$

$$\text{Si } fai > 2.MTBFi \text{ entonces } Cmmir.dmir.(Ri - 1) = 0$$

$$\text{Si } fai > MTBFi \text{ entonces } nmi.[Cmmi.dmi + cpu.(MTBFi - fai)] = 0$$

$$\text{Si } fai \leq MTBF \text{ entonces } nci.(Cmci.MTTRi + Cmmir.dmir.(Ri - 1)) = 0.$$

Incluyendo los costes por pérdidas de producción y actuación por grupos, el coste total esperado para la planta se puede expresar como:

$$Ctm = \sum_{i=1}^n [nci.(Cmci.MTTRi + Cmmir.dmir.(Ri - 1)) + nmi.fprp [Cmmi.dmi + cpu.(MTBFi - fai)] + Ciu.Ri + Wai.dia.(nmi \text{ o } nci).Ri + Xcr.Cmcip] + Cpput.(MTTRt + \Delta t \text{ fallo}) + G.Cat. \sum_{g=1}^G [ (nag1) ].$$

La expresión anterior representa la función objetivo del modelo a minimizar, por la aplicación de las actividades asociadas al mantenimiento. El primer término de la expresión (la sumatoria), evalúa los costes, actividad por actividad, de la planta. Los dos últimos representan, respectivamente, el coste generado por tener la planta parada y el coste por actuar sobre los conjunto de actividades.

Para la codificación como ya se ha explicado anteriormente, se propone dos segmentos que formarán parte del cromosoma principal, donde cada uno representa, respectivamente, el número de actuaciones o intervenciones  $nai$  (figuras 6.13, 6.14, 6.15 y 6.20) y el número de equipos presentes en una actividad (figura 6.21).

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
3	10	1	7	12	6	4	9	8

Figura 6.20: Segmento *nai*.

Es importante decir que utilizar el valor 1 para *nai*, implica que se realizará el mantenimiento al final del horizonte  $t$ . Esto puede ser útil sólo si un equipo tiene un MTBF extremadamente largo o mayor que  $t$ .

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
1	1	2	2	1	1	1	2	1

Figura 6.21: Segmento redundancia  $R$ .

Por lo tanto el cromosoma propuesto para mantenimiento será:

A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9
3	10	1	7	12	6	4	9	8	1	1	2	2	1	1	1	2	1

Figura 6.22: Segmentos de mantenimiento propuesto.

### 6.2.1.9.- Diagramas del modelo propuesto para mantenimiento.

En la figura 6.23 se representa el diagrama simplificado de flujo del modelo que llamaremos sub. diagrama 1 para una actividad  $i$ . Como se observa, si  $fai$  es menor a  $MTBFi$ , para la primera actuación  $a$  de  $nai$ , el resto de actuaciones  $ai$  estará en probabilidad de mantenimiento preventivo. Pero si  $fai$  es mayor para esta primera actuación, a podrá variar a lo largo del horizonte  $t$ , para cada actuación  $a$ , de  $nai$  (ver apartado 6.1.1.4). Por lo tanto, el algoritmo evalúa en cada actuación  $a$ , la condición de mantenimiento en función de la probabilidad para el horizonte de planificación.

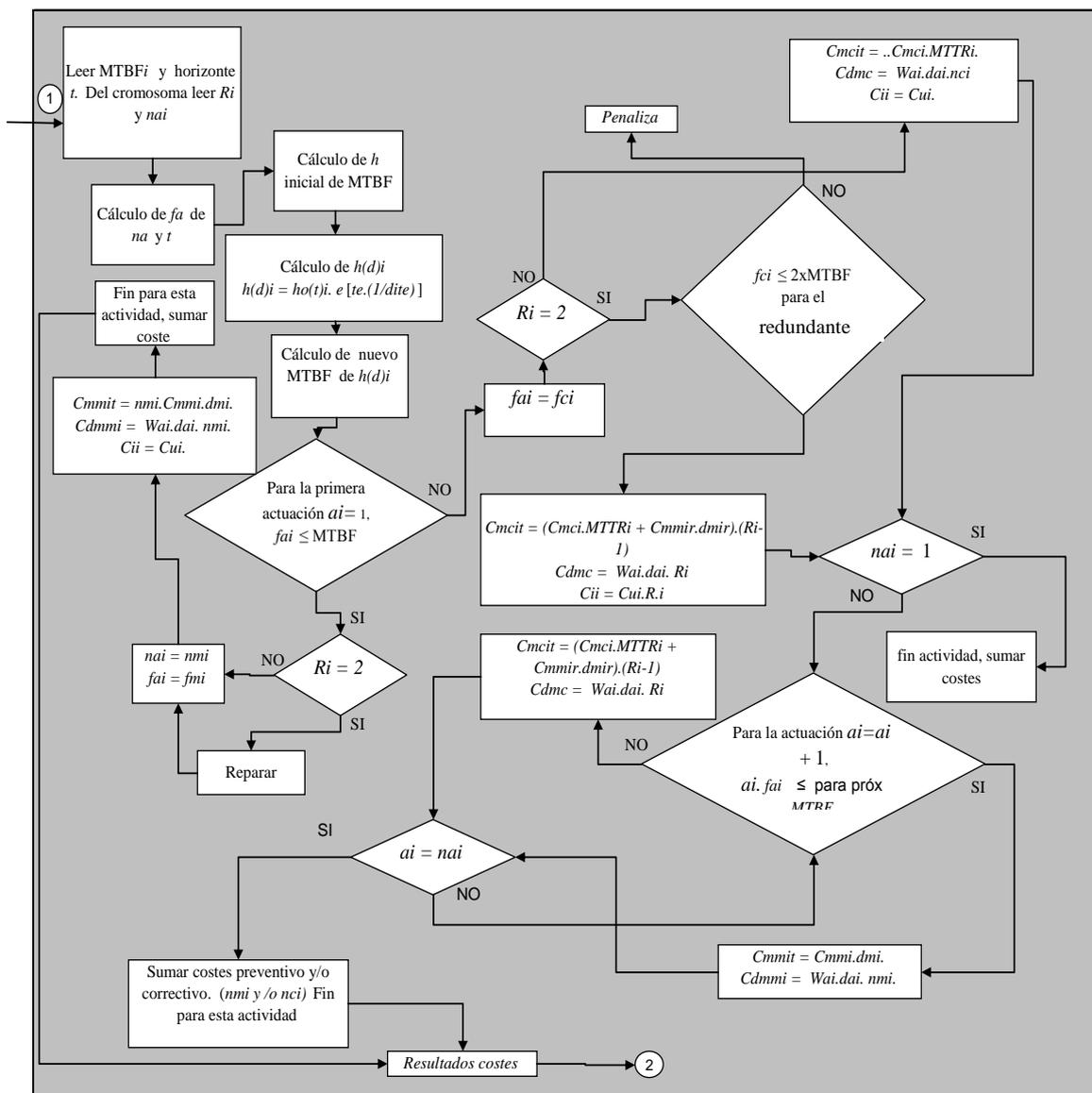


Figura 6.23: Diagrama de flujo simplificado de la propuesta a nivel de actividad (sub. diagrama 1).

En la figura 6.24 se representa el diagrama que llamaremos Diagrama 1 para toda la distribución en planta.

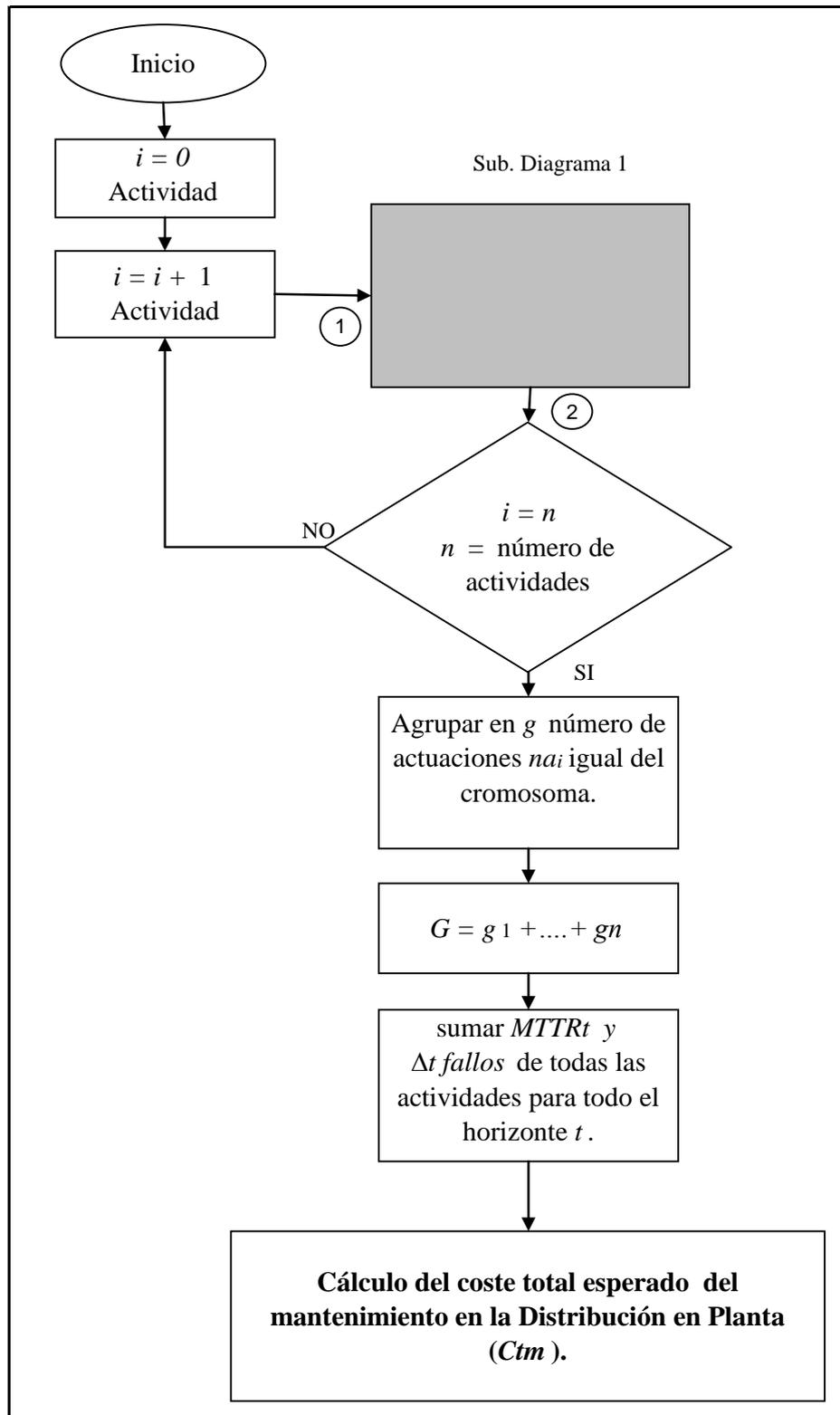


Figura 6.24: Diagrama 1, para toda la distribución.

## 6.2.2.- Consideraciones de la distribución en planta.

Una característica importante a considerar en el diseño de la distribución bajo la perspectiva de fiabilidad, es la necesidad de espacios para la redundancia. De las propuestas de Tam (1992), Santamarina (1995) y Diego-Más (2006), se deberá utilizar un sistema para la consideración del criterio geométrico o espacial, criterio que considera de forma implícita, las dimensiones de la maquinaria e instalaciones, operarios, y, para nuestro problema específico, los espacios para mantenimiento y redundancia.

Como se ha comentado en el apartado anterior, la ubicación de un almacén dentro de la distribución, se planificará como si se tratase de una actividad, de forma que su ubicación influirá en el recorrido de materiales, es decir, la presencia de este alargará o recortará la distancia recorrida para la manutención entre actividades. Las distancias a emplear serán rectilíneas euclidianas (ver capítulo 3).

Para distribuir las actividades se utilizará la técnica continua de los árboles de cortes. La razón para utilizar este planteamiento, es que esta técnica proporciona soluciones más compactas y rectangulares que implican un mejor aprovechamiento del espacio disponible, simplificando el problema y no perdiendo generalidad; mientras que los modelos que aplican técnicas de discretización (ver capítulo 3), proporcionan formas complejas que en algunos casos son difícilmente utilizables por actividades reales. Adicionalmente, según Diego-Más (2006), la aplicación de los algoritmos genéticos con árboles de cortes, nos proporciona mejores soluciones que otros tipos de metodologías aplicadas a problemas continuos de optimización, en la búsqueda de soluciones geoméricamente buenas.

Nuestra finalidad es incorporar las actividades de mantenimiento en el diseño de la distribución, por lo tanto, es necesaria, también, la aplicación o formulación de un modelo para la optimización del layout. Dada la naturaleza multicriterio de la distribución en planta, el propuesto por Santamarina (1995) será el utilizado. Se podría utilizar el de Diego-Más (2006) que incluye, además del potencial relacional de Santamarina, el potencial geométrico, pero para el caso del mantenimiento que incluye la redundancia, tiene el inconveniente de que se tiene que conocer el área de las actividades en la primera etapa del desarrollo. Las áreas de las actividades variarán en función de la redundancia  $R_i$  en la etapa individuo. Adicionalmente, el modelo de Santamarina, es robusto porque los requerimientos de mantenimientos se pueden considerar como criterios.

Como se ha observado en el capítulo 3, Santamarina (1995) propone un desarrollo a partir del modelo de Tam (1992), que busca resolver las limitaciones de este último,

debido a que no aborda el problema desde el punto de vista multicriterio de las distribuciones. Además Tam, considera una planta rectangular de dimensiones conocidas, que sólo se ajusta a casos de reordenado y no de una planta nueva, como es el caso de nuestro estudio.

Santamarina implementa los árboles de cortes desequilibrados, por la presencia de múltiples criterios para el diseño de la distribución. Hace un análisis macroevolutivo donde selecciona la mejor especie, y de esta, selecciona el mejor individuo. La función que evalúa la calidad del árbol de cortes (calidad de la especie), a partir del potencial de adyacencia, y que sea capaz de contener la mejor solución es (Capítulo. 3):

$$P(AC) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n P(i,j) \cdot \left[ \pm \sum_{u=1}^k \alpha_u f_{u,ij} \pm \sum_{v=1}^{k'} \beta_v t_{v,ij} \right]$$

Donde:

$\alpha_u, \beta_v$  = coeficientes de ponderación que representan la importancia relativa entre los factores cualitativos y cuantitativos.

$f_{u,ij}$  = valor de intensidad relacional entre las actividades  $i$  y  $j$  bajo el criterio cuantitativo  $u$ -ésimo.

$t_{v,ij}$  = valor de intensidad relacional entre las actividades  $i$  y  $j$  bajo el criterio cualitativo  $v$ -ésimo.

$k$  = número de criterios cuantitativos contemplados.

$k'$  = número de criterios cualitativos contemplados.

$\pm$  = signos que se eligen en función del significado utilizado para estimar la intensidad relacional.

$P(i,j)$  = potencial de adyacencia comentado entre dos actividades que se calcula como:

$$P(ij) = P(i) \cdot P(j).$$

Donde:

$P(i)$  = potencial de la actividad  $i$  relativo a la  $j$ .

$P(j)$  = potencial de la actividad  $j$  relativo a la  $i$ . (ver capítulo 3)

La función para evaluar el mejor individuo es:

$$CR = \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n d_{ij} \cdot \left[ \pm \sum_{u=1}^k \alpha_u f_{u,ij} \pm \sum_{v=1}^{k'} \beta_v t_{v,ij} \right] + \mu \sum_{i=1}^n f(i)$$

Donde:

$\alpha_u, \beta_v, \mu$  = coeficientes de ponderación que representan la importancia relativa entre los factores cualitativos, cuantitativos y criterio geométrico.

$d_{ij}$  = distancia rectilínea entre centros de gravedad de las actividades.

$f(i)$  = es la penalización por el incumplimiento de las restricciones geométricas vista en el capítulo 2.

$$I_i = \max \left( 0, \left\{ \frac{\max(\text{alto}_i, \text{ancho}_i)}{\min(\text{alto}_i, \text{ancho}_i)} - \max\left( r_i^{\max}, \frac{1}{r_i^{\min}} \right) \right\} \right)$$

Donde:

$r_i^{\max}$  = máximo valor de la relación alto / ancho permitido para la actividad  $i$ , en una orientación predominantemente vertical.

$r_i^{\min}$  = mínimo valor de la relación, permitida para la actividad  $i$ , en una orientación predominantemente vertical.

$\text{alto}_i$  = alto de la actividad  $i$ .

$\text{ancho}_i$  = ancho de la actividad  $i$ .

Para cuantificar la penalización  $f(i)$  de las actividades, debido al incumplimiento de las restricciones geométricas, Santamarina propone el uso de funciones matemáticas que aumenten la penalización en función del incumplimiento ( $I_i$ ).

$$f(i) = (I_i + 1)^p, \quad p \in [1, \infty].$$

Esta segunda etapa, es decir el individuo, se selecciona la relación ancho/alto  $\theta$  de la planta más conveniente. Esta ventaja del algoritmo, facilita la aplicación de la redundancia para calcular las dimensiones geométricas de planta que satisfacen los requerimientos de ésta.

Posteriormente en el apartado 6.2.3, proponemos una variable adicional, para la función objetivo conjunta, que homogeniza mejor el modelo de distribución con respecto al mantenimiento.

### 6.2.2.1.- Incumplimiento por restricciones geométricas en redundancia.

Antes de exponer la metodología propuesta, resulta conveniente explicar la forma como se representan las actividades a distribuir. Primero, el área de la actividad es fija y está definida por su largo y ancho, en función del espacio necesario para las acciones tanto de mantenimiento como de producción. Por lo tanto, esta actividad, puede ser colocada en un área de asignación de igual valor, pero con una determinada relación alto/ancho calculada. Estas dos áreas iguales, pero usualmente con geometrías diferentes, nos permitirán calcular el incumplimiento geométrico, como se verá mas adelante.

Esta forma de aplicación del área de trabajo en función del largo-ancho, es empleada por Sirinaovakul y Limudomsuk (2007) para optimizar la distribución en planta, por medio de algoritmos genéticos y árboles de cortes. La actividad representada por su largo y ancho es de orientación flexible, es decir, puede ser colocada tanto vertical como horizontal y tiene una asignación definida con respecto a las otras actividades, pero no considera restricciones geométricas (ver capítulo 3 y 4).

En nuestro problema, el área para la asignación, se puede duplicar si existe redundancia, es decir  $R(i) = 2$ , lo que implica que se asigna un área adicional de trabajo con las mismas especificaciones de alto y ancho. Lo importante ahora es asignar esas dos actividades cuya área total es igual al de asignación, pero con forma diferente.

Para determinar si en un departamento con dos equipamientos y sus respectivos espacios para mantenimiento, está contenido de forma correcta en una determinada área de asignación, se propone la siguiente expresión para calcular el incumplimiento geométrico:

$$\begin{aligned}
 & r_i \geq 1 \\
 I_i = \min \left\{ \left| r_i - \left[ Ri.largo_i / ancho_i \right] (t) \right|, \left| r_i - \left[ largo_i / (Ri .ancho_i) \right] (p) \right|, \left| r_i - \right. \right. \\
 & \left. \left. \left[ Ri.ancho_i / largo_i \right] (t) \right| \right\} \\
 & r_i < 1 \\
 I_i = \min \left\{ \left| 1/r_i - \left[ Ri.largo_i / ancho_i \right] (t) \right|, \left| 1/r_i - \left[ largo_i / (Ri .ancho_i) \right] (p) \right|, \right. \\
 & \left. \left| 1/ r_i - \left[ Ri.ancho_i / largo_i \right] (t) \right| \right\}
 \end{aligned}$$

Donde.

$r_i$  = a la relación alto/ ancho para el área destinada a la actividad o localización.

$largo_i$  = largo de la actividad  $i$ .

$ancho_i$  = ancho de la actividad  $i$ .

$R_i = 1$  o  $2$  dependiendo si hay o no actividad o equipo redundante.

$(l)$  = asignación longitudinal en el área de asignación o localización (figura 6.25).

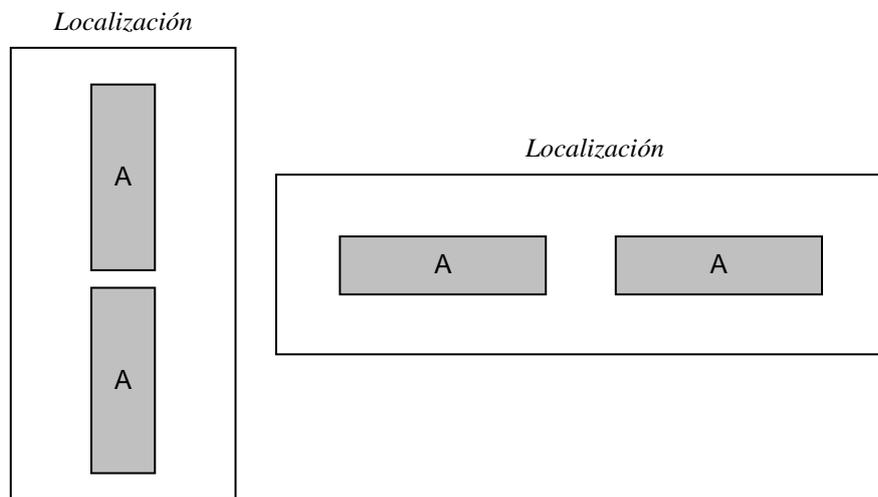


Figura 6.25: Ejemplos de asignaciones longitudinales de equipos o actividades redundantes.

$(p)$  = asignación paralela en la localización (figura 6.26).

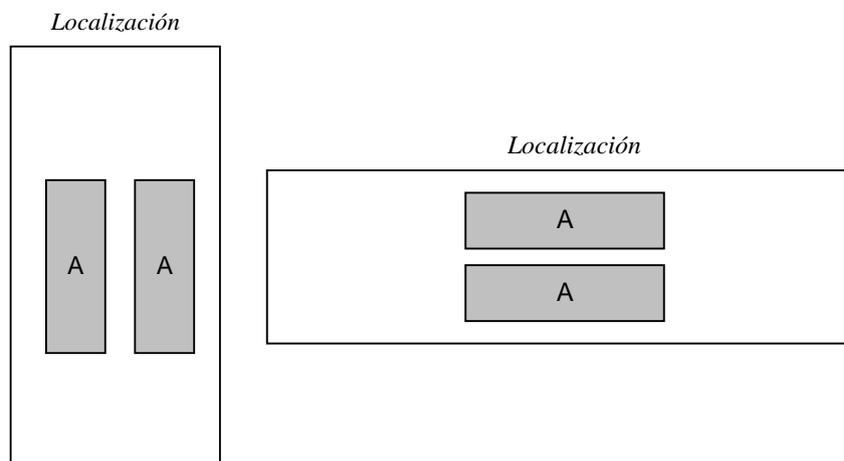


Figura 6.26: Ejemplos de asignaciones paralelas de equipos o actividades redundantes.

$(t)$  = asignación transversal en la localización (figura 6.27).

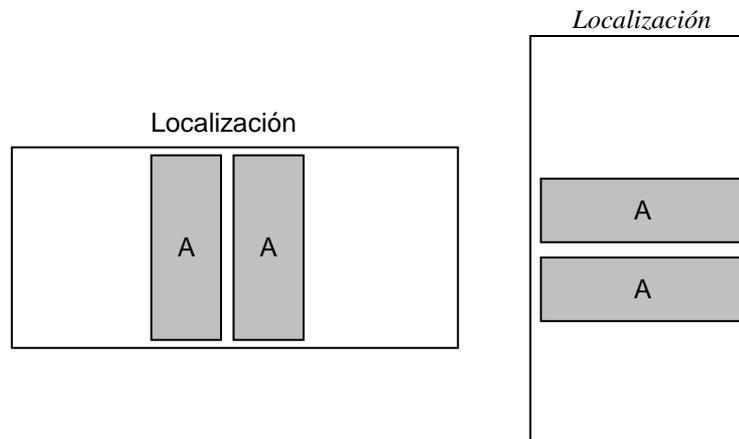


Figura 6.27: Ejemplos de asignaciones transversales de equipos o actividades redundantes.

**Comentario:** el área rectangular gris, como se ha comentado, contiene tanto la maquinaria para la realización de la actividad, como los espacios mínimos necesarios para producción y mantenimiento.

**Comentario:** el área empleada para la aplicación de las técnicas de cortes es el de las actividades, es decir, el área gris. Es importante decir, que el ejemplo de las figuras 6. 25, 6.26 y 6.27, no cumple con esta condición y la razón de la utilización es sólo a manera de ejemplo, ya que como se ha comentado el área de la actividad y la asignada para ella tienen que ser iguales (ver figuras 6.28 y 6.32). A partir de la codificación, el segmento de la redundancia determina si el área es el doble o no para la aplicación del corte. Luego por medio de la penalización se determina el grado de incumplimiento.

La expresión  $li$  condiciona a que la asignación podrá ser longitudinal, paralela o transversal. En función de los valores de la diferencia entre la relación  $r_i$  (alto / ancho) del área para la asignación y la relación alto y ancho de las actividades en presencia de  $Ri$ , se determina la asignación más conveniente que genere un menor valor de incumplimiento, en valor absoluto.

Por ejemplo, si tenemos una localización o área de asignación de 5 unidades de alto por 2 unidades ancho, para una actividad de 1.6 por 3 unidades respectivamente, con equipamientos redundantes, el valor de  $li$  será:

$$r_i \geq 1$$

$$I_i = \min \left\{ \left| ri - \left[ Ri.largo_i / ancho_i \right] (t) \right| , \left| ri - \left[ largo_i / (Ri . ancho_i) \right] (p) \right| , \left| ri - \left[ Ri.ancho_i / largo_i \right] (t) \right| \right\}$$

$$I_i = \min \left\{ \left| 5/2 - \left[ 2x3 / 1,6 \right] (t) \right| , \left| 5/2 - \left[ 3 / (2x1,6) \right] (p) \right| , \left| 5/2 - \left[ 2x1,6/3 \right] (t) \right| \right\}$$

$$I_i = \min \left\{ \left| -1,25 (t) \right| , \left| 1,56(p) \right| , \left| 1,43(t) \right| \right\}$$

$$I_i = 1,25 (t)$$

El valor permisible de  $li$  en este será 1,25 con una asignación longitudinal, ya que la paralela y la transversal generan incumplimientos de mayor valor. En las figuras (6.28, 6.29, 6.30 y 6, 31) se observa lo antes expuesto:

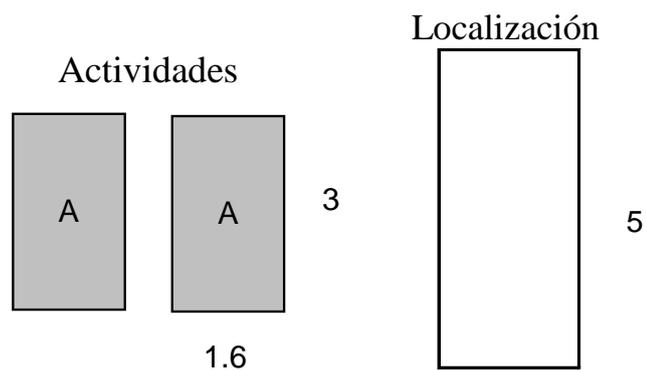
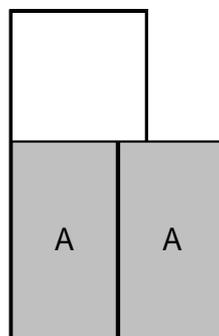
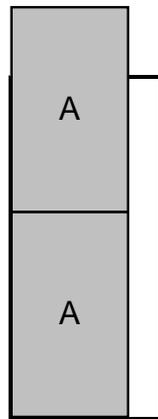


Figura 6.28: Localización y actividades para el ejemplo.



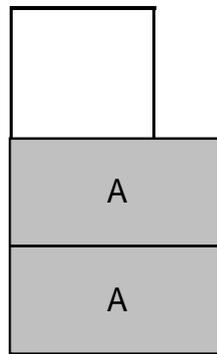
$$I_i = 1,56 (p)$$

Figura 6.29: Asignación paralela de actividades redundantes para el ejemplo.



$$I_i = 1,25 (l)$$

Figura 6.30: Asignación longitudinal de los equipos o actividades redundantes para el ejemplo.



$$I_i = 1,46 (t)$$

Figura 6.31: Asignación transversal de los equipos o actividades redundantes para el ejemplo.

Otro ejemplo, para un área de asignación de 3 unidades de alto por 4 unidades de ancho, y con actividades de 3 por 2 unidades respectivamente tenemos:

$$r_i < 1$$

$$I_i = \min \left\{ \left| 1/r_i - [R_i.largo_i / ancho_i] (l) \right|, \left| 1/r_i - [largo_i / (R_i .ancho_i)] (p) \right|, \left| 1/r_i - [R_i.ancho_i / largo_i] (t) \right| \right\}$$

$$I_i = \min \left\{ \left| 1/(3/4) - [2 \times 3 / 2] (l) \right|, \left| 1/(3/4) - [3 / 2 \times 2] (p) \right|, \left| 1/(3/4) - [2 \times 2 / 3] (t) \right| \right\}$$

$$I_i = \min \left\{ \left| -1,66 (l) \right|, \left| 0,58 (p) \right|, \left| 0 (t) \right| \right\}$$

$$I_i = 0(t).$$

La menor restricción es cero, es decir, la asignación transversal no genera incumplimiento para esta  $r_i$  de la localización (figuras 6.32, 6.33, 6.34 y 6.35).

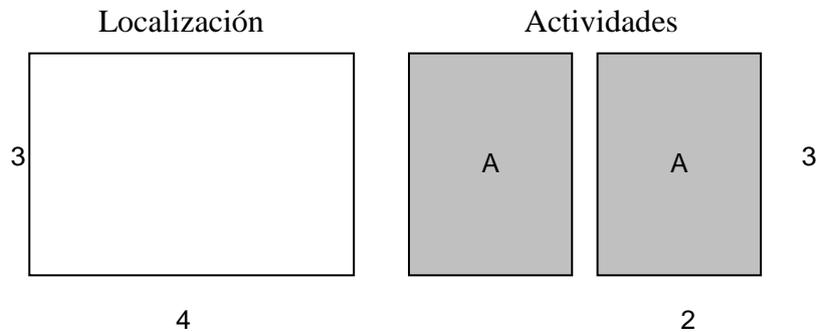
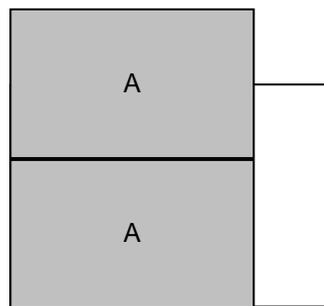
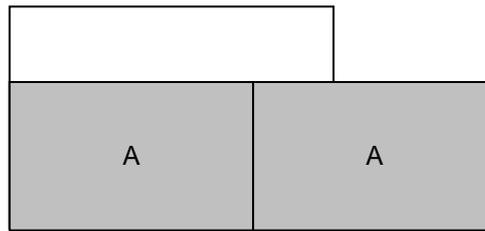


Figura 6.32: Áreas de asignación y actividades para el ejemplo.



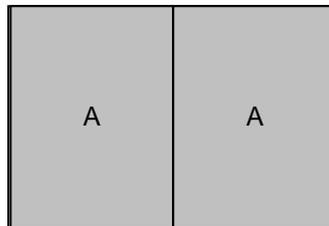
$$I_i = 0,58(p).$$

Figura 6.33: Asignación paralela de actividades redundantes para el ejemplo.



$$I_i = 1,66(t).$$

Figura 6.34: Asignación longitudinal de actividades redundantes para el ejemplo.



$$I_i = 0(t).$$

Figura 6.35: Asignación transversal de actividades redundantes para el ejemplo.

En resumen, y para la consideración de la distribución en planta, se emplea esta técnica de dos fases. La primera fase, consiste en la búsqueda del árbol de cortes que contenga el mayor potencial para agrupar actividades. La segunda fase, agrupa esas actividades a partir de la definición de los cortes correspondientes para el árbol seleccionado. La finalidad es conseguir la distribución de menor coste relacional y del mantenimiento, estando la calidad, desde el punto de vista de distribución de esta segunda fase, muy condicionada a la primera.

### 6.2.3.- Modelo propuesto para la optimización de la distribución y del mantenimiento.

Se describe a continuación la expresión y las características del modelo de optimización conjunto. Este modelo junto al algoritmo genético, determinará una solución óptima tanto del layout como de las actividades del mantenimiento. La función objetivo propuesta para el cálculo del coste relacional total de planta es:

$$\begin{aligned}
 CT \text{ de Planta (min)} = & \sum_{i=1}^n \sum_{j=i}^n d_{ij} \left[ \pm \eta p t \left( \sum_{u=1}^k \alpha_u f_{u,ij} \right) \pm \sum_{v=1}^{k'} \beta_v t_{v,ij} \right] + \mu \sum_{i=1}^n f(li) + \\
 & \gamma \left\{ \sum_{i=1}^n \left[ nci \cdot (Cmci \cdot MTTR_i + Cmmir \cdot dmir \cdot (R_i - 1)) + nmi \cdot fprp [Cmmi \cdot dmi \right. \right. \\
 & \left. \left. + cpu \cdot (MTBF_i - fai)] + Ciu \cdot R_i + Wai \cdot dia \cdot (nmi \text{ o } nci) \cdot R_i + Xcr \cdot Cmcip \right] + \right. \\
 & \left. Cpput \cdot (MTTR_t + \Delta t \text{ fallo}) + G \cdot Cat \cdot \sum_{g=1}^G [(na_{gl})] \right\}.
 \end{aligned}$$

Donde:

$\alpha_u, \beta_v, \mu$  y  $\gamma$ , = coeficientes de ponderación que representan la importancia relativa entre los factores cualitativos, cuantitativos para la distribución, criterio geométrico redundante y mantenimiento respectivamente.

**Comentario:** como se ha observado en el capítulo 3, no resulta trivial la determinación de estos coeficientes, no obstante, la aplicación se puede realizar por asignación directa en función de la experiencia de los expertos, o por cualquier otro método de estimación de los descritos en el apartado 3.3.3.2.

$f_{u,ij}$  = valor de intensidad relacional entre las actividades  $i$  y  $j$  bajo el criterio cuantitativo  $u$ -ésimo.

$t_{v,ij}$  = valor de intensidad relacional entre las actividades  $i$  y  $j$  bajo el criterio cualitativo  $v$ -ésimo.

$f(li)$  = función de penalización por el incumplimiento de las restricciones geométricas con redundancia.

**Comentario:** para estas intensidades relacionales ( $f_{u,ij}$ ,  $t_{v,ij}$ ), como también para la función penalización  $f(li)$  y del mantenimiento, se puede emplear cualquiera de los métodos de normalización descritos en el apartado 3.3.3.3 del capítulo 3.

$d_{ij}$  = distancia rectilínea entre centros de gravedad de las actividades.

$k$  = número de criterios cuantitativos contemplados para la distribución.

$k'$  = número de criterios cualitativos contemplados para la distribución.

$\pm$  = signos que se eligen en función del significado utilizado para estimar la intensidad relacional.

$\eta_{pt}$  = al número de procesos asociado al criterio cuantitativo flujo de materiales para el horizonte  $t$ . Esta variable tiene la finalidad de homogenizar mejor el modelo para el cálculo, con el mantenimiento, que se repite  $na$  veces a lo largo de  $t$ , el coste total.

$W_{ai}$  = coste de desplazamiento, por unidad de distancia, de materiales de mantenimiento de la actividad  $i$ .

$d_{ia}$  = distancia entre el almacén de materiales de mantenimiento y la actividad  $i$ .

$n_{mi}$  = número de intervenciones del mantenimiento preventivo para la actividad  $i$ .

$n_{ci}$  = número de intervenciones del mantenimiento correctivo para la actividad  $i$ .

$R_i$  = 2 si la actividad es redundante y 1 lo contrario.

$Cat$  = coste de actuación unitario.

$G$  = número de grupos constituidos en el cromosoma (ver figura 6.12, 6.13, 6.14 y 6.15).

$(n_{ci} = n_{mir})$  = número de acciones correctivas o preventivas a los equipos de la actividad  $i$  en caso de equipos redundantes.

$C_{mci}$  = coste de mantenimiento correctivo medio horario del equipo de la actividad  $i$ .

$C_{mcit}$  = coste de mantenimiento correctivo del equipo de la actividad  $i$ .

$MTTR_i$  = tiempo de reparación del equipo de la actividad  $i$ .

$C_{mmi}$  = coste del mantenimiento preventivo de la actividad  $i$ .

$C_{mmir}$  = coste de mantenimiento preventivo medio horario del equipo redundante de la actividad  $i$ . Este es igual a  $C_{mmi}$ .

$d_{mi}$  = duración media del mantenimiento preventivo para el equipo de la actividad  $i$ , en horas. Despreciable comparado con  $MTTR$ .

$d_{mir}$  = duración media del mantenimiento preventivo del equipo redundante de la actividad  $i$ . Este será igual a  $d_{mi}$ .

$C_{iu}$  = coste de instalación del equipo.

$C_{pput}$  = coste medio horario por pérdidas de producción.

$MTTR_i$  = tiempo de reparación del equipo o equipos siniestrados no redundantes en su caso.

$\Delta t$  fallo = diferencia en el tiempo desde que ocurre el fallo hasta el momento que se inicia la reparación para todos los equipos.

$n$  = número de actividades totales.

$n$  = número de actividades (no incluye el almacén).

$X_{cri}$  = factor de penalización por el incumplimiento del mantenimiento correctivo para la redundancia de la actividad  $i$ .

$cpu$  = costes por pérdidas de utilidad por mantenimiento preventivo excesivo.

$fprp$  = factor de penalización debido a la redundancia en preventivo total.

**Sujeto a las consideraciones vista en el apartado 3.3 y 3.2.2 para la distribución, y 6.2.1.8 para mantenimiento.**

El modelo representa, como ha sido comentado, los costes la distribución por la asignación de las actividades y los esperados para el mantenimiento. Estos costes pueden ser representados de forma separada para una evaluación detallada, o conjuntamente, para una evaluación del coste total final. **Pero es importante destacar que horizonte muy amplios con costes altos de mantenimiento, decantarían la balanza de la optimización hacia el mantenimiento.** Esto es un detalle que hay que tener presente a la hora de evaluar los resultados, y razón por la cual se incluye también el  $\eta p t$  en el modelo de distribución.

### 6.2.3.1.- Representación cromosómica propuesta.

El cromosoma propuesto (figura 6.36), para la aplicación del algoritmo, consta de tres segmentos que representan la distribución, el mantenimiento y la redundancia respectivamente.

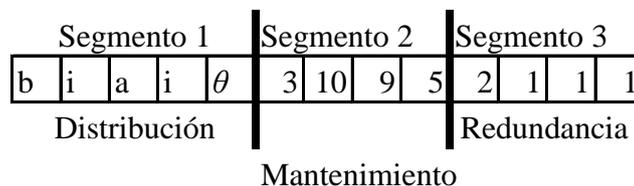


Figura 6.36: Representación genotípica de la solución conjunta.

Los valores alfabéticos, como se ha indicado en los capítulos 3 y 4 [a (arriba), b (bajo), d (derecha), i (izquierda)], representan los operadores de cortes para el árbol,  $\theta$  la relación ancho/alto de la ubicación o área de asignación, los valores numéricos (1, 2, 3,

4....,n) al número de actuaciones de mantenimiento para una determinada actividad y (1, 2) número o conjunto de equipos por actividad. La figura 6.37 representa una distribución de cinco localizaciones, donde una sería un almacén y el resto actividades con un equipamiento al que se le realizará una determinada cantidad de actuaciones de mantenimiento.

Estamos conscientes que es importante, para la identificación de buenos esquemas que participarán en otras generaciones, colocar otro segmento que represente el tipo de asignación de las comentadas en la penalización geométrica con redundancia (longitudinal ( $l$ ), paralela ( $p$ ) y transversal ( $t$ )). Como se ha observado en la figura 6.37, no se considerará este segmento, ya que complicaría considerablemente la aplicación informática.

El proceso de codificación a nivel de especie se describe con todo detalle en los capítulos 3 y 4.

#### **6.2.3.1.1.- Operadores a nivel de especie.**

Para la ejecución del modelo a nivel de especie, se emplea el propuesto por Santamarina (1995). Como se observó en los capítulos 3 y 4, para la selección de la especie capaz de contener la mejor solución para la distribución en planta, se emplea el método clásico de la ruleta de Goldberg (1989). Para el operador cruce, se selecciona, de forma aleatoria, un punto en los cromosomas para el intercambio del contenido genético. La aplicación de esta forma, suele originar soluciones malas, es decir, especies inviables. Las especies inviables pueden representar actividades y clúster repetidos o inexistentes. Para evitar estos inconvenientes debido a la aplicación del cruce, ambas especies a reproducirse tienen que ser parecidas o estar emparentadas (Santamarina, 1995). Como operador mutación, se utiliza la inversión, para evitar las especies inviables bajo la condición de que ningún clúster puede estar formado por elementos de mayor orden que el clúster en cuestión.

#### **6.2.3.1.2.- Operadores a nivel de individuo (distribución y mantenimiento).**

En la segunda etapa, para seleccionar a los mejores individuos para ser los padres en el proceso reproductivo, se emplea también la ruleta de Goldberg (1989). El algoritmo calcula el coste total de planta, y luego calcula la adaptabilidad por medio de una expresión que involucra el máximo coste posible y el coste de cada solución:

$$\mu(s) = \text{maxcoste} - \text{coste}(s).$$

Luego determina la probabilidad de reproducción como:

$$\text{Probabilidad}(s) = \frac{\mu(s)}{\sum_{s=1}^m \mu(s)}$$

Posteriormente, se ordenan los individuos en función de la probabilidad de menor a mayor, para incluir un determinado número de soluciones deseadas al conjunto de reproductores.

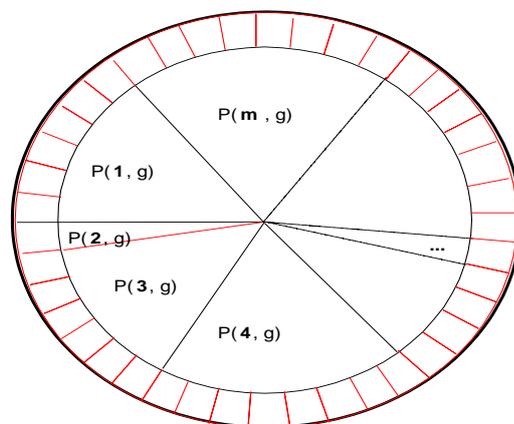
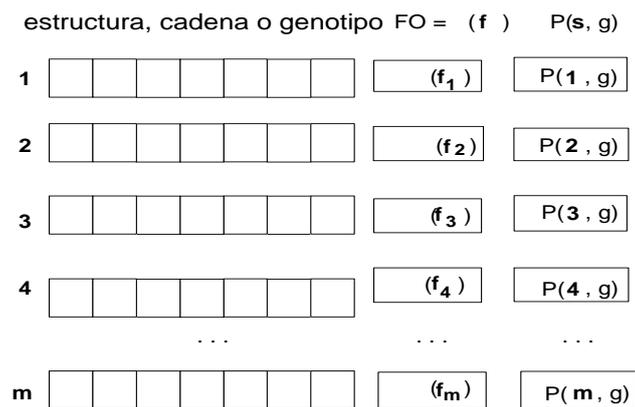


Figura 6.37: Operador selección-reproducción empleado.

Se emplea un operador cruce simple, el cual consiste en elegir aleatoriamente, un mismo punto de corte de dos cromosomas del grupo de reproductores, e intercambiarlos (figura 6.38).

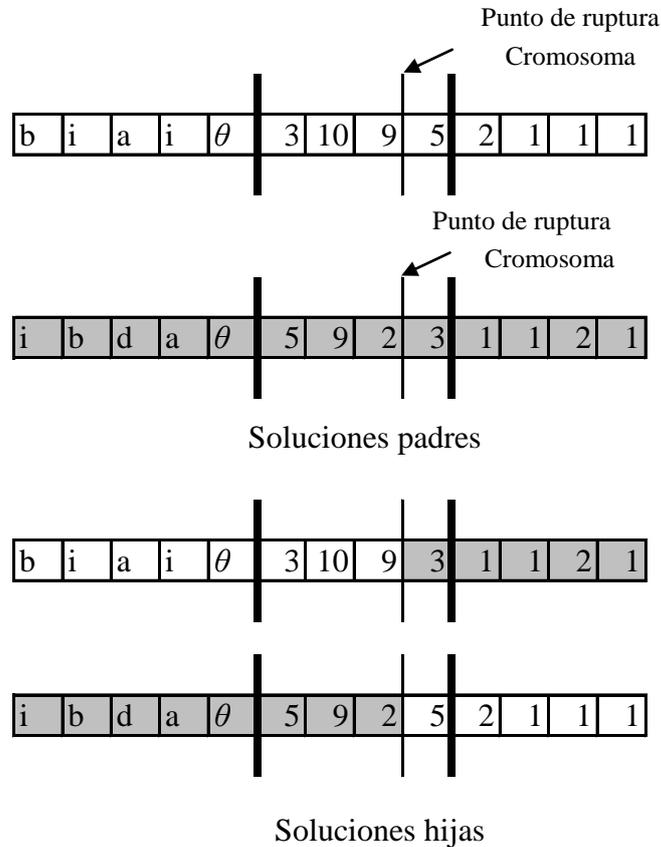


Figura 6.38: Ejemplo de operador cruce utilizado.

Como se ha observado en el capítulo 5, Santamarina (2002) utiliza ésta forma de aplicación en un modelo para la distribución en planta, que incorpora un planteamiento integral del diseño del edificio, adaptado a las condiciones bioclimáticas reinantes. La autora utiliza un operador de cruce simple para un cromosoma constituido tanto por valores alfabéticos (distribución en planta) y numéricos (características estructurales).

Para la mutación, se selecciona a un individuo del grupo de reproductores, para luego elegir, aleatoriamente, un gen de la solución en cualquier segmento y variar, también de forma aleatoria, su alelo dentro de ese conjunto valores rango. Se emplea una probabilidad de mutación  $Pm$  para representar a través de  $Pm.m(n-1)$ , el número de genes que mutan su alelo.

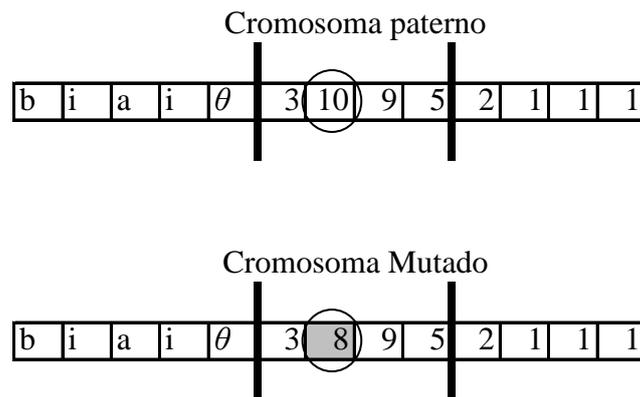


Figura 6.39: Ejemplo de actuación del operador mutación.

Como se ha comentado, se aplica un operador reparador, cuando, por la aplicación del algoritmo, una solución tenga un equipo redundante en una actividad que está en condición de mantenimiento preventivo. En este caso, el valor de  $R_i$  cambia de 2 a 1.

La figura 6.41 muestra un diagrama simplificado del algoritmo de optimización propuesto. El algoritmo comienza inicializando una población de individuos de forma aleatoria. El número máximo y mínimo de actuaciones, es decir, el rango donde varía  $n_{ai}$  los determina respectivamente el menor y mayor MTBF.

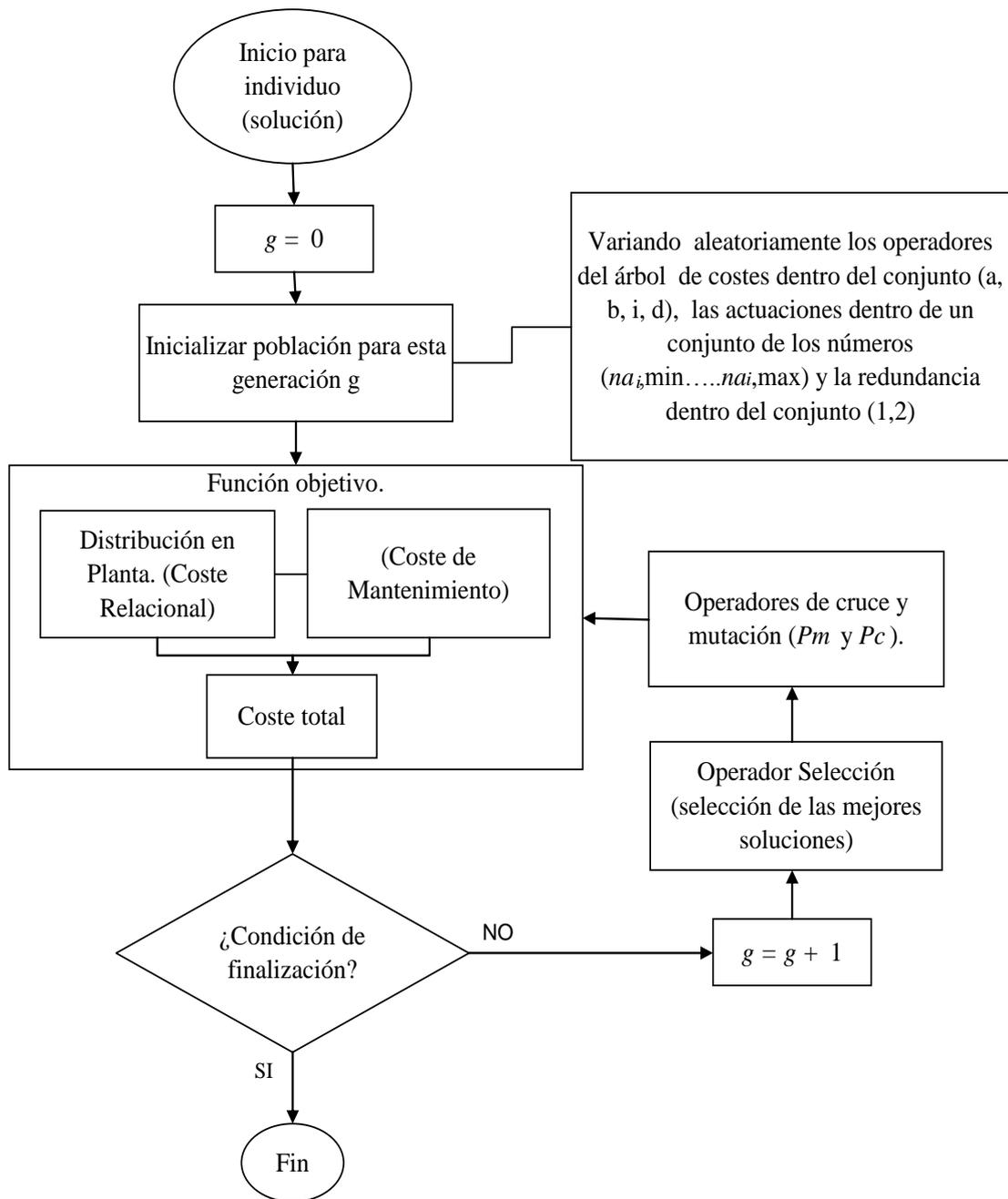


Figura 6.40: Algoritmo genético para el problema de optimización propuesto.

### **6.2.3.2.- Parámetros de partida para el modelo propuesto.**

Para cada una de las etapas que constituyen el modelo, es necesario un conjunto de parámetros de partida para guiar el proceso de búsqueda. Estos se diferencian en dos tipos:

- Los parámetros genéricos, propios del algoritmo genético.
- Los parámetros específicos, propios de la naturaleza del problema a resolver.

Los parámetros genéricos son:

- Numero de iteraciones del algoritmo, es decir, número de generaciones que se desea evaluar.
- Número de individuos que integrarán las poblaciones para esas generaciones.
- Probabilidad de cruzamiento.
- Probabilidad de mutación.

Parámetros específicos para la especie:

- Intensidades relacionales bajo el número de criterios tanto cualitativos y cuantitativos que se consideren necesarios.
- Coeficiente de ponderación de cada uno de los criterios bajo los que se ha estimado la intensidad relacional.
- Número de actividades presentes en el problema.

Los parámetros específicos para el individuo, es decir, de la distribución en planta y mantenimiento son:

- Intensidades relacionales bajo el número de criterios tanto cualitativos y cuantitativos que se consideren necesarios para la distribución.
- Coeficiente de ponderación de cada uno de los criterios bajo los que se ha estimado la intensidad relacional, el incumplimiento geométrico y del mantenimiento.
- Número de actividades presentes en el problema + almacén en su caso.
- Largo y ancho de cada una de las actividades. Cuando exista redundancia, por la asignación presente en el cromosoma (ver apartado 6.2.3.1), se multiplica por dos el área de la actividad.
- Tiempo medio entre fallos (MTBF) de cada equipo perteneciente a las actividades.

- Tiempo medio de reparación de todos los equipos del layout (MTTR).
- Coste de desplazamientos por unidad de distancia de materiales de mantenimiento para todas las actividades ( $W_{ai}$ ).
- Coste del mantenimiento preventivo medio horario de las actividades ( $C_{mmi}$ ).
- Coste del mantenimiento correctivo medio horario de los equipos ( $C_{mci}$ ).
- Coste de instalación de los equipos ( $C_{iu}$ ).
- Duración media de la actividad preventiva para los equipos de las actividades ( $d_{mi}$ ).
- Coste de actuación unitario ( $C_{at}$ ).
- Coste medio horario por pérdidas de producción ( $C_{pput}$ ).
- Horizonte ( $t$ ).
- Factores de penalización  $X_{cri}$  y  $f_{prp}$ .
- números de procesos asociado al criterio flujo de materiales para el horizonte  $t$  ( $\eta_{pt}$ ).
- Valores de factores perjudiciales en el ambiente del layout ( $a$ ).



# 7

Implementación, Conclusiones y  
Trabajos Futuros.



## **7.- Implementación, conclusiones y trabajos futuros.**

En este capítulo, se presenta la etapa experimental de la metodología propuesta. El objetivo es evaluar el potencial del modelo para la búsqueda de una solución aceptable, desde el punto de vista de los costes del mantenimiento y de la distribución de las actividades. Por lo novedoso del modelo, no es posible la comparación con desarrollos anteriores similares. Por lo tanto, el estudio se inicia en la definición y análisis de los valores de aplicación de los operadores del algoritmo y demás parámetros, para determinar aquellos que permitan una mejor exploración del campo de soluciones. Adicionalmente, se estudia el comportamiento del algoritmo en base al número de actividades y condiciones ambientales, para evaluar los costes finales y el horizonte para la correcta planificación. Se comparan también este desarrollo conjunto con uno de distribución en planta (Santamarina, 1995), para evaluar la influencia de las consideraciones del mantenimiento en la implantación.

Como se ha observado en los capítulos 1, 5 y 6, no existe en la bibliografía una formulación como la que se propone en este trabajo, siendo, por lo tanto, desconocida la solución de mínimo coste tanto del mantenimiento como de la distribución. Es prudente comentar, que los desarrollos descritos anteriormente para el layout y el mantenimiento, abordan problemas muy puntuales que incorporan parámetros específicos.

Los resultados, una vez obtenidos, manifestarán la bondad de la metodología propuesta para este tipo de problemas conjuntos, así como sus posibles limitaciones. La complejidad del modelo junto con la multiplicidad de criterios a optimizar, corresponden a un problema de difícil o imposible solución por métodos analíticos directos, siendo evidente la conveniencia de aplicar los algoritmos genéticos.

## **7.1.- Implementación.**

Para la implementación de la metodología propuesta y llevar a cabo el estudio experimental, se desarrolló el algoritmo en Visual C++.NET. Este lenguaje de programación por objetos, basado en el Visual C++, proporciona una aplicación robusta. Adicionalmente, crea un entorno de desarrollo eficaz y flexible para crear y ejecutar aplicaciones basadas en Microsoft Windows.

Las estructuras Microsoft.NET, representan un avance notable que mejora la capacidad de los sistemas Windows en la ejecución de las aplicaciones. La plataforma .NET es un Framework que pone a disposición de las aplicaciones los servicios que éstas necesitan, ya sean para las interfaces gráficas con el usuario, interoperabilidad a través de Internet o comunicaciones con diferentes servidores. Esta nueva versión de Microsoft Visual C++ .NET surge como la integración del lenguaje C++ con el resto de la arquitectura Microsoft.NET.

La finalidad de emplear una aplicación como ésta, es proporcionar un software que contemple todas las tareas necesarias en la implementación del algoritmo. Entre otros objetivos destacan los siguientes:

- Que permita introducir datos de partida tanto en el diseño de la distribución como en la implementación del mantenimiento.
- Que permita asignar y manipular los parámetros del algoritmo genético, tales como: la probabilidad de cruce, mutación, tamaño de la población y criterio de terminación (ver capítulo 4). Esto permitirá evaluar la eficacia de la técnica de optimización.
- Que permita almacenar y mostrar los resultados de los experimentos, en tablas y gráficos, como la evolución de la función objetivo y los costes finales.

### **7.1.1.- Introducción de datos.**

Para la introducción de los datos y parámetros del algoritmo, se partirá de cuadros de diálogos y celdas en el entorno Microsoft Windows. Como se ha observado en el capítulo anterior, los datos de partida de la metodología propuesta a cargar son:

Para el algoritmo genético:

- Número de iteraciones del algoritmo, es decir, número de generaciones que se desea evaluar.
- Número de individuos que integrarán las poblaciones para esas generaciones.
- Probabilidad de cruzamiento.
- Probabilidad de mutación.

Parámetros específicos para la especie:

- Intensidades relacionales bajo el número de criterios tanto cualitativos y cuantitativos que se consideren necesarios.
- Coeficiente de ponderación de cada uno de los criterios bajo los que se ha estimado la intensidad relacional.
- Número de actividades presentes en el problema.

Los parámetros específicos para el modelo, es decir, de la distribución en planta y el mantenimiento son:

- Intensidades relacionales bajo el número de criterios tanto cualitativos y cuantitativos que se consideren necesarios.
- Coeficiente de ponderación de cada uno de los criterios bajo los que se ha estimado la intensidad relacional de la distribución y el mantenimiento.
- Número de actividades presentes en el problema más el almacén, en su caso.
- Coeficiente de ponderación del criterio geométrico presente en la función objetivo, como término penalizador.
- Largo y ancho de cada una de las actividades. Cuando exista redundancia, por la asignación presente en el cromosoma (ver apartado 6.2.3.1), se multiplica por dos el área de la actividad.
- Tiempo medio entre fallos de los equipos de la distribución (MTBF).
- Tiempo medio de reparación de todos los equipos del layout (MTTR).
- Coste de desplazamientos, por unidad de distancia, de materiales de mantenimiento ( $W_a$ ).
- Coste del mantenimiento preventivo medio horario de las actividades ( $C_{mm}$ ).
- Coste del mantenimiento correctivo medio horario de los equipos ( $C_{mc}$ ).
- Coste de instalación de los equipos ( $C_u$ ).

- Duración media de la actividad preventiva para los equipos de las actividades ( $dm$ )
- Coste de actuación unitario ( $Cat$ ).
- Coste medio horario por pérdidas de producción ( $Cpput$ ).
- Horizonte ( $t$ ).
- Factores de penalización  $Xcr$  y  $fprp$
- Número de procesos asociado al criterio flujo de materiales para el horizonte  $t$ .
- Valores de factores perjudiciales propios del ambiente del layout.
- Coste por pérdidas de utilidad ( $cpu$ ).

### 7.1.1.1.- Cuadros de diálogos.

A continuación, se muestran los diferentes cuadros y celdas de carga para la ejecución del modelo propuesto.

Figura 7.1: Introducción de los datos de entrada para la identificación de la empresa y el problema.

Como se observa en la figura 7.1, se declaran una serie de datos para la identificación de la empresa. Para nuestro modelo, lo importante es introducir el número de actividades presente en el layout a diseñar (ver capítulo 8)..

The image shows a dialog box titled "Datos para la optimización del árbol de corte". It contains three main sections for inputting parameters:

- Población:**
  - Número de individuos: 50
  - Número de evoluciones: 10
- Probabilidades:**
  - Cruzamiento: 0.9
  - Mutación: 0.1
- Coeficientes ponderantes:**
  - Factor cualitativo: 1
  - Factor cuantitativo: 1

At the bottom right, there are two buttons: "Aceptar" and "Cancelar".

Figura 7.2: Introducción de los datos para la optimización del árbol de corte.

En el cuadro interactivo de la figura 7.2, se introducen todos los datos relacionados con la ejecución del algoritmo genético para la primera etapa del desarrollo. Como se observa en la figura, se declaran el número de individuos de la población, número de generaciones o evoluciones, probabilidad de mutación y cruce, y los valores de los coeficientes de ponderación de los criterios cualitativo y cuantitativo.

The image shows a dialog box titled "Datos para optimización la distribución" with a close button (X) in the top right corner. The dialog is divided into four main sections, each with a title and several input fields:

- Población:**
  - Número de individuos: 50
  - Número de evoluciones: 10
- Coeficientes ponderantes:**
  - Factor cualitativo: 1
  - Factor cuantitativo: 1
- Dominio global de ubicación:**
  - Mínimo ratio (alto/ancho): 0.5
  - Máximo ratio (alto/ancho): 2
  - Penalización geométrica: 100000
- Probabilidades:**
  - Cruzamiento: 0.95
  - Mutación: 0.05

At the bottom of the dialog, there are two buttons: "Aceptar" and "Cancelar".

Figura 7.3: Introducción de los datos para la optimización del individuo (distribución y mantenimiento).

La figura 7.3 representa el cuadro interactivo donde se introducen los datos genéricos para la aplicación del algoritmo genético en la segunda fase de optimización. Al igual que en la especie, se declaran el número de individuos, número de generaciones o evoluciones, probabilidad de cruce y mutación, factores para los criterios cualitativo y cuantitativo, criterio geométrico de penalización y las relación alto-ancho para el dominio global.

Tipo de relación	Código	Valores MAG asociados
Absolutamente necesaria	A	6400
Especialmente importante	E	1600
Importante	I	400
Ordinaria	O	20
Sin importancia	U	0
Rechazable	X	-120

Figura 7.4: Introducción de los valores relacionales entre actividades.

Como se ha comentado en el capítulo 2 del presente documento, para los criterios cualitativos, representados según la escala A, E, I, O, U y X (figura 7.4), es necesario llevar ésta a una escala cuantitativa. Una vez colocados en la Tabla Relacional de Actividades (figura 7.5), la finalidad es utilizarlos en los cálculos de la optimización.



En el cuadro de figura 7.6, se introducen las cantidades de materiales o piezas que circularán entre las distintas actividades de la distribución. Esto representa el criterio cuantitativo para nuestro modelo de distribución.

The screenshot shows a window titled "Datos de la planta" with a close button in the top right corner. The window is divided into three main sections: "Nombre y área", "Tabla de flujos entre actividades", and "Tabla relacional de actividades". Under "Nombre y área" is "Datos globales del mantenimiento". Under "Tabla de flujos entre actividades" is "Datos de mantenimiento por actividad". Under "Tabla relacional de actividades" is "Datos de la empresa". The main area contains a table with the following data:

	MTBF	Wa	MTTR	Cu	Cmm	Dmp	FAint	Cmc	Ancho	Largo
Act. 1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Act. 2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Act. 3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Act. 4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Act. 5	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Act. 6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Act. 7	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Act. 8	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Act. 9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

At the bottom of the window, there are three buttons: "Aceptar", "Cancelar", and "Aplicar".

Figura 7.7: Introducción de los datos de mantenimiento del equipo o equipos de cada actividad.

En la figura 7.7, se representan todos los datos a declarar, relacionados con el mantenimiento de los equipos de todas las actividades, como las dimensiones necesarias para la ejecución del mantenimiento y producción. Las variables son: tiempo medio de buen funcionamiento del equipo o equipos de la actividad ( $MTBF_i$ ), coste de desplazamientos, por unidad de distancia, de materiales de mantenimiento de la actividad ( $W_{ai}$ ), tiempo medio de reparación del equipo o equipos de la actividad ( $MTTR_i$ ), coste unitario de instalación del equipo de la actividad ( $C_{ui}$ ), coste del mantenimiento preventivo medio horario de la actividad ( $C_{mmi}$ ), duración media de la actividad preventiva para el equipo o equipos de la actividad ( $D_{mpi}$ ), factor ambiental promotor de la degradación del equipo de la actividad ( $FA_{inti}$ ), coste del mantenimiento correctivo medio horario del equipo o equipos de la actividad ( $C_{mci}$ ), largo y ancho de la actividad. El subíndice  $i$  utilizado en el capítulo anterior es para identificar la actividad.

Nombre y área	Tabla de flujos entre actividades	Tabla relacional de actividades
Datos globales del mantenimiento	Datos de mantenimiento por actividad	Datos de la empresa
Factor Amb. 1	Coste Medio Perd. Prod.	Coste Medio Perd. Prod.
Factor Amb. 2	Horizonte	Horizonte
Factor Amb. 3	Factor Penalizacion	Factor Penalizacion
Coste Actuacion	Factor de Perd. Util.	Factor de Perd. Util.
Coef. Ponderacion Mant.	Factor Penal. por Redund. Prevent.	Factor Penal. por Redund. Prevent.
Num Procesos asociado criterio cualitativo		

Figura 7.8: Introducción de los datos globales de mantenimiento.

En el cuadro de la figura 7.8, se introducen los datos relacionados con el mantenimiento a escala global para toda la planta. Entre estos tenemos: coste de actuación ( $Cat$ ), coste medio por pérdidas de producción ( $Cpput$ ), horizonte ( $t$ ), coeficiente de ponderación del mantenimiento ( $\gamma$ ), factor de penalización por el incumplimiento del mantenimiento correctivo para la redundancia de la actividad ( $Xcr$ ), factor de penalización por redundancia en preventivo total ( $fprp$ ), costes por pérdidas de utilidad ( $cpu$ ), número de procesos asociados al criterio cuantitativo ( $\eta pt$ ) y factores ambientales externos a la distribución ( $amb$ ).

Por último en la figura 7.9, se observan los posibles resultados de un proceso de optimización que incluyen, la distribución de menor coste relacional tanto de distribución y mantenimiento  $CT$  de Planta ( $min$ ), el árbol de corte óptimo, los números de actuación  $na(i)$  sobre los equipos de cada actividad de la distribución y  $R(i)$ , para cada actividad.

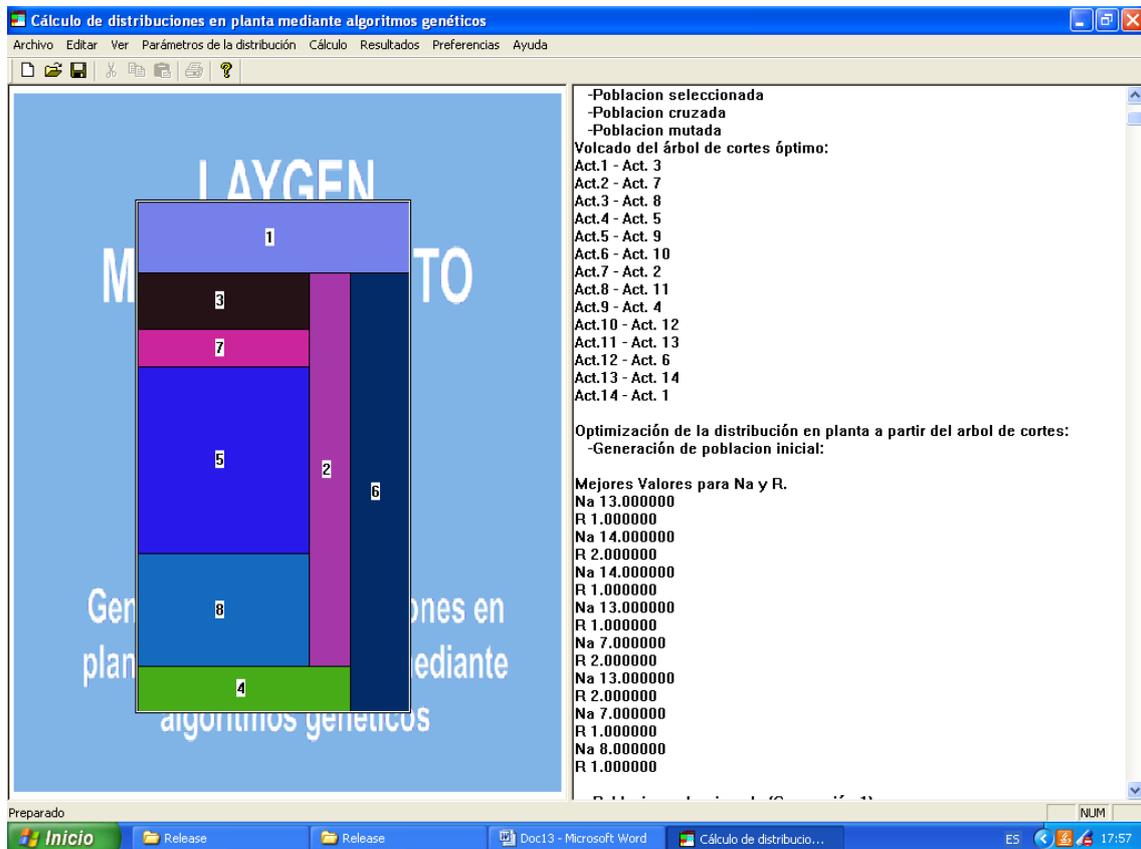


Figura 7.9: Distribución de menor coste total relacional, árbol de cortes óptimo, número de actuaciones  $na(i)$  y  $R(i)$  de cada actividad.

Adicionalmente (figura 7.10), el algoritmo muestra los costes asociados al flujo de materiales CR, coste derivado de las relaciones entre actividades, coste de penalización geométrica (con redundancia), coste del mantenimiento total esperado  $C_{tm}$  y coste total relacional de planta  $CT de Planta$  mínimo para cada generación de estudio.

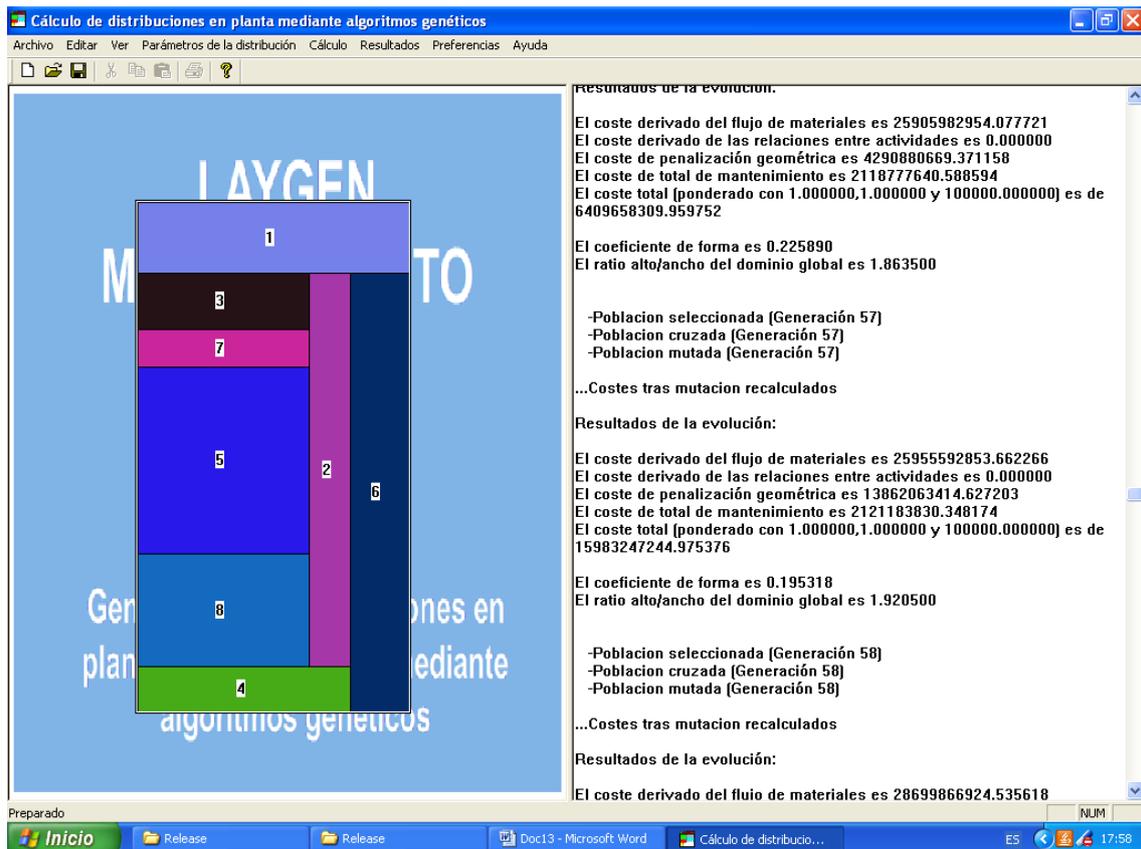


Figura 7.10: Resultados mínimos por generación asociados a un proceso de optimización.

## 7.2.- Diseño de experimentos.

En este apartado se describen los experimentos a realizar a fin de evaluar la metodología. Además, se pretende analizar las ventajas y eficacia de las aportaciones como el modelo de mantenimiento conjunto y las restricciones geométricas bajo la redundancia.

Por la naturaleza probabilística de los algoritmos genéticos, comentadas en los capítulos 2,3 y 4, se pueden producir diferentes soluciones para un mismo problema, por las diferentes aplicaciones de los parámetros del algoritmo.

Para estudiar qué valores son adecuados para los operadores genéticos y demás parámetros, se crea una serie de experimentos donde se varían los parámetros que se usan en la implementación del algoritmo. Los experimentos emplean diferentes valores para las probabilidades de cruce, mutación y número de individuos como generaciones,

hasta lograr los valores o intervalos de valores que aporten mejores soluciones para diferentes situaciones. Esto permite evaluar la capacidad exploradora y de convergencia del algoritmo.

Grefenstettes (1986), describe en su publicación, un conjunto de experimentos para identificar los parámetros más adecuados de una serie de funciones numéricas. Define seis parámetros de control, que identifican los valores adecuados para los casos de estudio.

Hay que destacar, que la elección adecuada de los operadores y demás parámetros del algoritmo, no es un problema de fácil solución y cien por ciento correctos, que nos permitan obtener valores generalistas. Encontrar los valores apropiados para un determinado problema, parece ser más un arte que una ciencia. La interacción de los operadores genéticos con el número de individuos de la población, pueden derivar en problemas paramétricos no lineales de optimización (Grefenstettes 1986). A su vez, la función objetivo y las características del problema en particular, influyen considerablemente en la determinación de los parámetros idóneos. No obstante, pueden existir ciertos valores de estos parámetros que son aceptables para el problema en estudio. También se realizan otra serie de pruebas de estudio y validación de la metodología propuesta (ver apartados 7.2.2, 7.2.3, 7.2.4, 7.2.5 y 7.2.6).

### **7.2.1.- Determinación de los parámetros genéricos para el algoritmo propuesto.**

Según lo comentado anteriormente y en el apartado 4.20, para una mayor eficiencia de aplicación de la metodología propuesta, es menester determinar los valores o rangos paramétricos adecuados de funcionamiento. Para iniciar los experimentos, es conveniente determinar o fijar las características del problema, es decir, cuáles son las condiciones de planta. Estas condiciones involucran para nuestro modelo: número de actividades y sus dimensiones, relación alto y ancho del dominio inicial, costes medio de mantenimiento preventivo, correctivo, etc. Teniendo esto se implementa y manipulan los parámetros del funcionamiento del algoritmo genético.

Para iniciar la etapa experimental, se propone un problema de distribución en planta de cinco actividades, más el almacén para productos y mantenimiento, es decir, seis actividades (ver figura 7.11 y 7.12). La razón de plantearse el problema de esta manera, es que en la literatura relativa al tema, no existen trabajos previos y mucho menos resultados publicados, que nos sirvan de ejemplo clásico para iniciar los ensayos bajo estas nuevas consideraciones. Adicionalmente, resulta difícil utilizar problemas clásicos para evaluar los resultados con métodos más complejos, además de incorporar

parámetros que antiguamente no se empleaban, como es el caso del mantenimiento en la distribución. Además, es necesario incrementar el número de actividades del problema para evaluar los resultados, manteniendo la homogeneidad en los datos de entrada (ver apartado 7.2.2). No obstante, los valores empleados en los ensayo del modelo de mantenimiento y distribución corresponden con parámetros de campo reales.

Santamarina (1995), emplea problemas clásicos de la literatura, y propone a su vez, problemas para evaluar la influencia de la estructura del árbol en los resultados. Unos de los problemas propuesto, consiste en una planta de 16 actividades, con áreas que varían unas respecto a otras desde el 0% hasta un 10%. En el apartado 7.2.5, se emplea un problema clásico, para comparar como influyen las consideraciones de mantenimiento en una planta monoárea. El ensayo, consiste en evaluar como influye la redundancia en la configuración de la distribución y en los costes relacionales de manutención. Pero hay que comentar que estos desarrollos previos, consideran distribuciones que en algunos casos emplean actividades que consisten en áreas de inspección, baños, salas, etc, áreas que, por su puesto, no recibirán mantenimiento mecánico y tampoco consideraciones de redundancia. Nuestro modelo está más enfocado a plantas con actividades donde hay maquinaria que mantener. La finalidad del ensayo del apartado 7.2.5, es simplemente para observar las variaciones originadas por  $R$  en un problema ya realizado solo para distribución.

También, se tiene que aclarar, que se emplean números moderados de evoluciones por razones de volcado y recolección de datos del programa, ya que emplea una gran cantidad de información en el desarrollo del modelo y costes elevados. Estamos conscientes, que en algunos casos, es necesario un número mayor de evoluciones para darle tiempo al programa que converja. Pero como se ha comentado, algunos autores consiguen buenos resultados de convergencia aplicando un número moderado de iteraciones. Como se verá más adelante, el algoritmo consigue distribuciones de bajo coste en las primeras 20 generaciones. Además, este es un primer modelo con estas características, siendo necesario en un futuro mejorar las bondades informáticas de la aplicación (ver apartado 7.4).

### 7.2.1.1.- Etapa experimental 1.

Los valores de partida están definidos en las figuras 7.4 y 7.5 y las tablas de las figuras 7.11 y 7.12. Se observan 5 actividades, más el almacén (productos y repuestos).

	MTBF	Wa	MTTR	Cmm	Cmc	dm	Ciu	factor amb	ancho	largo
Actividad 1	2000 horas	200 unid.	45 horas	4 unid.	35 unid.	2 horas.	250 unid.	0	1	3
Actividad 2	5300 horas	350 unid.	30 horas.	8 unid.	90 unid.	5 horas	360 unid.	0	2	3
Actividad 3	4000 horas	100 unid.	15 horas	6 unid	70 unid	2 horas.	300 unid.	0	3	4
Actividad 4	1000 horas	700 unid.	10 horas	2 und.	40 unid	1 hora	500 unid.	0	4	5
Actividad 5	4500 horas	850 unid.	20 horas.	3 unid.	60 unid	2 horas.	400 unid.	0	3	4
Actividad 6	*	*	*	*	*	*	*	*	1	2

Figura 7.11. Valores de mantenimiento por actividad etapa experimental 1.

	Actividad 1	Actividad 2	Actividad 3	Actividad 4	Actividad 5	Actividad 6
Actividad 1	*	1200				300
Actividad 2		*	2000	2000	5000	
Actividad 3	4000	2000	*			
Actividad 4			5000	*		1000
Actividad 5	1000	4000			*	
Actividad 6					4000	*

Figura 7.12. Valores de manutención etapa experimental 1.

Podemos observar en la tabla de la figura 7.12, que los flujos de manutención son altos comparados con los ejemplos clásicos mostrados por Francis y White (1984), que emplean el flujo para un mes. Hay que resaltar que se emplean estos valores porque se consideran 3 turnos de 8 horas por día, para un año, lo que representa un horizonte de tiempo de 8784 horas. Esto nos permite mejor homogeneidad en los resultados, con el horizonte de 10000 horas empleado para mantenimiento. Este tipo de operaciones son empleados con frecuencia en industrias de alta producción, como instalaciones petroleras etc.

Estos ensayos se han repetido cinco veces y se han escogido los que aportaron mejores resultados de cada uno.

Los experimentos se organizan de la siguiente forma:

Para 50 generaciones y 50 individuos:

Ensayo 1 (figuras 7.13, 7.14, 7.15 y 7.16):

- Probabilidad de cruce 20%.
- Probabilidad de mutación de 100%.

Ensayo 2 (figuras 7.17 y 7.18):

- Probabilidad de cruce 50 %.
- Probabilidad de mutación de 50 %.

Ensayo 3 (figura 7.21, 7.22 y 7.23) Estos son los parámetros propuestos por Tam (1992):

- Probabilidad de cruce 95%.
- Probabilidad de mutación de 5%.

Para 100 generaciones y 50 individuos:

Ensayo 4 (figuras 7.24, 7.25, 7.26 y 7.27):

- Probabilidad de cruce 20%.
- Probabilidad de mutación de 100%.

Ensayo 5 (figuras 7.28, 7.29 y 7.30):

- Probabilidad de cruce 50%.
- Probabilidad de mutación de 50%.

Ensayo 6 (figuras 7.32, 7.33 y 7.34):

- Probabilidad de cruce 95%.
- Probabilidad de mutación de 5%.

Para 100 generaciones y 100 individuos:

Ensayo 7 (figura 7.35 y 7.36):

- Probabilidad de cruce 20%.
- Probabilidad de mutación de 100%.

Ensayo 8 (figuras 7.37, 7.38, 7.39 y 7.40):

- Probabilidad de cruce 50%.
- Probabilidad de mutación de 50%.

Ensayo 9 (figuras 7.41, 7.42 y 7.43):

- Probabilidad de cruce 95 %.
- Probabilidad de mutación de 5 %.

Para 50 generaciones y 50 individuos:

**Ensayo 1** (figuras 7.13, 7.14, 7.15 y 7.16):

- Probabilidad de cruce 20%.
- Probabilidad de mutación de 100%.

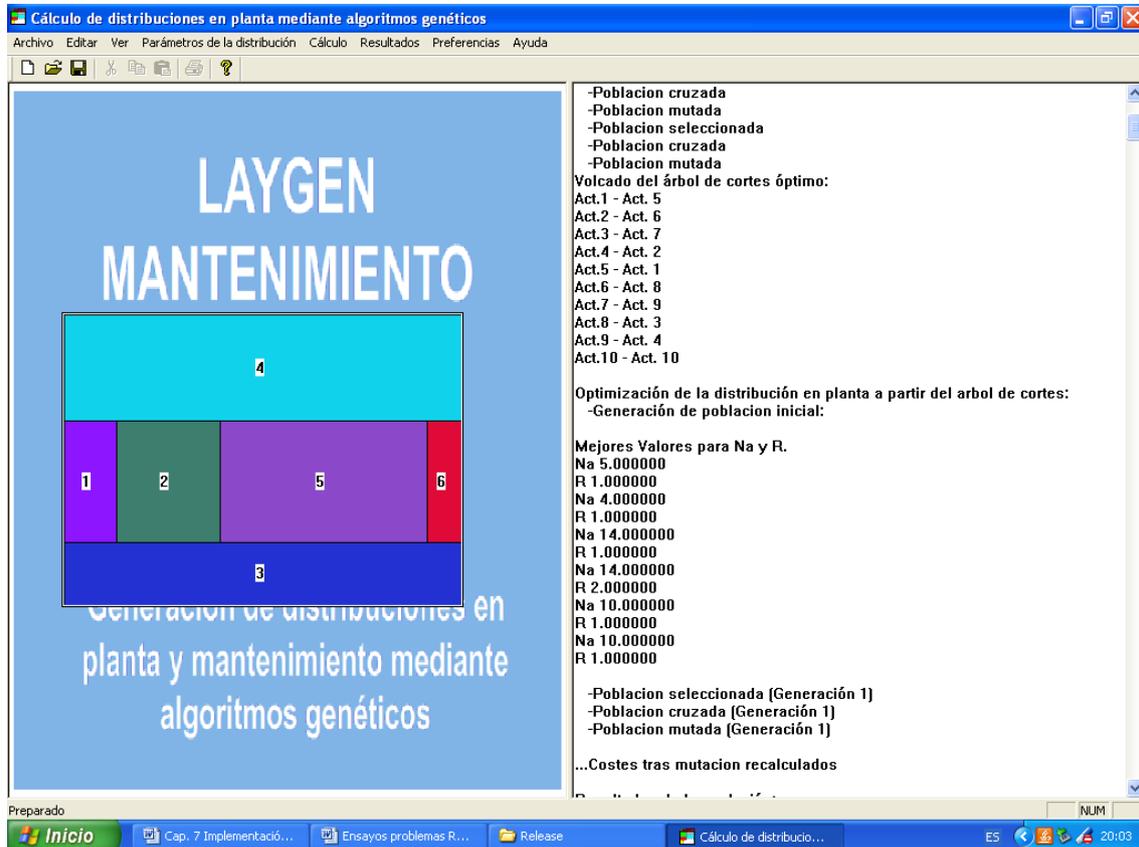


Figura 7.13: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 1.

En la figura 7.13, se representa la planta de menor coste total relacional de la distribución y del mantenimiento, para el ejercicio planteado del ensayo 1. Como puede observarse en la pantalla de resultados, el modelo identifica: el árbol de cortes óptimo, el número de acciones de mantenimiento  $na(i)$  y el número de equipos  $R(i)$  en cada actividad (ver capítulo 6). Se observa que las actividades 3 y 4 constituyen un grupo de actuación, con  $na_i = 14$ .

En la siguiente figura (figura 7.14), se presentan los costes totales relacionales de la distribución y del mantenimiento por generación, para el ensayo 1. Puede observarse una alta dispersión en las primeras generaciones que representa una etapa de exploración inicial (ver capítulo 4). Posteriormente, el algoritmo comienza una etapa de explotación a partir de la generación 8. Al final se observan otros picos de costes, que representan una nueva etapa de exploración y pérdidas de orientación del programa, por la misma aplicación de los operadores. Estos picos pueden ser originados por la altísima

probabilidad de mutación utilizada, pero en los ensayos siguientes veremos que no necesariamente siempre sucede así.

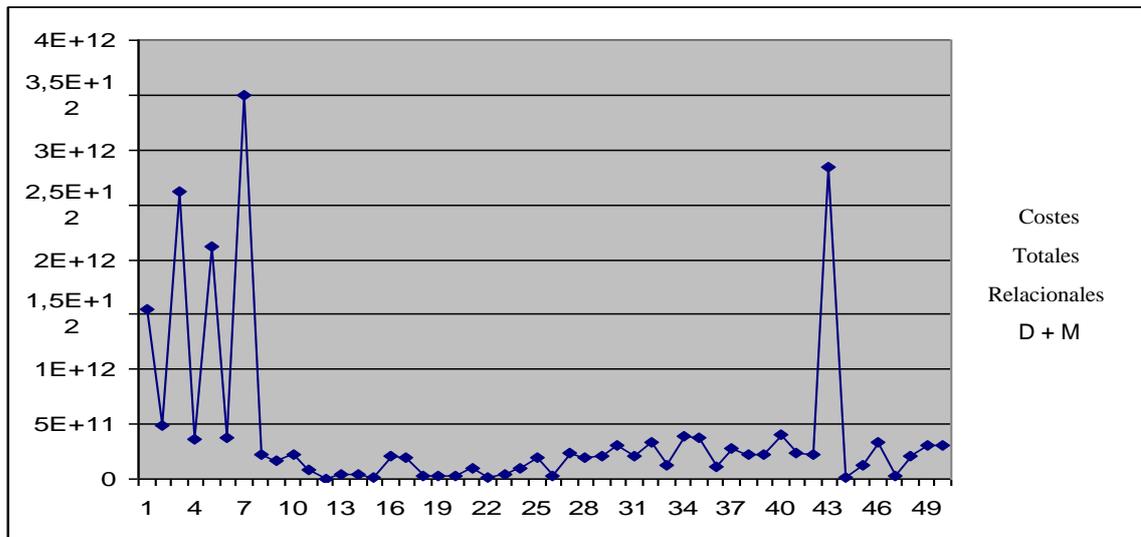


Figura 7.14: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo1.

Para hacer una mejor evaluación de los costes totales relacionales, graficamos del fichero los costes de la generación número 8 a la 42 y de la 43 a la 50 (figura 7.15 y 7.16). Esto con la finalidad de evitar los picos de pérdida de orientación, y ampliar la escala para una mejor observación. Se observa en la figura 7.15, que los mejores resultados se obtienen entre la generación número 10 y 29. Adicionalmente, se observa la variabilidad fruto de la explotación alrededor de los valores más bajos, y cierta exploración para este espacio de soluciones. Hay una pequeña divergencia a partir de la generación 29.

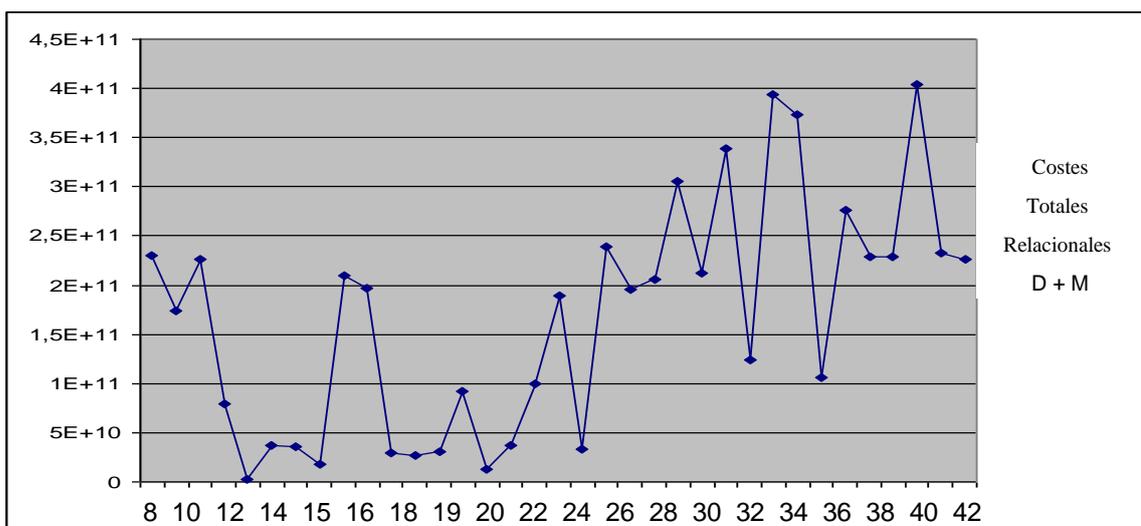


Figura 7.15: Evolución de los costes mínimos totales relacionales a partir de la generación número 8 hasta la 42, ensayo1.

Igual en este caso anterior, se selecciona el trozo de diagrama entre la generación número 43 y 50 y se crea el subdiagrama de la figura 7.16.

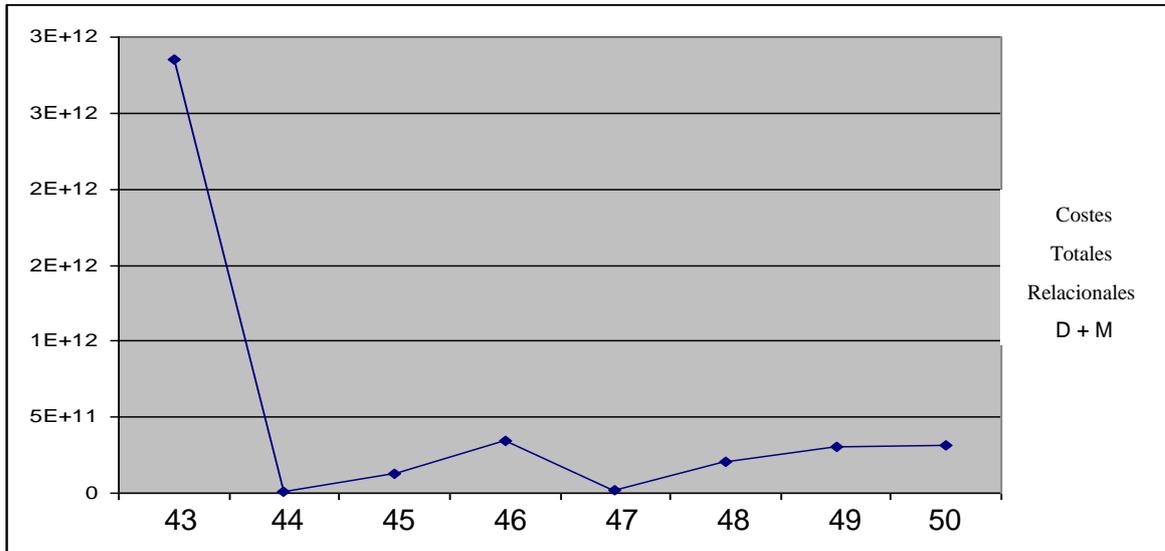


Figura 7.16: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 43 hasta la 50, ensayo1.

Observando el fichero de resultados, la solución de mínimo coste total relacional, para este número de evoluciones es 10332749591 unidades que se localiza en la generación 44.

**Ensayo 2** (figuras 7.17 y 7.18):

- Probabilidad de cruce 50 %.
- Probabilidad de mutación de 50 %.



Figura 7.17: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 2.

Al igual que en el caso anterior, se representa la planta de menor coste total relacional del ensayo 2 (figura 7.17). Puede observarse la diferencia de configuración de la distribución con respecto al ensayo anterior. También se observan valores diferentes para los  $na(i)$  y  $R(i)$ . Esto se debe a la naturaleza probabilísticas de estos modelos, comentados en el capítulo 4, y más aún, con una variación de los parámetros del algoritmo.

En la figura 7.18, se aprecia que cambiando los parámetros, la evolución de los costes es diferente en convergencia y en valor, a su vez, se puede observar un pico que representa pérdida de orientación del algoritmo que nuevamente converge por el paralelismo implícito (ver capítulo 4). Observando la figura 7.18 y teniendo presente la escala máxima de los diagramas (ensayo 1  $4E+12$  y ensayo 2  $9E+14$ ), la dispersión tiene mayores picos. Adicionalmente, no se observa al principio una convergencia, sino divergencia ascendente con una variabilidad menos intensiva que en el ensayo 1.

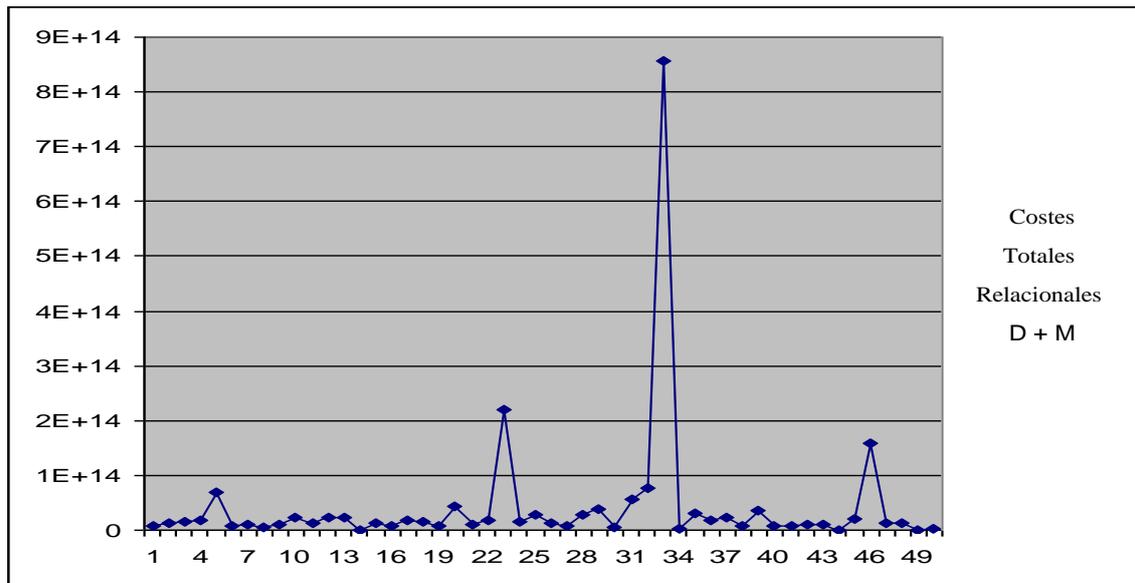


Figura 7.18: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 2.

Igual que en el ensayo anterior, evitamos lo picos de pérdida de orientación del algoritmo para evaluar mejor los costes.

En de la figura 7.19, se observa la evolución de los costes totales relacionales de la distribución y del mantenimiento para el subdiagrama de la generación número 1 hasta la 32, y de la generación 34 hasta la 45. Y en la figura 7.20 de la generación 34 a la 45.

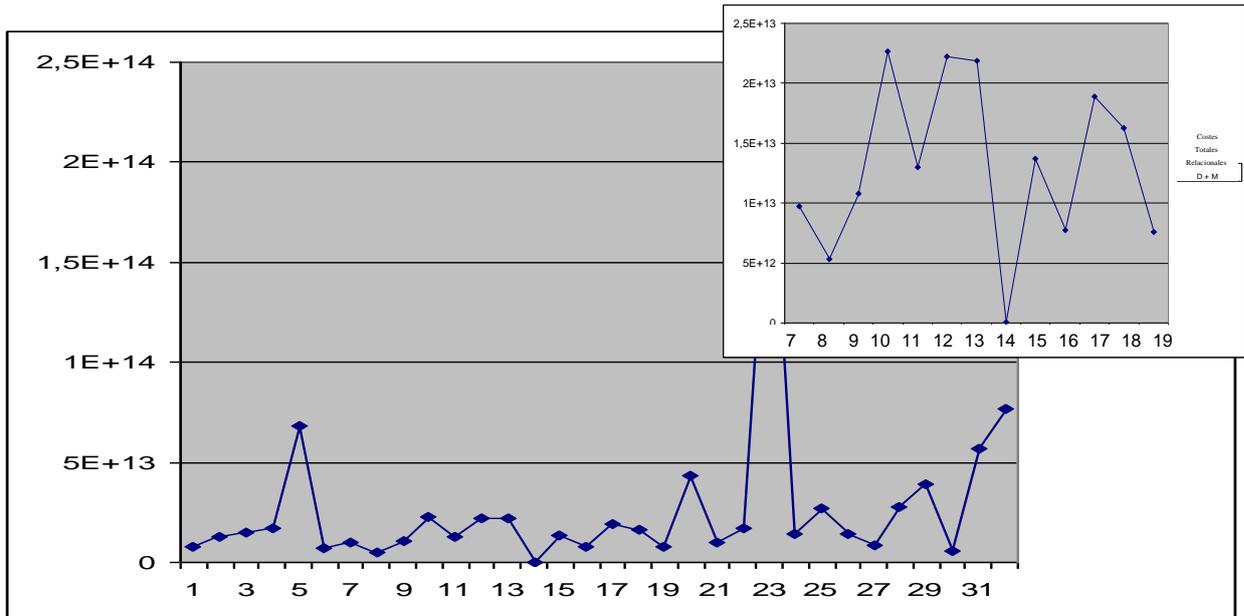


Figura 7.19: Evolución de los costes mínimos totales relacionales hasta generación 32 y de la 7 a la 19, ensayo 2.

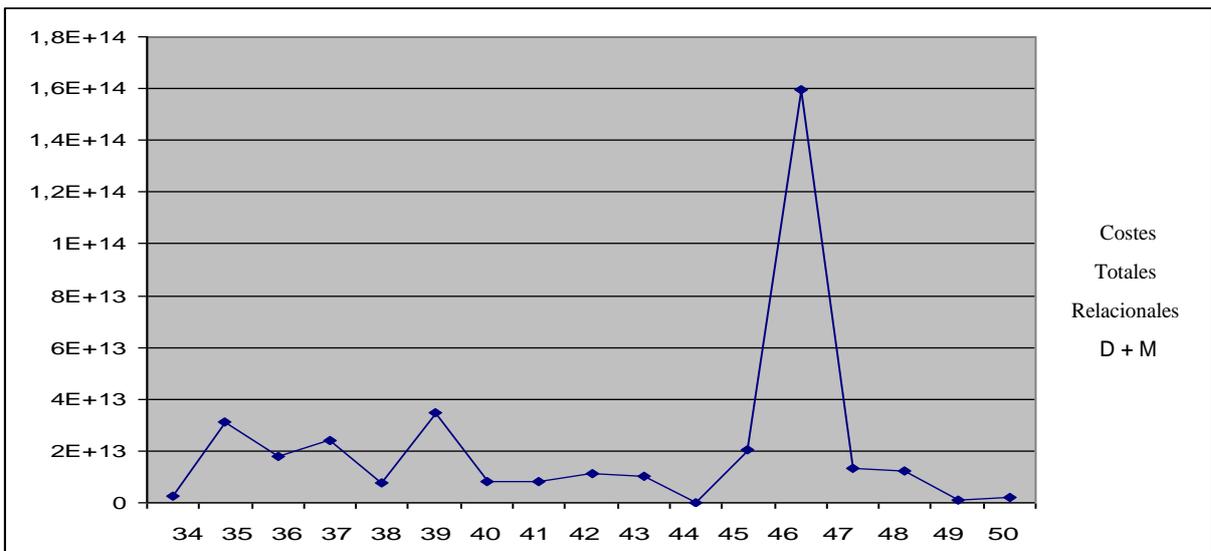


Figura 7.20: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 34 hasta la 50, ensayo 2.

La solución de mínimo coste total, para este ensayo específico, es 13664629637 unidades en la generación número 44.

**Ensayo 3** (figura 7.21, 7.22 y 7.23):

- Probabilidad de cruce 95%.
- Probabilidad de mutación de 5%.

Siguiendo con los ensayos del problema, se varían nuevamente los parámetros del algoritmo.



Figura 7.21: Distribución del mínimo coste total relacional del ensayo 3.

Aprovechando el resultado gráfico de la figura 7.21, se puede observar que el modelo identifica grupos de actuación  $g$ , específicamente en la actividad 3 y 5 donde  $na(i)$  es 3 para ambas (ver capítulo 6).

En la figura 7.22 se observa la convergencia del algoritmo para los parámetros de estudio. Este caso presenta una clara convergencia de los resultados del coste total. No necesariamente implican los mejores resultados, si no, que el modelo con estos parámetros se comporta de esta forma.

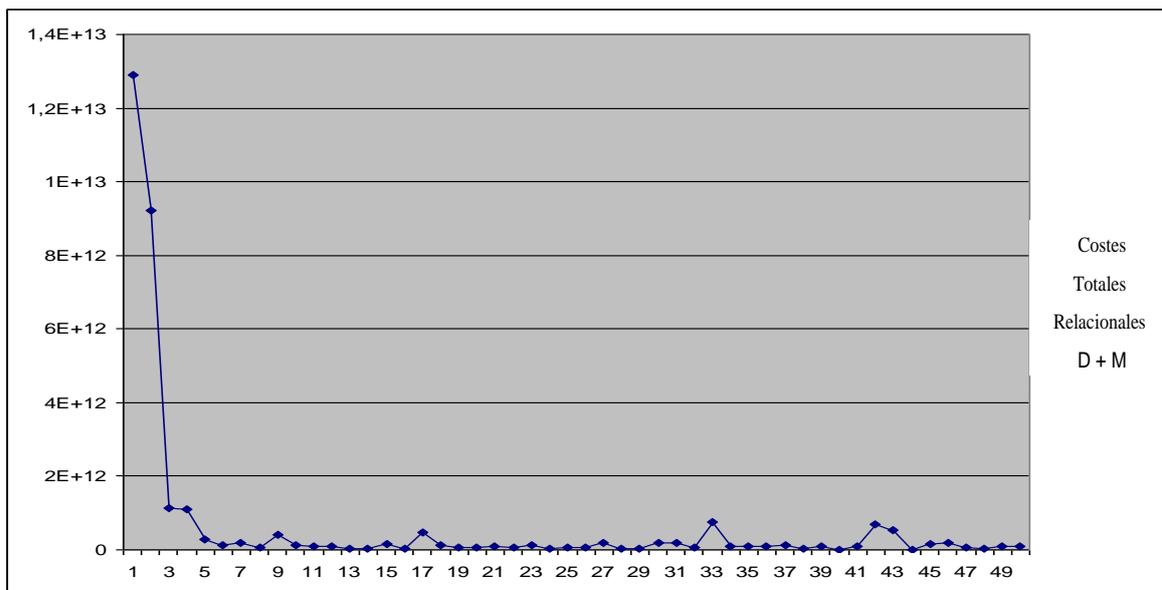


Figura 7.22: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 3.

Para evaluar mejor la evolución de los costes mediante una ampliación de la escala, volvemos a evitar los valores picos como se observa en la figura 7.23. Viendo este subdiagrama, podemos observar tanto la exploración y explotación de los resultados, como también pérdidas de orientación que nuevamente convergen por el paralelismo. Aunque los resultados son similares al ensayo 1, en este se observa que los picos de exploración son de mayor valor para esta etapa de convergencia. Por la naturaleza del modelo, que posee un cromosoma de tres segmentos, el efecto del cruce puede ser el causante de mayor variabilidad en la exploración que la mutación para este caso específico.

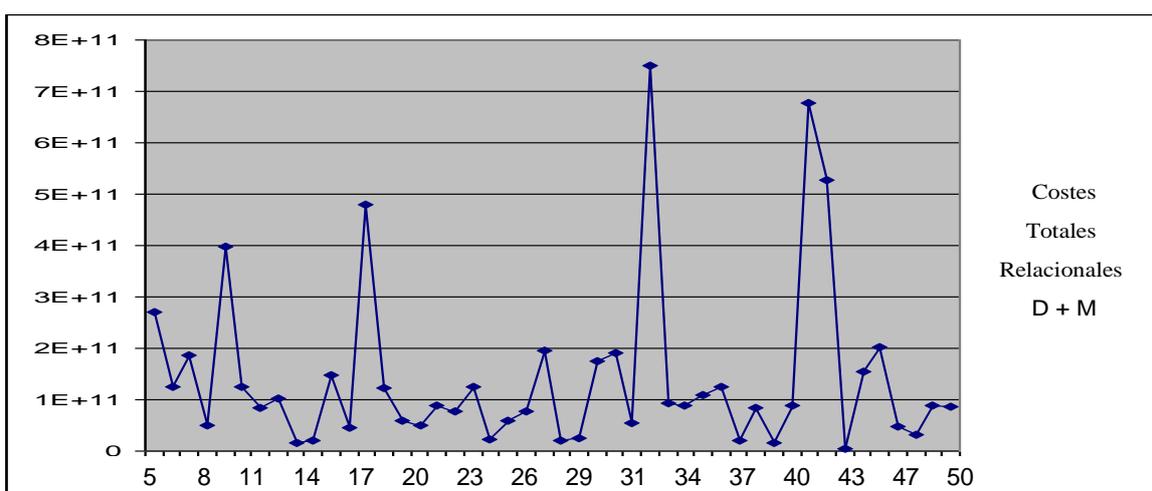


Figura 7.23: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación número 5 hasta la 50, ensayo 3.

El valor de menor coste total para este caso es: 3545363523 unidades y se localiza en la generación 43. Este es el mejor resultado para estos tres primeros ensayos.

Para 100 generaciones y 50 individuos:

Ensayo 4 (figuras 7.24, 7.25, 7.26 y 7.27):

- Probabilidad de cruce 20%.
- Probabilidad de mutación de 100%.

Aquí se aumenta el número de las evoluciones, para observar los resultados en función de los parámetros. Observando la figura 7.24 las actividades 1 y 5 forman un grupo con  $n_{ai} = 14$ .

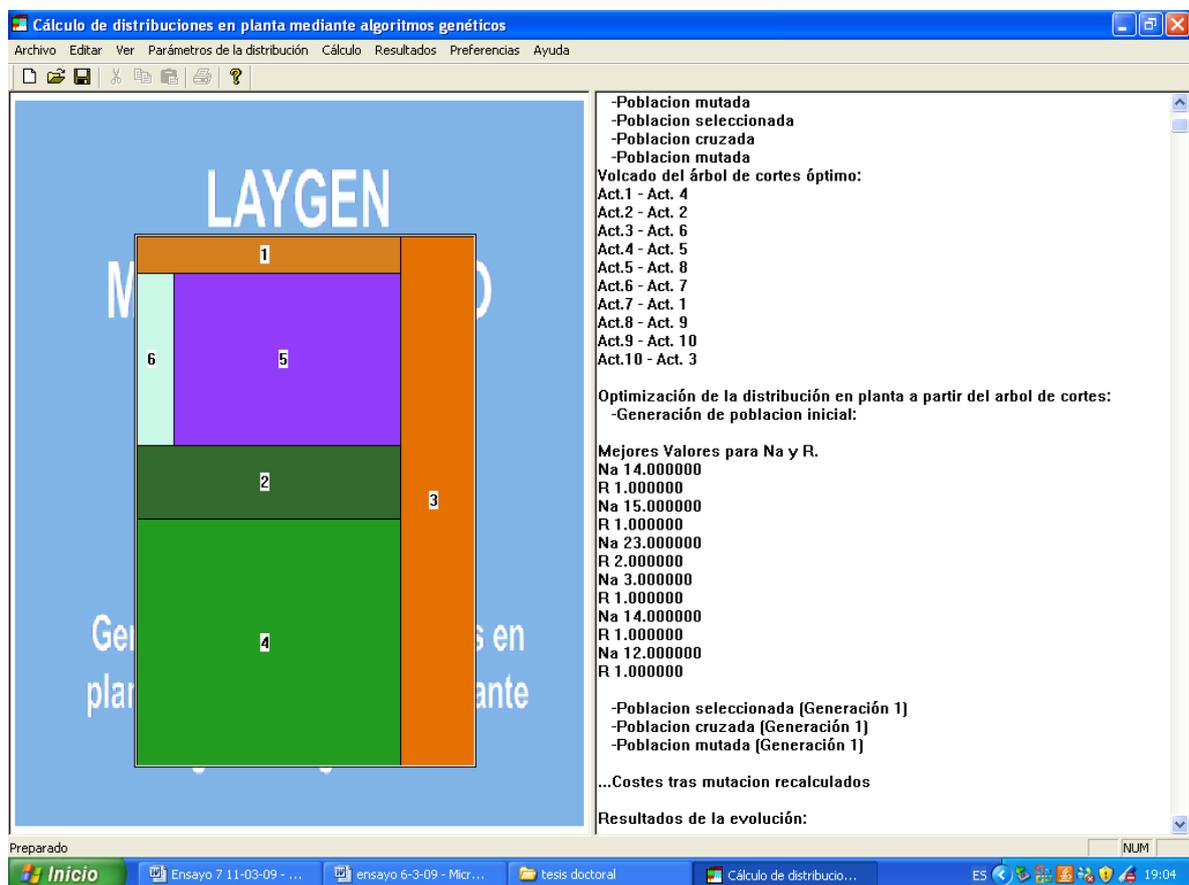


Figura 7.24: Distribución del mínimo coste total relacional del ensayo 4.

Observando la figura 7.25, el algoritmo tiene un comportamiento similar al caso del ensayo 1, con los mismos parámetros de cruce y mutación. Se observa una pérdida de orientación en la generación 9, que rápidamente es subsanada. Al igual que en los ensayos anteriores, dividimos el diagrama en subdiagramas para evitar los picos y mejorar la escala (figuras 7.26 y 7.27).

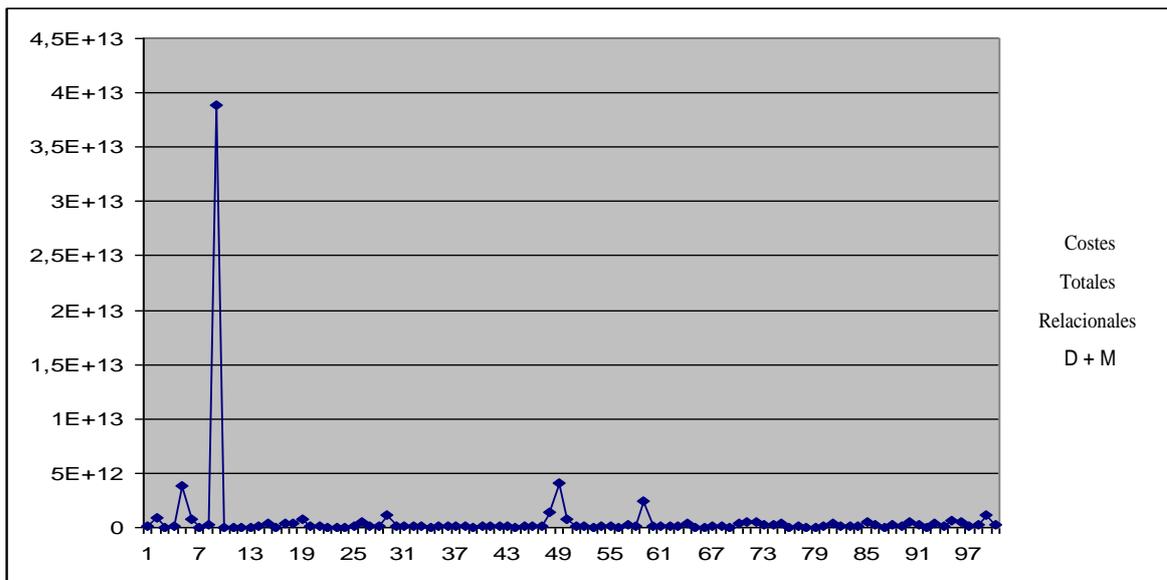


Figura 7.25: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 4.

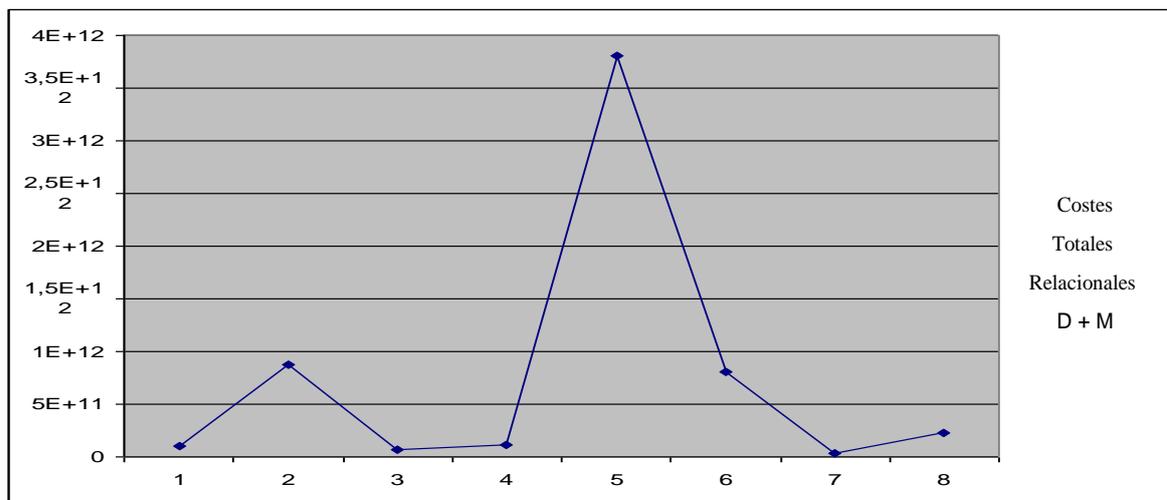


Figura 7.26: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 1 hasta la 8, ensayo 4.

En la figura 7.27, se representa mejor la evolución de los costes totales relacionales donde observamos una considerable explotación después de intervalos de exploración. Al igual que en los ensayos anteriores, se observan picos de pérdida de orientación.

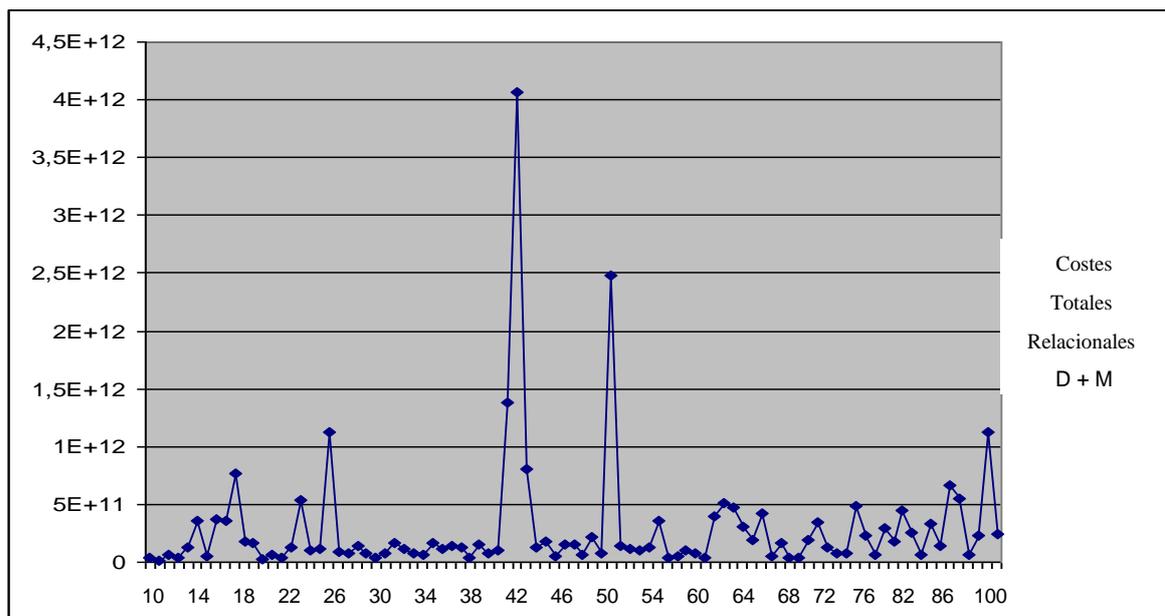


Figura 7.27: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 10 hasta la 100, ensayo 4.

La solución de mínimo coste total relacional para este ensayo es: 32565274880 unidades y está en la generación 79.

**Ensayo 5** (figuras 7.28, 7.29 y 7.30):

- Probabilidad de cruce 50%.
- Probabilidad de mutación de 50%.

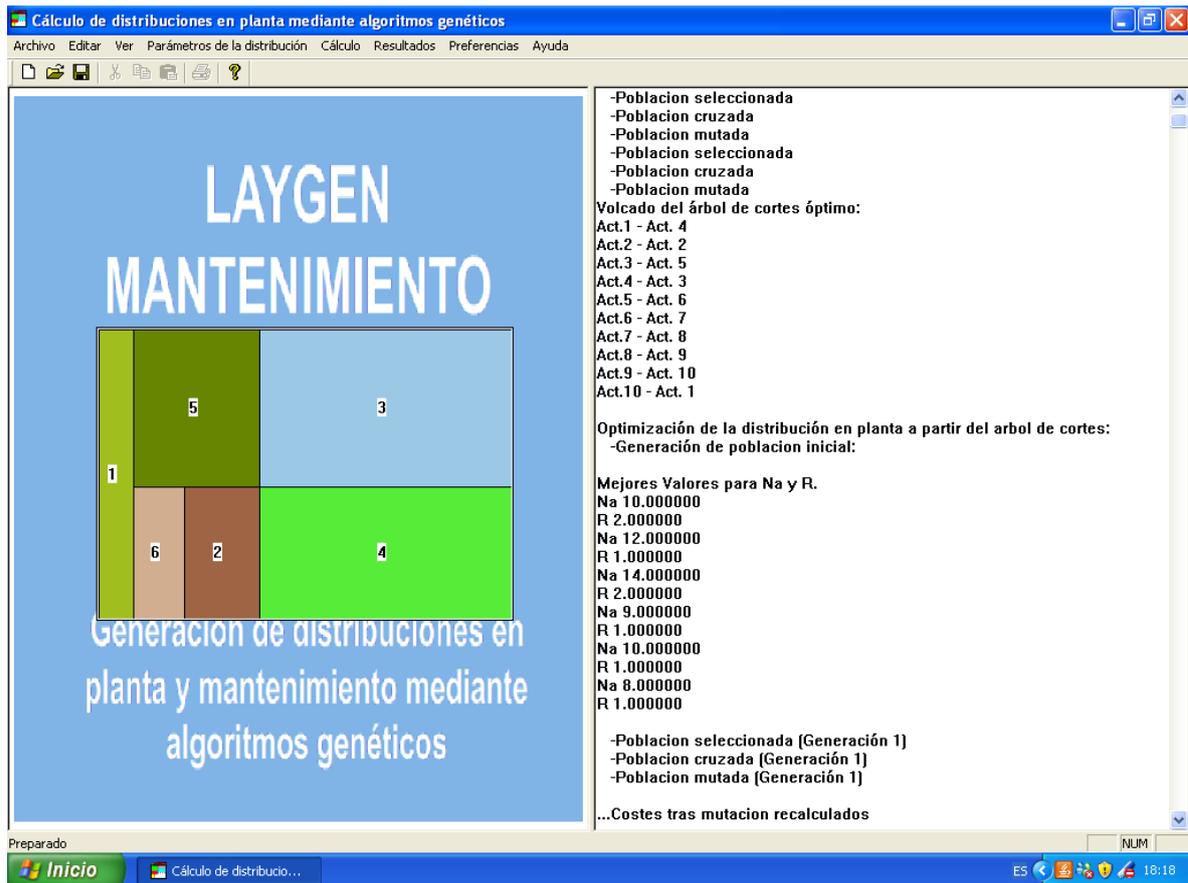


Figura 7.28: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 5.

Como en los casos anteriores, se grafica la distribución de menor coste total relacional y demás resultados relacionados al mantenimiento y distribución. Se puede visualizar que las actividades 1 y 5 forman un grupo de actuación (capítulo 6), con un valor *nai* igual a 10.

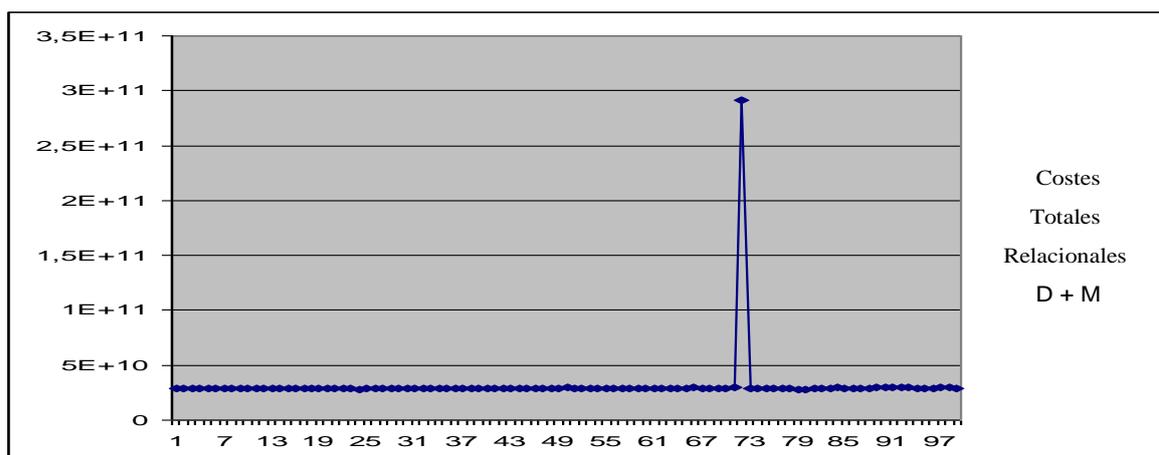


Figura 7.29: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 5.

Volvemos a subdividir el diagrama para una mejor evaluación (figuras 7.30 y 7.31). Podemos observar, que los valores están comprendidos entre  $28 \cdot 10^9$  y  $29 \cdot 10^9$ , los que nos hace pensar que para este caso y con estos valores, el algoritmo queda atrapado en un óptimo local. Como se ha observado en el ensayo 2, la aplicación de los operadores con estos valores, no permite una buena exploración en etapas iniciales, lo que da origen a que el algoritmo pueda comportarse esta forma.

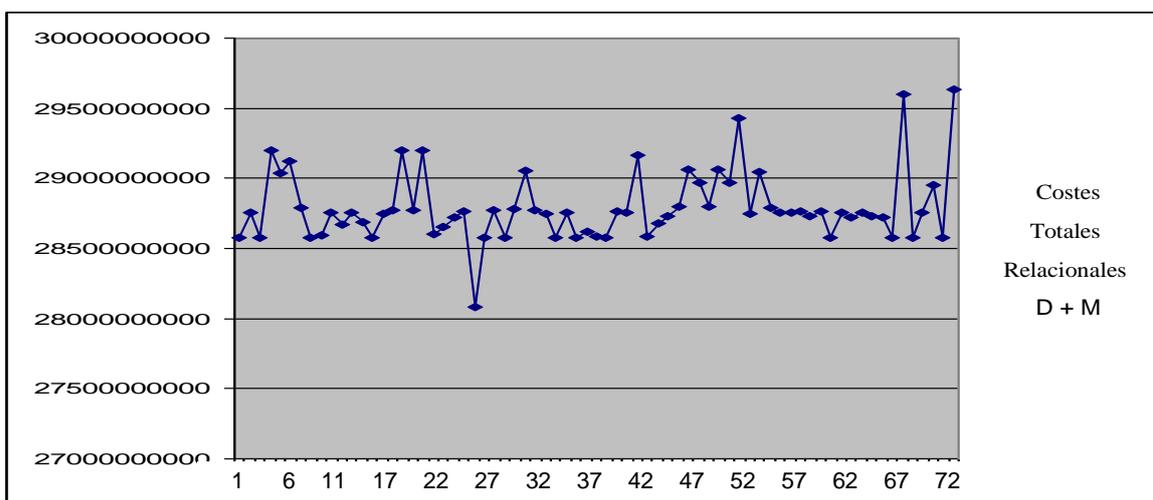


Figura 7.30: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 1 hasta la 72, ensayo 5.

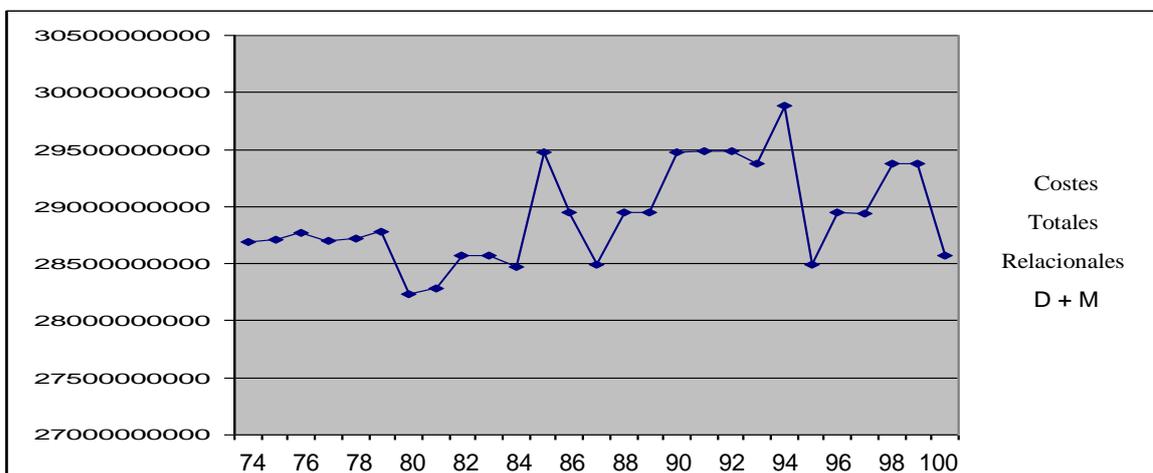


Figura 7.31: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 74 hasta la 100, ensayo 5.

El coste mínimo total relacional de planta es: 28079281905 unidades y está en la generación 25. Este es mejor que el anterior, pero peor que los restantes anteriores.

**Ensayo 6** (figuras 7.32, 7.33 y 7.34):

- Probabilidad de cruce 95%.
- Probabilidad de mutación de 5%.

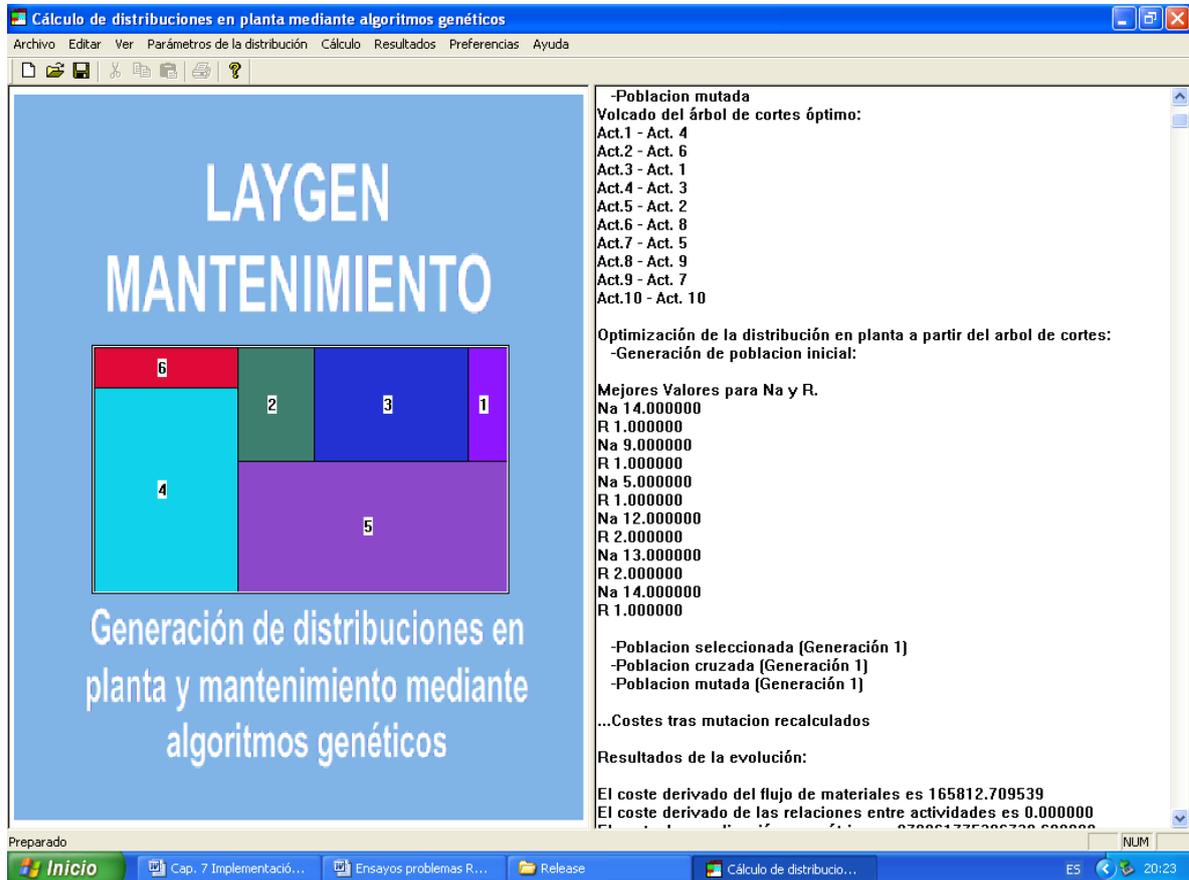


Figura 7.32: Distribución del mínimo coste total relacional del ensayo 6.

Evolución del coste total relacional de la distribución y del mantenimiento (figura 7.33). Igualmente se observa cierta similitud de convergencia con los ensayos anteriores con iguales parámetros.

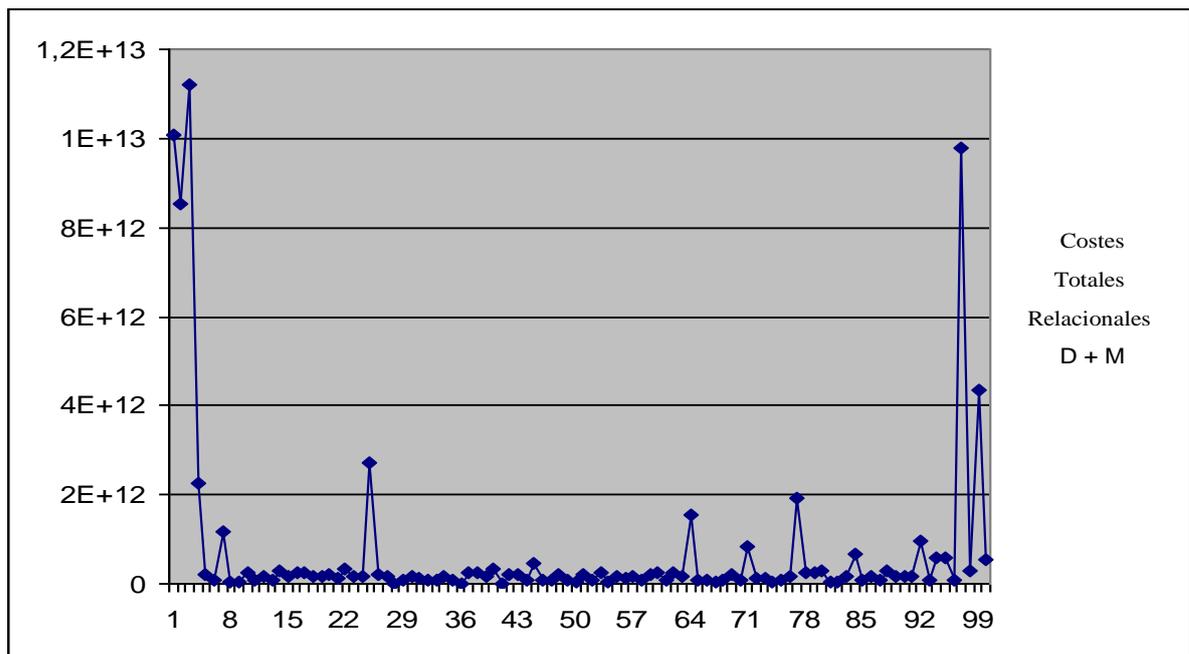


Figura 7.33: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 6.

Volvemos a subdividir el grafico de resultados de coste total de la generación 2 a la 96 (figura 7.34)

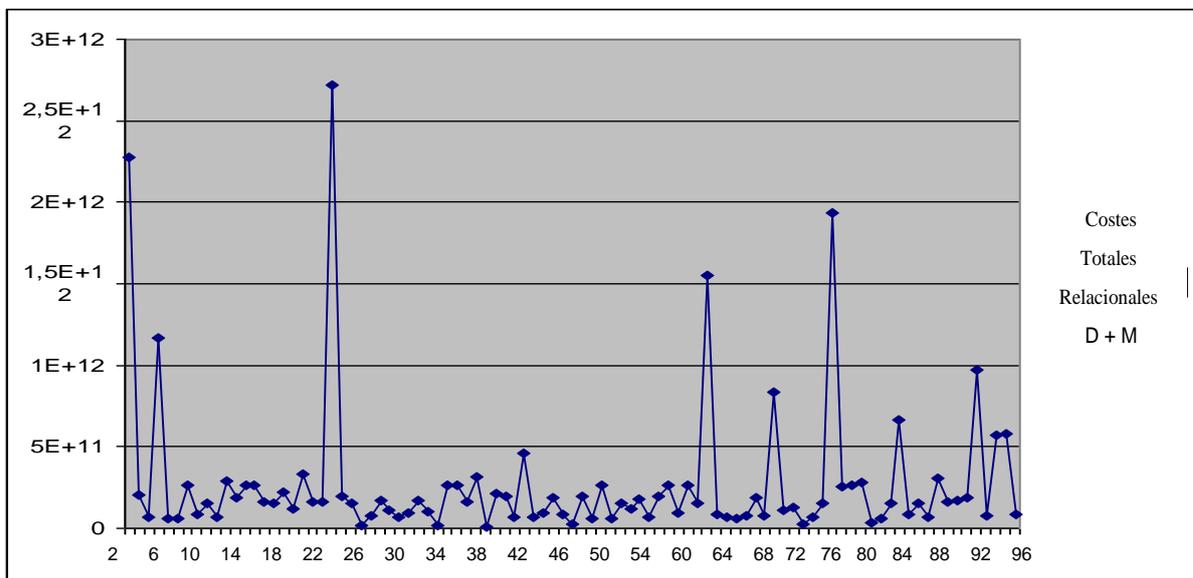


Figura 7.34: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 4 hasta la 96, ensayo 6.

En la figura 7.34, se observa que el proceso de búsqueda es diversificado. Nótese la alta variabilidad en los puntos cerca de los mínimos, como ha ocurrido en el ensayo 3. También se observan gran cantidad de puntos que se alejan de los mínimos, pero convergen nuevamente a las mejores soluciones.

La solución de mínimo coste total relacional para este número de evoluciones es: 15041765961 unidades y está en la generación 29. Podemos apreciar que es el menor para los tres últimos de 100 evoluciones, pero mayor que las tres primeras. Se pueden lograr buenos resultados con pocas generaciones para este problema específico, como se ha observado en el ensayo 3. Hay que aclarar, que esta diferencia con respecto al ensayo 3, es debida a la forma como se genera la población inicial y a la forma de aplicación de los operadores monopunto empleados (ver capítulo 6). Es necesario en un trabajo futuro sustituir los operadores por unos más elaborados (ver apartado 7.4).

Para 100 generaciones y 100 individuos:

**Ensayo 7** (figura 7.35 y 7.36):

- Probabilidad de cruce 20%.
- Probabilidad de mutación de 100%.



Figura 7.35: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 7.

En la figura 7.35, también podemos observar el grupo constituido por la actividad 1, 4 y 5 que poseen  $na(i)$  igual a 8.

En este caso (figura 7.36), como hemos aumentado el número de individuos, la variabilidad es mayor que en el ensayo representado en la figura 7.25, bajo las mismas características, pero con el número de individuos menor. Como se ha comentado en el capítulo 4, un mayor número de individuos implica mayor material para evolucionar. Esto representa una mayor dispersión u oscilación en la explotación y exploración del espacio de búsqueda, como ha sido comentado anteriormente, evitando los óptimos locales posibles en los ensayos previos. Se han considerado las escalas en el análisis.

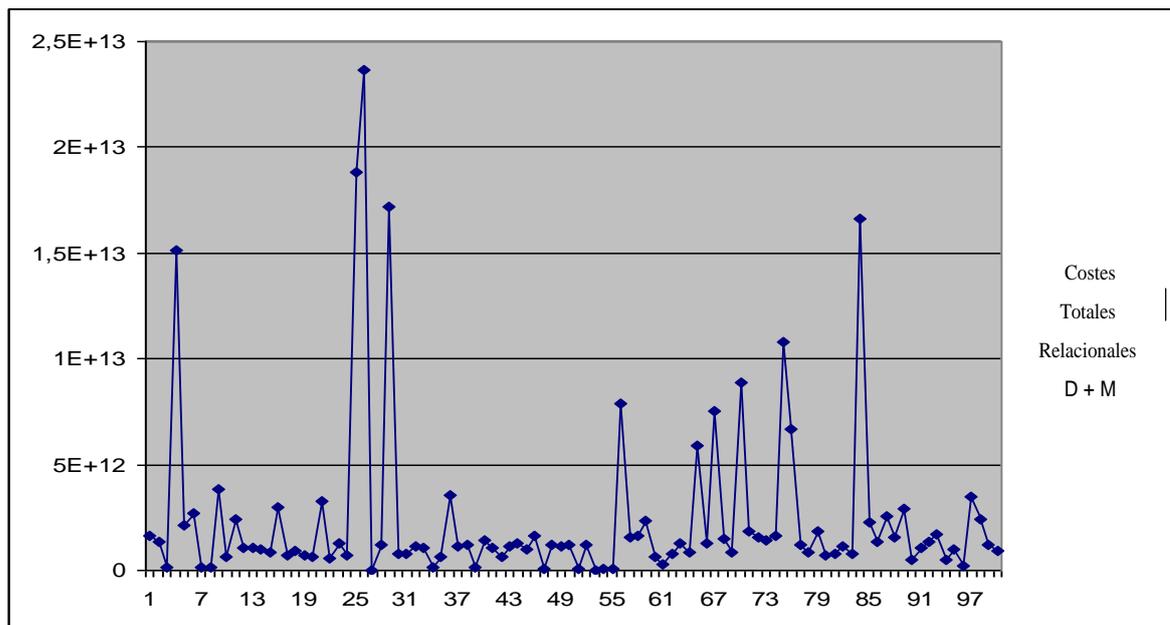


Figura 7.36: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 7.

La solución de mínimo coste total relacional para este ensayo es: 22539962505 unidades y está en la generación 27. Sólo es mejor que los ensayos número 4 y 5.

**Ensayo 8** (figuras 7.37, 7.38, 7.39 y 7.40):

- Probabilidad de cruce 50%.
- Probabilidad de mutación de 50%.

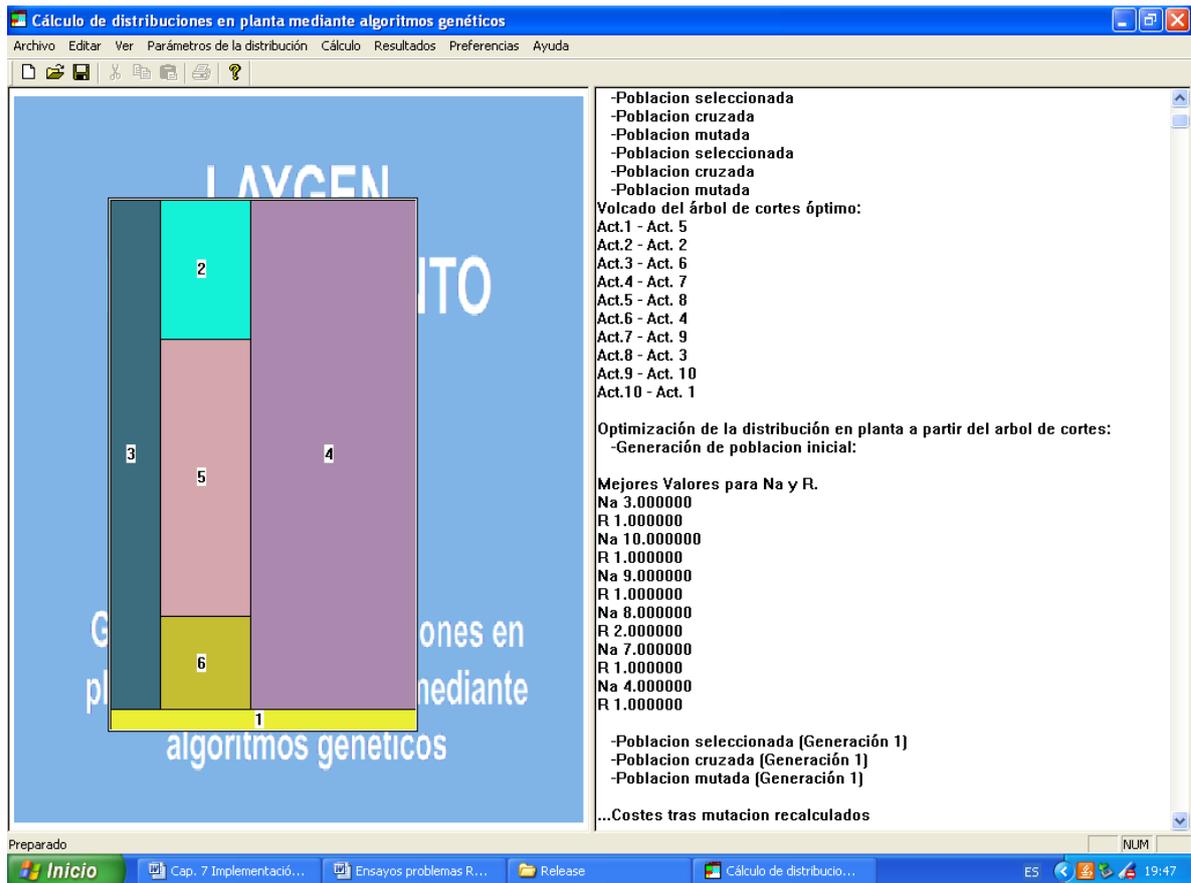


Figura 7.37: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 8.

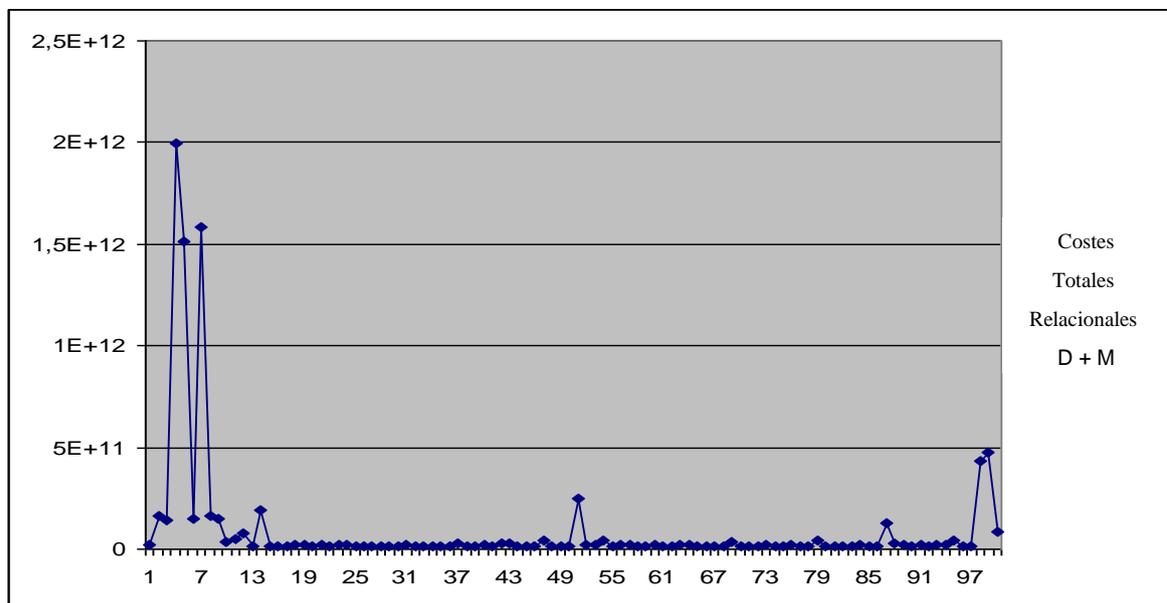


Figura 7.38: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 8.

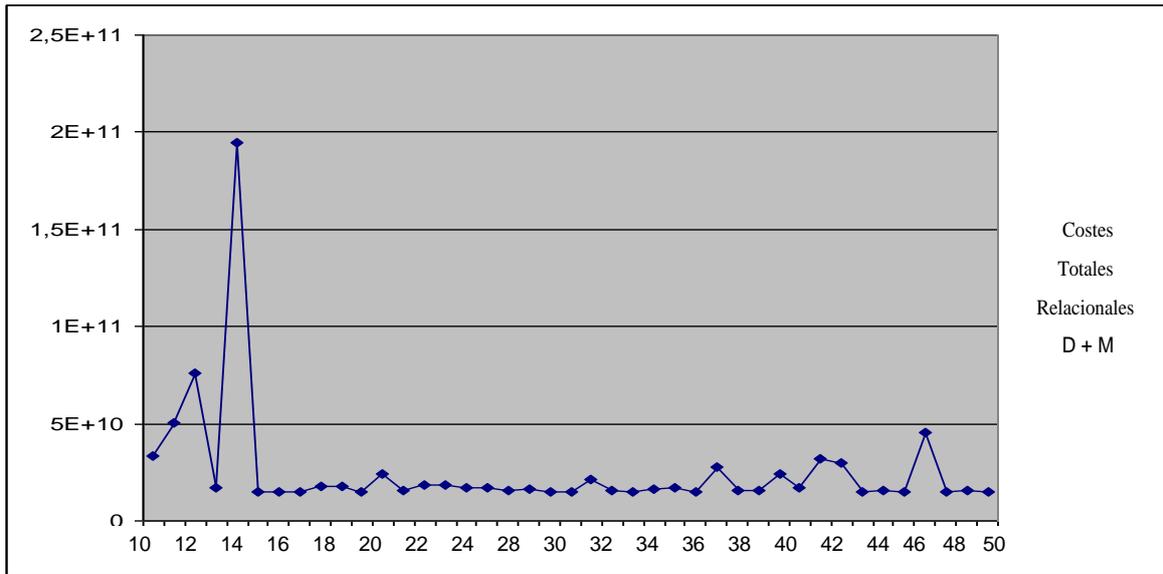


Figura 7.39: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 10 hasta la 50, ensayo 8.

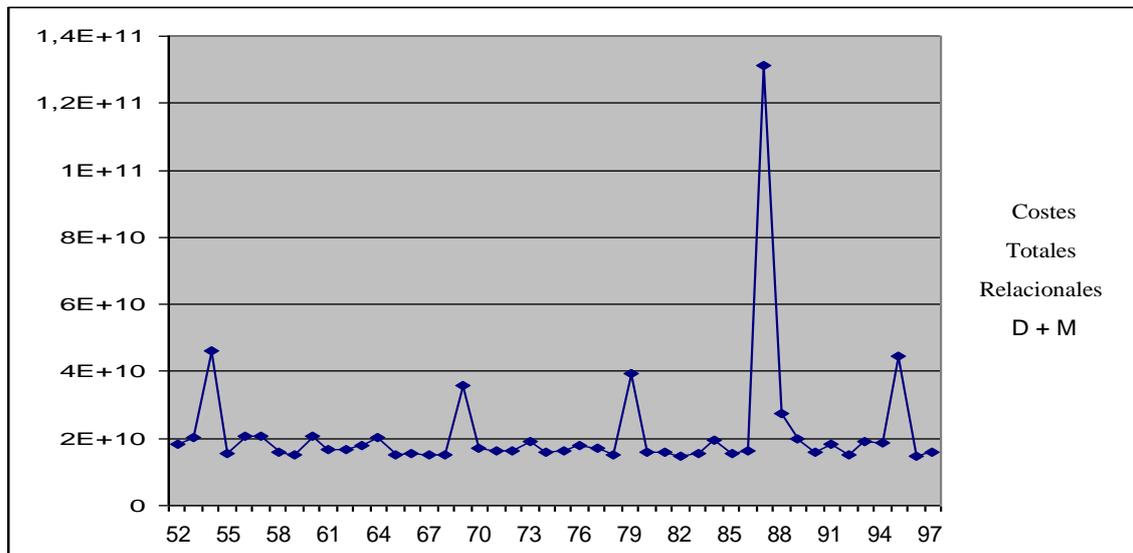


Figura 7.40: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 52 hasta la 97, ensayo 8.

En este caso, a diferencia del anterior (ensayo 7), se observa poca variabilidad en los valores mínimos de los costes totales. Pero hay una mejoría con respecto a los

ensayos 2 y 5, en cuanto a la exploración inicial. La explotación es intensiva pero en un óptimo local (figura 7.39 y 7.40).

La mejor solución encontrada para este ensayo es: 14902664550 unidades y se localiza en la generación 96.

**Ensayo 9** (figuras 7.41, 7.42 y 7.43):

- Probabilidad de cruce 95 %.
- Probabilidad de mutación de 5 %.

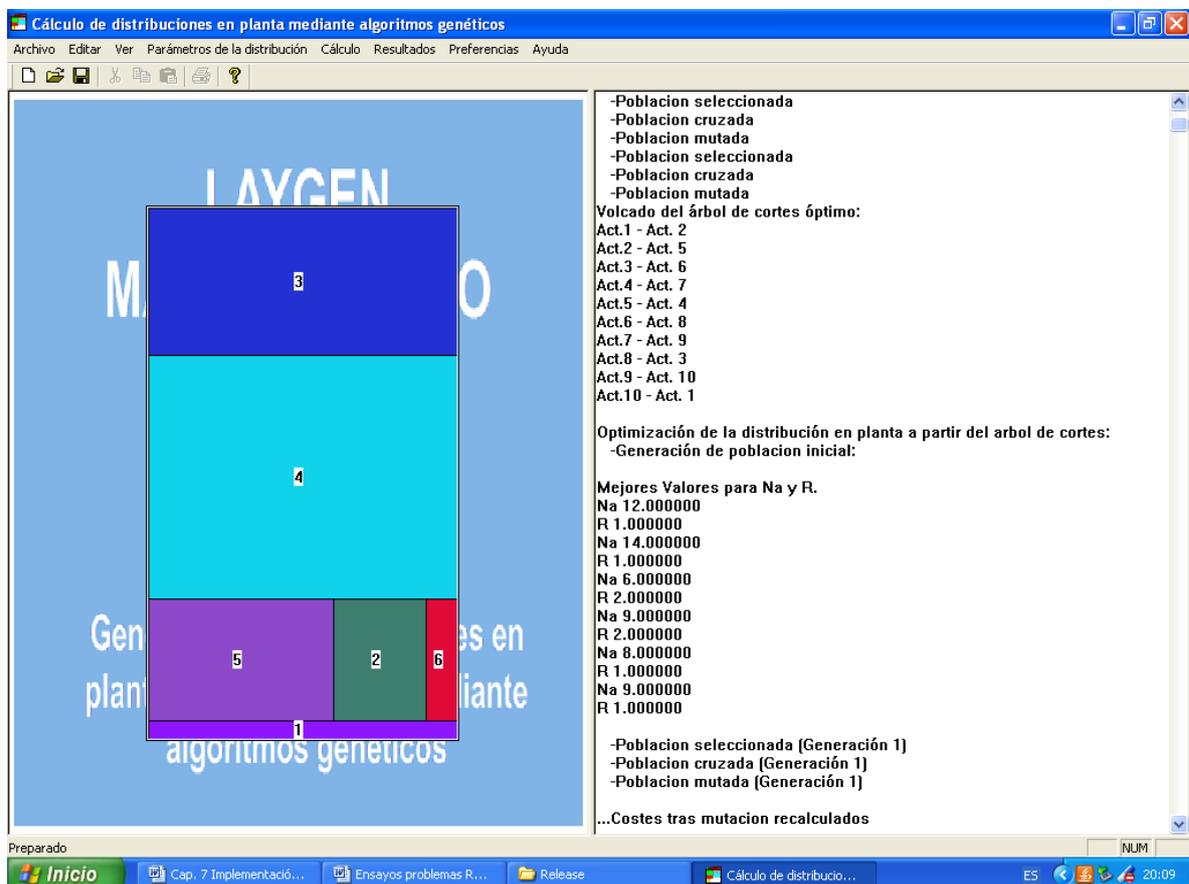


Figura 7.41: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 9.

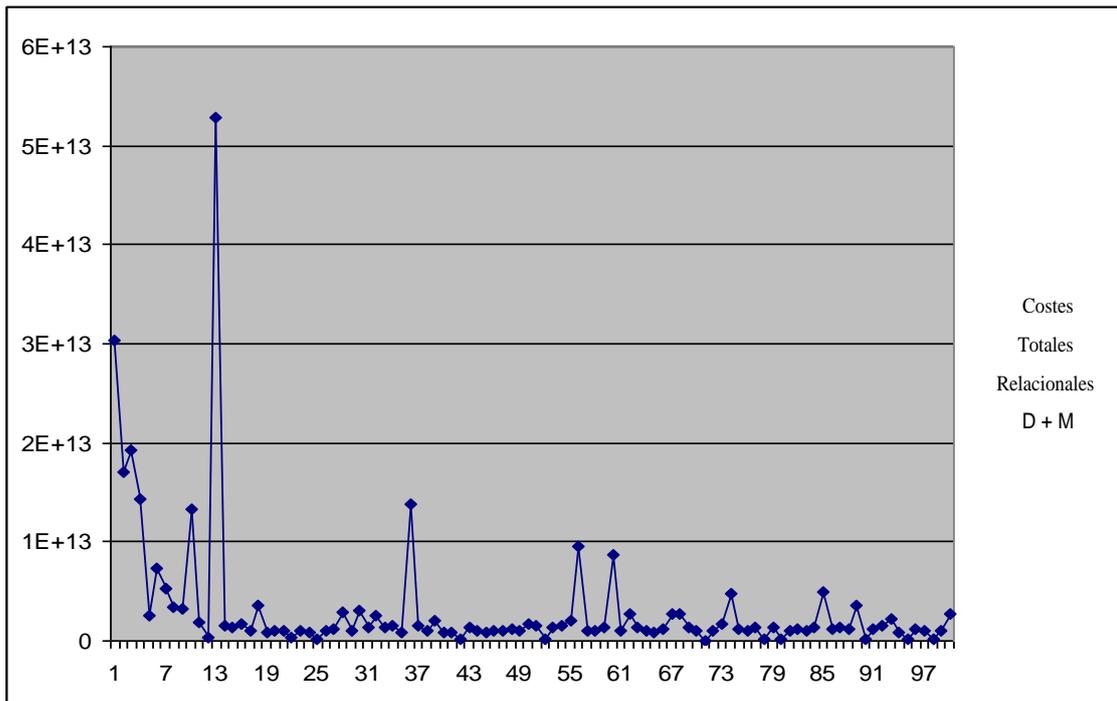


Figura 7.42: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 9.

En la figura 7.42, se observa una rápida convergencia del modelo. Pero podemos observar también en el subdiagrama de la figura 7.43, que hay una mayor oscilación que en el caso anterior. Se observa una mejor exploración, que en los ensayos bajo los mismos valores paramétricos (ensayos 3 y 6).

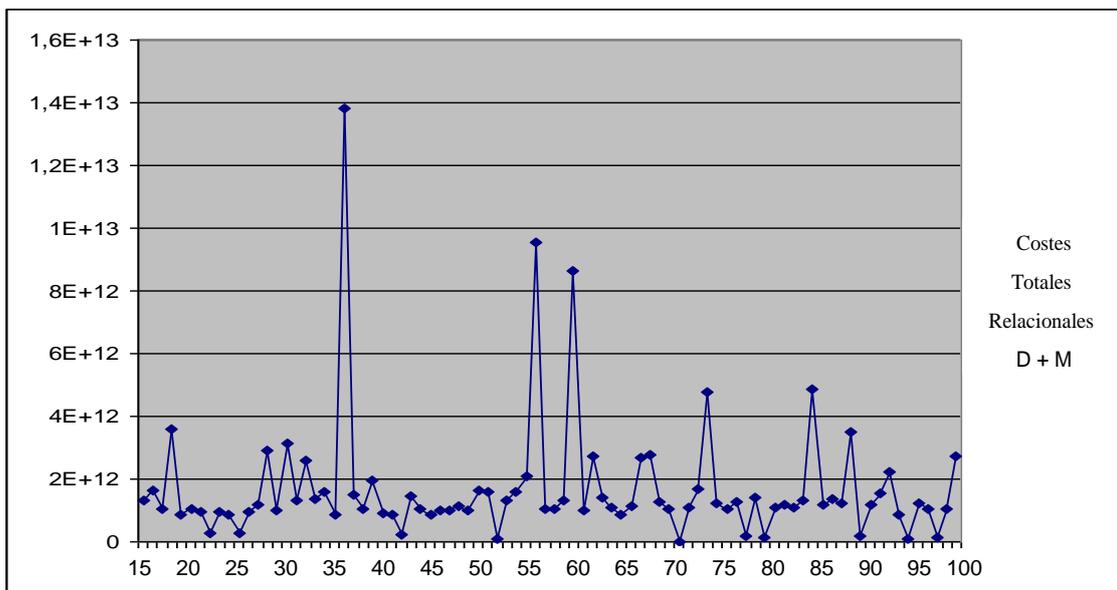


Figura 7.43: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 15 hasta la 100, ensayo 9.

La solución de menor coste total relacional para este número de evoluciones es: 13698027089 y está en la generación 70, y es la menor para esta serie de ensayos con 100 evoluciones.

Dada la gran longitud del cromosoma, la asignación aleatoria de las variables y el tipo de operadores empleados (ver capítulo 6), se obtiene una diferencia en los resultados aún empleando valores similares en los parámetros genéticos. Lo que si observamos, es la similitud en el comportamiento hacia la convergencia en función de estos parámetros.

### **7.2.2.- Influencia del número de actividades en la búsqueda de las soluciones.**

Como se ha comentado en el apartado 4.20, el número de actividades empleado en planta puede influir en la convergencia del algoritmo. Esto se debe a la posible diversidad, fruto de una mayor información y a los intervalos del espacio de búsqueda. Por lo tanto, se realiza un experimento donde se varía el número de actividades, utilizando los parámetros utilizados en el ejemplo anterior. El número de actividades en la distribución, influye en el tamaño del cromosoma, es decir, a más actividades mayor longitud cromosómica. Los incrementos se realizan manteniendo homogeneidad con los ensayos previos, para mejor valoración de los resultados.

Li Shen- Tun y colaboradores (Li Shen- Tun et al., 2002), evaluaron la convergencia del algoritmo, en función del número de elementos a recibir mantenimiento (tanques de almacenamiento). A su vez, realizaron una manipulación de los parámetros para un estudio más completo. Igualmente, Lazo y Pacheco (1999), variaron el número de máquinas para mantenimiento y la aplicación de los operadores de cruce y mutación a lo largo del desarrollo.

Como se ha comentado en el apartado 4.20, Muñoz (1997), realizó un experimento paramétrico variando el número de variables del problema, es decir, estrategias de mantenimiento. Esto le permitió observar cómo en función del tamaño del cromosoma, se contribuía a una mayor diversidad, lo que influía considerablemente en la aplicación de los operadores. Es importante decir, como opinión de este trabajo, que la longitud del cromosoma puede aumentar el espacio de soluciones y la diversidad, no obstante no necesariamente implica mejores resultados.

### 7.2.2.1.- Etapa experimental 2.

De igual forma que en el apartado 7.2.1.1, pero esta vez, fijando el número de individuos en 50 y generaciones en 50, se varían los valores de los operadores para los siguientes números de actividades.

Para cinco actividades, más el almacén de productos y mantenimiento (ver figuras 7.11 y 7.12), utilizamos los mismos valores del ensayo 1.

Para nueve actividades más almacén (figuras 7.4, 7.8, 7.44 y 7.45).

	MTBF	Wa	MTTR	Cmm	Cmc	dm	Ciu	factor amb	ancho	largo
Actividad 1	2000 horas	200 unid.	45 horas	4 unid.	35 unid.	2 horas.	250 unid.	0	1	3
Actividad 2	5300 horas	350 unid.	30 horas.	8 unid.	90 unid.	5 horas	360 unid.	0	2	3
Actividad 3	4000 horas	100 unid.	15 horas	6 unid	70 unid	2 horas.	300 unid.	0	3	4
Actividad 4	1000 horas	700 unid.	10 horas	2 und.	40 unid	1 hora	500 unid.	0	4	5
Actividad 5	4500 horas	850 unid.	20 horas.	3 unid.	60 unid	2 horas.	400 unid.	0	3	4
Actividad 6	2000 horas	200 unid.	45 horas	4 unid.	35 unid.	2 horas.	250 unid.	0	1	3
Actividad 7	5300 horas	350 unid.	30 horas.	8 unid.	90 unid.	5 horas	360 unid.	0	2	3
Actividad 8	4000 horas	100 unid.	15 horas	6 unid	70 unid	2 horas.	300 unid.	0	3	4
Actividad 9	1000 horas	750 unid.	10 horas	2 und.	40 unid	1 hora	500 unid.	0	4	5
Activa 10	*	*	*	*	*	*	*	0	3	4

Figura 7.44. Valores de mantenimiento por actividad etapa experimental 2 ensayos 4, 5 y 6 (nueve actividades + almacén).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Actividad 1	*	1200				300	2000			
Actividad 2		*	2000	2000	5000					
Actividad 3	4000	2000	*					400		
Actividad 4			5000	*		1000	500			
Actividad 5	1000	4000			*					
Actividad 6					4000	*				
Actividad 7							*			
Actividad 8	3000							*		
Actividad 9			6000		100			2000	*	3000
Activa 10										*

Figura 7.45. Valores de manutención etapa experimental 2 ensayos 4, 5 y 6 (nueve actividades + almacén).

**Ensayo 10** (figuras 7.46, 7.47, 7.48 y 7.49):

- Probabilidad de cruce 20%.
- Probabilidad de mutación de 100%.

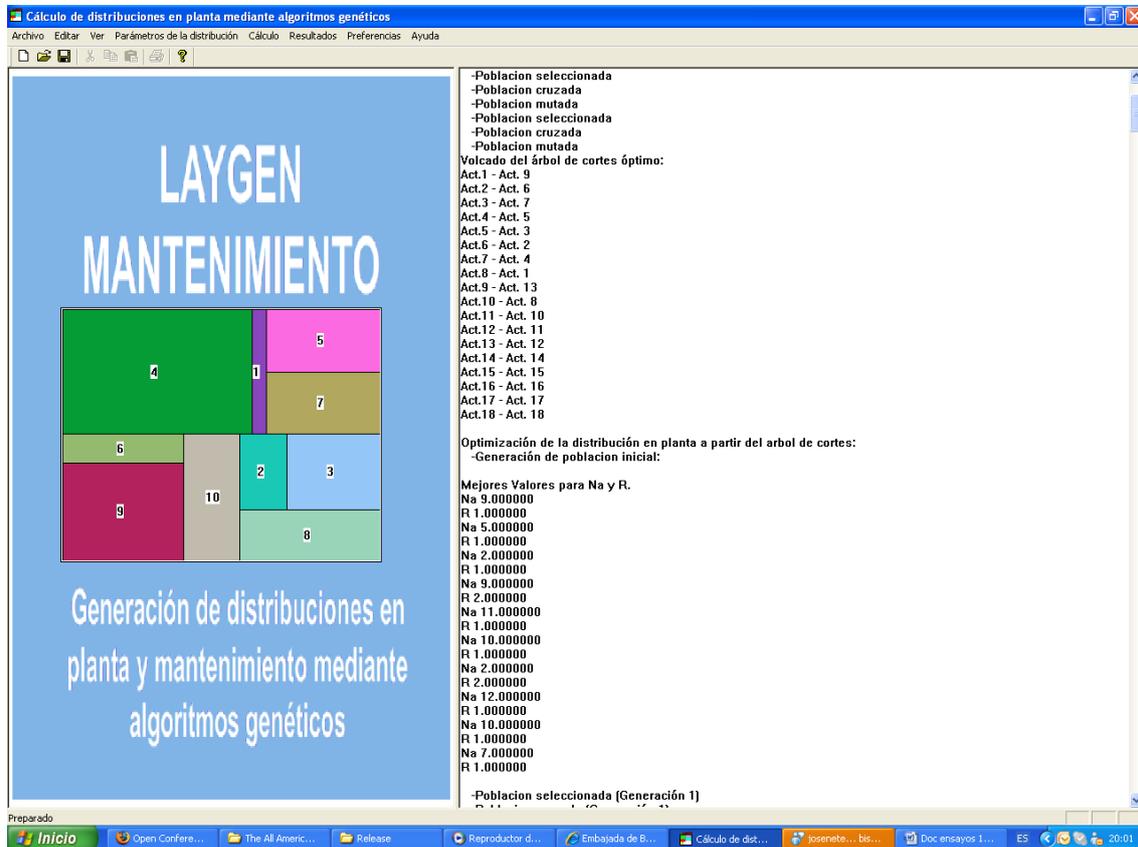


Figura 7.46: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 10.

En la figura 7.46, se observa una distribución con un número mayor de actividades. Al igual que en los estudios previos, se observan los  $na(i)$  y  $R(i)$  para este número mayor de actividades. Las actividades 1 y 3 forman un grupo con  $nai = 9$ , las actividades 3 y 7, un grupo  $nai = 2$  y las actividades 6 y 9 con  $nai = 10$ .

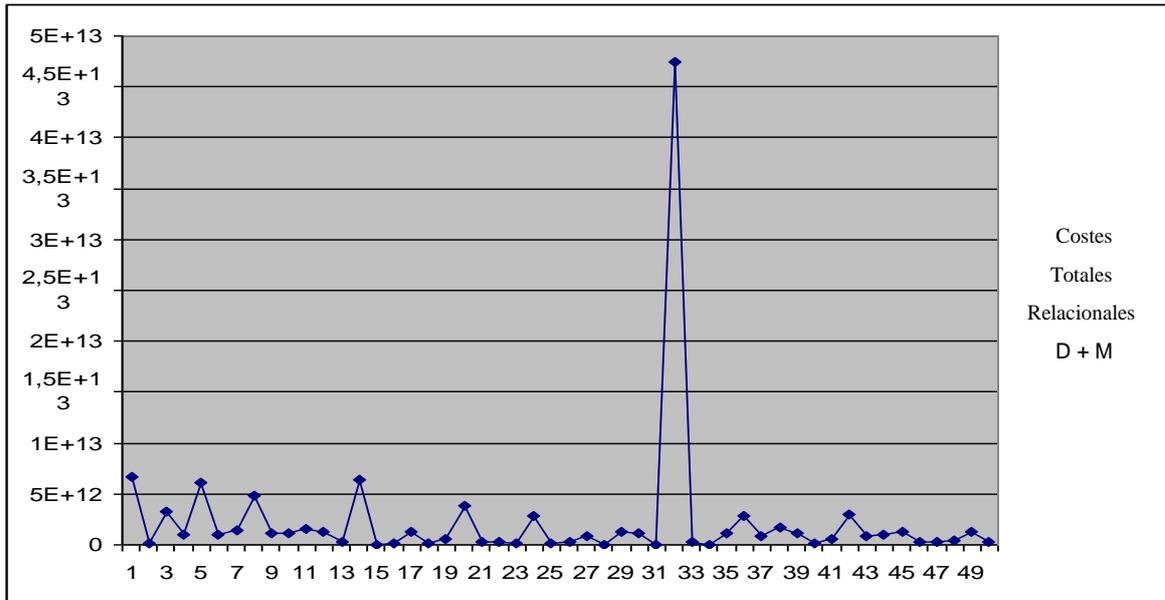


Figura 7.47: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 10.

En la figura 7.47, se nota una ligera convergencia al principio originada por una paulatina exploración. Hay una pérdida de orientación en la generación 32, que vuelve otra vez a los valores iniciales.

Observando los subdiagramas las figuras 7.48 y 7.49, queda más evidente lo comentado anteriormente. Comparando con el ensayo 1, que tiene los mismos operadores y número de individuos, se observa que este último ensayo tiene una dispersión mayor (figura 7.69).

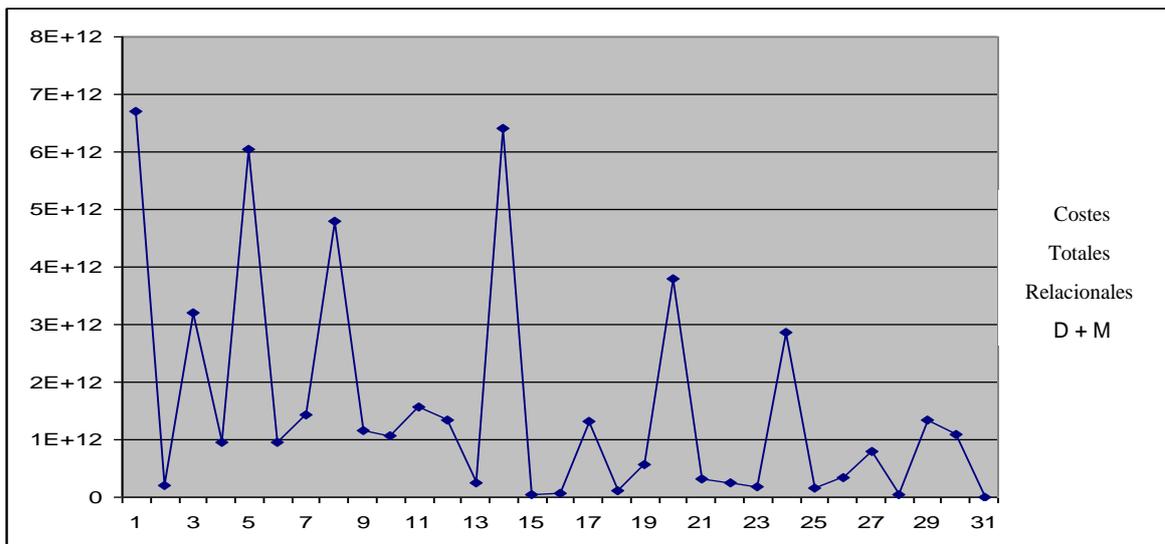


Figura 7.48: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 1 hasta la 31, ensayo 10.

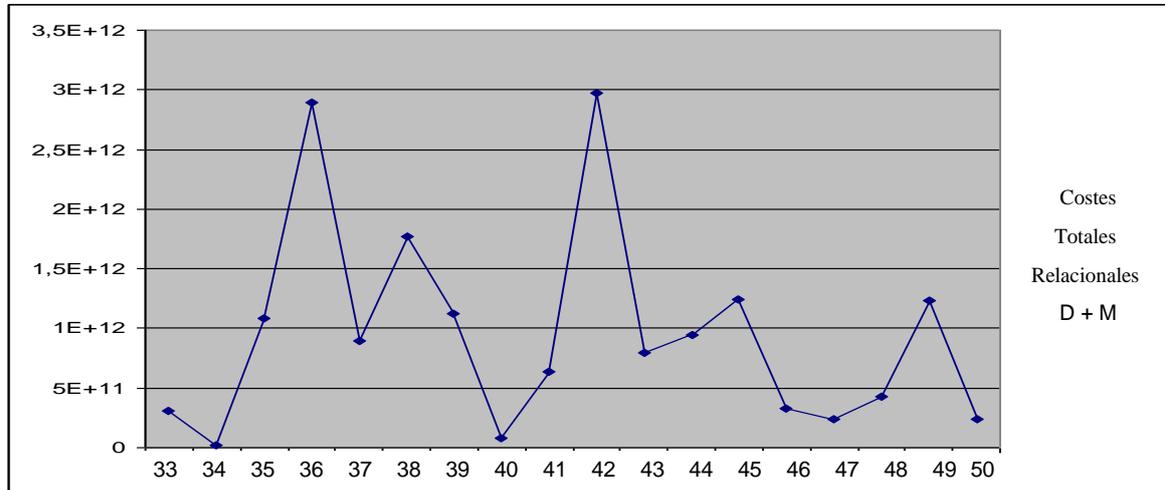


Figura 7.49: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 33 hasta la 50, ensayo 10.

La mejor solución para este ensayo es: 15990382801 unidades y está en la generación 34. Se observa que este valor es mayor que el ensayo con 6 actividades, con los mismos parámetros. Esto se debe a que hay más actividades, lo que genera mayores costes de distribución, penalización y mantenimiento.

**Ensayo 11** (figuras 7.50 y 7.51):

- Probabilidad de cruce 50%.
- Probabilidad de mutación de 50%.

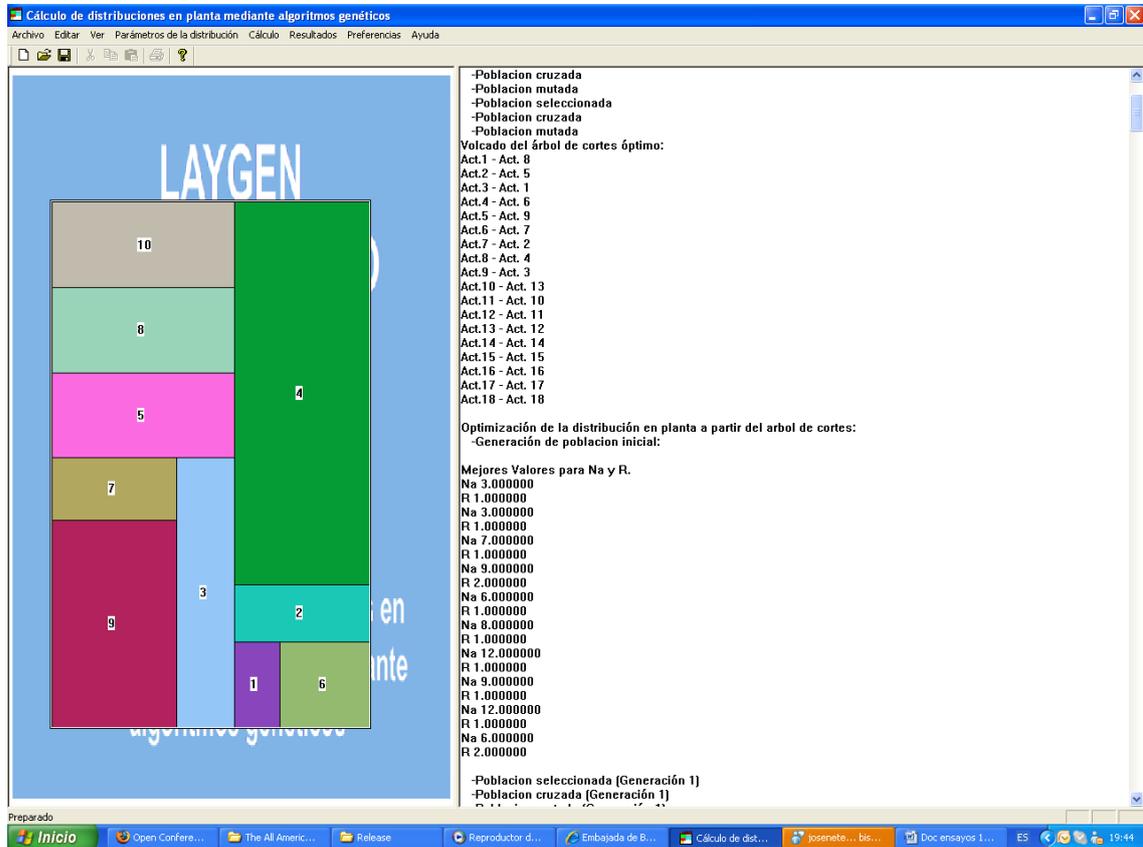


Figura 7.50: Distribución de mínimo coste total relacional, ensayo 11.

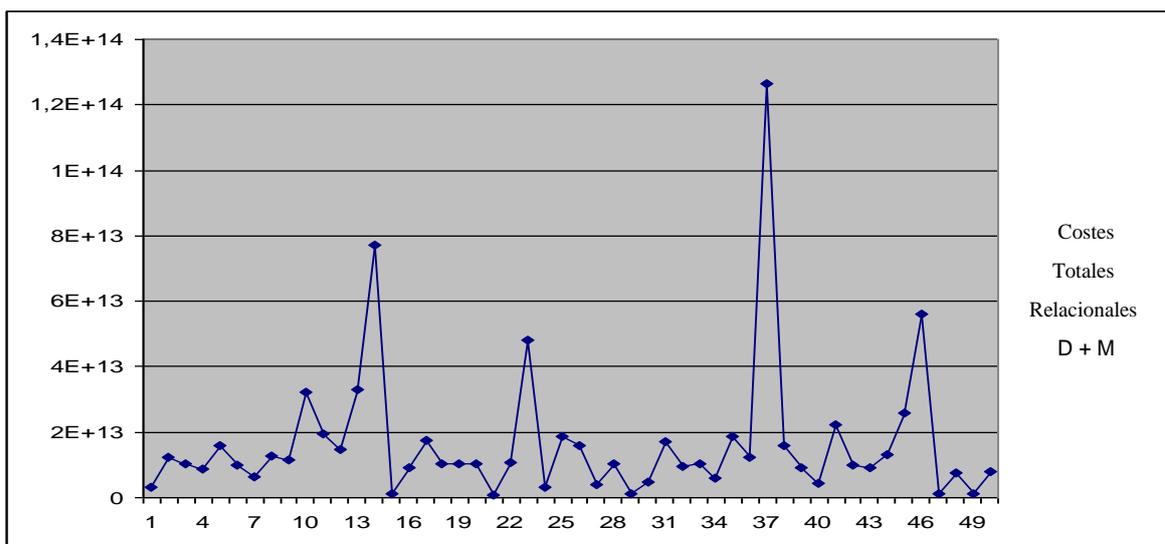


Figura 7.51: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 11.

Se observa en la figura 7.51, un comportamiento similar a los casos anteriores bajo estas características, pero con una mayor dispersión y mejor exploración al principio.

El menor coste total relacional para este ensayo es:  $9.8832E+11$  y se localiza en la generación 21.

**Ensayo 12** (figuras 7.52, 7.53 y 7.54):

- Probabilidad de cruce 0.95 %.
- Probabilidad de mutación de 0.05 %.

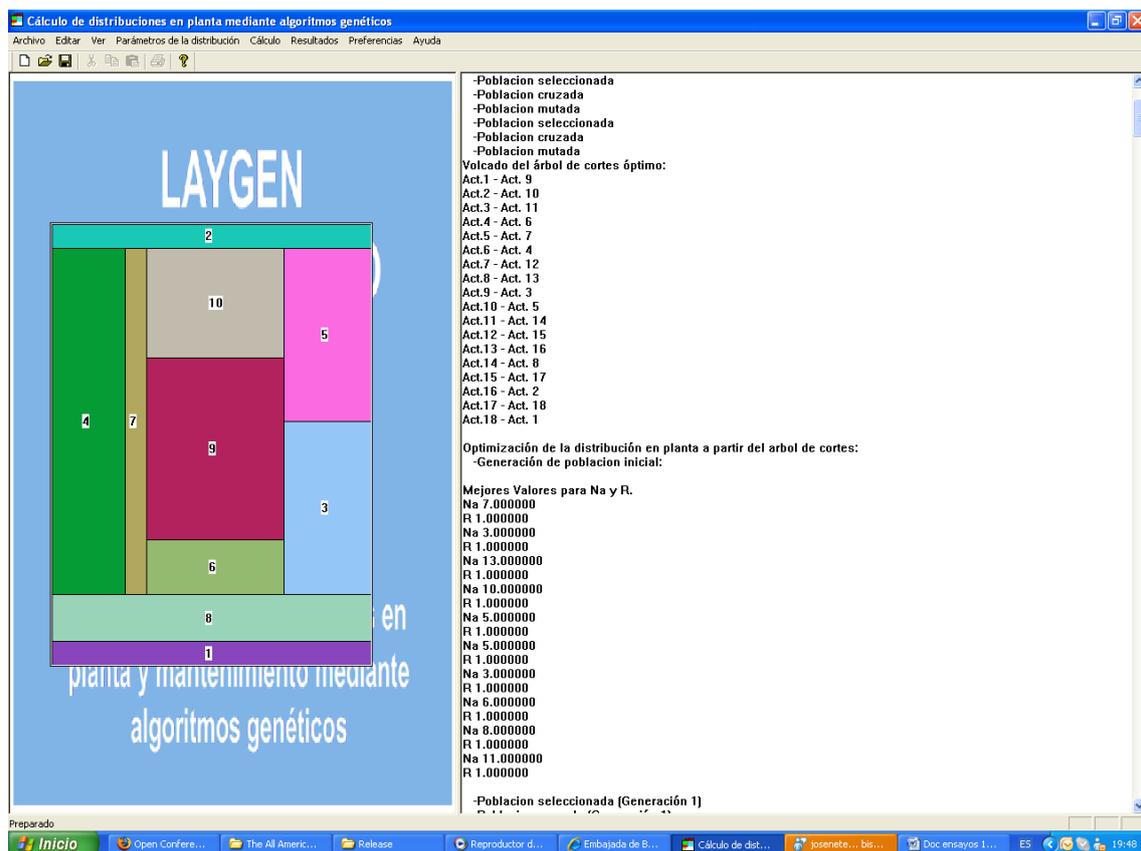


Figura 7.52: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo12.

En la figura 7.53 y 7.54, no se observa un comportamiento similar a los ensayos realizados con los mismos parámetros. En este caso, se puede apreciar una pequeña convergencia al principio, que luego comienza una etapa de exploración. Hay una pérdida de orientación en la generación 45.

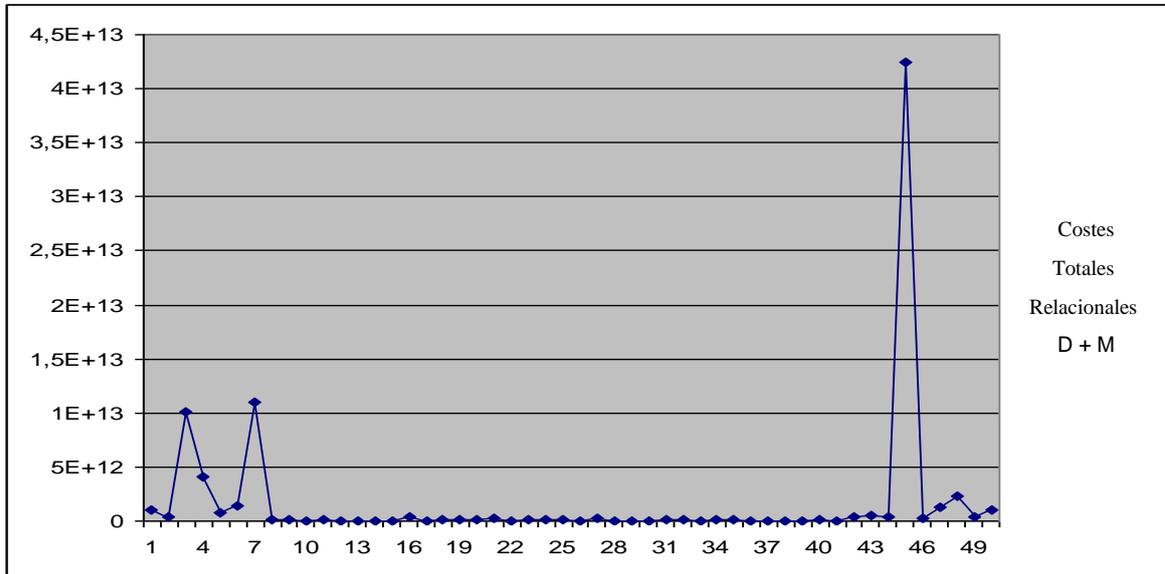


Figura 7.53: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 12.

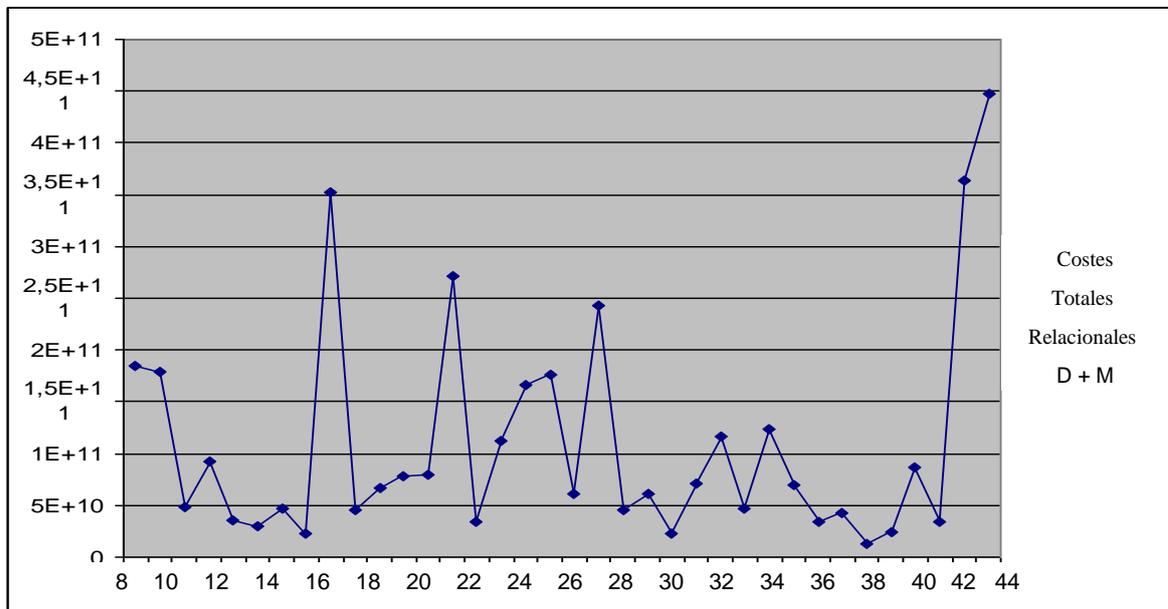


Figura 7.54: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 8 hasta la 43, ensayo 12.

En la figura 7.54 se puede observar un nivel considerable de exploración en las primeras etapas, para luego entrar, a partir de la generación 27, en la explotación y determinación de la generación óptima para este número de evoluciones. Se aprecia más oscilaciones que en el ensayo con los mismos parámetros pero con menos actividades.

El menor coste total relacional para este ensayo es: 12097224724 unidades y se localiza en la generación 38.

Para trece actividades, más el almacén de mantenimiento.(figuras 7.4, 7.8, 7.55 y 7.56).

	MTBF	Wa	MTRR	Cmm	Cmc	dm	Ciu	factor amb	lancho	largo
Actividad 1	2000 horas	200 unid.	45 horas	4 unid.	35 unid.	2 horas.	250 unid.	0	1	3
Actividad 2	5300 horas	350 unid.	30 horas.	8 unid.	90 unid.	5 horas	360 unid.	0	2	3
Actividad 3	4000 horas	100 unid.	15 horas	6 unid	70 unid	2 horas.	300 unid.	0	3	4
Actividad 4	1000 horas	700 unid.	10 horas	2 und.	40 unid	1 hora	500 unid.	0	4	5
Actividad 5	4500 horas	850 unid.	20 horas.	3 unid.	60 unid	2 horas.	400 unid.	0	3	4
Actividad 6	2000 horas	200 unid.	45 horas	4 unid.	35 unid.	2 horas.	250 unid.	0	1	3
Actividad 7	5300 horas	350 unid.	30 horas.	8 unid.	90 unid.	5 horas	360 unid.	0	2	3
Actividad 8	4000 horas	100 unid.	15 horas	6 unid	70 unid	2 horas.	300 unid.	0	3	4
Actividad 9	1000 horas	750 unid.	10 horas	2 und.	40 unid	1 hora	500 unid.	0	4	5
Actividad 10	2000 horas	200 unid.	45 horas	4 unid.	35 unid.	2 horas.	250 unid.	0	1	3
Actividad 11	5300 horas	350 unid.	30 horas.	8 unid.	90 unid.	5 horas	360 unid.	0	2	3
Actividad 12	4000 horas	100 unid.	15 horas	6 unid	70 unid	2 horas.	300 unid.	0	3	4
Actividad 13	1000 horas	700 unid.	10 horas	2 und.	40 unid	1 hora	500 unid.	0	4	5
Actividad 14	*	*	*	*	*	*	*	*	1	2

Figura 7.55. Valores de mantenimiento por actividad, etapa experimental 2 ensayos 13, 14 y 15 (trece actividades + almacén).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Actividad 1	*	1200				300	2000							
Actividad 2		*	2000	2000	5000									600
Actividad 3	4000	2000	*					400		3600		2000		
Actividad 4			5000	*		1000	500							
Actividad 5	1000	4000			*									
Actividad 6					4000	*							5000	
Actividad 7							*							
Actividad 8	3000							*						
Actividad 9			6000		100			2000	*	3000				
Actividad 10										*				700
Actividad 11											*			
Actividad 12	4000											*		
Actividad 13						6000							*	
Actividad 14											500			*

Figura 7.56. Valores de manutención etapa experimental 2 ensayos 13, 14 y 15 (trece actividades + almacén).

**Ensayo 13** (figuras 7.57, 7.58 y 7.59):

- Probabilidad de cruce 20%.
- Probabilidad de mutación de 100%.

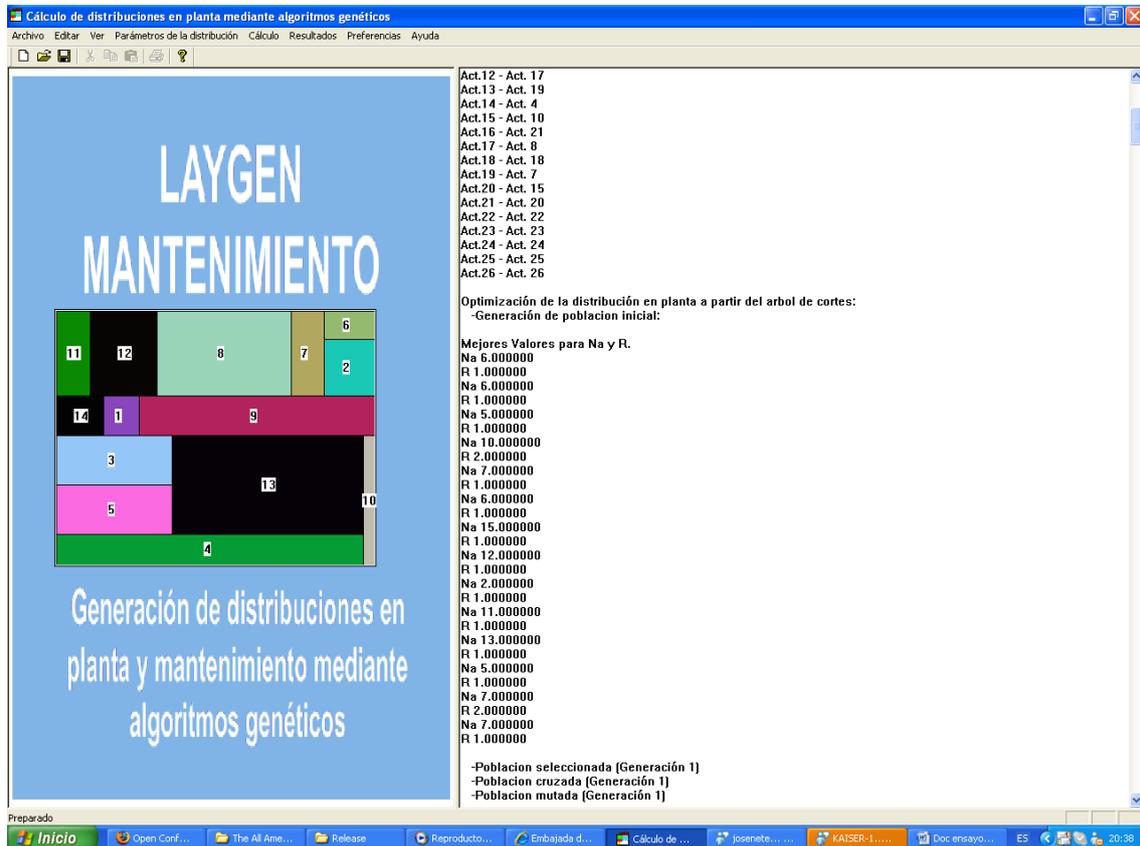


Figura 7.57: Distribución de mínimo coste total relacional, ensayo 13.

En la figura 7.57 se observa la distribución de menor coste total relacional para una planta de catorce actividades, como también, los valores para el número de acciones de mantenimiento y redundancia. En la figura 7.58 se observan los costes totales relacionales para todas las generaciones.

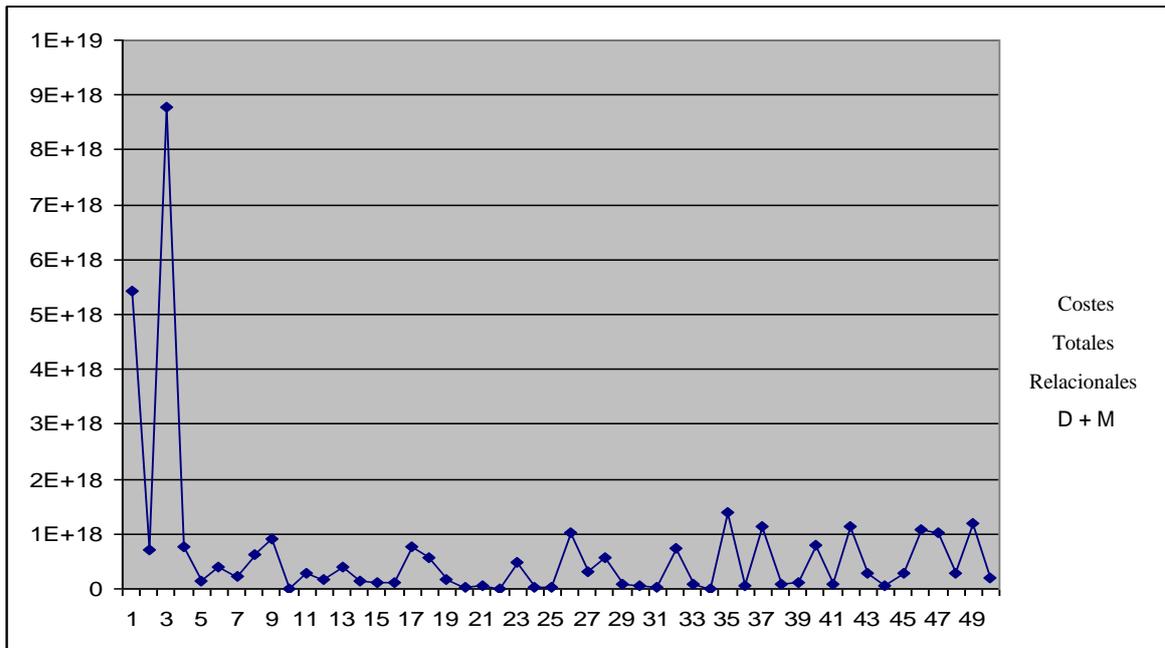


Figura 7.58: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 13.

Para este mayor número de actividades, se observa una alta variabilidad en los resultados para el rango de escala demostrado (figuras 7.58 y 7.59). No obstante, estos resultados, son mucho mayores debido al gran número de actividades, que generan un mayor coste total relacional de planta. Hay que tener presente que la comparación de las oscilaciones con los ensayos anteriores es difícil, debido a que los altos costes de la distribución generan diferentes escalas en la aplicación Excel. Por lo tanto, ya no es fácil realizar un estudio comparativo por actividades por la diferencia de los resultados. Pero si podemos observar el comportamiento del algoritmo bajo estas consideraciones.

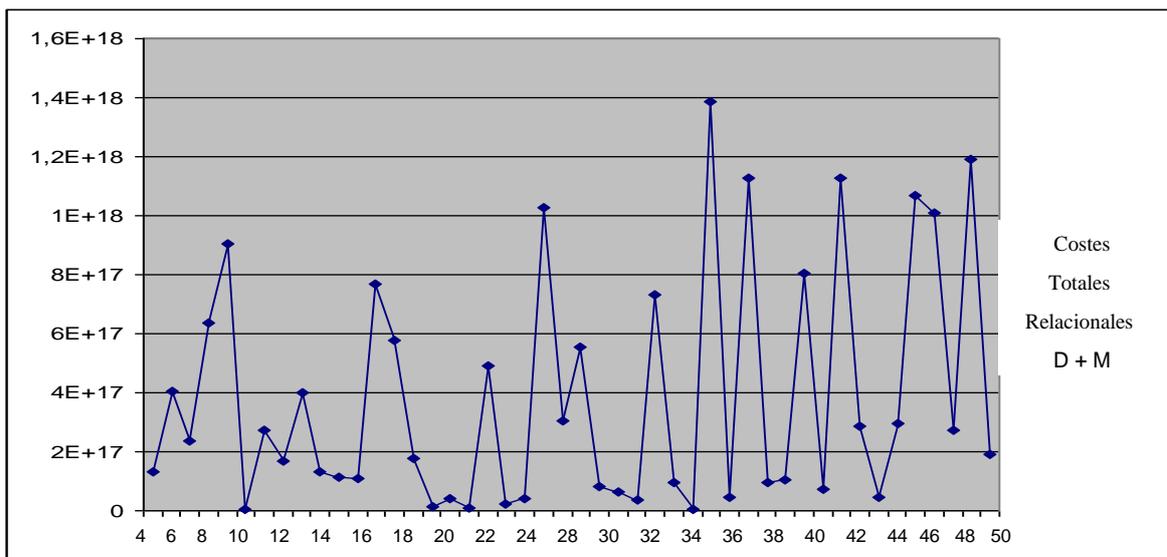


Figura 7.59: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 4 hasta la 50, ensayo 13.

La solución de mínimo coste total para este número de evoluciones es: 4,32946E+15 y se logra en la generación 10. Como se observa, tiene un gran valor debido al alto número de actividades empleadas en este ensayo.

**Ensayo 14** (figuras 7.60, 7.61, 7.62 y 7.63):

- Probabilidad de cruce 50%.
- Probabilidad de mutación de 50%.

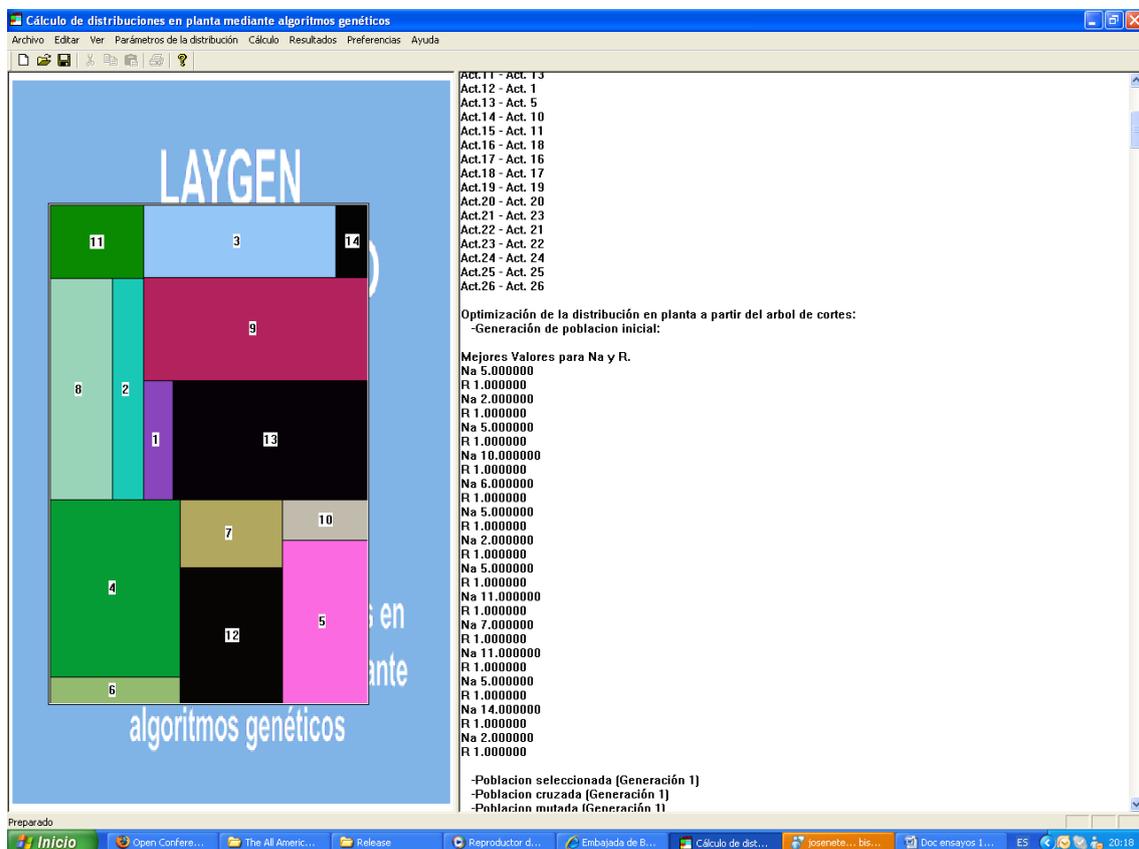


Figura 7.60: Distribución de mínimo coste total relacional, ensayo 14.

Como se observa en la figura 7.60, el programa identifica varios grupos de actuaciones para el mantenimiento. La actividades 1, 7, 9, 10 y 15 tienen un  $na(i) = 5$ , mientras que las actividades 2 y 3 poseen un  $na(i) = 3$  y las actividades 8 y 11 tienen un  $na(i) = 14$ .

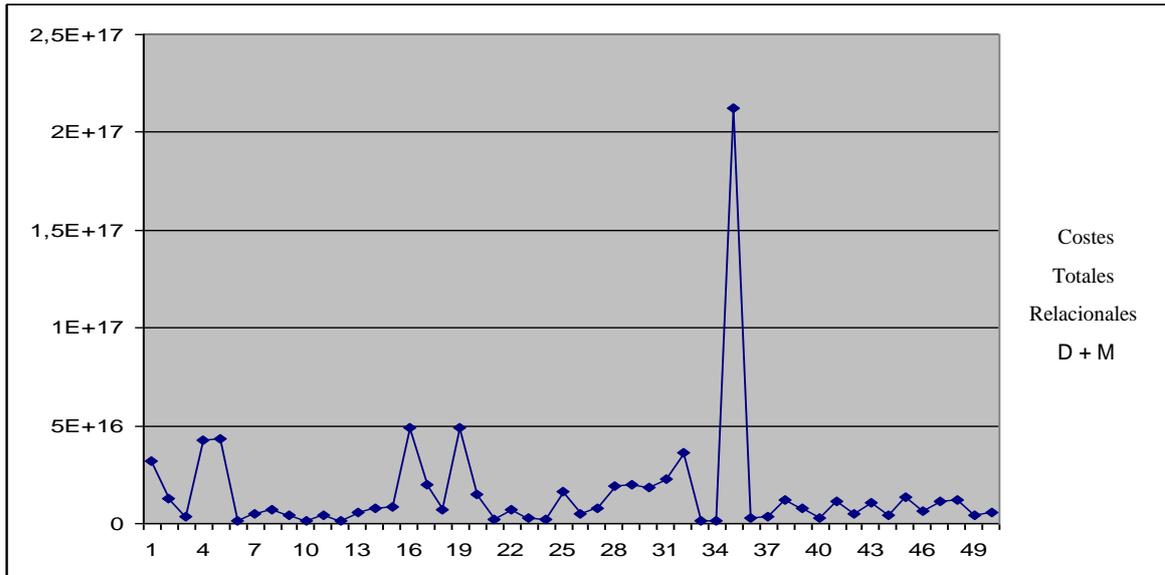


Figura 7.61: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 14.

En la figura 7.61 se observa también elevados costes. Se puede apreciar una pérdida de orientación en la generación 35. Hay dos periodos de explotación desde la generación número 6 a la 15 (figura 7.62) y de la 36 a la 50 (figura 7.63).

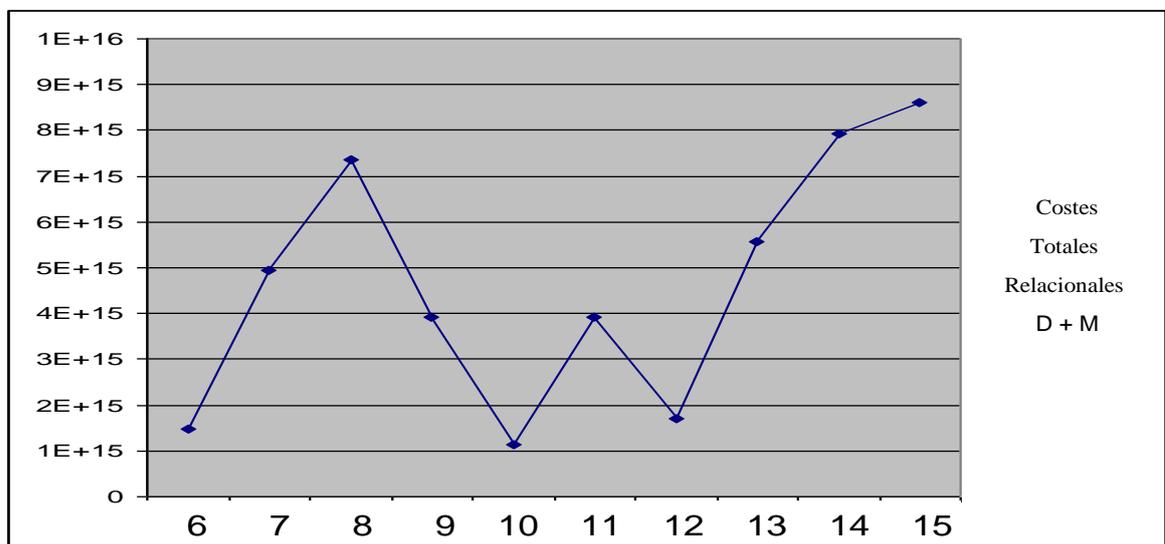


Figura 7.62: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 6 hasta la 15, ensayo 14.

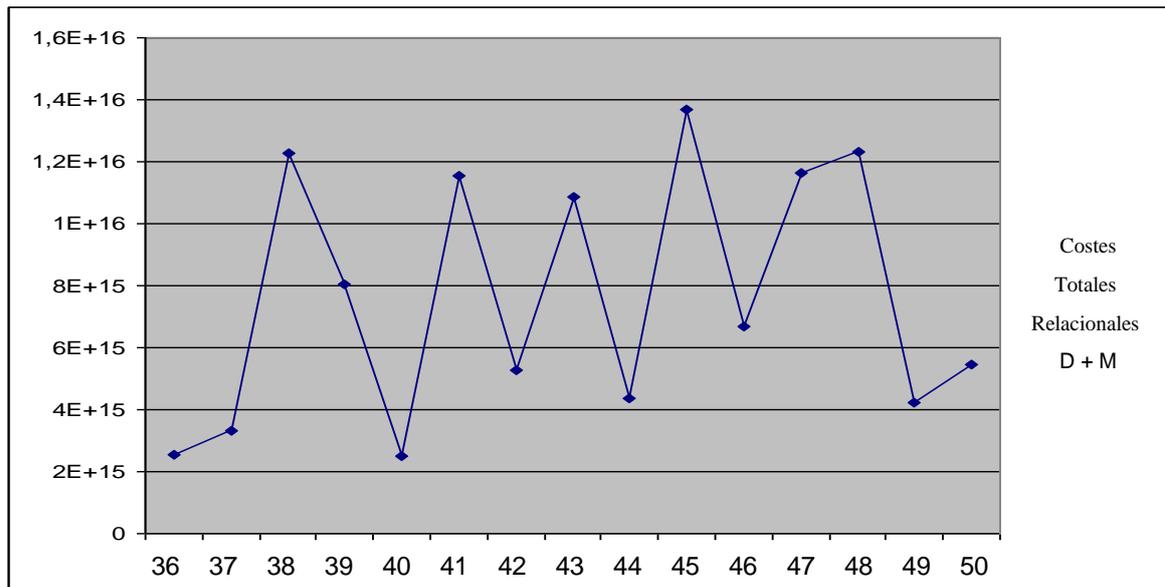


Figura 7.63: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 36 hasta la 50, ensayo 14.

El valor de la solución de mínimo coste total relacionales para este número de evoluciones es: 1.1483E+15 y se localiza en la generación 10. Es una solución mejor que la anterior.

**Ensayo 15** (figuras 6.64, 6.65 y 6.66):

- Probabilidad de cruce 95 %.
- Probabilidad de mutación de 5 %.

En la figura 7.64 se identifican 7 grupos de actuaciones, siendo, para esta planta, la de menor número de ellos.

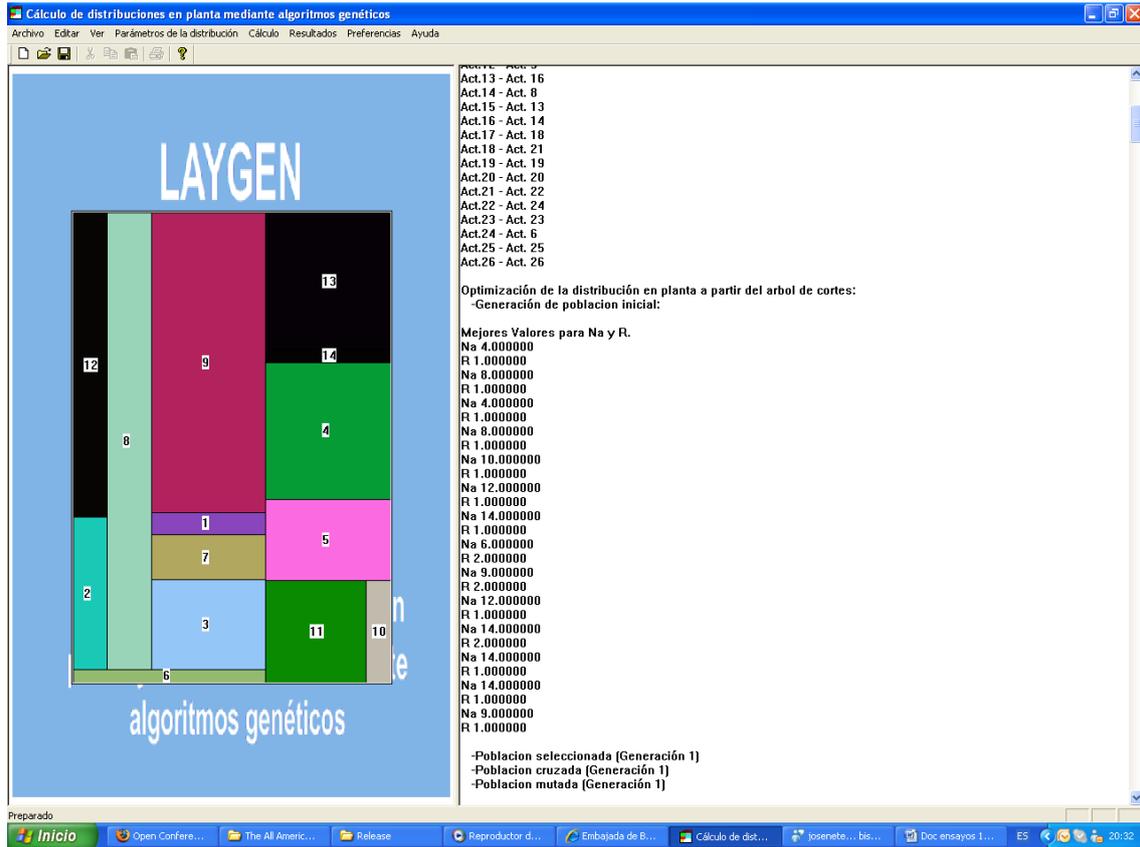


Figura 7.64: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 15.

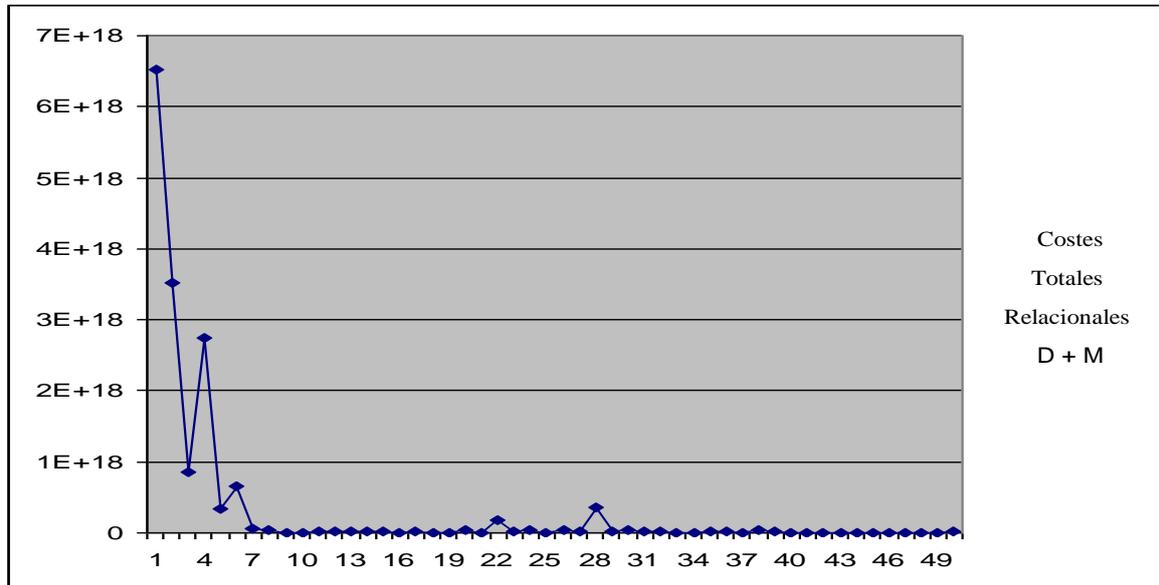


Figura 7.65: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 15.

Igual que en los casos anteriores con los mismos parámetros, converge en las primeras generaciones (figura 7.65), para luego entrar en una etapa variable tanto de exploración y explotación que alterna a lo largo de las evoluciones (figura 7.66). Puede verse también pérdida de orientación en la generación 29.

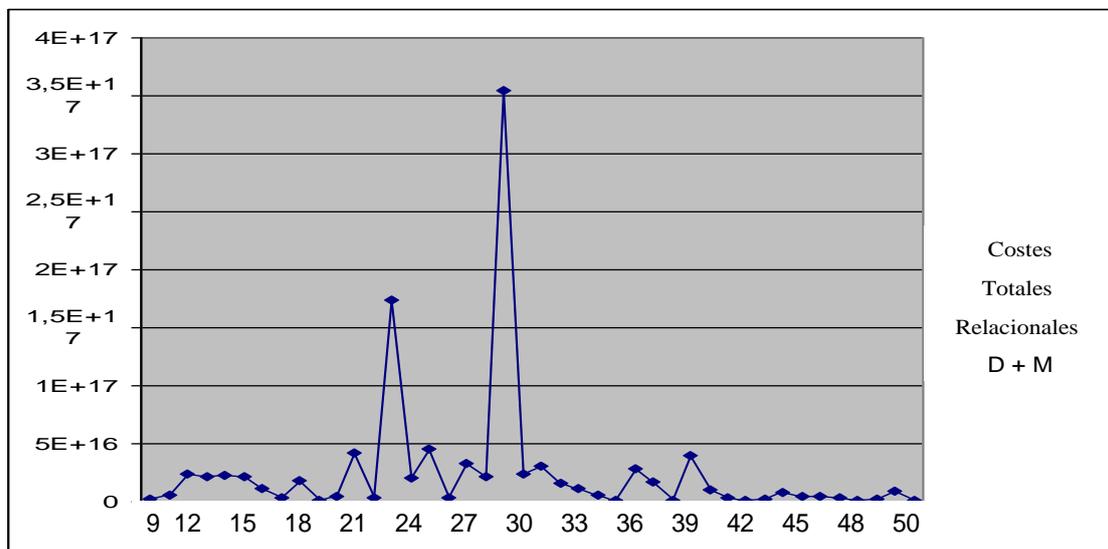


Figura 7.66: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 9 hasta la 50, ensayo 15.

La mejor planta tiene un coste mínimo relacional total de 1.1029E+15 unidades y se localiza en la generación 39 para este número de evoluciones.

### 7.2.3.- Conclusiones de las etapas experimentales 1 y 2.

Observando los resultados, podemos concluir, que a pesar de la convergencia del algoritmo en las primeras etapas de evolución, para los valores de cruce y mutación del 95% y 5% respectivamente, son los parámetros que mejores resultados da para la determinación de una solución de mínimo coste relacional para este algoritmo específico. Este comportamiento, bajo estos parámetros, se ha observado también en el trabajo de Santamarina (1995), donde aplica finalmente los mismos parámetros para el problema, sólo de distribución en planta. También se observa que empleando probabilidades de cruce y de mutación del 50%, el algoritmo puede quedar atrapado en un óptimo local (ver capítulo 4). Esto se debe a una mala explotación en etapas iniciales de la evolución.

En la siguiente figura 7.67, se comparan las convergencias de los ensayos 1, 2 y 3 para el problema planteado (primeras 22 generaciones). Se observa que la convergencia es más evidente en el ensayo 3. Adicionalmente, se aprecia que comienza con valores mayores, debido, en principio, a que los operadores, con estos valores, no influyen en las soluciones malas, y que, posteriormente con la aplicación y localización de buenas soluciones, comienza un periodo de convergencia. En cuanto al ensayo 1, la alta mutación puede generar soluciones comparativamente de bajo coste al principio, para entrar luego en una etapa de exploración que logra, a posteriori, una convergencia hacia soluciones similares a las obtenidas en el ensayo 3.

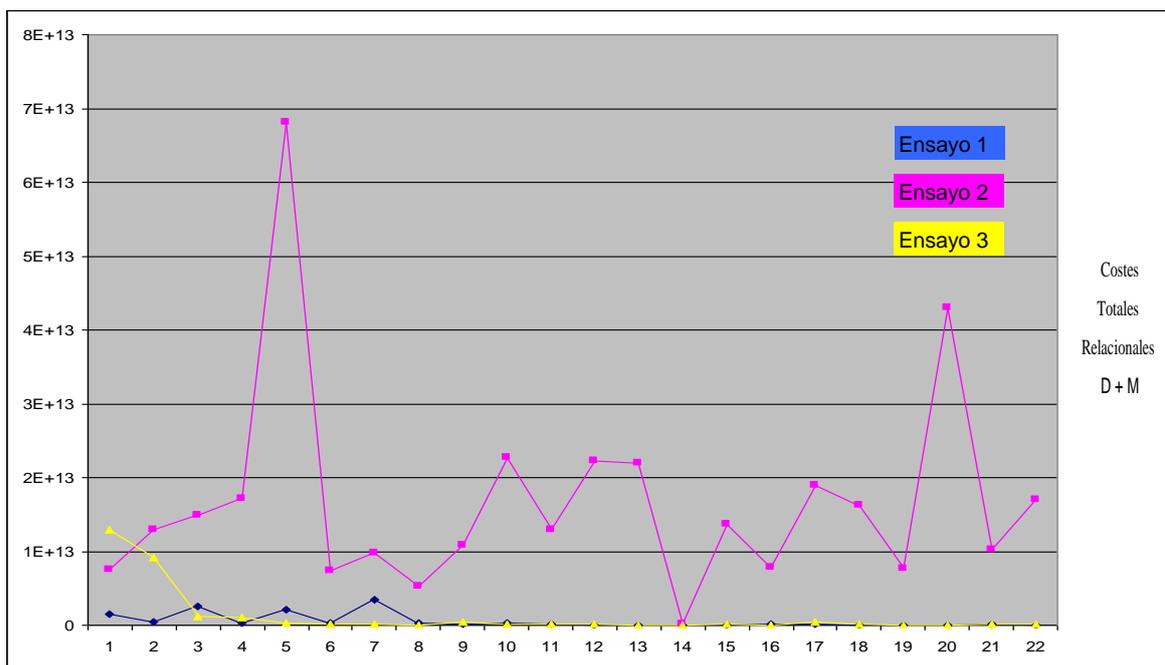


Figura 7.67: comparación en la convergencia de los costes totales relacionales de los ensayos 1, 2 y 3, para las primeras 22 generaciones.

En las siguientes figuras 7.68 y 7.69 se observan los menores costes relacionales para el ensayo 3, representados como una la línea envolvente de mínimos costes. Se observa además, la convergencia del algoritmo para estos parámetros. Para el ensayo 1, se obtiene una envolvente similar representativa de los mínimos costes totales relacionales.

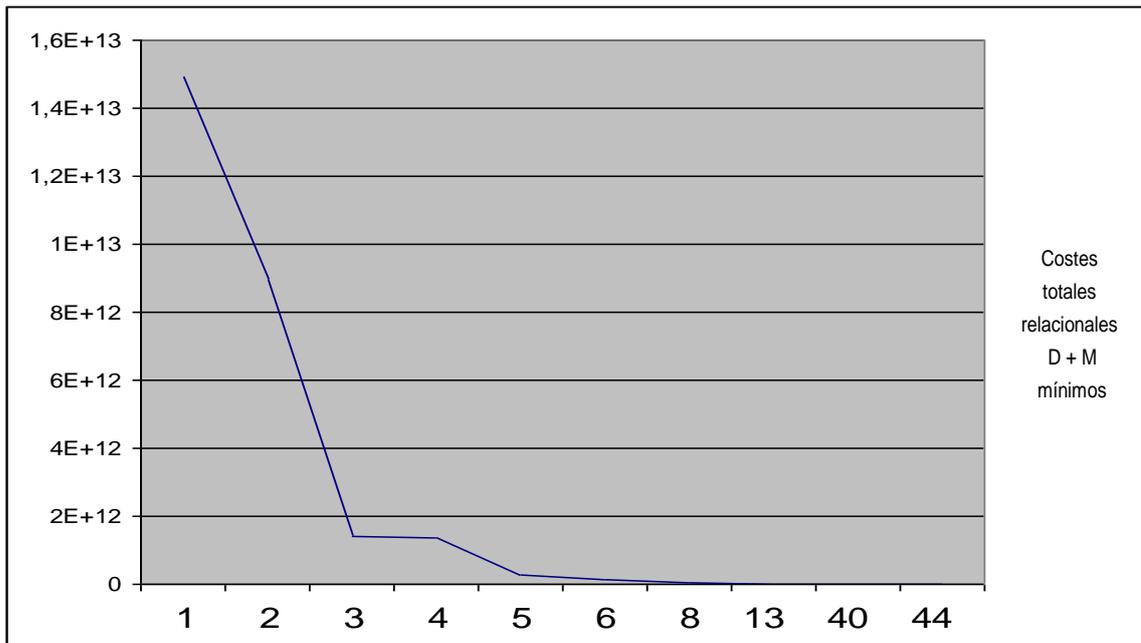


Figura 7. 68: Curva envolvente de mínimos costes totales relacionales del ensayo 3.

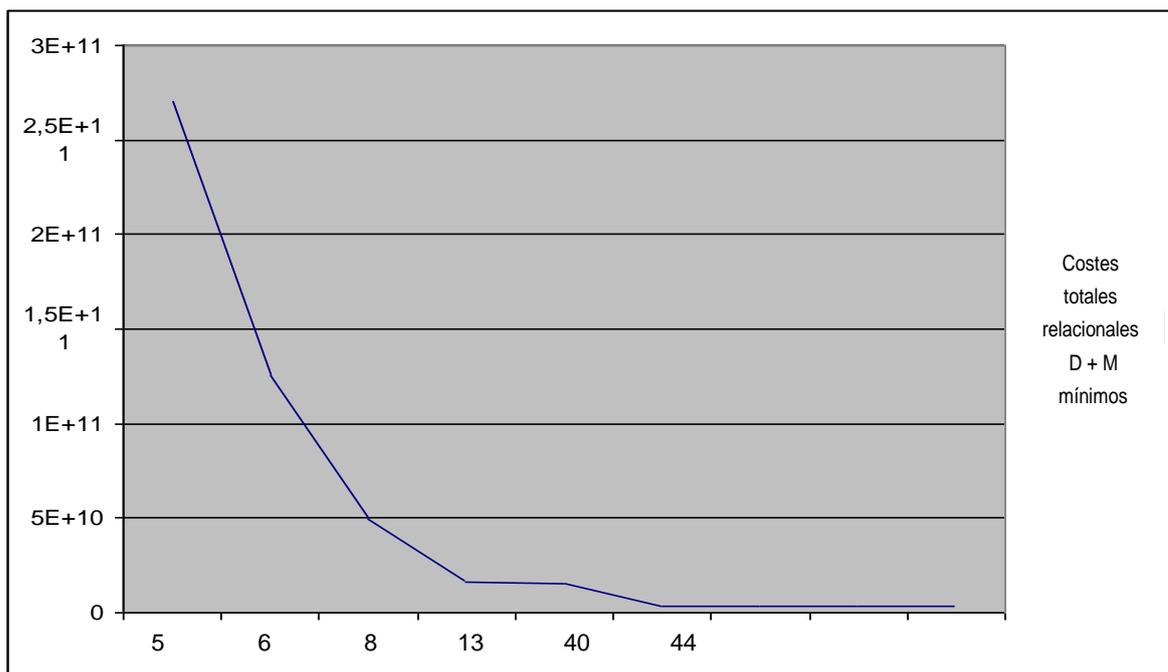


Figura 7. 69: Curva envolvente de mínimos costes totales relacionales de la generación 5 hasta la convergencia, del ensayo 3.

Es recomendable utilizar un elevado número de individuos para aumentar la diversidad. Se observó más variabilidad con el incremento del número de individuos (figura 7.70), pero la mejor solución no se ha conseguido bajo estas condiciones.

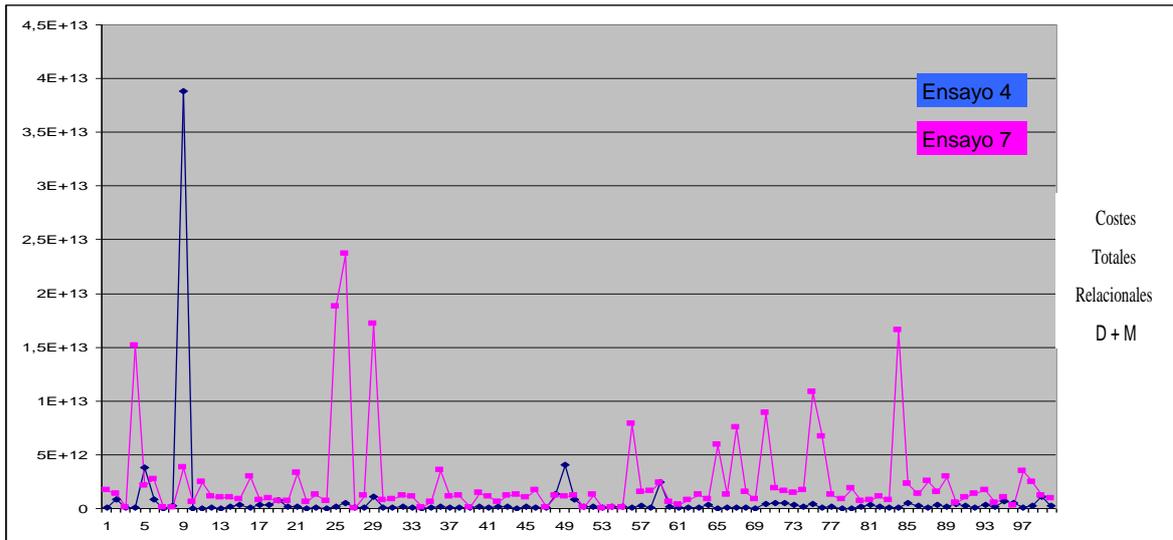


Figura 7.70: Comparación de las oscilaciones de los costes totales relacionales de los ensayos 4 y 7.

Se apreció que a mayor número de actividades hay bastante dispersión u oscilaciones, pero una comparación objetiva no es fácil, ya que con el aumento de las actividades, los costes de planta y mantenimiento se incrementan (figura 7.71). Pero sí se observa, en la mayoría de ensayos, que la mejor solución se obtenía a menor generación. Adicionalmente, el algoritmo tiende a agrupar las acciones de mantenimiento a mayor número de actividades para reducir en coste de actuación. Aquí los grupos son determinantes para la búsqueda de la mejor solución (ver capítulo 6).

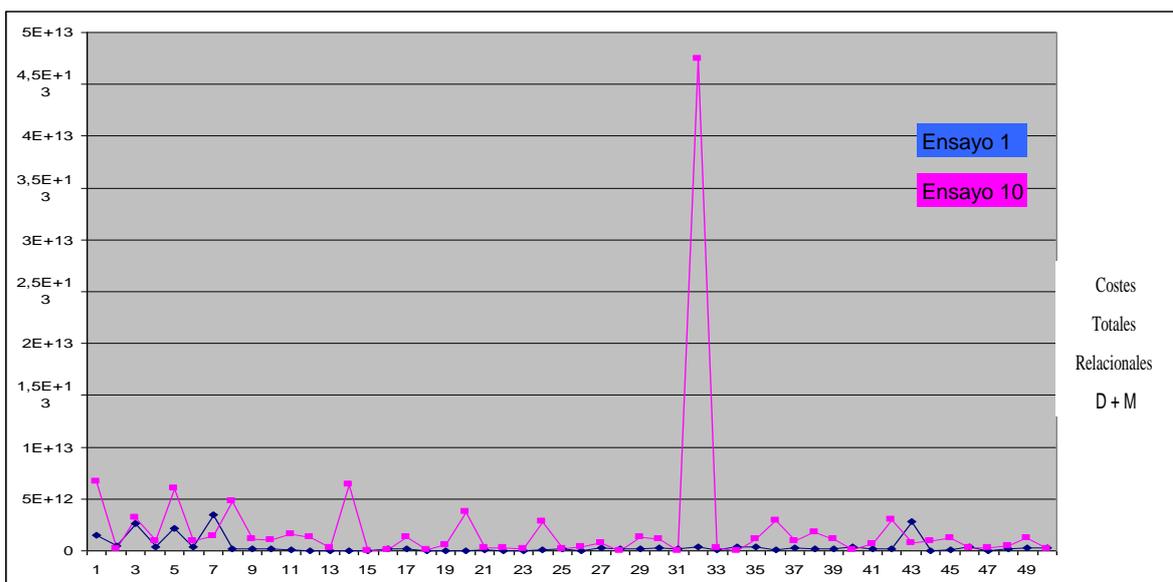


Figura 7.71: Comparación de las oscilaciones de los costes totales relacionales en función del número de actividades de los ensayos 1 y 10.

Debido al genotipo empleado para representar las soluciones que contienen tres segmentos (ver capítulo 6), es conveniente, para un mejor desempeño del algoritmo, emplear un nuevo mecanismo de cruce y mutación (ver apartado 7.4). Este consistiría en aplicar el cruce y mutación por segmentos, lo que originaría una mejor búsqueda y evitaría la caída en óptimos locales como ha ocurrido en algunos ensayos, por ejemplo, donde se ha utilizado 50% de cruce y mutación. Es recomendable emplear otro segmento que identifique el tipo de asignación de los equipos como fue sugerido en el capítulo 6. Esto con la finalidad, de evitar la aleatoriedad observada en los ensayos anteriores, debido a que el modelo no identifica los esquemas relacionados con la redundancia en paralelo, longitudinal y transversal, dando origen a resultados muy dispares, en algunos ensayos bajo las mismas condiciones.

También se ha observado, que los resultados finales están condicionados fuertemente por el coste del mantenimiento y los costes relacionales de penalización geométrica, resultado habitual, que el menor coste total relacional de planta, esté en la solución de menor coste geométrico y del mantenimiento. Según Amendola (2009), los costes de mantenimiento pueden estar en el orden de los 10 millones de euros, para grandes industrias, y la mala gestión de estos, puede originar 1 millón de euros en pérdidas diarias.

#### **7.2.4.- Influencia del horizonte de planificación y del MTBF.**

Como se ha observado en el capítulo 6, es necesario un mecanismo que permita incorporar el mantenimiento en el cromosoma, para la correcta implementación del algoritmo genético. Para ello se utilizó el número de actuaciones  $n_{ai}$ , que por medio de la aplicación del horizonte  $t$ , permite determinar un  $f_{ai}$  ( $f_{ai} = t/n_{ai}$ ) para comparar con el  $MTBF_i$  del equipo de la actividad  $i$ . Por lo tanto, esta variable condiciona los resultados para un problema. Adicionalmente evaluaremos, cómo influye en el ajuste de los instantes de actuación para puntos cercanos al MTBF.

##### **7.2.4.1.- Etapa experimental 3.**

Se realizarán varios ensayos modificando el horizonte de planificación del mantenimiento. Los parámetros genéticos utilizados están fijados en: 95% cruce, 5% mutación, 50 individuos y 100 evoluciones. Se emplearán los siguientes horizontes: 6000 horas, 10000 horas, 20000 horas, 50000 horas y 100000 horas. Los ensayos se han realizado seis veces para cada horizonte, y se han escogido los que mejor se ajustan a valores cercanos al  $MTBF_i$ . Se examina también, las condiciones de mantenimiento en cada una de las actividades, para ver si están en riesgo de mantenimiento preventivo o correctivo.

Para evaluar la condición del mantenimiento de una actividad y cercanía con el  $MTBF_i$ , se realiza la diferencia de  $fai$  ( $fai = t / nai$ ) menos el  $MTBF_i$ . Y para toda la planta, las horas de diferencia es la suma, en valor absoluto, de esta diferencia partido por el número de actividades de la planta.

### Ensayo 16.

Horizonte  $t = 6000$  horas.

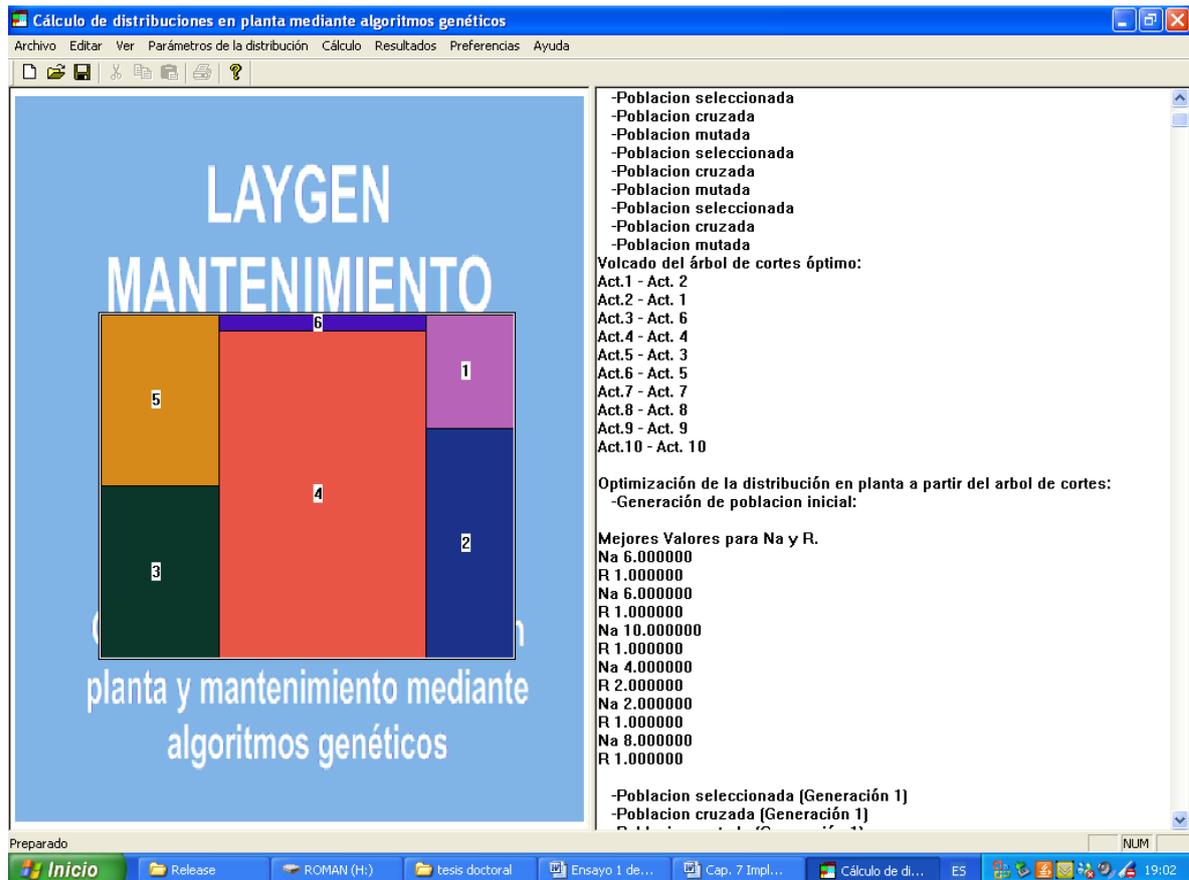


Figura 7.72: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo16.

Como se observa en la figura 7.72, los valores de  $nai$  varían de 2 a 8, específicamente de 2 a 6, ya que la actividad 6 para este ensayo es sólo un almacén. También se aprecia un grupo constituido por las actividades 1 y 2 con  $nai$  igual a 6.

Determinando el  $fai = t / nai$  para cada actividad, tenemos el instante de actuación en unidades de tiempo. Comparando con el  $MTBF_i$  podemos ver si está en riesgo de mantenimiento correctivo o preventivo. Los  $MTBF_i$  de este ensayo son:

Actividad 1 2000 horas.

Actividad 2 5300 horas.

Actividad 3 4000 horas.

Actividad 4 1000 horas.

Actividad 5 4500 horas.

De los *nai* calculamos los *fai* que son:

*fa1*: 1000 horas.

*fa2*: 1000 horas.

*fa3*: 600 horas.

*fa4*: 1500 horas.

*fa5*: 3000 horas.

Aplicando la diferencia  $fai - MTBFi$ , determinamos las horas que hay desde la aplicación del mantenimiento hasta el  $MTBFi$  del equipo correspondiente de cada actividad. Luego la suma total de todas en valor absoluto y promediadas por el número de actividades, nos da las horas de diferencia promedio para la planta. El signo positivo indica correctivo.

$f_{a1} - MTBF_1 = -1000$  (preventivo).

$f_{a2} - MTBF_2 = -4300$  (preventivo).

$f_{a3} - MTBF_3 = -3400$  (preventivo).

$f_{a4} - MTBF_4 = 500$  (riesgo de correctivo).

$f_{a5} - MTBF_5 = -1500$  (preventivo).

Observamos que la mayoría de las actividades está en la condición de riesgo de mantenimiento preventivo. Son lógicos estos resultados, ya que el mantenimiento preventivo genera menor coste y riesgo de paro. Pero también hay que aclarar que algunas actividades pueden estar sobre mantenidas. La suma de todos estos valores en valor absolutos y promediada es:  $10700/6 = 1783$  horas.

De igual forma se realizarán los demás ejemplos.

## Ensayo 17.

Para  $t = 10000$  horas.

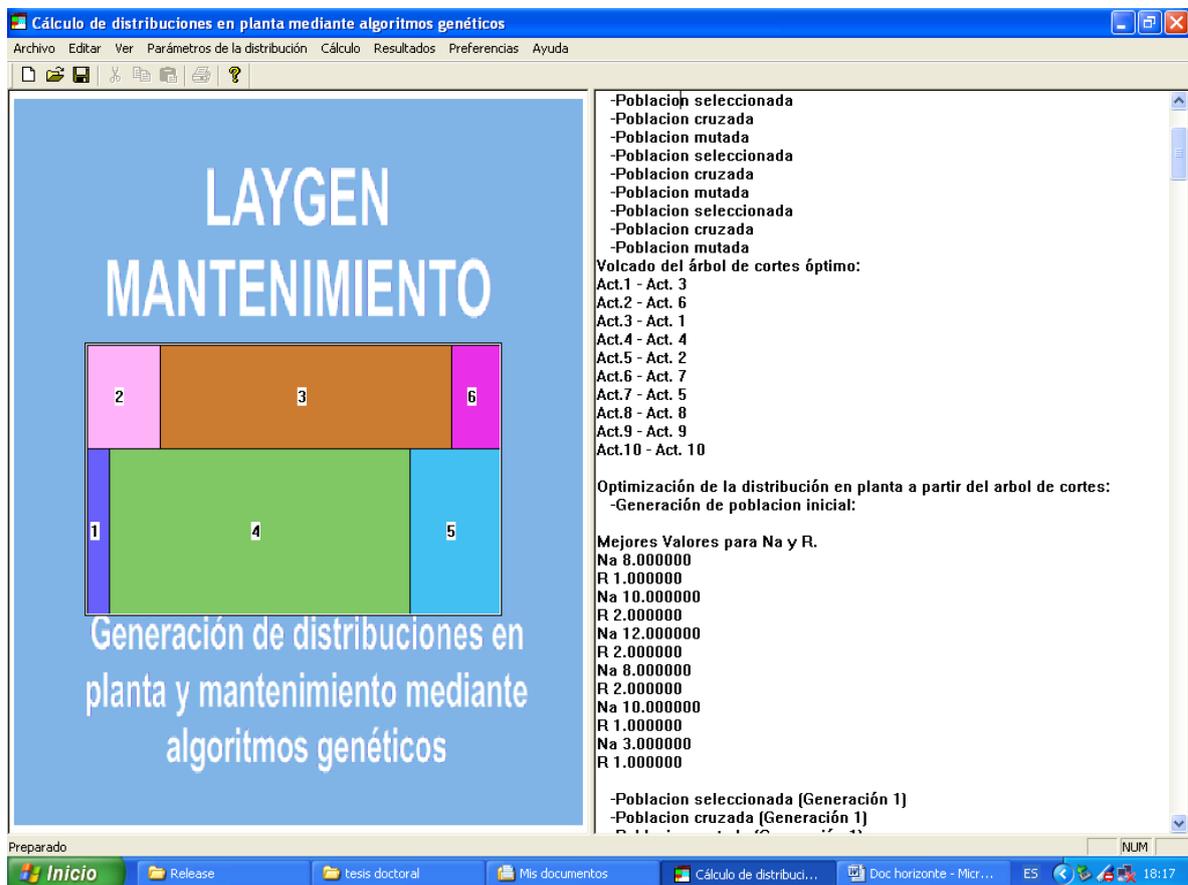


Figura 7.73: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 17.

Realizando el ejercicio de la misma forma que el anterior, la suma de todas las diferencias promedio es 1995 horas para este horizonte. Es importante resaltar, que los  $nai$  se incrementan ya que el horizonte de planificación del mantenimiento es mayor. Como se observa, los números de actuaciones  $nai$  están entre 3 y 12 que representa un incremento con respecto al ensayo anterior. La actividad 4 sigue en mantenimiento correctivo con  $R_4 = 2$ . La actividad 4 constituye un grupo con la actividad 1. Esto implica, que el coste esperado del mantenimiento para este grupo representa dos preventivos: uno para el equipo de la 1 y uno para el equipo redundante de la 4. El correctivo es para el equipo de la actividad 4.

## Ensayo 18.

Para  $t = 20000$  horas.

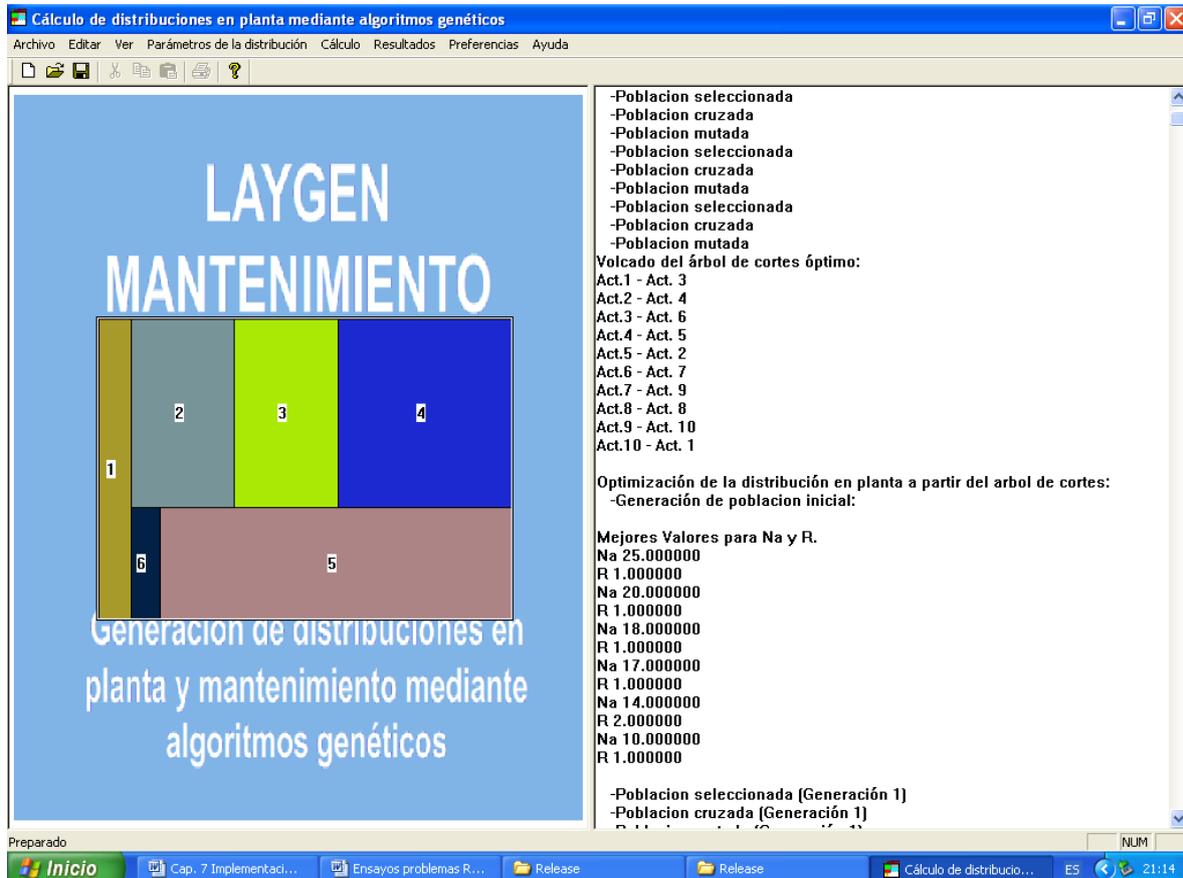


Figura 7.74: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 18.

Obsérvese que en la figura 7.74, los  $n_{ai}$  se incrementan en un rango que varía 10 a 24 actuaciones. En este caso también la actividad 4 está en correctivo, pero esta vez con  $R_4$  igual a 1. El promedio de horas de diferencia entre las actuaciones y los MTBF de todos los equipos es 1548 horas para este horizonte.

Este incremento de las actuaciones  $n_{ai}$  es debido a que el modelo ajusta las acciones dentro del rango del horizonte, con la finalidad de evitar los riesgos asociados al mantenimiento correctivo. Es necesario comentar, que al aumentar el horizonte  $t$ , los costes esperados totales del mantenimiento se incrementan también, al existir más acciones de mantenimiento. Esto no representa un incremento del mantenimiento por unidad de tiempo, si no que el horizonte para planificarlo es mayor.

### Ensayo 19.

Para  $t = 50000$  horas.

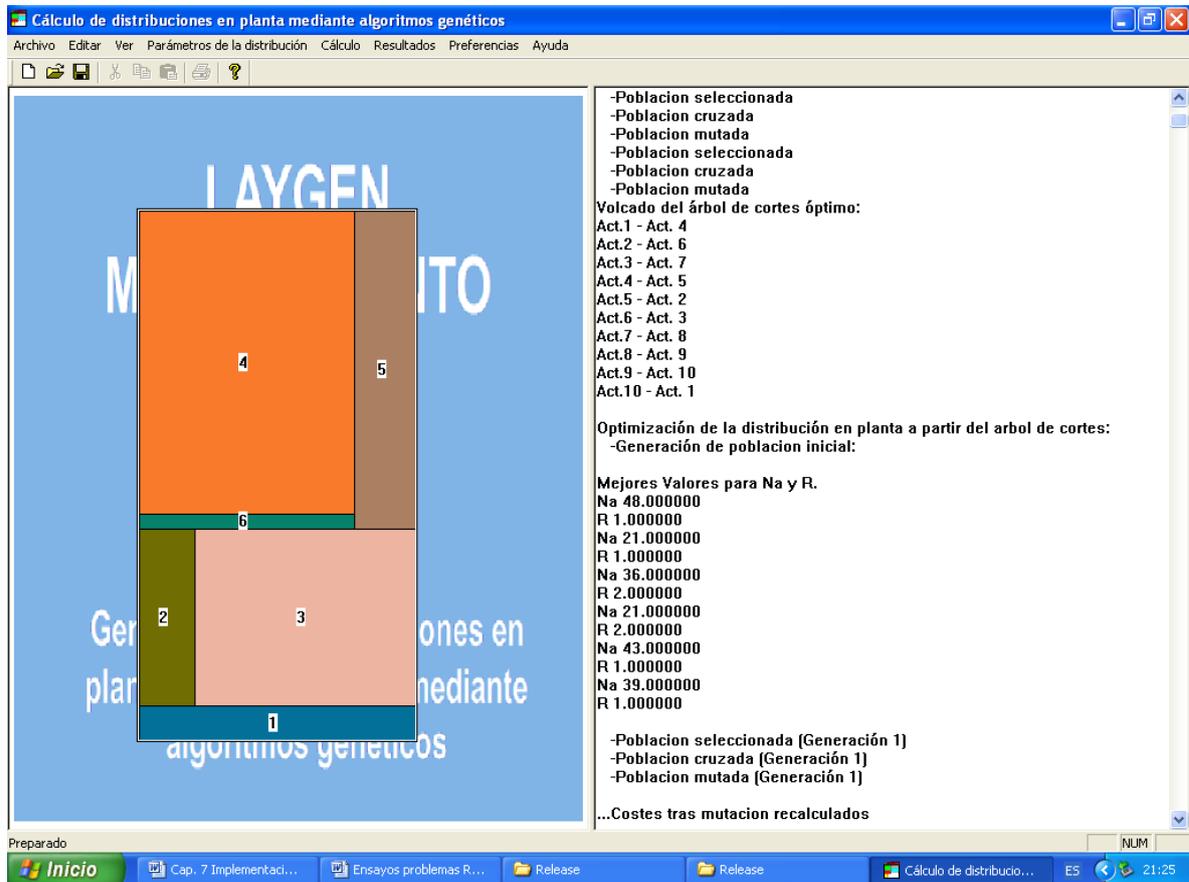


Figura 7.75: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 19.

Se observa en la figura 7.75, que nuevamente se incrementan los  $n_{ai}$ , en el rango 21 y 48 actuaciones, fruto del aumento del horizonte  $t$ . En este caso el resultado promedio es: 1627 horas.

Puede observarse también, que se ha identificado un grupo constituido por la actividad 2 y 4, que tienen un  $n_{ai}$  igual a 21.

## Ensayo 20.

Para  $t = 100000$  horas.

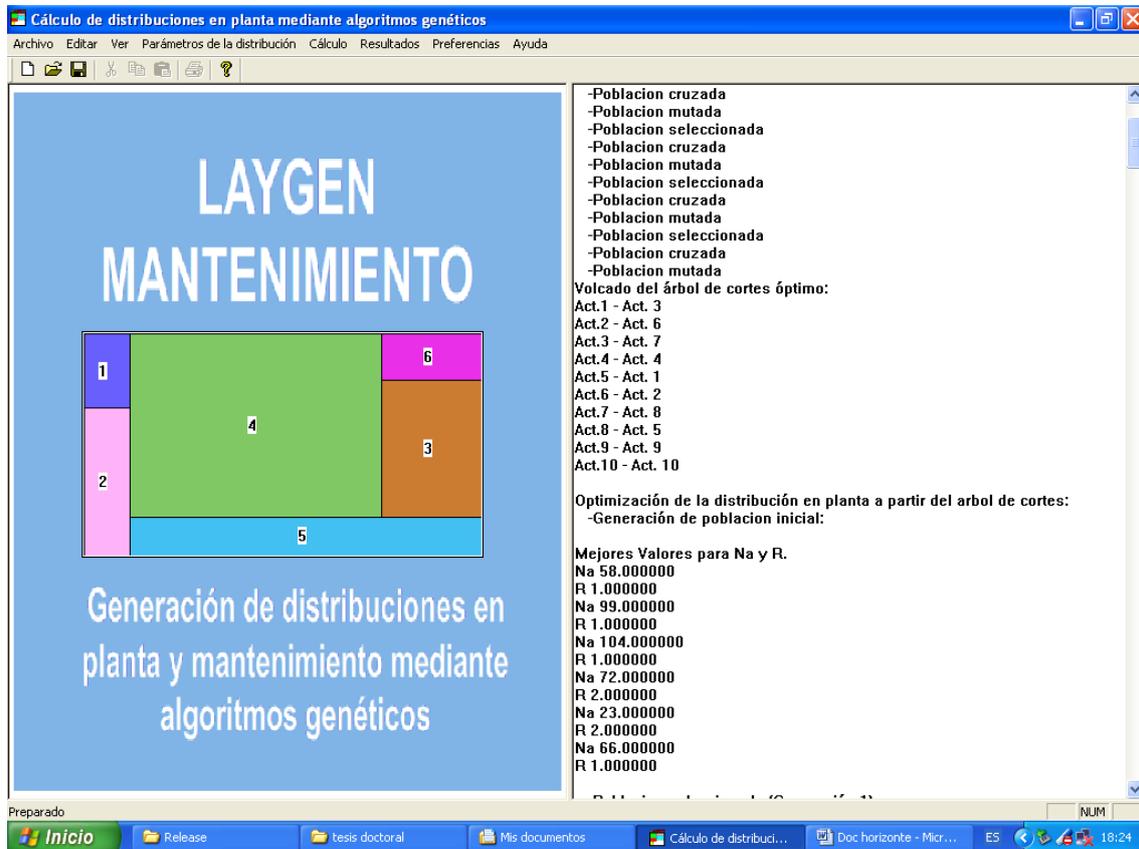


Figura 7.76: Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 20.

Siguiendo el esquema de los ejemplos previos, los  $n_{ai}$  se incrementan considerablemente en un rango de 24 hasta 104 (ver figura 7.76). La diferencia promedio es 1357 horas para este horizonte. La actividad cuatro en este caso también está en mantenimiento correctivo, con un  $R_4 = 2$ . Es lógico que para la actividad 4, se asignen más veces:  $R_4 = 2$ , ya que el  $MTBF_4$  es el menor de planta. El modelo busca evitar los costes por paro de planta, así que las actividades con más riesgo de fallo, tienen más probabilidades de que se le asigne un equipo adicional.

Se observa un valor mínimo para este último ensayo, pero no queda claro si el ajuste a los MTBF es realmente mejor a mayor  $t$ , como se ha comentado en el capítulo 6, ya que a pesar de realizar varios ensayos por horizonte, la mejoría por la extensión de este no es del todo evidente. Algunos de estos dieron valores similares a los de menor extensión. Los mejores resultados se dieron con los horizontes 50000 horas y 100000 horas. También como punto muy importante, se observó como el algoritmo adapta el número de las acciones de mantenimiento en función del horizonte.

Este efecto del incremento de los *nai*, también ocurre cuando se utilizan equipos con MTBF menores. Es decir, al ser menor los valores de los MTBF sobre un horizonte, el algoritmo incrementa los *nai* para mantener prioritariamente la condición de preventivo. Para demostrarlo, realizamos un ensayo sólo con el 10% de los MTBF empleados al principio y 10000 horas de horizonte.

### Ensayo 21.

Empleando sólo el 10% de los tiempos medios de buen funcionamiento MTBF.

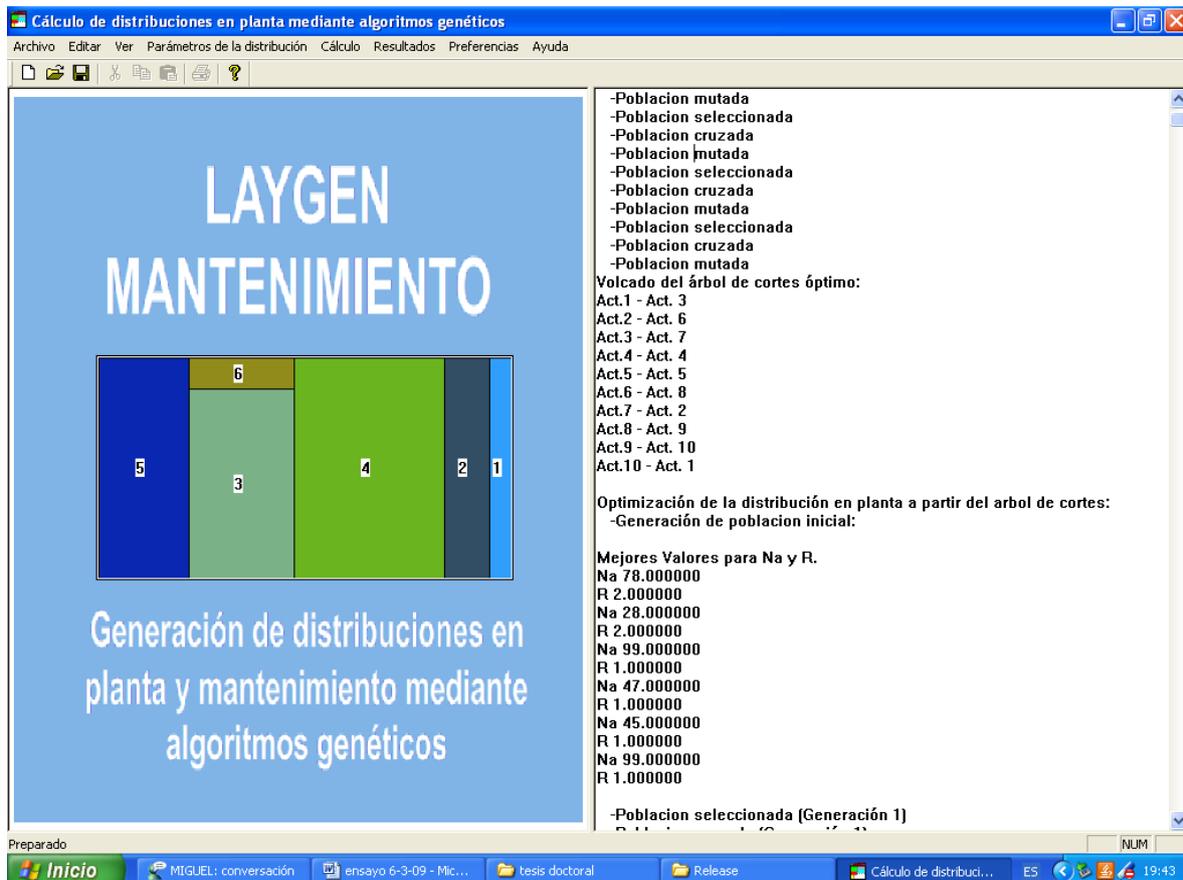


Figura 7.77. Distribución de menor coste total relacional del ensayo 21.

Como se observa en la figura 7.77, los valores de las actuaciones de mantenimiento *nai* se han incrementado considerablemente, al ser inferior los MTBF de cada actividad para el horizonte empleado de 10000 horas.

### 7.2.5.- Influencia de la redundancia en la manutención y configuración de la distribución.

Para evaluar cómo influyen las consideraciones del mantenimiento en la distribución en planta, se realiza un ensayo empleando un problema clásico de distribución monoárea, que fue propuesto por Hiller (1963) y utilizado por Santamarina (1995). La finalidad de realizar el ensayo bajo estas características de áreas iguales, es comparar y evaluar cómo la redundancia influye en la configuración de las diferentes actividades y en los costes finales relacionales al movimiento de materiales, para un problema conocido.

#### 7.2.5.1.- Etapa experimental 4.

El problema propuesto por Hiller (1963) y tratado por Santamarina (1995), consiste en una planta de 12 actividades de áreas iguales (una unidad cuadrada), con los flujos asociados dados en la matriz de la figura 7.78. Santamarina (1995), realiza los ensayos con la finalidad de evaluar los parámetros en la optimización de las distribuciones contenidas en un árbol de cortes. En el ejemplo a comparar, Santamarina (1995) empleó los siguientes parámetros del algoritmo: probabilidad de cruce 95%, probabilidad de mutación 5%, 50 individuos y 500 evoluciones. El ratio de las actividades igual a 1.

To From	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	*	5	2	4	1	0	0	6	2	1	1	1
2		*	3	0	2	2	2	0	4	5	0	0
3			*	0	0	0	0	5	5	2	2	2
4				*	5	2	2	10	0	0	5	5
5					*	10	0	0	0	5	1	1
6						*	5	1	1	5	4	0
7							*	1	5	2	3	3
8								*	0	0	5	0
9									*	0	10	10
10										*	5	0
11											*	2
12												*

Figura 7.78: Matriz de flujo entre actividades (transporte/día) (Hillier, 1963).

Santamarina (1995) obtuvo la siguiente distribución de planta de mínimo coste relacional que se demuestra en la figura 7.79.

7	12	9	3	2
				10
8	4	11	1	6
				5

Figura 7.79: Distribución de mínimo coste relacional con los valores de Hillier (1963) empleados por Santamarina (1995).

En la siguiente figura 7.80, se observa la variación del coste relacionado a la manutención del ensayo anterior. El coste mínimo relacional del flujo de materiales fue 307 y se ha logrado en la generación 302.

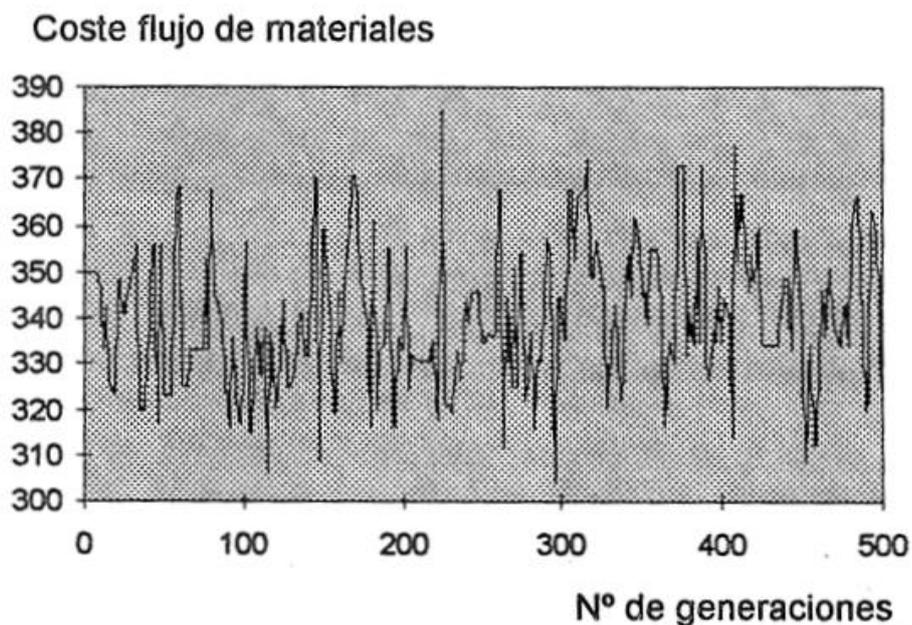


Figura 7.80: Evolución de los costes relacionados al flujo de materiales (Santamarina, 1995).

## Ensayo 22.

Manteniendo los datos de partida de Hillier (1963), datos del mantenimiento del ensayo 13 (hasta 12 actividades) y los parámetros del algoritmo de Santamarina (1995) utilizados para este problema clásico, obtenemos la siguiente configuración del layout de mínimo coste relacional de la distribución y del mantenimiento (figura 7.81).

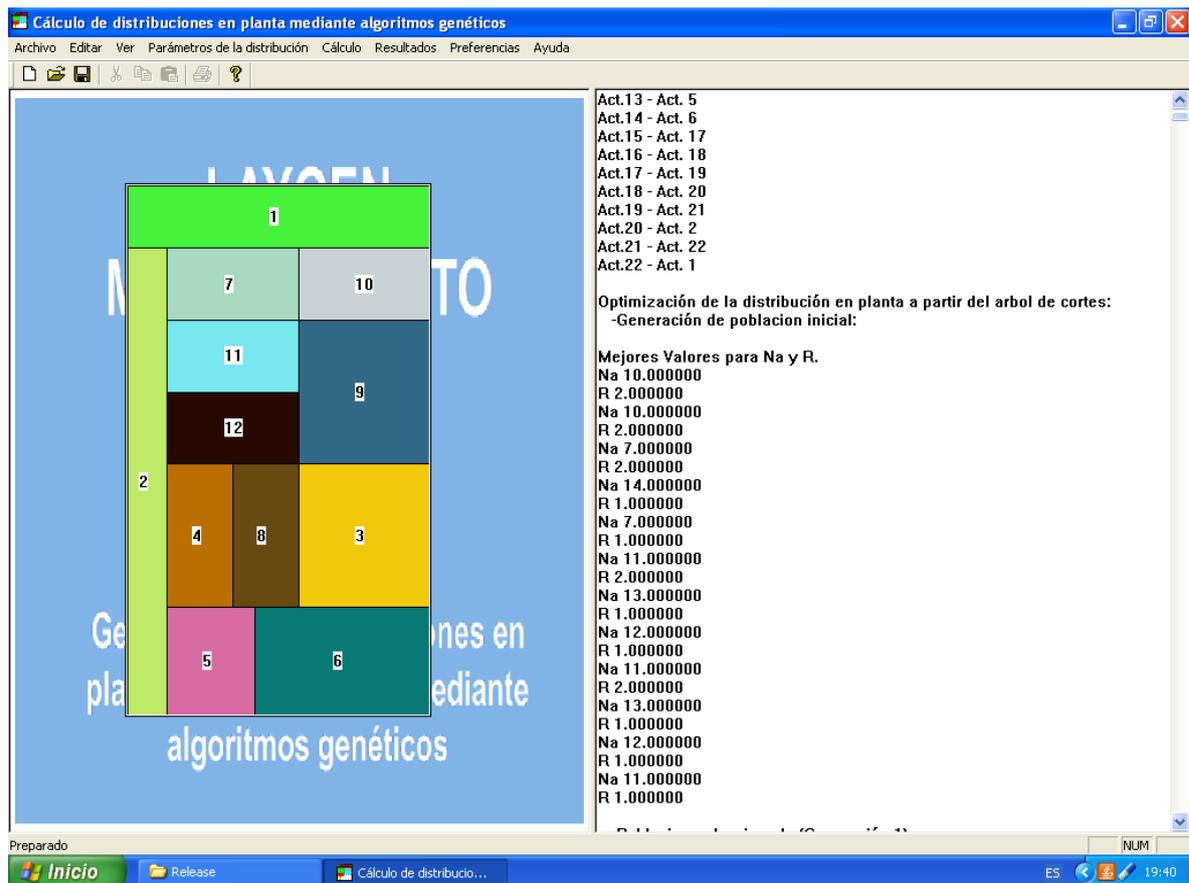


Figura 7.81: Distribución de mínimo coste total relacional, ensayo 22.

La razón de utilizar valores del mantenimiento, es con la finalidad de que por el diseño del software éste pueda operar.

Se observa en la figura 7.81 que el área de cinco actividades es diferente (actividades 1, 2, 3, 6 y 9). Esto es debido a que estas actividades poseen un  $R_i = 2$ . Adicionalmente, no todas las adyacencias se han mantenido para estas circunstancias. Los costes esperados del mantenimiento se reducen con respecto a los ensayos anteriores, debido a la disminución de las distancias hacia el almacén, al ser las áreas menores. Los costes relacionados con la penalización geométrica se incrementan con respecto a ensayos sin redundancia.

Evaluando los costes relacionales del flujo (figuras 7.82 y 7.83), observamos que el mínimo coste relacional es de 330 unidades, localizado en la generación número 260. El coste mínimo se incrementa con respecto al ensayo anterior, debido a la presencia de las áreas adicionales que aumentan las distancias para el recorrido de materiales. Se observa también un comportamiento similar en cuanto a la convergencia con los ensayos anteriores, con los mismos operadores genéticos (figura 7.82). Se aprecia una pérdida de orientación en la generación 460, que vuelve a los valores de mínimo coste por el paralelismo implícito (ver capítulo 4).

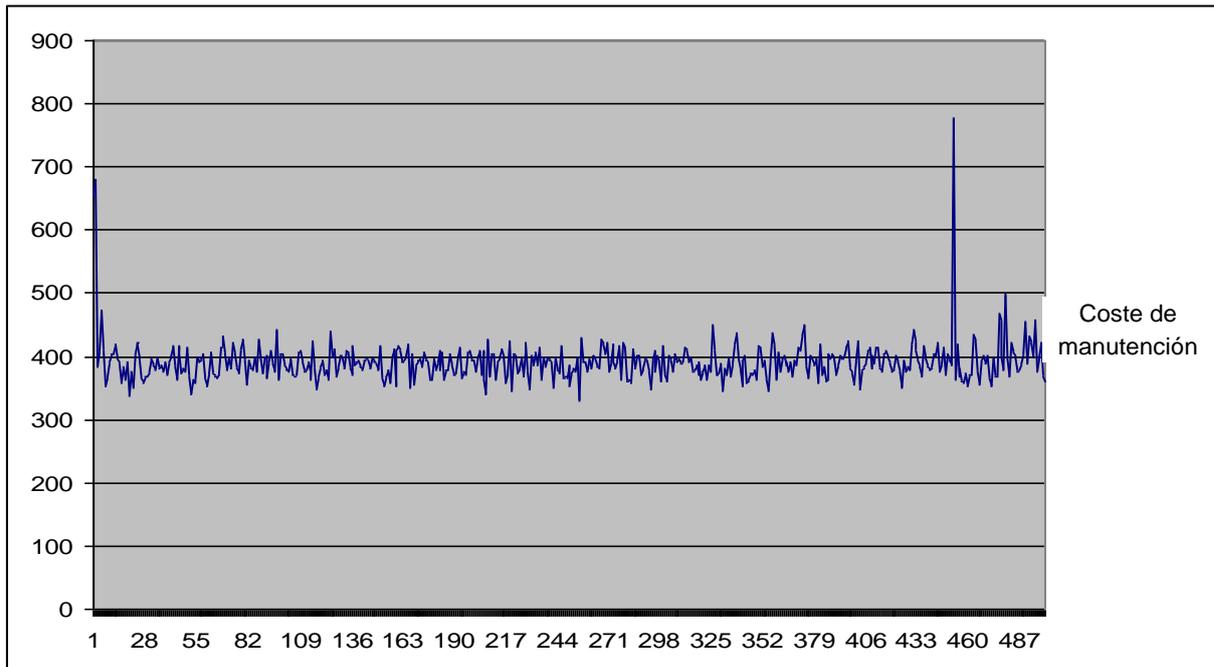


Figura 7.82: Evolución del coste relacional asociado al flujo de materiales, ensayo 22.

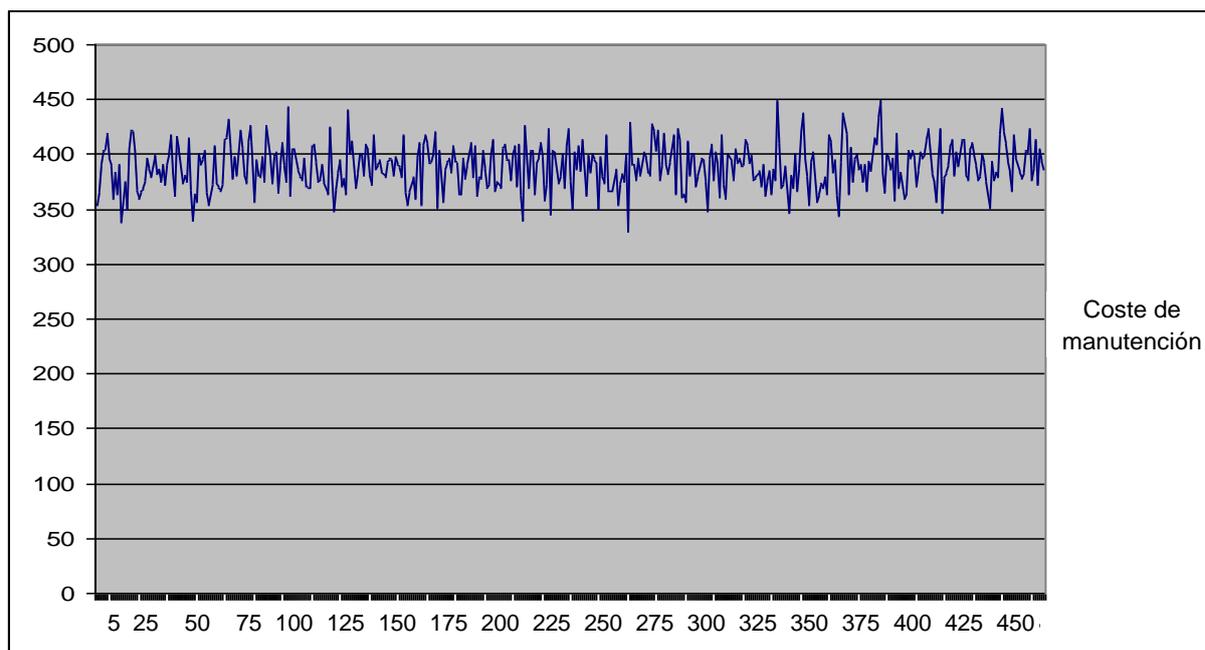


Figura 7.83: Evolución del coste relacional asociado al flujo de materiales de la generación número 6 hasta la 459, ensayo 22.

En las figura 7.83 se observa mayor oscilación o variación de los costes de manutención, debido, como ya se ha comentado, a la presencia de áreas adicionales. La variación de costes por generación de Santamarina (1995) oscila entre 309 y 385 unidades, y la nuestra entre 330 y 450, sin incluir los costes en las primeras generaciones de convergencia y pérdida de orientación.

### 7.2.6.- Influencia de las condiciones del ambiente.

Como se ha comentado en los capítulos 2, 5 y 6, las condiciones imperantes en el ambiente, influyen en la degradación de los equipos y por lo tanto en los costes finales del mantenimiento. Estas condiciones, pueden ser ocasionadas por los mismos equipos y/o por los agentes bioclimáticos externos.

Para evaluar como influirían estas condiciones en los costes, se propone el siguiente experimento:

### 7.2.6.1.- Etapa experimental 5.

Utilizando los valores de los parámetros del apartado 7.2.1.1 (mejores valores de los experimentos anteriores), el ensayo se realiza adicionando a la declaración de datos, parámetros que afectan al modelo propuesto en función de su valor. La consideración de las condiciones ambientales, determinarán un valor diferente de cero para la expresión:  $a_1 \cdot (1/dia_1) + a_2 \cdot (1/dia_2) + a_3 \cdot (1/dia_3) + \dots + a_n \cdot (1/dia_n) + amb + \dots + ambn$ , de la siguiente función propuesta en el capítulo 6:

$$h(t,d)i = h_o(t)i \cdot e^{\{[a_1 \cdot (1/dia_1) + a_2 \cdot (1/dia_2) + a_3 \cdot (1/dia_3) + \dots + a_n \cdot (1/dia_n)] + amb + \dots + ambn\}}.$$

Luego se compara con el mismo problema del apartado 7.2.1.1, cuyo valor fue cero para esta función por no considerarlas, es decir,  $a_1 \cdot (1/dia_1) + a_2 \cdot (1/dia_2) + a_3 \cdot (1/dia_3) + \dots + a_n \cdot (1/dia_n) + amb + \dots + ambn = 0$  lo que hace  $h(t,d)i = h_o(t)i$ .

#### Ensayo 23.

Manteniendo los mismos valores de partida del ensayo 7.2.1.1, pero esta vez adicionando los parámetros ambientales globales (figura 7.8) y por actividad (figura 7.9). Los datos globales fueron 0.08 para los tres considerados y 0.01 para las tres primeras actividades.

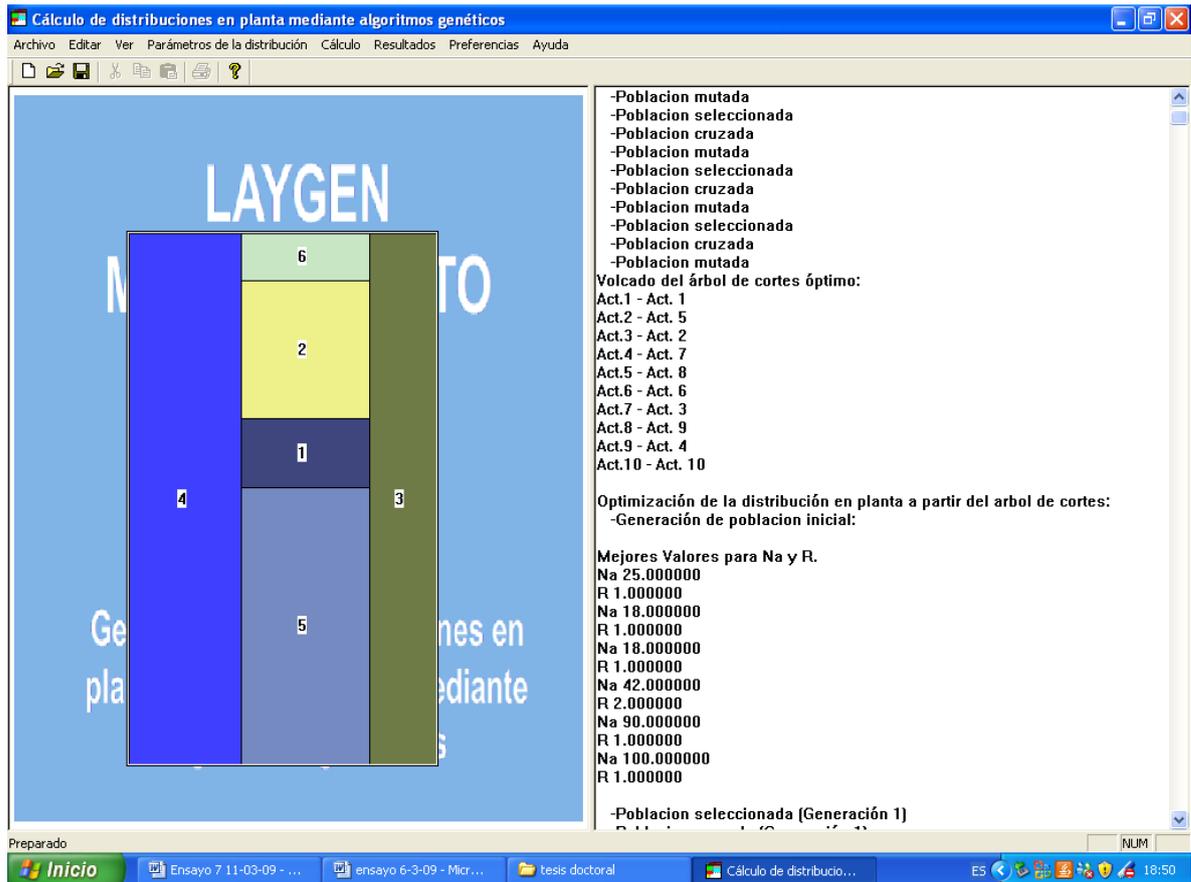


Figura 7.84. Distribución de mínimo coste total relacional del ensayo 23.

En la figura 7.84, se observa la distribución de menor coste total relacional de planta para las especificaciones de entrada. En ella puede apreciarse un incremento considerable del número de actuaciones, fruto de la reducción de los MTBF de los equipos de las actividades, debido a la consideración de parámetros asociados a las condiciones ambientales diferentes de cero.

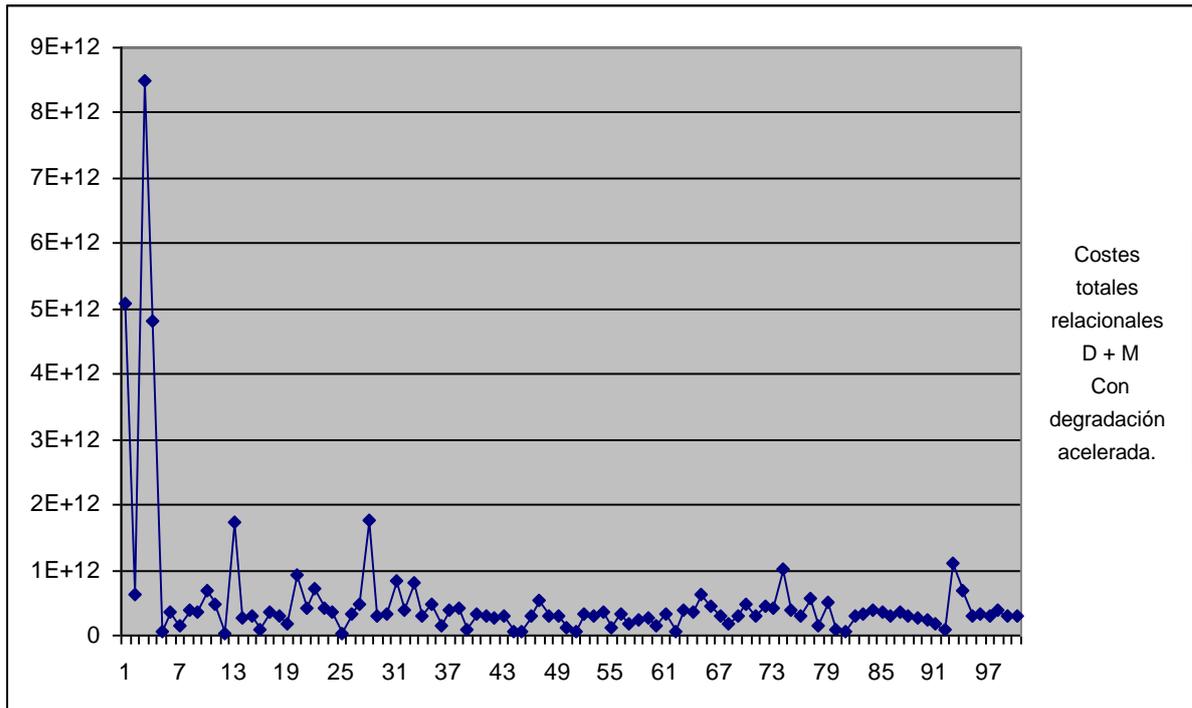


Figura 7.85: Evolución de los costes mínimos totales relacionales por generación, ensayo 23.

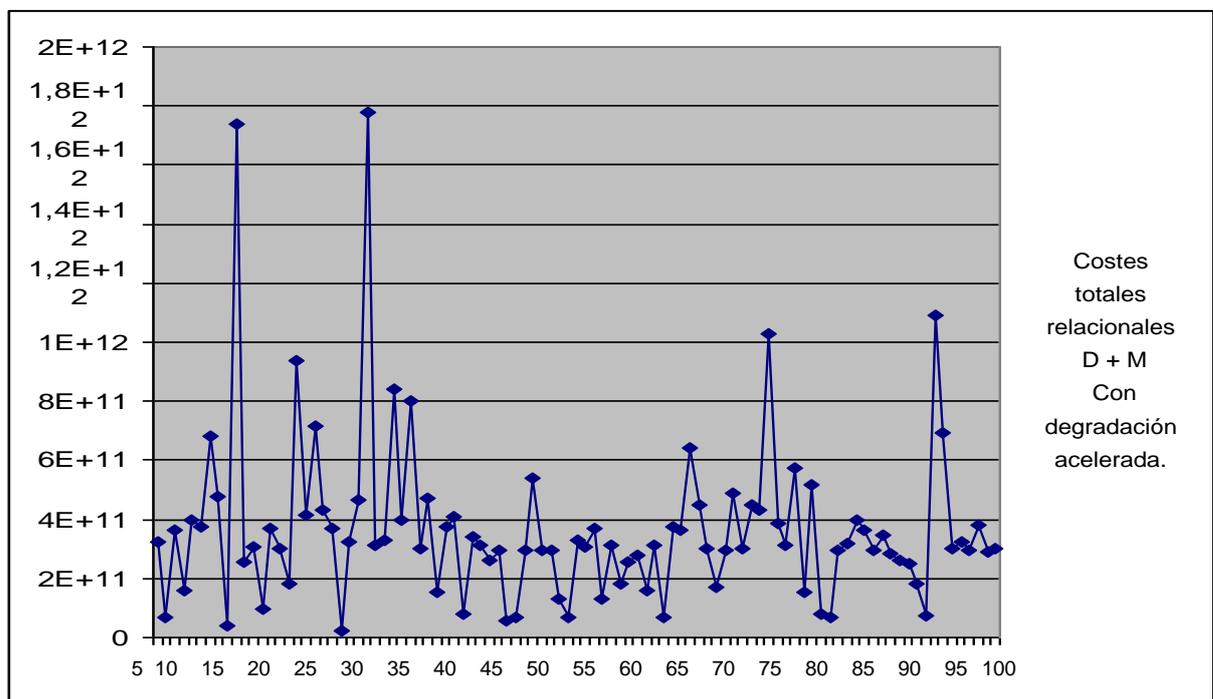


Figura 7.86: Evolución de los costes mínimos totales relacionales de la generación 6 hasta la 100, ensayo 23.

En la figura 7.87, puede observarse la variabilidad y picos de pérdidas menores respecto a los ensayos 3 y 6, con los mismos parámetros genéticos, pero sin las consideraciones degradantes del ambiente. No obstante, y como era de esperar, los costes mínimos son mayores para este ensayo. El mínimo coste total relacional para este caso es: 20365490922 unidades y se ha logrado en la generación número 28.

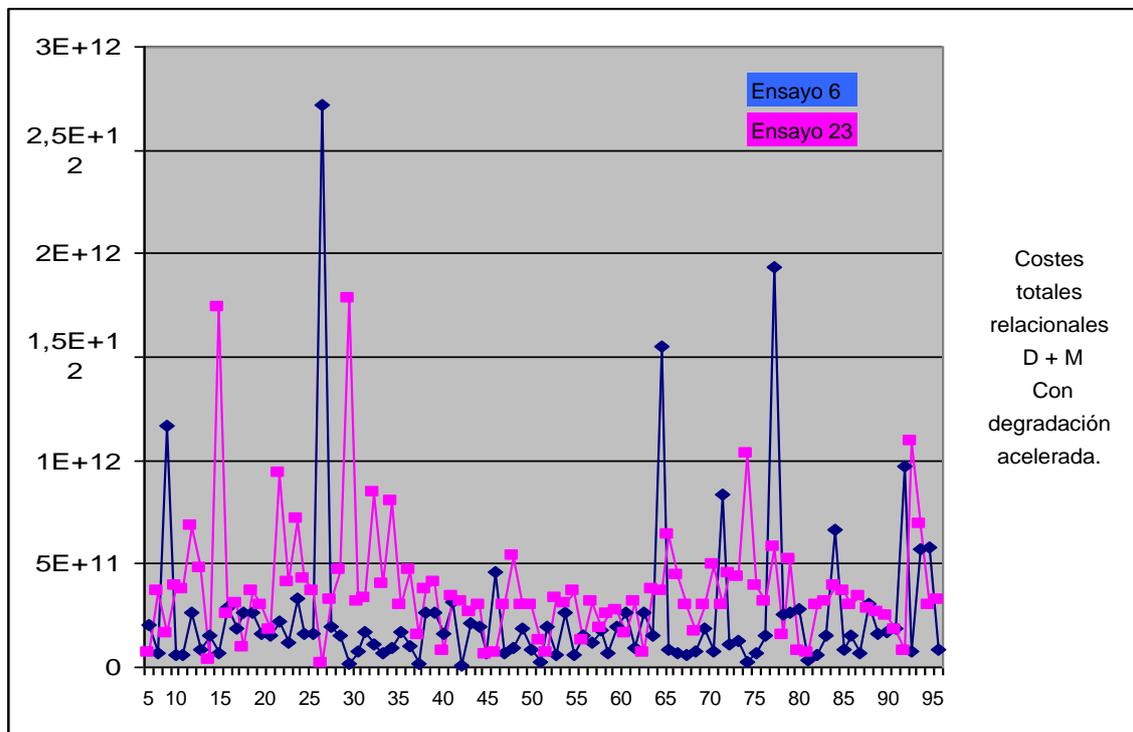


Figura 7.87: Comparación de los costes mínimos totales relacionales de la generación 5 hasta la 95 de los ensayos 6 y 23.

### 7.3.- Conclusión.

Al inicio del trabajo, se expuso la necesidad de incluir las actividades de mantenimiento en el diseño de la distribución en planta, así como de la optimización conjunta entre éstos. Motivado a que en la literatura existente no se ha considerado esta circunstancia, la finalidad del trabajo, ha sido desarrollar un modelo que minimice tanto los costes de distribución como los del mantenimiento, cuando estos son considerados de manera conjunta.

Para lograr buenas soluciones bajo todos estos requerimientos, se ha empleado un algoritmo genético. La aplicación de esta metodología, ha obligado a plantearse una representación en cadena, que contenga aspectos del mantenimiento y de la distribución en planta. Para cumplir con este planteamiento, se han implementado variables críticas,

dentro del modelo de optimización, que representan un determinado gen en la cadena. Las variables del modelo que representan genes y que posibilitan la identificación de una solución son: los operadores del árbol de cortes para la distribución, el número de intervenciones para el equipo o equipos de cada actividad, y la redundancia.

A lo largo de la revisión bibliográfica, se han comentado y estudiado, las principales cuestiones a considerar en la optimización de las actividades de mantenimiento y distribución en planta.

En las actividades de mantenimiento, se ha observado cómo es indispensable formular los modelos de optimización para un componente, en términos de un parámetro que cuantifiquen la probabilidad de ocurrencia de fallos, y a la vez, de la consideración de las diferentes políticas de mantenimiento, que en función de la durabilidad y frecuencias, contribuyen en los costes y en los riesgos. Dentro de estos modelos, se analizan diferentes submodelos que involucran ciertos factores (ambientales) que influyen en los análisis de fiabilidad y en el resultado final de la optimización. Con respecto a la optimización a nivel de sistema, se observó la subjetividad de esta en función del grado de complejidad deseado, y de algunas propuestas para la optimización por medio de algoritmos genéticos. En la optimización del mantenimiento a nivel de planta, se analizaron los diferentes enfoques, siendo estos muy específicos, en función de las necesidades, criterios y requerimientos del proceso. Sobre el mantenimiento centrado en la fiabilidad, se comentaron sus particularidades como metodología de aplicación para la optimización combinatorial de un sistema, a partir del conocimiento de los requerimientos para el funcionamiento de los equipos y sus causas de fallos.

Para la distribución en planta se resumió la metodología para el diseño Systematic Layout Planning, y de las etapas finales de ésta, los modelos de espacio. Se elaboró un resumen de los modelos más importantes, incluyendo también, los recientes modelos dinámicos. Se observó, que la mayoría de los modelos descritos para la distribución, se formulaban matemáticamente como un problema cuadrático de asignación. Por último y lo más importante, se analizaron las propuestas y estudios realizados por diferentes autores para la optimización de la distribución, aplicando los algoritmos genéticos. Aquí observamos la diversidad en las diferentes formas de abordar y formular el problema, como la utilización de árboles de cortes, el seccionamiento del área en  $N$  cuadrados (método discreto), la construcción de matrices simples, la inclusión de pasillos, manutención para diferentes pisos, células flexibles de manufactura con programación entera mixta, modelos dinámicos, etc.

La metodología de optimización que se analizó en detalle fue la de los algoritmos genéticos. De estos se describen las características principales como: los operadores y la influencia sobre el proceso de búsqueda, criterios para la finalización, penalizaciones, formas de aplicación para mejorar su efectividad y velocidad. Se exponen algunos desarrollos para la codificación, tendentes a la optimización de la distribución en planta y el mantenimiento, observando que las soluciones pueden estar representadas por una

cadena de  $n$  caracteres que representan a su vez, un estado del problema. Se analizan otras metodologías de optimización, para comparar con los algoritmos genéticos y estudiar sus ventajas, y de esta manera justificar su utilización. Se comentan otras tendencias de los algoritmos evolutivos como los coevolutivos y los meméticos, siendo estos desarrollos para mejorar la intensidad de búsqueda local en casos particulares.

Seguidamente, se analizan los posibles elementos que permiten el análisis integrado del mantenimiento y la distribución en planta. La finalidad de esto es disponer de una base más consistente para el desarrollo del modelo de optimización propuesto. Entre los diferentes elementos considerados están: los requerimientos de espacios para el almacenaje de repuestos y centros de monitoreo. También se estudió la influencia de las acciones de mantenimiento, que en función de la política empleada, determinan la ubicación de los respectivos almacenes y de los espacios necesarios para la redundancia. Se describe un modelo de distribución, que considera aspectos ambientales pero para el diseño del edificio.

Teniendo presente todo este basamento, expuesto a lo largo del trabajo, se procedió a elaborar el modelo de optimización para mantenimiento y distribución en planta. Este modelo, a nivel de planta, se enfoca en la reducción de los costes relacionales de manutención por la asignación de las actividades, y de los posibles costes que tendrían que asumirse por la implementación de determinadas políticas de mantenimiento. El modelo ofrece un primer acercamiento para el diseño de planta, contemplando los criterios de mantenimiento, y, sin duda, abre un nuevo campo de investigación para la distribución de sistemas productivos, que involucran también las condiciones del ambiente. El modelo incluye, en lo que a mantenimiento se refiere, los costes de la intervención para un equipo ya sea solo o redundante, coste de instalación, coste de transporte de materiales de mantenimiento, coste por la actuación sobre un conjunto de equipos o grupos de intervención, y los costes por pérdidas de producción por un posible fallo. Incluye, también, un desarrollo que varía la tasa de fallos en función de las condiciones de operación en el ambiente de trabajo. Como aporte adicional, se presenta la función para el incumplimiento por restricciones geométricas, pero considerando la redundancia.

Se ha realizado un recorrido y análisis bibliográfico de diferentes propuestas experimentales, así como un estudio paramétrico para evaluar el comportamiento de los operadores y demás parámetros del algoritmo genético, con el fin de determinar los más adecuados para esta nueva clase de problemas. Entre los parámetros evaluados están: el operador cruce, mutación, generaciones y número de individuos, y ha quedado de manifiesto la variabilidad u oscilación y la convergencia hacia las mejores soluciones para ciertos valores de estos parámetros.

También, se ha realizado un estudio de la influencia de las consideraciones de redundancia en la distribución final, donde ha quedado establecido el incremento de los costes asociados al recorrido de materiales. Por su parte, la consideración de los agentes ambientales, involucra un incremento en los costes por la disminución de los MTBF de

los equipos de planta. Con respecto al número de actividades a ser consideradas, un incremento de éstas, implica la creación de grupos de actuación para minimizar costes asociados. Además, ha quedado evidente, que el modelo busca la condición de mantenimiento preventivo ya sea por la variación del horizonte de planificación o por los MTBF de los equipos.

Dicho lo anterior, este modelo puede ser empleado, para optimizar y resolver problemas de operatividad en instalaciones de plantas industriales, donde los costes de manutención, mantenimiento y de producción, así como los costes por paro, sean considerables. Este modelo representa una mejora en la etapa de prediseño de plantas industriales, debido a la multiplicidad de criterios que aplica, mejorando sensiblemente el resultado del layout final para estos nuevos factores considerados. Además, por la naturaleza del modelo propuesto, se puede adaptar, con ligeros cambios, a diferentes condiciones de producción, tales como instalaciones petroleras o petroquímicas, donde en vez de costes de manutención, existirán coste de bombeo. Adicionalmente, permite determinar los instantes más adecuados para la ejecución del mantenimiento, por la presencia de factores ambientales, como lo es la corrosión. Y por supuesto, se usa la redundancia para minimizar los riesgos de paros.

#### **7.4.- Trabajos futuros:**

- a) Es conveniente, a los efectos de poder estimar parámetros que cuantifiquen la fiabilidad total de la planta, incluir en este modelo de optimización, nuevas variables asociadas a la indisponibilidad o disponibilidad. Para lograr esto sería menester realizar el estudio de la distribución, como si se tratase de un sistema, e involucrar también la redundancia para ganar en fiabilidad total de planta.
- b) Siguiendo con la idea anterior, y con la finalidad de realizar un proceso de optimización más preciso que involucre aspectos tales como la efectividad del mantenimiento, análisis de causa de fallos, probabilidad de fallo, detalles estructurales y de construcción de la distribución, se debe ejecutar un estudio más completo que incluya los otros niveles descritos en la literatura para el mantenimiento, como también, métodos de decisión empleando cadenas de Markov para minimizar imprecisiones.
- c) En el desarrollo de los modelos para el mantenimiento y la distribución, en función de las condiciones ambientales, es importante hacer un estudio más detallado con la finalidad de crear modelos precisos, así como estimar en su justa dimensión los parámetros asociados a estos, los cuales representan las sensibilidades de los equipos a los diferentes agentes del entorno. Se debería, por tanto, desarrollar metodologías para evaluar de forma exacta la acción de esos agentes, en los equipos de cualquier instalación industrial, sin recurrir a las aproximaciones como la empleada. A su vez, resultaría interesante incluir

aspectos asociados con la estructura del edificio, para conseguir un mejor ambiente de trabajo, que minimice el efecto de posibles agentes negativos y cree un entorno adecuado de confort. La consideración de aspectos tales como la iluminación, ventilación, humedad, temperaturas, ruido, contaminación etc. es relevante.

- d) Con respecto a las penalizaciones geométricas, es necesario proponer nuevas formas de evaluar el incumplimiento, que den más flexibilidad al modelo propuesto. Se sugiere, por ejemplo, la utilización de más de dos equipos en el área de asignación y un rango de desarrollo para la actividad. Es importante identificar en el cromosoma, las asignaciones correspondientes de los equipos, lo que implicaría aplicar nuevos operadores y reparadores, en vista de la extensión del cromosoma.
- e) Para esta clase de modelos, que se representan como una suma ponderada, un aporte interesante sería incluir diferentes técnicas que conlleven a una estimación más precisa de los coeficientes asociados a la importancia relativa, para eliminar así, la subjetividad de la implementación por parte del experto. También, implementar nuevas técnicas de normalizado para las intensidades relacionales y costes en este nuevo tipo de funciones.
- f) Dado el entorno industrial actual, se sugiere incluir nuevos diseños para células de fabricación que incluyan en una misma célula diferentes equipos, así como de modelos dinámicos para la distribución, que a su vez incluyan aspectos del mantenimiento y del ambiente de trabajo. La asignación de diferentes equipos en una misma célula, implicaría diferentes tiempos medio de fallos (MTBF) para ésta.
- g) En cuanto al horizonte de planificación  $t$ , resulta necesario incluir, dentro del cromosoma propuesto, una variable que represente un rango de éste para la ejecución. Esto con la finalidad de ajustar mejor las acciones de mantenimiento en el proceso de optimización. Esto implicaría determinar una metodología que, independientemente de la extensión de los horizontes, determine el que genere menor coste.
- h) En relación a la metodología de optimización, con la expresa intención de mejorar su eficacia, resulta necesario el análisis, estudio e implementación, de todas aquellas técnicas innovadoras encaminadas a mejorar los procesos de búsqueda de los algoritmos genéticos, así como nuevas formas de implementación de los operadores, parámetros e hibridación con otras metodologías. También, la implementación de nuevas técnicas o modelos de optimización para la distribución en planta y mantenimiento.



# 8

## Anexos



## 8.1.- Manual de instalación LAYGEN+MANTENIMIENTO.

Para poder instalar adecuadamente el programa LAYGEN+MANTENIMIENTO y demás programas auxiliares, como el Microsoft .NET Framework Versión 1.1 e INAGRID, el ordenador deberá poseer en su sistema operativo los permisos de ADMINISTRADOR de programas de Microsoft.

### 8.1.1.- Instalación de Microsoft .NET Framework Versión 1.1

Para la instalación de Microsoft .NET Framework Versión 1.1, debe descargarse el archivo desde la dirección de Internet:

<http://www.microsoft.com/downloads/thankyou.aspx?familyId=262d25e3-f589-4842-8157-034d1e7cf3a3&displayLang=es>

Una vez abierto los cuadros de dialogo de instalación, haga doble clic sobre el archivo dotnetfx.exe (figura 8.1) y a continuación presione el icono “ejecutar” (figura 8.2).



Microsoft .NET Framework Versión 1.1

Figura 8.1.



Figura 8.2.

En el siguiente cuadro de dialogo presione el icono “si” para confirmar la instalación (figura 8.3).

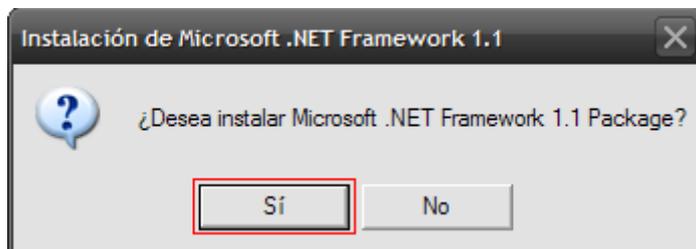


Figura 8.3.

A continuación verá la siguiente pantalla del proceso de instalación (figura 8.4).

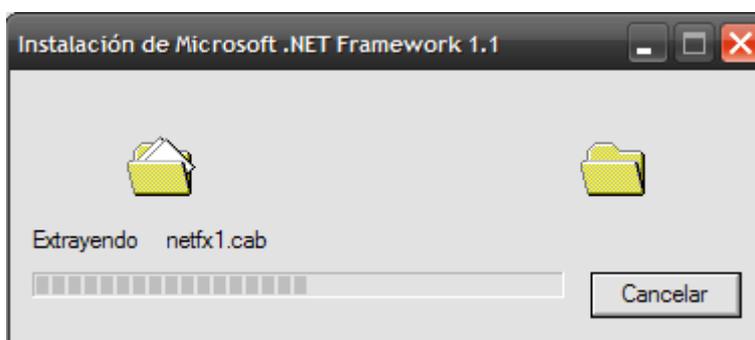


Figura 8.4.

Al finalizar el procedimiento, una pantalla mostrará la instalación satisfactoria de la aplicación **Microsoft .NET Framework Versión 1.1** (figura 8.5).

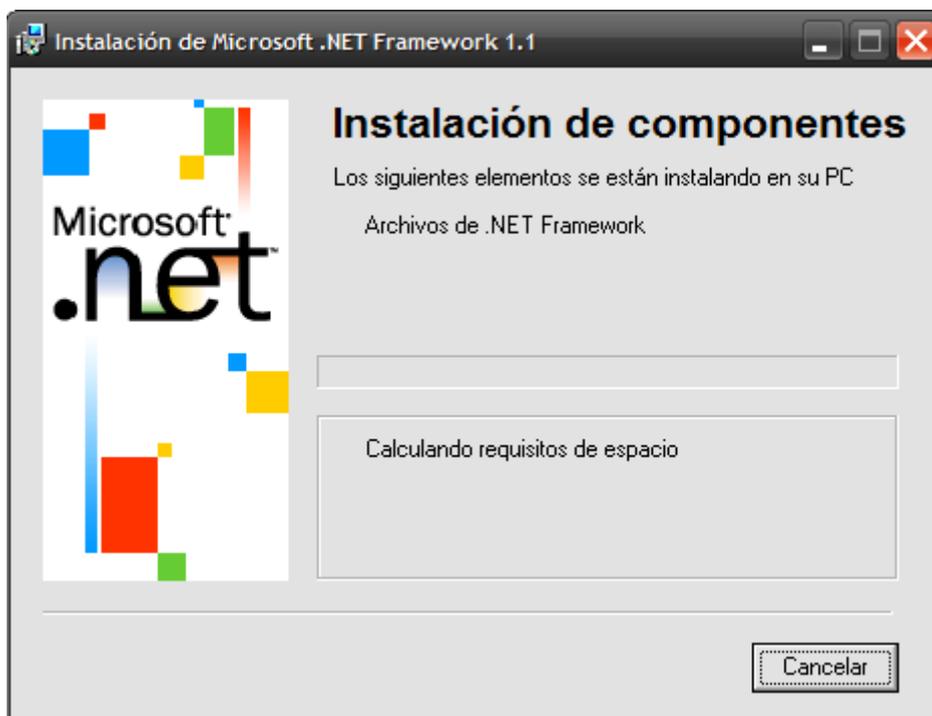


Figura 8.5.

### 8.1.2.-Instalación de INAGRID.

El INAGRID es una aplicación informática destinada a la gestión de activos, que permite realizar inventarios, visualizar resultados gráficos, crear jerarquías en función de parámetros definidos, así como la gestión de conceptos incluidos en bases de datos. Adicionalmente, permite al usuario, generar una aplicación Web para publicar en Internet toda la información posible.

En nuestro trabajo, la finalidad de implementar esta aplicación, es construir rejillas para declarar los datos de distribución y mantenimiento, en función del número de actividades con las que se desea ejecutar el ensayo de optimización.

Para la instalación de INAGRID busque la carpeta INAGRID-ACTIVX del programa de instalación, guardada en la carpeta raíz del software (figura 8.6).



Figura 8.6.

Luego ejecute el archivo de instalación en SETUP.EXE (figura 8.7).



Figura 8.7.

El programa de instalación lo guiará durante todo el proceso. En la pantalla siguiente, presione el icono "Next" (figura 8.8).

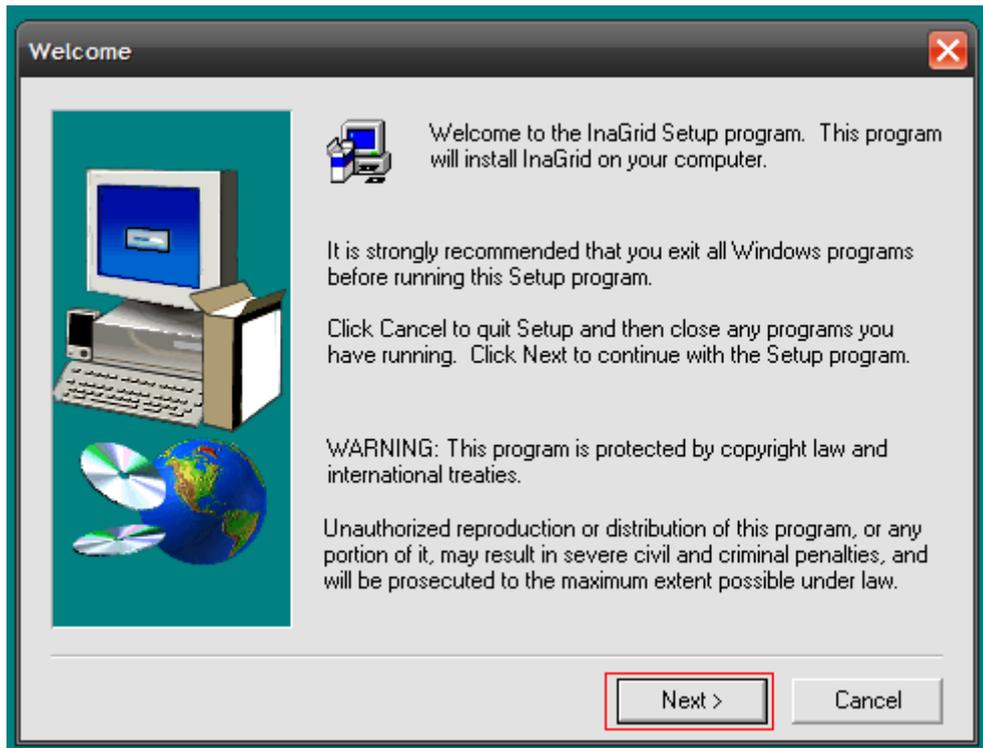


Figura 8.8.

Luego presione el icono “YES” para confirmar la instalación del INAGRID (figura 8.9).

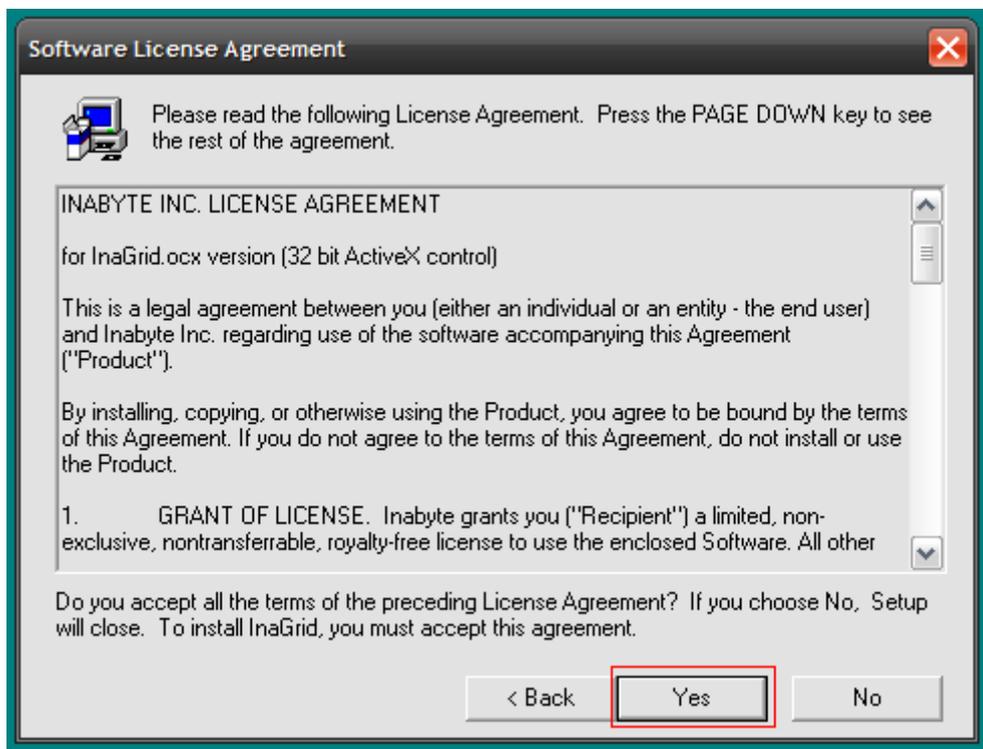


Figura 8.9.

Luego, escriba sus datos personales y no rellene el campo Serial, ya que el serial está incluido automáticamente en la aplicación de instalación (figura 8.10).

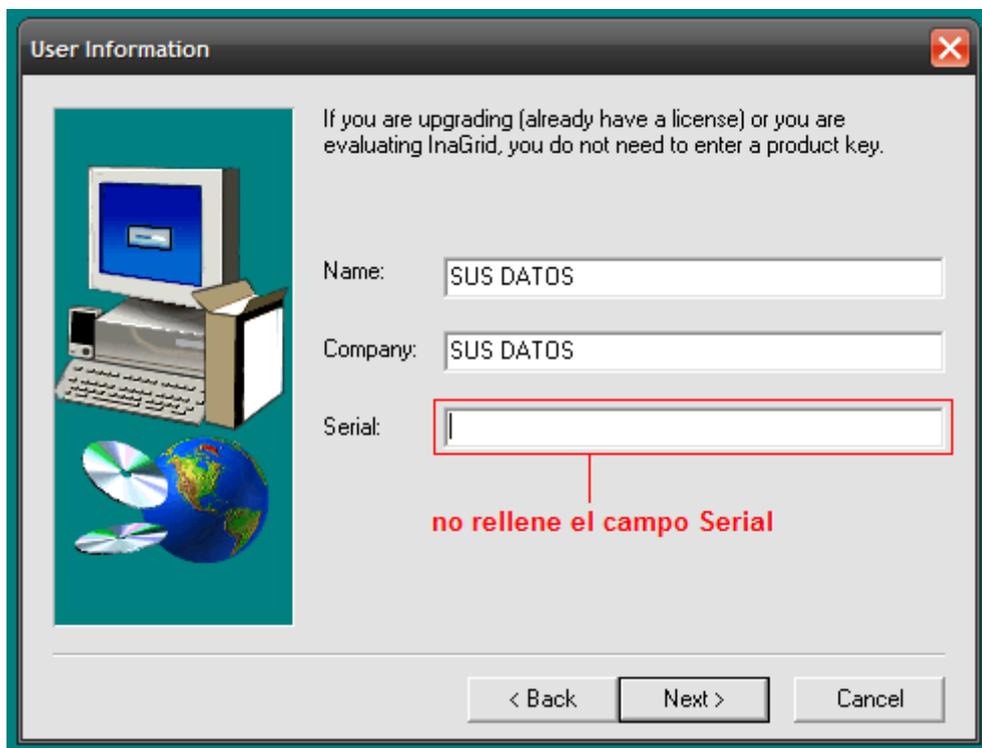


Figura 8.10

Posteriormente siga el proceso de instalación hasta este haya finalizarlo.

### 8.1.3.- Instalacion del programa LAYGEN + MANTENIMIENTO.

Para validar el modelo propuesto en el capítulo 6 e instalar el programa correspondiente, busque la carpeta Release en la carpeta principal del programa (figura 8.11).



Figura 8.11.

Busque el archivo Setup.exe y ejecútelo (figura 8.12).



Figura 8.12.

A continuación siga los pasos del proceso de instalación presionando el icono “siguiente” (figura 8.13).

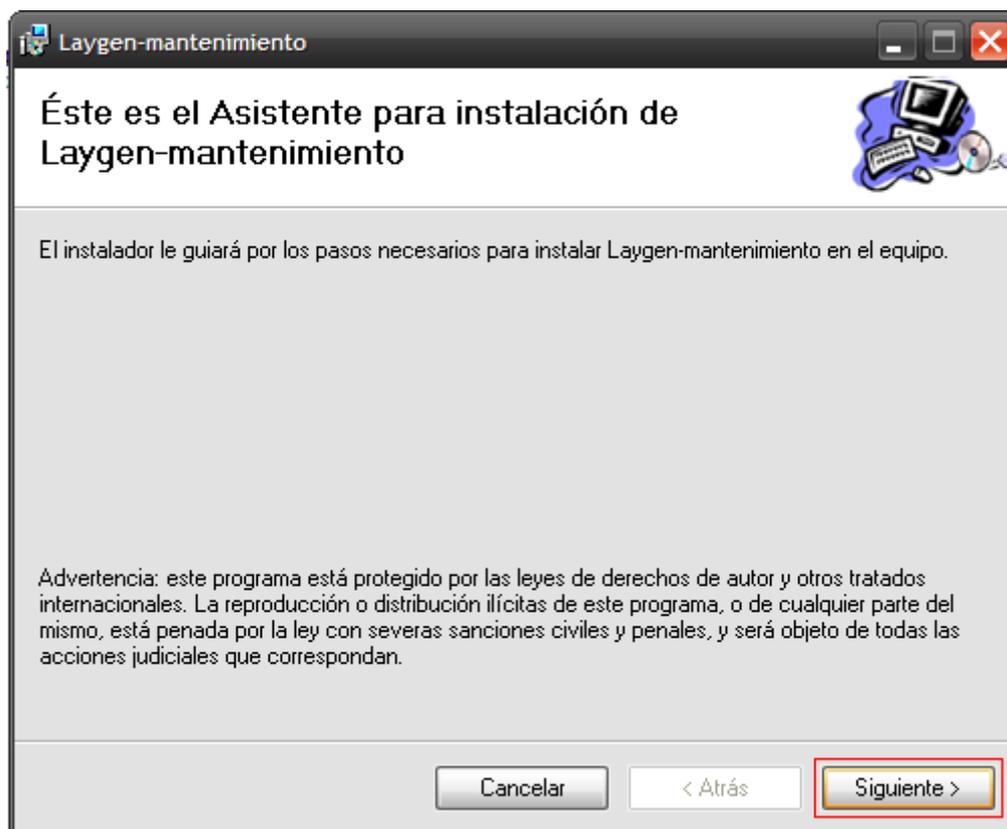


Figura 8.13

Ahora seleccione la carpeta en donde desea instalar el programa. Para seleccionarla presione el icono “Examinar”, luego presione “Siguiente” (figura 8.14).

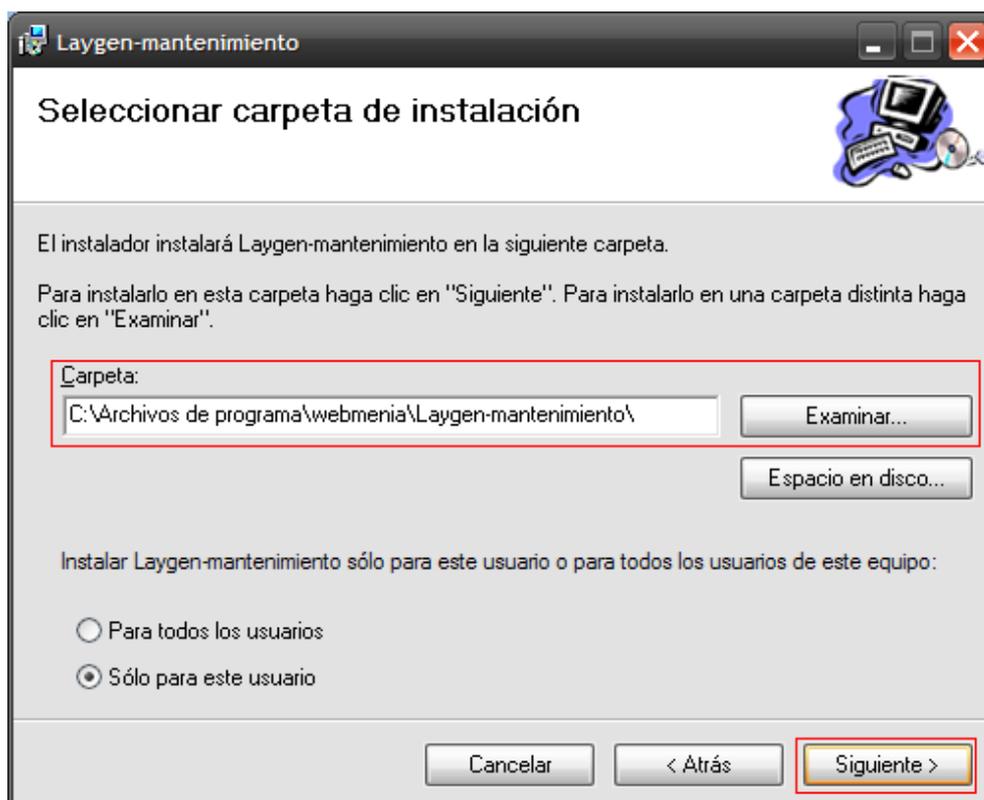


Figura 8.14.

Para confirmar la instalación presione el icono “siguiente” (figura 8.15).

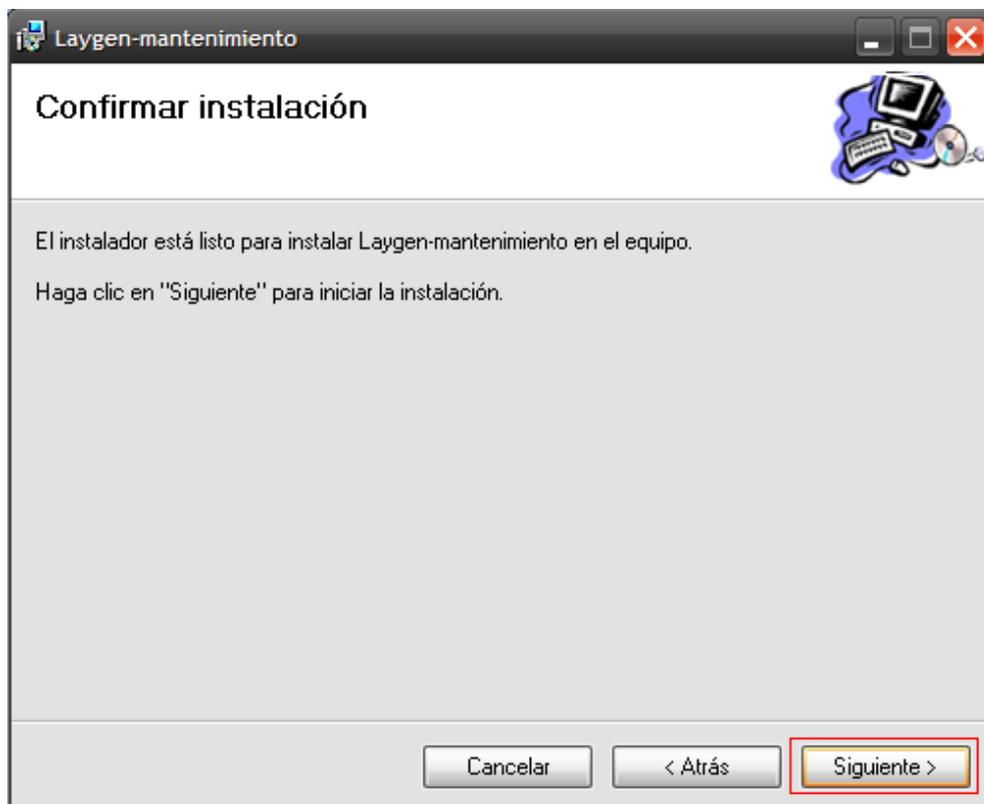


Figura 8.15

Luego aparece una pantalla que indica que se está ejecutando la instalación (figura 8.16).

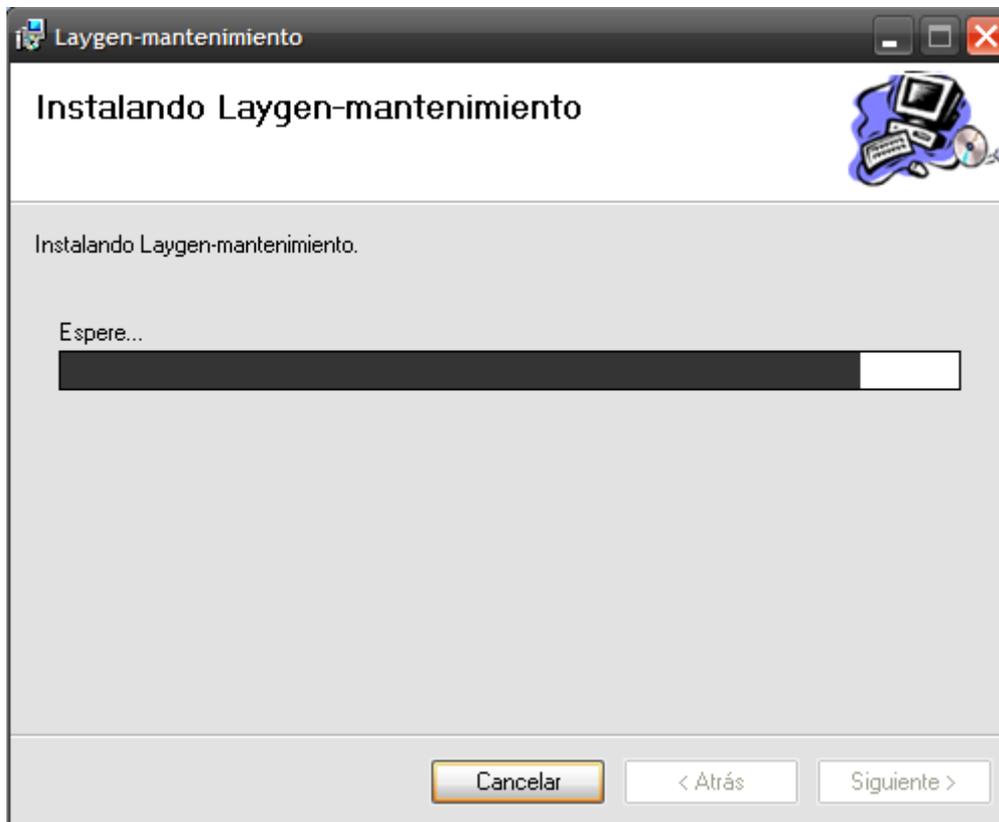


Figura 8.16.

Al finalizar, aparecerá un mensaje mostrando el resultado de la instalación, como se verá a continuación (figura 8.17).

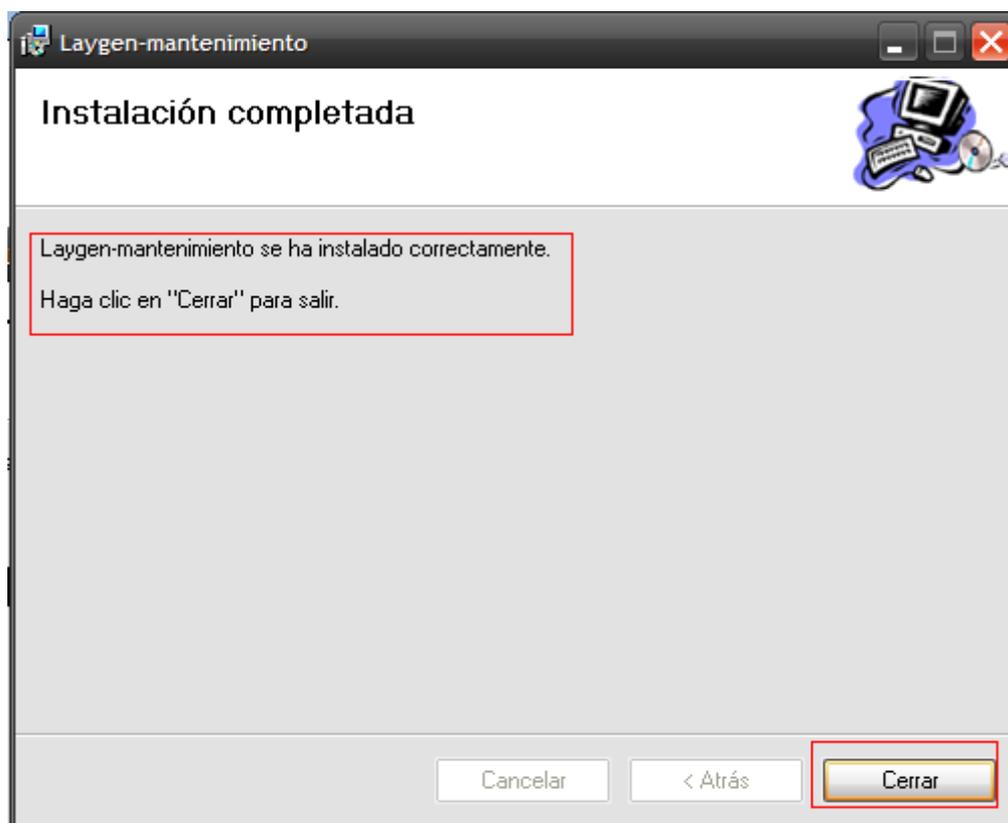


Figura 8.17

## 8.2.- Manual de uso del LAYGEN+MANTENIMIENTO.

Para ejecutar el programa, deberá buscar el archivo Laygen2.exe (figura 8.19) que se encuentra en la carpeta en la cual se ha instalado el programa de distribución y mantenimiento LAYGEN+MANTENIMIENTO (figura 8.18).

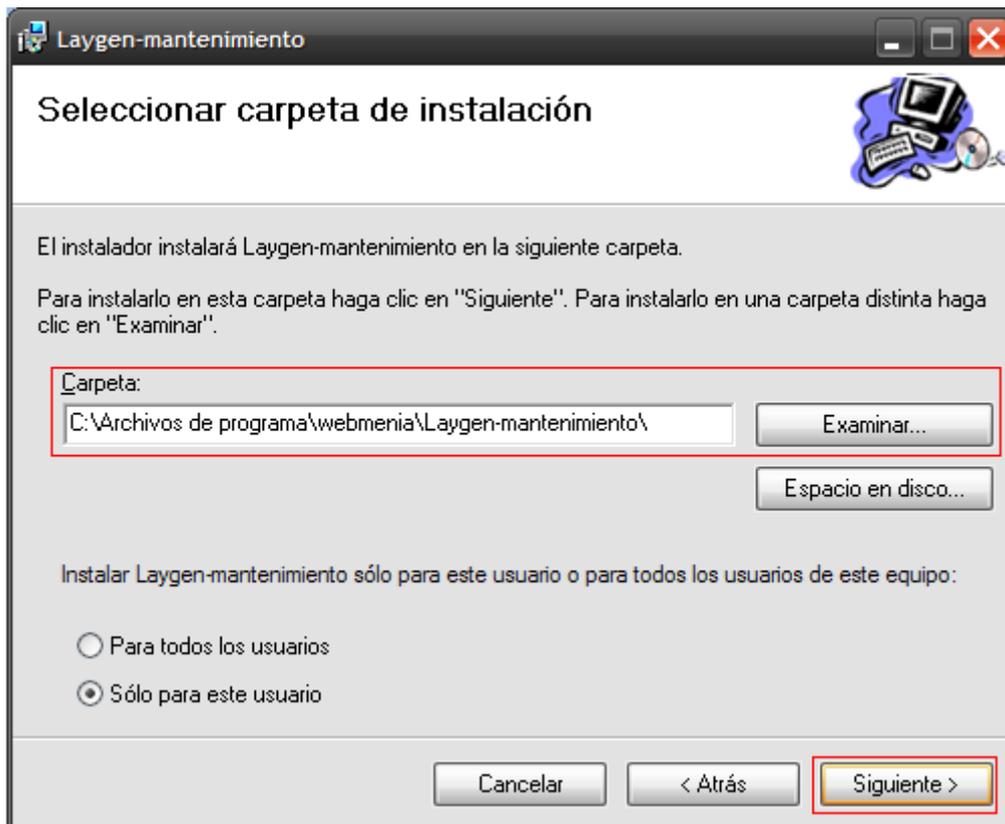


Figura 8.18

Haga doble clicks en el archivo LayGen2.exe (figura 8.19).

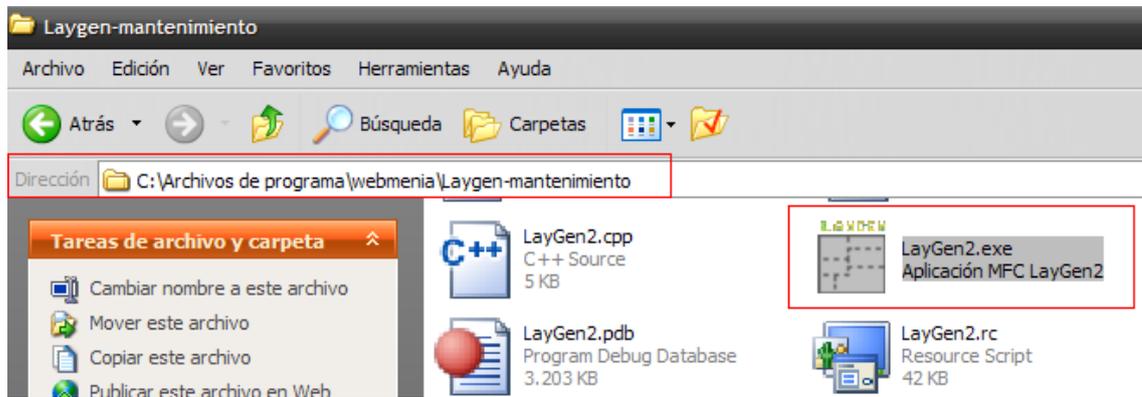


Figura 8.19.

Una vez abierto, aparecerá la siguiente pantalla de inicio de programa (figura 8.20).

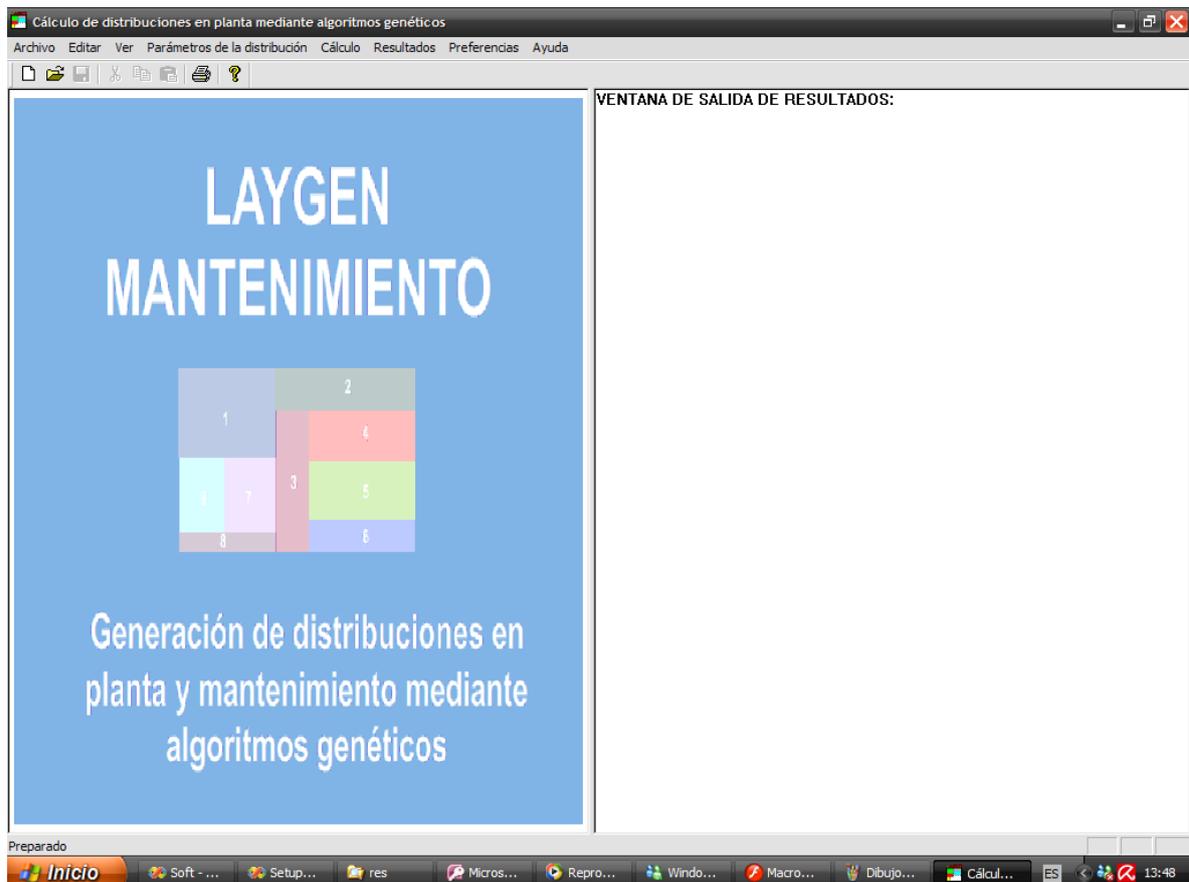


Figura 8.20.

Se busca el ícono “archivo” (figura 8.20) y una vez desplegado se selecciona “nuevo”, para comenzar la ejecución de un problema específico (figura 8.21).

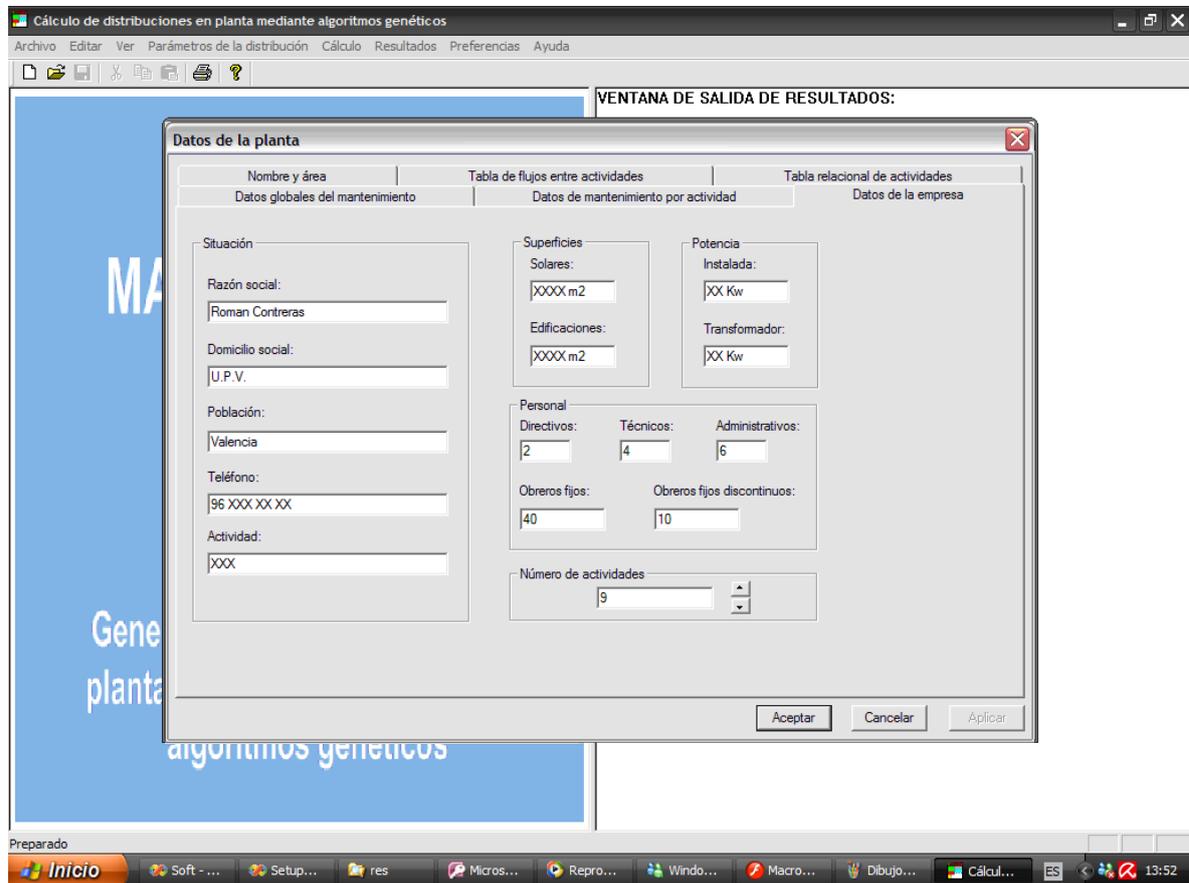


Figura 8.21.

Como se comenta en el capítulo 7, se van declarando los datos necesarios para la ejecución de un problema particular. Una vez terminado un cuadro de diálogo específico, se hace clic en otro cuadro de diálogo hasta completar todos los requerimientos del problema: la tabla del flujo entre actividades (figura 8.22), la tabla relacional de actividades (figura 8.23), los datos globales de mantenimiento (figura 8.24) y los datos de mantenimiento por actividad (figura 8.25). Es necesario declarar primero el número de actividades del problema, para que se configuren los demás cuadros de diálogo (figura 8,21).

En los capítulos 6 y 7, se especifican y describen las variables de entrada para todo el modelo.

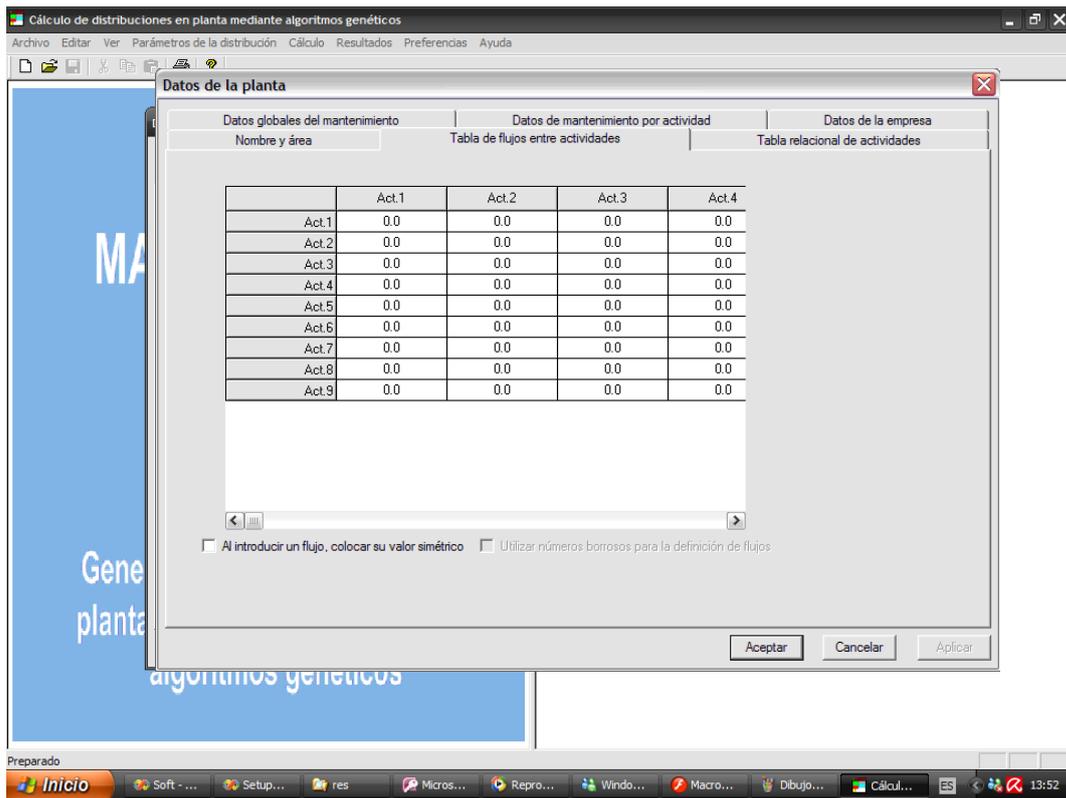


Figura 8.22.

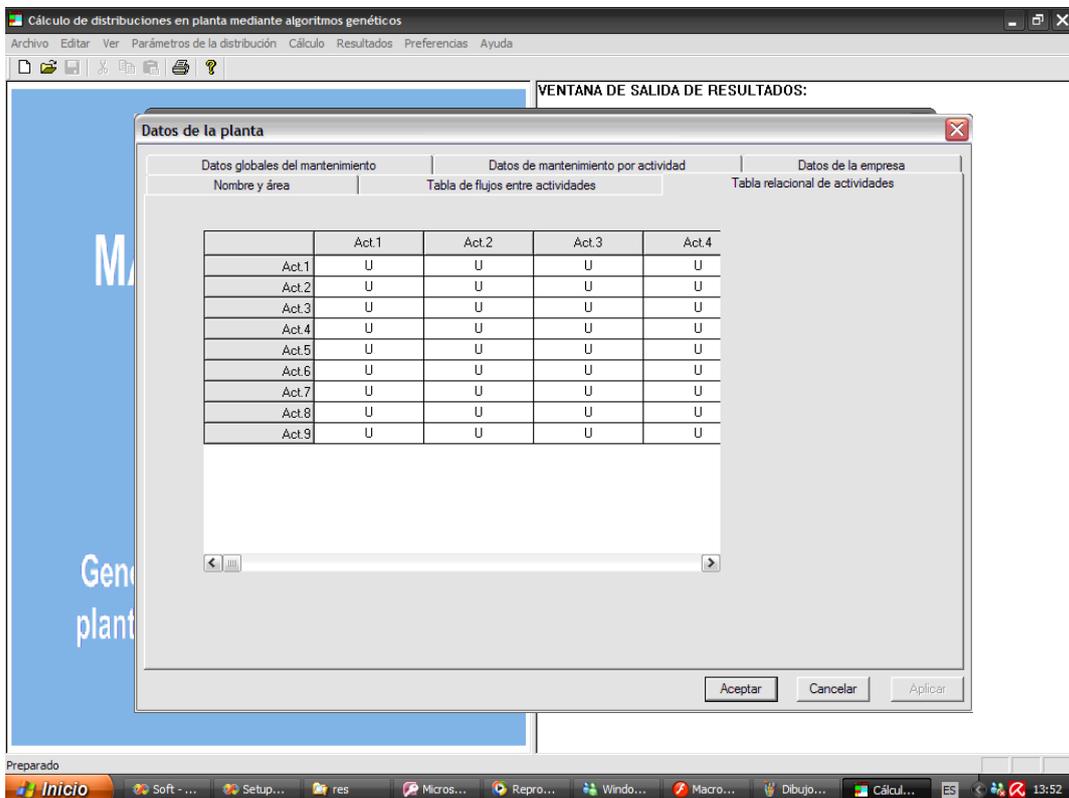


Figura 8.23

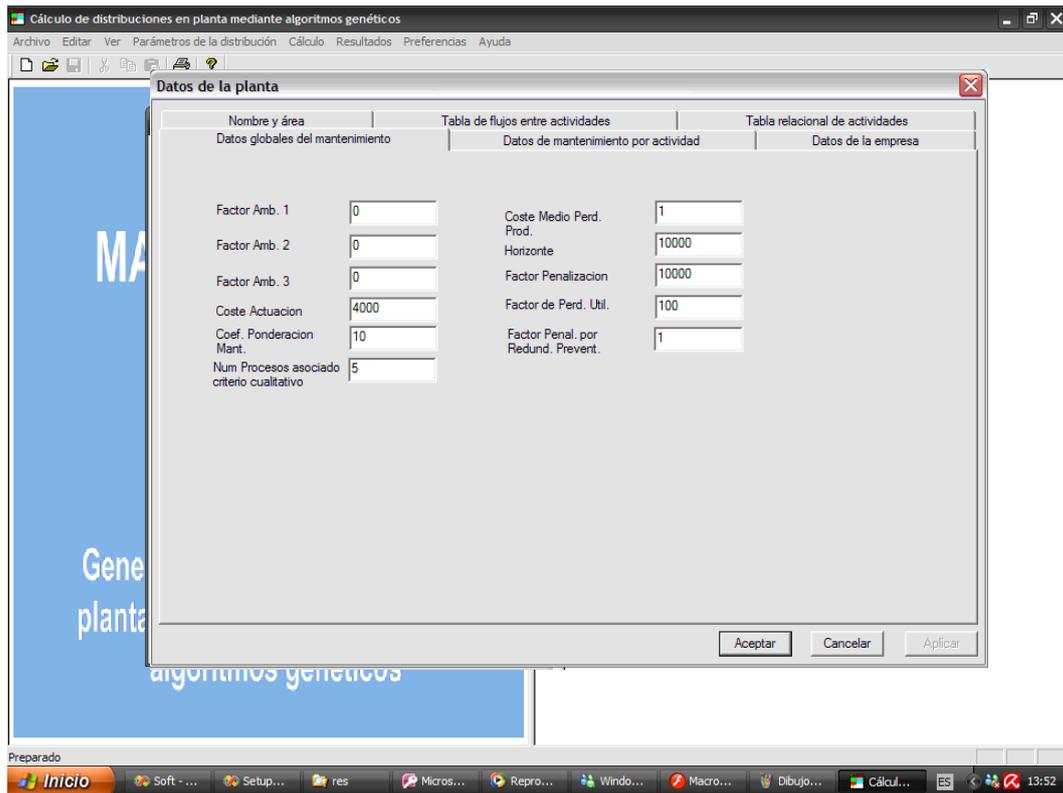


Figura 8.24.

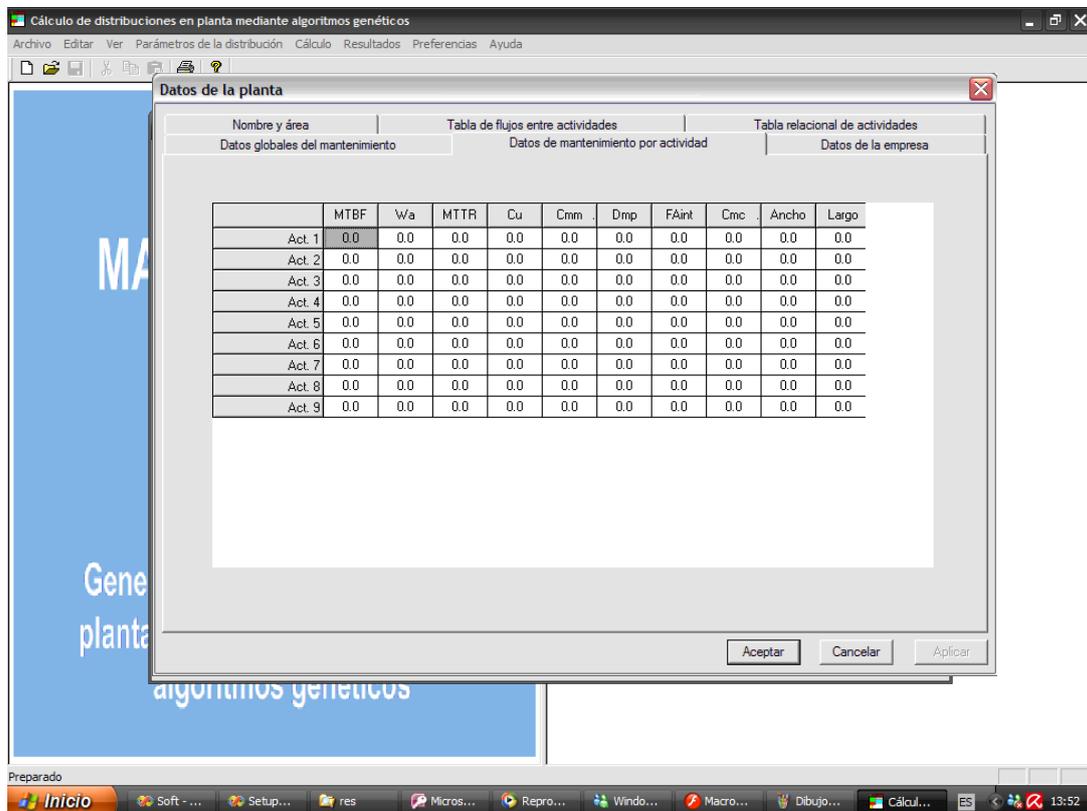


Figura 8.25

Una vez cargado todos los datos de la distribución y mantenimiento, el programa activa el icono “parámetros de la distribución” (arriba a la izquierda figura 8.20). Este paso permite declarar los datos relacionados con el algoritmo genético y demás parámetros considerados para la especie (figura 8.26) e individuo (figura 8.27).

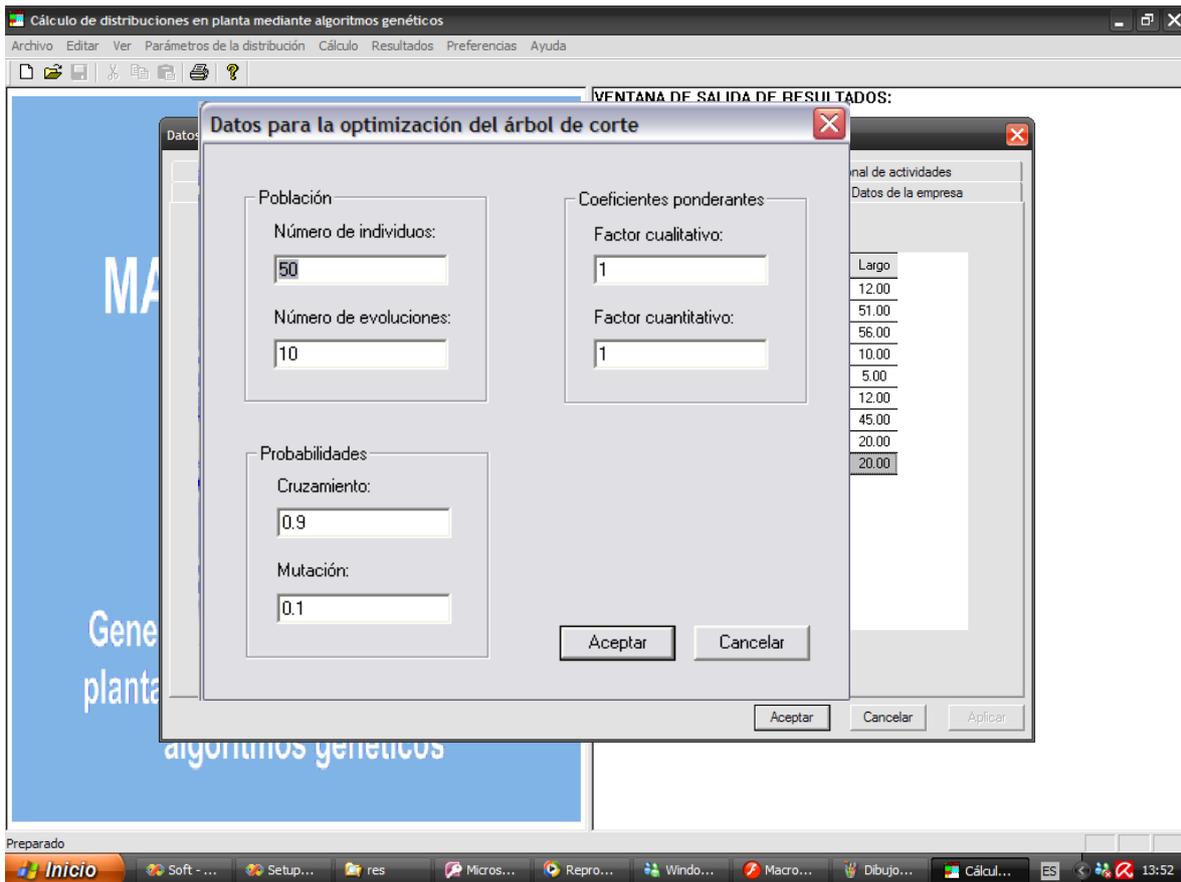


Figura 8.26.

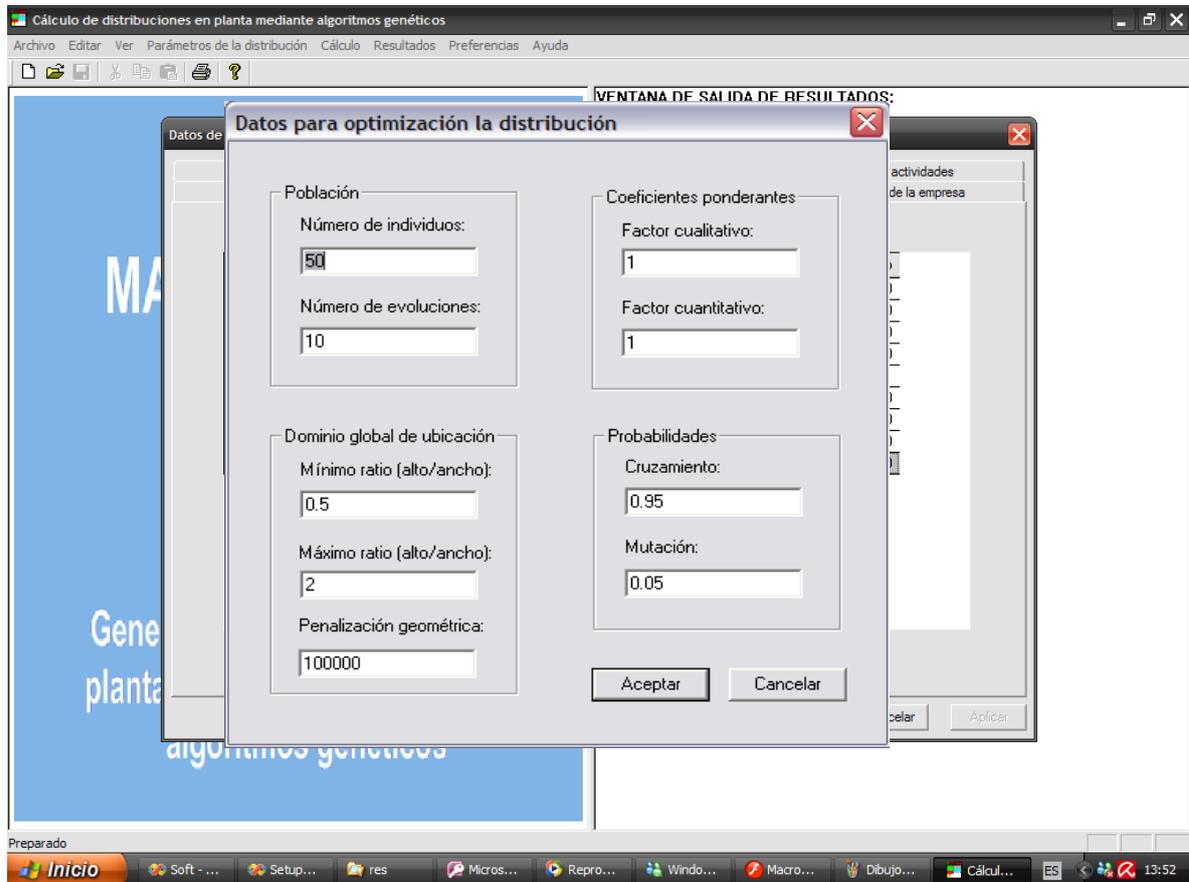


Figura 8.27.

Podemos declarar también en el icono “preferencias” (figura 8.20), los valores para la escala empleada en la tabla relacional de actividades (figura 8.28).

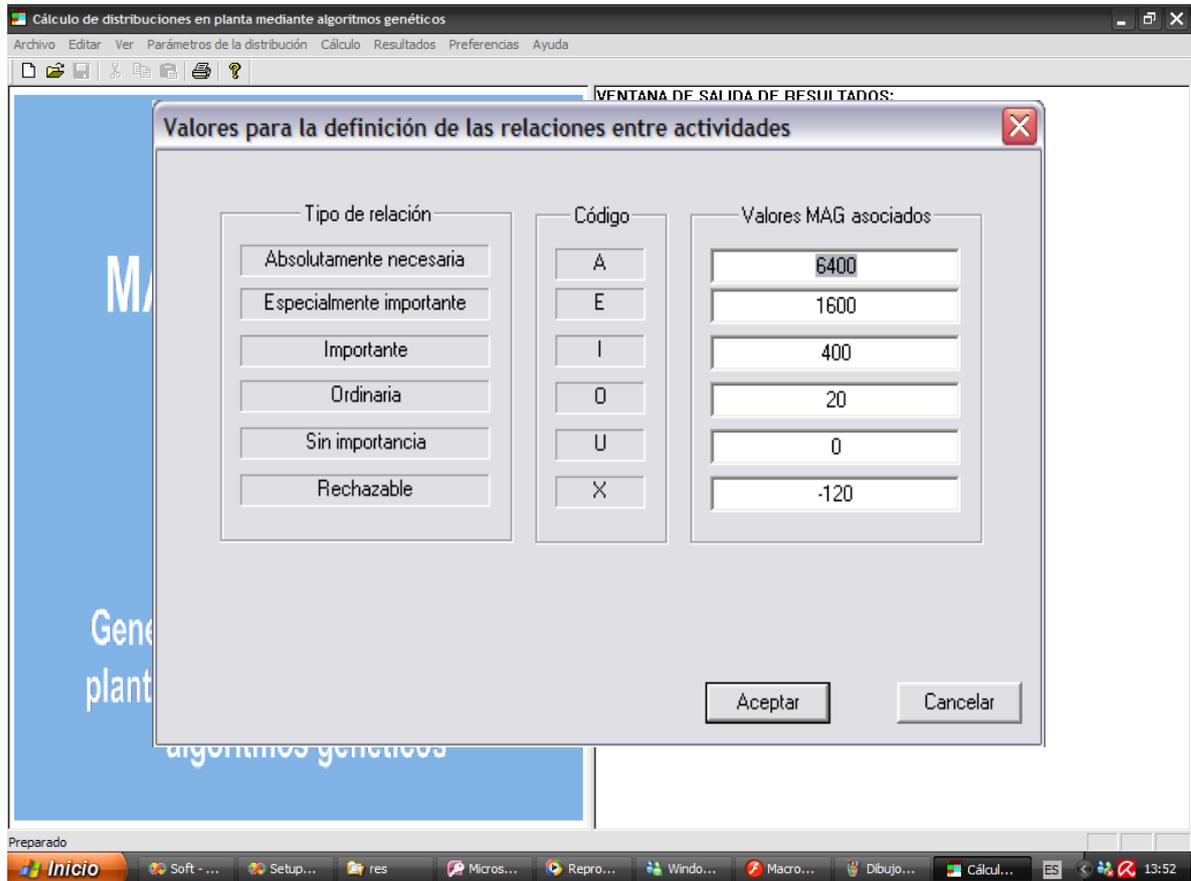


Figura 8.28.

Finalmente, para obtener los resultados, presionamos el ícono “cálculo” y el programa presenta (figura 8.29): el árbol de corte óptimo y la distribución de menor coste total (mantenimiento y distribución). Adicionalmente, los costes de distribución, relación alto ancho del dominio, coste geométrico, coste de mantenimiento y el total mínimo por generación, así como el número de actuaciones de mantenimiento y número de equipos en la actividad para la distribución de menor coste total (figura 8.29 y 8.30).

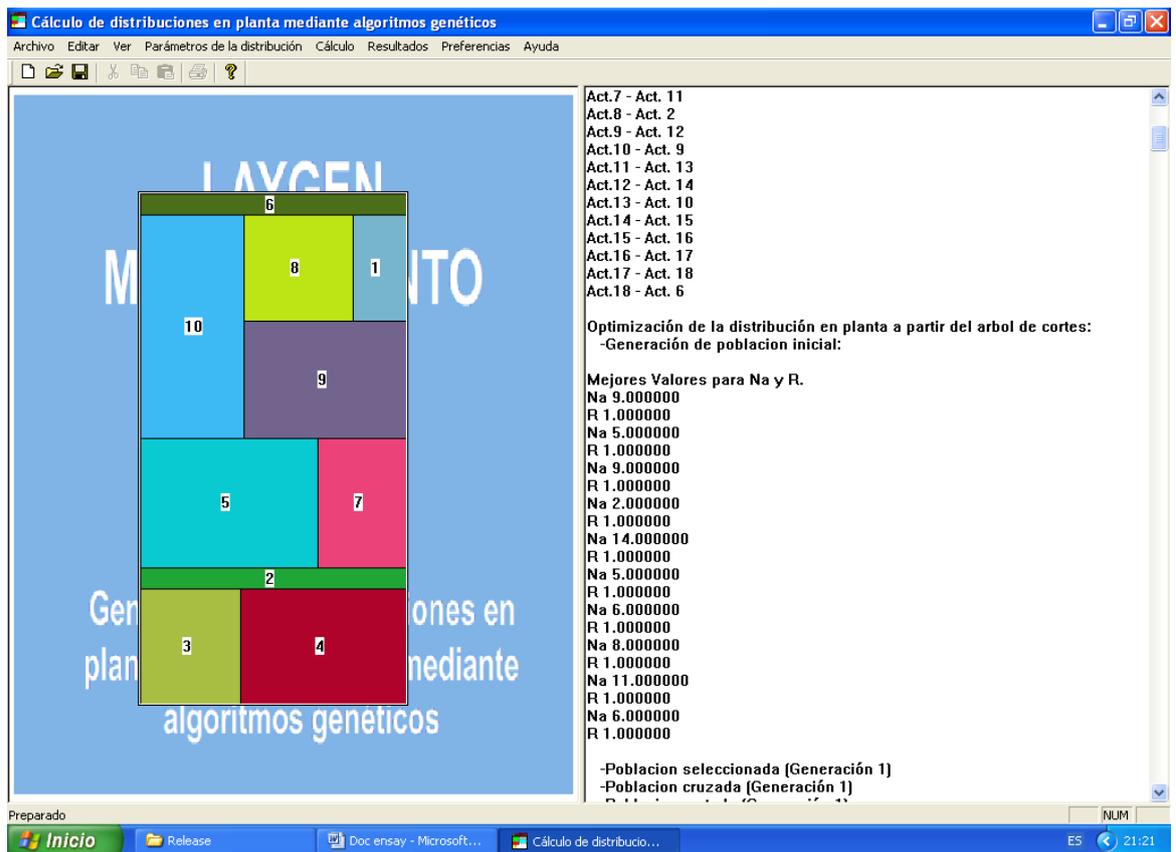


Figura 8.29.

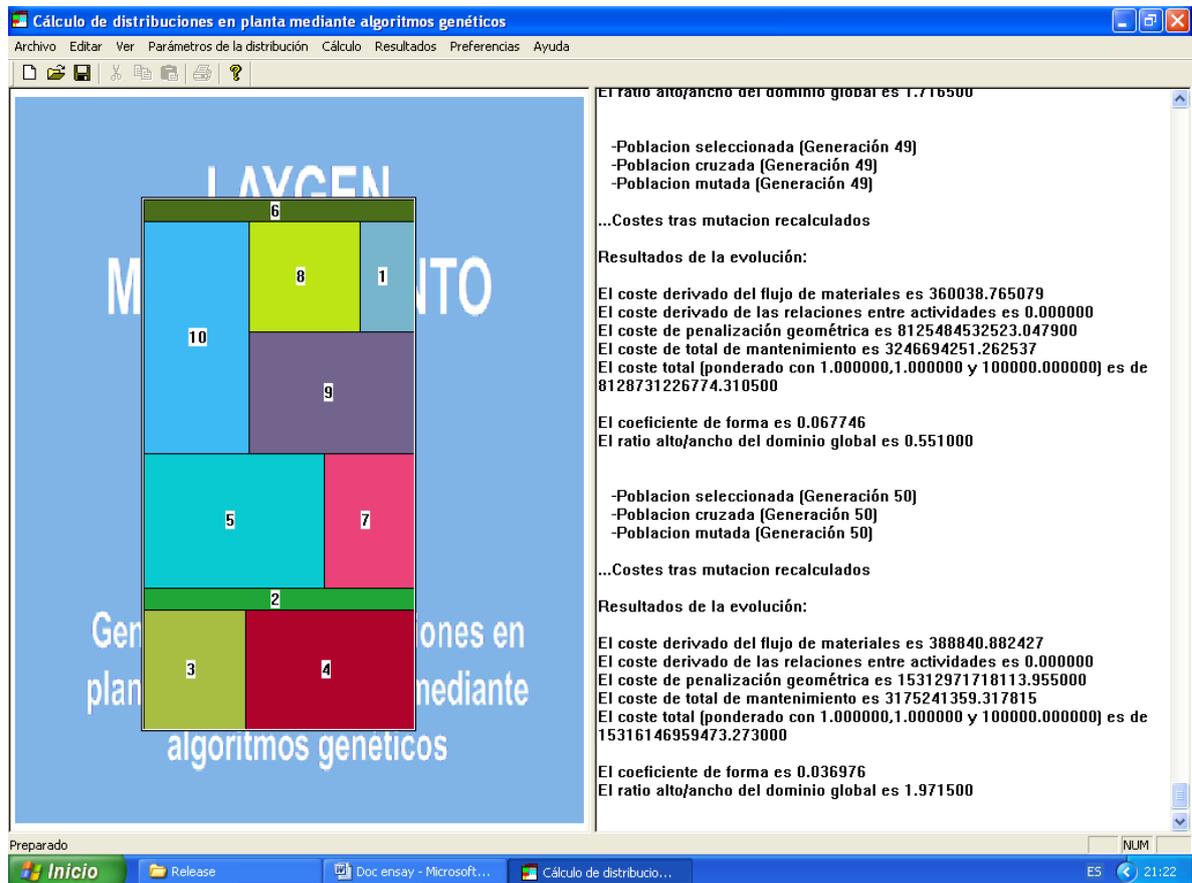


Figura 8.30.

# 9

## Bibliografía



## 9.- Bibliografía.

### **Abdinnour-Helm y Hadley (2000).**

Abdinnour-Helm Sue And Hadle. Scott W. D., “Tabu search based heuristics for multi-floor facility layout”. International Journal and Production Research, vol. 38, nº. 2, pp. 365-388, (2000).

### **Akbarov et al. (2008).**

Akbarov A., Christer A. H., Wang W., “Problem identification in maintenance modelling: a case study”. International Journal of Production Research. Vol. 46.nº 4, pp. 1031-1046, (2008).

### **Alcaide et al. (2001)**

Alcaide Marzal Jorge, Diego-Mas José, Artacho Miguel, “Diseño de Producto, el Proceso de Diseño”. Editorial Universidad Politécnica de Valencia, (2001).

### **Alcaide et al. (2004).**

Alcaide Marzal. Jorge, Diego-Mas José, Artacho Miguel, “Diseño de Producto, Métodos y Técnicas”. Editorial Universidad Politécnica de Valencia, (2004).

### **Alcaráz (2001).**

Alcaráz Soria Javier, “Algoritmos Genéticos para Programación de Proyectos con Recursos Limitados”. Departamento de Estadística e Investigación Operativa. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia, (2001).

### **AL-Hakim (2000a).**

AL-Hakim, “On solving facility layout problems using genetic algorithms”, International Journal of Production Research, vol. 38, nº. 11, pp. 2573-2582, (2000).

### **AL-Hakim (2000b).**

AL-Hakim, A note on “A genetic algorithm approach for multiple criteria facility layout design”, International Journal of Production Research, vol. 38, nº. 4, pp. 985-989, (2000b).

**Altinkilinc (2004).**

Altinkilinc Mert, "Simulation-Based Layout Planning of a Production Plant". Proceedings of the 2004 Winter Simulation Conference. Department of Engineering Management & Systems Engineering. Old Dominion University, Norfolk U.S.A, (2004).

**Ambrosino y Scutella (2005).**

Ambrosino D. and Scutella M.G., "Distribution network design: new problems and related models". European Journal of Operation Research n° 165, pp. 610–624, (2005).

**Amendola (2003).**

Amendola Luís, "Indicadores de Confiabilidad, Propulsores en la Gestión del Mantenimiento". Departamento de Proyectos de Ingeniería Universidad Politécnica de Valencia (2003).

**Amendola (2009).**

Amendola Luís, "Es hora de invertir en acciones concretas" Polivalencia, antiguos alumnos UPV, n°. 54, pp. 30-31, (2009).

**Anaya (1998).**

Anaya Durand Alejandro, "Implantación de Equipos en Plantas Petroquímicas. Recomendaciones para el Diseño del (PLOT-PLAN)", Instituto Mexicano del Petróleo, Ingeniería Química, mayo (1998).

**Apple and Deisenroth (1972).**

Apple J.M. and Deisenroth M. P, "A computerized plan layout analysis and evaluation technique (PLANET)" A.I.I.E Technical Papers, 23<sup>rd</sup> Conference, Anaheim, California U.S.A, pp. 121-127, (1972).

**Apple (1977).**

Apple. J.M., "Plant Layout and Material Handling", Third Edition. John Wiley & Sons, United States, (1977).

**Ansell y Phillips (1994)**

Ansell J., Phillips M., "Practical Methods for Reliability Data Analysis". Oxford Science Publication, (1994).

**Ansell y Phillips (1997).**

Ansell J., Phillips M., "Practical aspects of modelling of repairable systems data using proportional hazards models". Reliability Engineering and System Safety, 58, pp. 165-171, (1997).

**Aragonés (1997).**

Aragonés Pablo, “Aproximación a la toma de decisiones multicriterio en proyectos. Implementación de una metodología multicriterio y multiexperto, PRES II”. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia, (1997).

**Armour y Buffa (1963).**

Armour G.C. and Buffa E.S., “A heuristic algorithm and simulation approach to relative location of facilities”, *Management Science*, vol. 9, nº. 2, pp. 294-309, (1963).

**Azadivar (1998).**

Azadivar Farhad, “Use of Simulation in Optimization of Maintenance Policies”. Winter Simulation Conference, USA, (1998).

**Azadivar y Tompkins (1999).**

Azadivar Farhad and Tompkins George, “Simulation optimization with qualitative variable and structural model changes: A genetic algorithms approach”, *European Journal of Operational Research*, vol. 113, pp. 169-182, (1999).

**Azadivar (1999b).**

Azadivar Farhad, “Maintenance policy selection for JIT production systems”, *International Journal of Production Research*, vol. 37, nº. 16, pp 3725-3738, (1999b).

**Azadivar y Wang (2000).**

Azadivar Farhad and Wang John, “Facility Layout optimization using simulation and genetic algorithms”, *International Journal of Production Research*, vol. 38, nº. 17, pp 4369-4383, (2000).

**Badri (1999).**

Badri, M.A., “Combining the analytic hierarchy process and goal programming for global facility location-allocation problem”. *International Journal of Production Economic*. nº. 62, pp. 237–248, (1999)

**Balakrishnan et al. (2003).**

Balakrishnan J., Cheng Chun Hung., y otros, “A hybrid genetic algorithm for the dynamic plan layout problem”, *International Journal of Production Economics*, 86, pp.107-120, (2003).

**Barbosa et al. (2001).**

Barbosa Póvoa A. P., Mateus R., Novais. A. Q., “Optimal two-dimensional layout of industrial facilities”, *International Journal of Production Research*, vol. 39, nº. 12, pp 2567-2596, (2001).

**Barbosa et al. (2002).**

Barbosa Póvoa. A. P., Mateus. R., Novais. A. Q., “Optimal 3D layout of industrial facilities”. *International Journal of Production Research*, vol. 40, nº. 7, pp. 1669-1698, (2002).

**Barilá (1998).**

Barilá Rodríguez Daniel Oscar. “Contribución al Diagnóstico de Averías en Motores Diesel por Análisis de Vibraciones”. Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia, (1998).

**Beasley et al. (1993)**

Beasley D., Bull D., Martinn, “An overview of genetic algorithms: Part 1, fundamentals”. *University Computing*, 15:2, pp. 58-69, (1993).

**Beasley et al. (1993b)**

Beasley D., Bull D., Martinn, “An overview of genetic algorithms: Part 2, research topics”. *University Computing*, 15:4, pp. 170-181, (1993).

**Benson y Foote (1997)**

Benson B and Foote B. L., “Door FAST: A constructive procedure to optimally layout a facility including aisles and door locations based on an aisle flow distance metric”. *International Journal of Production Research*, vol. 35, nº 7, pp. 1825-1842, (1997).

**Boucly (1998).**

Boucly Francys, “Gestión del Mantenimiento”. AENOR Asociación Española de Normalización y Certificación, Madrid (1998).

**Boulard et al. (1998).**

Boulard T., Lamrani M. A., Roy J. C., Jaffrin. A., Bouirden. L, “Natural Ventilation by Thermal Effect in a One-Half Scale Model Mono-Span Greenhouse”, *American Society of Agricultural Engineers* 0001-2351/98/4103-773, vol. 41 (3), pp. 773-781, (1998).

**Boulard et al. (1999).**

Boulard T., Haxaire R., Lamrani M .A., Roy J. C., Jaffrin. A., “Characterization and Modelling of the Air Fluxes induced by Natural Ventilation in a Greenhouse”. J. Agric. Engng. Res., 74, pp. 135-144. (1999).

**Bowser (2004).**

Bowser Timothy, “Planning the Engineering Design of a Food Processing Facility”, Biological and Agricultural Engineering Dept. Oklahoma State University (2004).

**Bozer et al. (1994).**

Bozer Y.A., Meller R.D., Steven Erlebacher, “An improvement-type Layout algorithm for single and multiple-floor facilities”, Management Science, vol. 40, n°. 7, pp. 918-932, (1994).

**Buffa (1955).**

Buffa E.S, “Sequence analysis for functional layouts”. The Journal of Industrial Engineering. MAR, pp. 12-25, (1955).

**Buffa et al. (1964).**

Buffa E.S., Amour G.C. and VollmannT.E, “Allocating facilities with CHAFT”. Harvard Business Review, vol. 42, n° 2, pp. 136-159, (1964).

**Burker y Smith (1998).**

Burker E.K. and Smith A, “A Memetic Algorithm to Schedule Planned Grid Maintenance”. University of Nottingham, University Park (NG7 2RD) Nottingham, Great Britain (1998).

**Burker y Smith (1998b).**

Burker Edmund and Alistair Smith, “A Memetic Algorithm for the Maintenance Scheduling Problem”. In Proceedings of International Conference on Neural Information Processing and Intelligent Information Systems, vol. 1, pp. 469-473, (1998).

**Cantoni et al. (2000).**

Cantoni M., Marseguerra M., Zio E., “Genetic algorithms and Monte Carlo simulation for optimal plant design”, Reliability Engineering and System Safety, 68, pp. 29-38. (2000).

**Carrasco y Sanchis (2000).**

Carrasco R. García y Sanchis J. “Métodos de Simulación Monte Carlo y sus Aplicaciones”. Servicios de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, (2000).

**Castell et al. (1998).**

Castell C.M.L., Lakshmanan R., Skilling. J. M., Bañares-Alcántara. “Optimisation of Process Plant Layout using Genetic Algorithms”. Computers & Chemical Engineering, vol 22 Suppl., pp. S993-S996, (1998).

**Chacón (2001).**

Chacón Velasco. Jorge Luís. “Diagnóstico de fallos mediante la utilización de información incompleta e incierta. Aplicación a motores Diesel”, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos. Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia (2001).

**Chan y Leonard (1993).**

Chan. Jack-Kang, Leonard Shaw “Modelling Repairable Systems with Failure Rates That Depend on Age & Maintenance”, IEEE Transaction on Reliability, vol. 42, n°. 4, (1993).

**Chan y Fwa (1994).**

Chan. W.T. and Fwa. T.F., “Road-Maintenance Planning Using Genetic Algorithms. I: Formulation”. Journal of Transportation Engineering. Vol. 120, n°. 5, pp. 693-709, (1994).

**Chan y Fwa (1994b).**

Chan. W. and Fwa T, “Road-Maintenance Planning Using Genetic Algorithms. II: Analysis”. Journal of Transportation Engineering, vol. 120, n°. 5, pp. 710-722, (1994).

**Chan et al. (2008).**

Chan. F.T.S., Lau. K. W., Chan. L. Y. and Lo. V. H., “Cell formation problem with consideration of both intracellular and intercellular movements”. International Journal of Production Research, vol. 46, n°. 10, pp.2589-2620, (2008).

**Chatain (1993).**

Chatain J., “Diagnostic par système expert”. Editions Hormès, Paris, (1993).

**Cheng y Gen (1998).**

Cheng Runwei and Gen Mitsuo. "Loop Layout Design Problem in Flexible Manufacturing Systems Using Genetic Algorithms". Computers & Industrial Engineering, vol. 34, n.º. 1, pp. 53-61, (1998).

**Chelbi (1999).**

Chelbi Anis, "An optimal inspection strategy for randomly failing equipment". Reliability Engineering and System Safety, 63, pp.127-131, (1999).

**Chunlu y Yoshito (1997).**

Chunlu Liu and Yoshito Itoh, "Maintenance Strategy Optimization of Bridge Decks Using Genetic Algorithm". Journal of Transportation Engineering, vol. 123, n.º. 2, pp. 91-100, (1997).

**Clayton et al. (1975).**

Clayton F., Brasington J., Donald R., "Layout Guide for Small Meat Plants". Marketing Research Report N.º 1057, United States Department of Agriculture in cooperation with Oklahoma Agricultural Experiment Station, United States (1975).

**Cloquell (1999).**

Cloquell Ballester Vicente Agustín, "Contribución al Desarrollo de un Modelo Generalizado y Sistemático de Localización de Actividades Económicas", Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia (1999).

**Contero (1995).**

Contero González. Manuel. "Aportación a la Optimización del Diseño Geométrico de Plantas Industriales. Distribución en Planta", Departamento de Expresión Gráfica en Ingeniería, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia (1995).

**Contini (1995).**

Contini S., "A new hybrid method for fault tree analysis". Reliability Engineering and System Safety, 49, pp. 13-21, (1995).

**Creus (1991).**

Creus Solé Antonio. "Fiabilidad y seguridad de procesos industriales". Marcombo Boixareu Editores, España (1991).

**Cross (2002).**

Cross Nigel, “Métodos de Diseño, estrategias para el Diseño de Productos” . Editorial Limusa Willey, (2002).

**Das (1993).**

Das D. J, “A facility layout method for flexible manufacturing systems”, International Journal of Production Research, vol. 31, n°.2, pp. 279-297, (1993).

**Deb y Bhattacharyya (2003).**

Deb S.K. and Bhattacharyya B. “Facilities layout planning based on Fuzzy multiple criteria decision-making methodology”, International Journal Production Research, vol. 41, n°. 18, pp. 4487-4504, (2003).

**Dekker (1996).**

Dekker Rommert. “Application of maintenance optimization models: a review and analysis”. Reliability Engineering and System Safety, 51 , pp 229-240, (1996).

**Dekker y Philip(1998).**

Dekker Rommert and Philip Scarf, “On the impact of optimisation model in maintenance decision making: the state of the art”. Reliability Engineering and System Safety, 60, pp.111-119, (1998).

**Del Brío et al. (2004).**

Del Brío González, Fernández Sánchez Esteban, Junquera Cimadevilla Beatriz., Vázquez Ordás Camilo José, “Implantación Conjunta de ISO 14001-ISO-9000-Prácticas de Prevención de Riesgos Laborales en las Empresas Industriales Españolas: Un Estudio Descriptivo. “ Dirección y Organización: Revista de dirección, organización y administración de empresas. ISSN 1132-175X, n° 30, pp. 145-158. (2004).

**Diego-Más (2006).**

Diego-Más José Antonio, “Optimización de la Distribución en Planta de Instalación Industriales Mediante Algoritmos Genéticos. Aportación al Control de la Geometría de las Actividades. Departamento de Proyectos de Ingeniería, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia, (2006).

**Domínguez et al. (1995).**

Domínguez M. José A., Álvarez G, M<sup>a</sup> José, González G. Santiago, “Dirección de Operaciones, Aspectos Estratégicos de la Producción y los Servicios”, McGraw-Hill, Madrid (1995).

**Dunker et al. (2003).**

Dunker T., Radons G., Westkämper E., “A coevolutionary algorithm for facility layout problem”. *International Journal of Production Research*. Vol. 41, n°. 15, pp. 3479-3500, (2003).

**Dutta y Sahu (1982).**

Dutta K.N. and Sahu S., “A multi-goal heuristic for facilities design problems: MUGHAL”. *International Journal of Production Research*. vol. 20, n°. 2, pp. 147-154, (1982).

**Evans y Anderson (1990).**

Evans J.R. and Anderson D.R., “Applied Production and Operations Management”. West (1990).

**Fiori de Castro y Lecchesi (2006).**

Fiori de Castro Hélio., Lucchesi Cavalca Katia., “Maintenance resources optimization applied to a manufacturing system”. *Reliability Engineering and System Safety*. 91 pp. 413–420 (2006).

**Fongel (1994).**

Fongel David, “An Introduction to Simulated Evolutionary Optimization”. *IEEE Transactions on Neural Networks*, vol 5, n°. 1, (1994).

**Fortenberry y Cox (1985).**

Fortenberry J.C. and Cox J.F., “Multiple criteria approach to the facilities layout problem”, *International Journal of Production Research*. vol. 23, no. 4, pp. 773-782, (1985).

**Francis et al. (1983).**

Francis R.L., McGinnis L.F. and White J.A., “Locational analysis”. *European Journal of Operation Research*” n° 12, pp. 220–252, (1983).

**Freeman (1994).**

Freeman James, “Simulated Neural Networks with Mathematical”. *Loral Space Information Systems and University of Houston* (1994).

**Fygueroa (1994).**

Fygueroa Salgado Simón, “Diagnóstico de Motores de Encendido por Compresión de Automoción Mediante el Análisis del Lubricante” . Departamento de Motores Térmicos, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia, (1994).

**Gallardo (2004).**

Gallardo Bemell Sergio, “Determinación del Espectro Primario de Rayos X para Radiodiagnóstico Mediante Espectrometría Compton, Aplicando Técnicas de Deconvolución y Simulación por Monte Carlo”. Departamento de Ingeniería Química y Nuclear. Tesis Doctoral UPV, (2004).

**Gau y Meller (1999).**

Gau K.I. and Meller R., “An interactive facility layout algorithm”. International Journal Production Research, vol 37, nº 16, pp 3739-3758, (1999).

**Giddens y Yadav (1994).**

Giddens T. D. and Yadav S. B., “The Development and Evaluation of an Improved Genetic Algorithm Based on Migration and Artificial Selection”, IEEE Transactions on Systems, man and cybernetics, vol. 24, nº. 24, pp. 73-86, (1994).

**Glover et al. (1985).**

Glover F, McMillan C and Novick. B., “Interactive decision software and computer graphics for architectural and space planning”, Annals of Operations Research, vol. 5, nº. 6, pp. 557-573, (1994).

**Glover (1986).**

Glover F., “Future paths for integer programming and links to artificial Intelligence”. Computer and Operations Research, nº. 13, pp. 533-549, (1986).

**Glover (1989a).**

Glover F., “Tabu Search – Part I”, ORSA Journal on Computing 1, pp.190-206, (1989).

**Glover (1989b).**

Glover F., “Tabu Search – Part II”, ORSA Journal on Computing 2, pp. 4-32, (1989).

**Glover et al. (1995).**

Glover F., Laguna M., Kelly J., “Tabu search for the multilevel generalized assignment problem”. European Journal of Operational Research, vol. 82, nº 1, pp. 176-189, (1995).

**Goldberg (1989).**

Goldberg David, “Genetic Algorithms in Search Optimization and Machine Learning”. Addison-Wesley Publishing Company, Inc. University of Alabama (1989).

**Gómez-Senent (1997).**

Gómez-Senent E. M., “El proyecto de diseño en Ingeniería. Universidad Politécnica de Valencia”. Servicio de Publicaciones. Valencia (1997).

**Gómez et al. (2003).**

Gómez A., Fernández Q., otros, “Using genetic algorithms to resolve layout problems in facilities where there are aisles”. *International Journal of Production Economics*, nº. 84, pp. 271-282, (2003).

**González (2001).**

González Cruz M<sup>a</sup> Carmen, “Implantación y Aplicación de una Estrategia General de Resolución de Problemas, Basada en la Teoría de las Dimensiones del Proyecto, para la Elaboración de una Metodología de Resolución de Layout”, Departamento de Proyectos de Ingeniería, Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia, (2001).

**González (2005).**

González Garcia José Luís. “Aportación a la Optimización Multiobjetivo del Diseño de Plantas Industriales, Distribución en Planta”, Departamento de Proyectos de Ingeniería, Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia, (2005).

**Grefenstette (1986).**

Grefenstette John J., “Optimization of Control Parameters for Genetic Algorithms”. *IEEE Transactions on Systems, man and cybernetics*, vol. 16, nº 1, pp. 122- 128, (1986).

**Guida (1995).**

Guida Maurizio, “Reliability Analysis of accelerated Life-Test Data from a Repairable System”. *IEEE Transaction on Reliability*, vol. 44, nº .2, (1995).

**Gupta et al. (1996).**

Gupta Y., Gupta M., Kumar A. and Sundaram C., “ A genetic algorithm-based approach to cell composition and layout design problems”. *International Journal of Production Research*, vol. 34, nº. 2, pp. 447-782, (1996).

**Hamamoto et al. (1999).**

Mamamoto S., Yih Y., Salvendy G., “Development and validation of genetic algorithms-based facility layout- a case study in the pharmaceutical industry”. *International Journal of Production Research*, vol. 37, nº. 4, pp. 749-768, (1999).

**Hambright y Benson (1997).**

Hambright R. and Benson H., “Diagnostic of Diesel engines using exhaust smoke and temperature”. SAE paper 970399, (1997).

**Harmonosky y Tothero (1992).**

Harmonosky C.M. and Tothero G.K., “A multi-factor plant layout methodology”, International Journal of Production Research. vol, 30, n° 8, pp.1773-1780, (1992).

**Hassan et al. (1986).**

Hassan M.M.D., Hogg G.L., Donald Smith, “SHAPE: A construction algorithm for area placement evaluation”. International Journal of Production Research, vol. 24, n°. 5, pp. 1283-1295, (1986).

**Hauser y Chung (2006).**

Hauser Karina and Chung Chen H., “Genetic algorithms for layout optimization in crossdocking operations of a manufacturing plant”. International Journal of Production Research, Vol. 44, n°. 21, pp. 4663–4680 (2006).

**Heragu y Kusiak (1991).**

Heragu S. and Kusiak A., “Efficient models for the facility layout problems” European Journal of Operational Research, vol. 53, pp. 1-13, (1991).

**Heragu (1997).**

Heragu S., “ Facilities Design”. Editorial: PWS Publishing Company, Boston. (1997).

**Hicks (2003).**

Hicks Christian, “A Genetic Algorithm tool for design manufacturing facilities in capital goods industry”. Faculty of Engineering, Newcastle U.K, (2003).

**Hillier (1963).**

Hillier F.S., “Quantitative tools for plant layout analysis”, The Journal of Industrial Engineering, vol. 14, n° 1, pp 33-40, (1963).

**Hontelez et al.(1996).**

Hontelez Jan A.M., otros, “Optimum condition-based maintenance policies for deteriorating systems with partial information”, Reliability Engineering and System Safety, 51, pp 267-274, (1996).

**Hsu (1999).**

Hsu Lie-Fern, “Simultaneous determination of preventive maintenance and replacement policies in a queue-like production system with minimal repair”. Reliability Engineering and Systems Safety, 63, pp. 161-167, (1999).

**Immer (1950).**

Immer J. R., “Layout Planning Techniques”. New York, Mc Graw Hill, (1950).

**Islier (1998).**

Islier A. A., “A genetic algorithm approach for multiple criteria facility layout design”, International Journal Production Research, vol. 36. n°. 6, pp. 1549-1569, (1998).

**Jacques et al. (2001).**

Jacques Vinícius, De Sousa. Alexandre., Morelato Paulo, “Algoritmo Memético Paralelo Aplicado a Problemas de Secuenciación en Máquinas Simples”, Departamento de Engenharia de Sistemas, Faculdade de Engenharia Elétrica e de Computação, Universidade Estadual de Campinas, Brasil, (2001).

**Jaén et al. (2002).**

Jaén P., Hospitaler A., Santamarina S., “Arquitectura Industrial, volumen I Distribución en Planta Seguridad e higiene”, Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, (2002).

**Jayabalan (1992).**

Jayabalan V., “Cost Optimization of Maintenance Scheduling for a System with Assured Reliability”, IEEE Transaction on reliability, vol. 41, n° 1, (1992).

**Johnson (1982).**

Johnson R.D., “SPACECRAFT for de multi-floor layout planning”. Management Science, n°. 28, pp. 407-417, (1982).

**Kanematsu et al. (1990).**

Kanematsu Manabu, Noguchi Takafumi, otros, “Optimization of Maintenance and Repair Scheme by Applying a Genetic Algorithm”. University of Tokyo, Japan (1990).

**Kathryn y Belardimino (2003).**

Kathryn A. and Belardimino Adenso, “Heuristic design fundamentals of the Simulated Annealing”. Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana de Inteligencia Artificial. n° 19, pp 93-102, (2003).

**Kelly y Harris (1997).**

Kelly A. and Harris M., “Gestión del mantenimiento Industrial”. Fundación Repsol publicaciones. (1997).

**Kim et al. (1992).**

Kim I.S., Martorell S., Vesely W.E., “Quantitative evaluation of surveillance test intervals including test-caused risks”. NUREG/CR-5775, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York, (1992).

**Kim et al. (1994).**

Kim I.S., otros, “Risk analysis of surveillance requirements including their adverse effects”, Reliability Engineering and System Safety, 45, pp 225-234, (1994).

**Kirkpatrick et al. (1983).**

kirkpatrick S., Gelatt C and Vecchi, “Optimization by simulated annealing”, Science. Vol. 220, n°. 4598, pp. 671-680, (1983).

**Klose y Drexel (2005).**

Klose A. and Drexel A., “Facility location models for distribution system design”. European Journal of Operation Research. n° 162, pp. 4–29, (2005).

**Knights (2004).**

Knights Peter, “Gestión Moderna del Mantenimiento: Oportunidades para el Ejército de Chile”. Escuela de Ingeniería de la Pontificia Universidad Católica de Chile, (2004).

**Kochhar y Heragu (1998).**

Kochhar J. and Heragu S., “MULTI-HOPE: a tool for multiple floors for multiple floor layout problems”. International Journal Production Research, vol, 36. n°. 12, pp. 3421-3235, (1998).

**Kochhar et al. (1998).**

Kochhar J., Foster B. and Heragu S., “Hope: A genetic algorithm for the unequal area facility layout problem” Computers & Operations Research. vol. 25, n°. 7/8, pp 583-594, (1998).

**Kochhar y Heragu (1999).**

Kochhar J. and Heragu S., “Facility layout design in a changing environment”. International Journal Production Research, vol. 37. n°. 11, pp. 2429-2446, (1999).

**Koenig et al. (1978).**

Koenig Tony, Hellickson Mylo and Roepke Warren, “Building Geometry and Wind Effects on Model Open-Front Beef Building Ventilation” , American Society of Agricultural Engineers 0001-2351/78/2105-1199\$02.00, pp. 1199-1208, (1978).

**Konak et al. (2006).**

Konaka Abdullah, David W. Coitb, Alice E. Smith, “Multi-objective optimization using genetic algorithms: A tutorial”. Reliability Engineering and System Safety. 91 pp. 992–1007 (2006).

**Kouvelis et al. (1992).**

Kouvelis P., Chiang W., and Fitzsimmons J., “Simulated annealing for machine layout problems in the presence of zoning constraints”. European Journal of Operational Researches, n° 57, pp. 203-223, (1992).

**Kumar y Klefsjö (1994).**

Kumar Dhananjay and Klefsjö B., “Proportional hazards model: a review”, Reliability Engineering and System Safety..44, pp. 177-188, (1994).

**Kumar y Anup (1995).**

Kumar Dhananjay and Anup S., “Genetic-Algorithm-Based Reliability Optimization for Computer Network Expansion”, IEEE Transaction on Reliability, vol. 44, n°. 1, (1995).

**Kumar (1996).**

Kumar Dhananjay, “Proportional Hazards Modelling of Time-Dependent Covariates Using Linear Regression: A Case Study”, IEEE Transactions on Reliability, vol. 45, n°. 3, (1996).

**Kyu-Yeul Lee et al. (2003).**

Kyu-Yeul Lee, Seong-Nam Han, Myung-II Roh, “An improved genetic algorithm for facility layout problems having inner structure walls and passages”. Computers & Operations Research, n°. 30, pp. 117-138, (2003).

**Kyu-Yeul Lee et al. (2005).**

Kyu-Yeul Lee., Myung-II Roh, Hyuk-Su Jeong, “An improved genetic algorithm for multi-floor facility layout problems having inner structure walls and passages”. Computers & Operations Research, n° 32, pp 879-899, (2005).

**Langholz y Kandel (1994).**

Langholz. G., Kandel. A. “Genetic-Based New Fuzzy Reasoning Models with Application to Fuzzy Control”, IEEE Transactions on Systems, man and Cybernetics, vol. 24, n°. 1, pp. 39-47, (1994).

**Lapa et al.(2006).**

Lapa Celso Marcelo F, Márcio N.A., Cláudio Pereira, Marcio Paes de Barros, “A model for preventive maintenance planning by genetic algorithms based in cost and reliability”. Reliability Engineering and System Safety. 91 pp. 233–240 (2006).

**Lazo y Pacheco (1999).**

Lazo Juan y Pacheco Marco, “Planeamiento para mantenimiento de Máquinas de Impresión por Algoritmos Genéticos”. Proceeding-V Congreso Internacional de Ingeniería Informática, ICIE, Buenos Aires, Argentina (1999).

**Lee y Moore (1967).**

Lee R.C. and Moore J.M., “CORELAP - Computerized Relationship Layout Planning”, The Journal of Industrial Engineering, vol. 18, n°. 3, pp. 195-200, (1967).

**Legát et al. (1996).**

Legát V., Otros, “Contribution to optimization of preventive replacement”. Reliability Engineering and System Safety. 51. pp. 259-266, (1996).

**Lerma (2000).**

Lerma Peris María José, “Gestión del mantenimiento asistido por ordenador”. Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Servicio de Publicaciones Universidad politécnica de Valencia, (2000).

**Levitin (2006).**

Levitin Gregory, “Genetic algorithms in reliability engineering”. 976 Guest Editorial / Reliability Engineering and System Safety. 91 pp. 975–976 (2006).

**Li. Sheng-Tun et al. (2002).**

Li. Sheng-Tun., Otros. “Maintenance Scheduling of Oil Storage Tanks using Tabu-based Genetic Algorithm”, NSC90-2416-H-327, Taiwan, ROC. (2002).

**Lie Chien Lin y Gunter (1999).**

Lie Chien Lin and Gunter P. Sharp, “Quantitative and qualitative indices for the plant layout evaluation problem”. European Journal of Operational Research, 116, pp. 100-117, (1999).

**Liggett y Michell (1981).**

Liggett R.S. and Michell. W. T., “ Optimal Space Planning in Practice”, Computer Aided Design, 13, pp. 277-288, (1981).

**Lim et al. (2000).**

Lim M. H., Yuan Y., Omatu S., “Efficient Genetic Algorithms Using Simple Genes Exchange Local Search Policy for the Quadratic Assignment Problem”. Computational Optimization and Applications, n°. 15, pp. 249-268, (2000).

**Llatas (2004)**

Llatas Salvador Isables, “Notas del Curso de Fiabilidad”. Universidad Simón Bolívar, Sartenejas (2004).

**Machado et al. (2001).**

Machado J.M., Shiyu Yang, otros, “A common Tabu search algorithm for the global optimization of engineering problems”. Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, n°. 190, pp. 3501-3510, (2001).

**Macián et al. (2000).**

Macián Vicente, Tormos Bernardo, Olmeda Pablo, “Fundamentos de Ingeniería del Mantenimiento”. Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Servicio de Publicaciones Universidad Politécnica de Valencia, (2000).

**Macián (2002).**

Macián. Vicente, “Mantenimiento de Motores Diesel”. Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, (2002).

**Mahfound y Goldberg (1995).**

Mahfound S. W and Goldberg D. E., “Parallel recombinative simulated annealing: A genetic algorithm”. Parallel Computing, vol. 21, n° 1, pp. 1- 28, (1995).

**Man et al. (2000)**

Man K.F., Tang K.S. and Kwong S., Genetic Algorithms. Advanced Textbooks in Control and Signal Processing. Springer (2000).

**Malakooti. B y D`Sousa (1987).**

Malakooti B. and D`Sousa G.I., “ Multiple objective programming for the quadratic assignment problems” International Journal of Production Research, vol. 25, n°. 2, pp. 285-300, (1987).

**Malakooti (1989).**

Malakooti B., “Multiple objective facility layout: a heuristic to generate efficient alternatives”, *International Journal. of Production. Research*, vol. 27, no. 7, pp. 1225-1238, (1989).

**Malik (1979).**

Malik M.A.K., “Reliable preventive maintenance scheduling”. *AIIE Transaction*, n°. 11. pp. 221-228, (1979).

**Marc y Yvea (1989).**

Marc Gabriel and Yvea Pimor, “Mantenimiento Industrial por Ordenador”, Masson, S.A (1989).

**Marczyk (2004).**

Marczyk Adam, *Genetic Algorithms and Evolutionary Computation. The Talk. Origins Archive. Exploring the Creation/Evolution Controversy* (2004). ([www.talkorigins.org/faqs/genalg/genalg.html](http://www.talkorigins.org/faqs/genalg/genalg.html)).

**Marseguerra y Zio (2000).**

Marseguerra Mazio and Zio Enrico, “Optimizing maintenance and repair policies via a combination of genetic algorithms and Monte Carlo simulation”, *Reliability Engineering and System Safety*. 68, pp. 69-83, (2000).

**Marseguerra et al. (2001).**

Marseguerra Mazio, Zio Enrico, Giuggioli B, “Multiobjective optimization by genetic algorithms: application to safety systems”. *Reliability Engineering and System Safety*, 72 , pp. 59-74, (2001).

**Marseguerra et al. (2002).**

Marseguerra Mazio, Zio Enrico, Luca Podofillini, “Condition-based maintenance optimization by means of genetic algorithms and Monte Carlo simulation”, *Reliability Engineering and System Safety*, 77, pp. 151-165, (2002).

**Martínez (2002).**

Martínez Nieves, “Fiabilidad, Garantía y Mantenimiento Preventivo”. Departamento de Estadísticas e Investigación Operativa, Servicio de Publicaciones Universidad Politécnica de Valencia (2002).

**Martorell (1991).**

Martorell A. Sebastián S., “Análisis de la interacción entre los requisitos de tiempos máximos permitidos de inoperatividad (AOT) e intervalos de pruebas de vigilancia (STI) de componentes de sistemas de seguridad de centrales nucleares”. Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, Tesis Doctoral UPV Valencia, (1991).

**Martorell et al. (1995).**

Martorell S., Serradell V., Otros, “Improving allowed outage time and surveillance test interval requirements: a study of their interactions using probabilistic methods”, *Reliability Engineering and System Safety*, 47, pp. 119-129, (1995).

**Martorell et al. (1995b).**

Martorell S., Muñoz A., Otros, “An approach to integrating surveillance and maintenance tasks to prevent the dominant failure causes of critical components”, *Reliability Engineering and System Safety*, 50, pp. 179-187, (1995).

**Martorell et al. (1996).**

Martorell S., Muñoz A., Otros, “Age-dependent models for evaluating risks and costs of surveillance and maintenance of components”, *IEEE transactions on Reliability*, 45: 3, pp. 433-442, (1996).

**Martorell y Doménech (1998).**

Martorell Sebastián y Doménech Eva, “Análisis de Riesgos en la Industria”. Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia, (1998).

**Martorell et al. (1999).**

Martorell S., Sanchez A., Otros, “The use of maintenance indicators to value the effects of maintenance programs on NPP performance and safety”, *Reliability Engineering and System Safety*. 65. pp. 85-94, (1999).

**Martorell et al. (1999b).**

Martorell S., Sanche A., Otros, “Age-dependent reliability model considering effects of maintenance and working conditions”, *Reliability Engineering and System Safety*, 64, pp. 19-31, (1999).

**Martorell et al. (2000).**

Martorell S., Carlos S., Otros, “Constrained optimization of test intervals using a steady-state genetic algorithm”, *Reliability Engineering and System Safety*, 67, pp. 215-232, (2000).

**Martorell et al. (2002).**

Martorell S., Sanchez Ana, Otros, “Comparing effectiveness and efficiency in technical specifications and maintenance optimization”. *Reliability Engineering and System Safety*, n°. 77, pp. 281-289, (2002).

**Matías (2003).**

Matías S. Agustín, “Diseños de Redes de Distribución de Agua Contemplando la Fiabilidad, Mediante Algoritmos Genéticos”. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Tesis Doctoral UPV Valencia, (2003).

**Matsuzaki et al. (1999).**

Matsuzaki Kenichiro, Irohara Takashi and Kazuho Yoshimoto, “Heuristic algorithm to solve the multi-floor layout problem with the consideration of elevator utilization”. *Computers & Industrial Engineering*, vol. 36, n°. 2, pp. 487-502, (1999).

**Mavridou y Pardalos (1997).**

Mavridou T. and Pardalos Panos, “Simulated Annealing and Genetic Algorithms for the Facility Layout Problem: A Survey”. *Computational Optimization and Applications*, n°. 7, pp. 111-126, (1997).

**Meller (1997).**

Meller R.D., “The multi-bay manufacturing facility layout problem”, *International Journal Production Research*, vol 35, n° 5, pp 1229-1237. (1997).

**Metropolis et al. (1953).**

Metropolis N., Ariana W., Rosenbluth M., Rosenbluth N. and Teller A., “Equation of state calculations by fast computing machines”. *The Journal Chemical Physics*, vol. 21, n°. 6, pp. 1089-1092, (1953).

**Michalewicz (1996).**

Michalewicz H.J., “Genetic Algorithms + Data Structures = Evolution Programs”, 3º Edition. Springer. New York, (1996).

**Ming-Jaan Wang et al. (2005).**

Ming-Jaan. Wang., Michael. H., Hu. Meei-Yuh Ku. “A solution to the unequal area facilities layout problem by genetic algorithms” *Computers in Industry*. n°. 56, pp. 207-220, (2005).

**Moghaddam et al. (2008).**

Moghaddam R., Tavakkoli S., Sassani F., “Reliability optimization of series-parallel systems with a choice of redundancy strategies using a genetic algorithm”. *Reliability Engineering and System Safety*. 93 pp. 550–556 (2008).

**Montreuil y Ratliff (1989).**

Montreuil B and Ratliff H. D., “Utilizing cut tress as design skeletons for facility layout”, *IIE Transactions*, vol.21, n°. 2, pp. 136-143, (1989).

**Moore (1962).**

Moore J.M., “Plan Layout and Design”, Macmillan Publishing Co, Inc, (1962).

**Moore (1969).**

Moore J.M., “Plant Layout and Design”. The Macmillan Company. United States. (1969).

**Muñoz et al. (1997).**

Muñoz A., Martorell S., Serradell V., “Genetic algorithms in optimizing surveillance and maintenance of components”, *Reliability Engineering and System Safety*, n°. 57, pp. 107-120, (1997).

**Muñoz (1997b).**

Muñoz Aurelio, “Algoritmos genéticos en el cálculo de la optimización de la fiabilidad de componentes y sistemas con ejemplo de aplicación a centrales nucleares”, Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, Tesis Doctoral UPV Valencia (1997).

**Murillo (2004).**

Murillo Gerardo, “Plan de Implantación General del RCM”. *Gestiopolis.com* (2004).

**Muther (1968).**

Muther Richard, “Planificación y Proyección de la Empresa Industrial (Método S.L.P)”. Editores Técnicos Asociados, S.A, Barcelona (1968).

**Muther (1981).**

Muther Richard, “Distribución en planta, ordenación racional de los elementos de producción industrial”. Cuarta edición, Editorial Hispano Europea, España (1981).

**Navarro y Pastor(1997).**

Navarro Luís y Pastor Ana. “Gestión Integral del Mantenimiento”, Marcombo Boixareu editores, (1997).

**Olmeda (2003).**

Olmeda Pablo, “Diagnóstico de fallos de motores mediante el análisis de la oscilación del bloque”, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia (2003).

**Ontiveros (1995).**

Ontiveros Padilla Luís Eduardo, “Diagnóstico de motores de encendido por compresión marinos mediante el análisis de su lubricante”, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia (1995).

**Ontiveros (2004).**

Ontiveros Martínez. Ramón. “Algoritmo Interactivo de Solución al Problema de Distribución en Planta, con Control de Forma y con Empleo de Decisiones Multicriterio Discretas”, Departamento de Proyectos de Ingeniería, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia (2004).

**Ouzineb et al. (2008).**

Ouzineb Mohamed, Nourelfath Mustapha, Gendrea Michel, “Tabu search for the redundancy allocation problem of homogenous series–parallel multi-state systems”. Reliability Engineering and System Safety. 93 pp.1257–1272 (2008).

**Paiton y Campell (1995).**

Painton Laura and Campell James, “Genetic Algorithms in Optimization of System Reliability”, IEEE Transactions on Reliability, vol. 44. n°. 2, (1995).

**Pazos (1996).**

Pazos Sierra Alejandro, “Redes Neuronales Artificiales y Algoritmos Genéticos”, Universidad da Coruña. Servicio de Publicaciones (1996).

**Peralta (2001).**

Peralta Uría Ramiro Willy, “Aplicación de la Termografía Infrarroja al Diagnóstico de Fallos en Motores Diesel”. Departamento de Motores Térmicos, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia, (2001).

**Pettersen y Segerstedr (2008).**

Pettersen Jan-Arne and Segerstedr Anders, “Production Performance vs. Machine Down Times and Buffer Sizes. A Case study” Fifteenth International Working Seminar on Production Economics. Volume 2. Congress Innsbruck. Austria (2008).

**Pérez (2003).**

Pérez Alonso José, “Caracterización y Diseño de los Alojamientos Ganaderos de Caprino de Leche de la Provincia de Almería Mediante Técnicas de Optimización de Distribución en Planta y de Sistemas de Ventilación Natural”. Departamento de Ingeniería Rural y Agroalimentaria, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia, (2003).

**Pérez (2004).**

Pérez Trujillo Francisco, “Monitorización electroquímica de la corrosión a elevada temperatura en presencia de sales fundidas”, Departamento de Ciencias de los Materiales e Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Complutense de Madrid (2004).

**Pierre (1978).**

Pierre M., “Distribución en Planta”, Deusto Serie B Tomo 1. España (1978).

**Rahmat-Samill y Michielssen (1999).**

Rahmat-Samill Yahya and Michielssen Eric, “Electromagnetic Optimization by Genetic Algorithms”, John Wiley & sons, Inc, (1999).

**Rajasekharan et al. (1998).**

Rajasekharan M., Peters B.A., “A genetic algorithm for facility layout design in flexible manufacturing systems”, International Journal Production Research. vol. 36. nº. 1, pp. 95-110, (1998).

**Rao et al. (1999).**

Rao H.A., Pham. S.N., Gu P., “A genetic algorithms-based approach for design of manufacturing systems: an industrial application”, International Journal Production Research, vol. 37, nº 3, pp. 557-580, (1999).

**Rausand (1998).**

Rausand Marvin, "Reliability centred maintenance", Reliability Engineering and System Safety, 60, pp. 121-132, (1998).

**Robert y James (1993).**

Robert C. y James O., "Manual de mantenimiento Industrial", Tomo II McGraw-Hill (1993).

**Rodríguez et al. (2002).**

Rodríguez V. Alejandro, Sempere R. Francisca, Poler E. Raúl, "Utilización de la simulación para el rediseño de la sección de montado y zona de expedición de una PYME (Aux. Sector Calzado)", II Conferencia de Ingeniería de Organización, Vigo (2002).

**Rosenblatt (1979).**

Rosenblatt M.J., "The facilities layout problem: a multi-goal approach", International Journal and Production Research, vol. 17, nº. 4, pp. 258-268, (1979).

**Rosenblatt (1986).**

Rosenblatt M.J., "The dynamics of the plant Layout" Management Science, vol. 32, nº. 1, pp. 76-86, (1986).

**Rosenblatt y Golany (1992).**

Rosenblatt M.J. and Golany B., "A distance assignment approach to the facility layout problem", European Journal of Operational Research, vol. 57, pp. 253-270, (1992).

**Ruiz (2003).**

Ruiz Padillo Diego. "Comentarios sobre los distintos tipos de sonómetros, sus especificaciones técnicas y usos", Departamento de Física Aplicada de la Universidad de Granada (2003).

**Saaty (2000).**

Saaty Thomas, "Toma de Decisiones para Líderes", University of Pittsburg, (2000).

**Salazar (2003).**

Salazar A., "Productividad en el mantenimiento de industrias manufactureras", Tesis de Licenciatura de Ingeniería Industrial, Departamento de Ingeniería Industrial y textil, Universidad de las América- Puebla, México (2003).

**Sánchez (2000).**

Sánchez. Ana, “Metodología de Optimización Conjunta y Multi-criterio de Requisitos de Vigilancia y Condiciones de Mantenimiento de Componentes de CC.NN” Departamento de Ingeniería Química y Nuclear, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia (2000).

**Sánchez (2000b).**

Sánchez Enrique, “Optimización de la Expansión de un Sistema de Recursos hídricos Utilizando las Metodologías del Algoritmo Genético y el Recocido Simulado” Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia (2000).

**Santamarina (1995).**

Santamarina María Cristina, “Métodos de Optimización en la Generación de Distribuciones de Plantas Mediante la Aplicación de Algoritmos Genéticos y Técnicas Basadas en Árboles de Cortes”, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia (1995).

**Santamarina y Hospitaler (1995).**

Santamarina M.C. y Hospitaler A, “Distribución en Planta”, Departamento de Ingeniería de la Construcción, Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (1995).

**Santamarina et al. (1998).**

Santamarina M.C., Hospitaler A., Cano Juan, “Apuntes de Arquitectura Industrial” Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería, Servicio de Publicaciones de la Universidad Politécnica de Valencia (1998).

**Santamarina (2002).**

Santamarina María Cristina, “Aproximación a la Optimización del Diseño Integral del Edificio Industrial con Parámetros Bioclimáticos, a Partir de la Optimización de la Distribución en Planta, Utilizando un Método Basado en Algoritmos Genéticos y Árboles de Cortes”, Trabajo de Investigación Universidad Politécnica de Valencia, (2002).

**Sarin et al. (1992).**

Sarin S.C., Loharjun P., Malmborg C.J. and Krishnakumar B., “A multiattribute decision-theoretic approach for the layout design problem”, European Journal of Operational Research, vol. 57, pp. 231-242, (1992).

**Seehof y Evans (1967).**

Seehof J.M. and Evans W.O., “Automated Layout Design Program”, The Journal of Industrial Engineering. Vol. 17. n° 12, pp. 690-695, (1967).

**Sappanen y Moore (1970).**

Seppanen J. and Moore J., “Facilities planning with graph theory” Management Science, vol 17, n°. 4, pp. 242-253. (1970).

**Sexto (2000).**

Sexto Luís Felipe, “Ruido: implicaciones que acompañan a los niveles registrados en áreas de una central termoeléctrica”, Centro de Estudios de Innovación y Mantenimiento del Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría, Habana Cuba (2000).

**Sha y Chen Chien-Wen (2001).**

Sha D. Y. and Wen Chen Chien, “A new approach to the multiple objective facility layout problems”, Integrated Manufacturing Systems. 12/1 pp 56-66, (2001).

**Shang (1995).**

Shang J.S., “ Robust design and optimization of material handling in an FMS”, International Journal of Production Research, vol. 33, n°. 9, pp. 2437-2454, (1995).

**Shang y Tadikamalla (1998).**

Shang J. and Tadikamalla P., “Multicriteria design a control of a cellular manufacturing system through simulation and optimization”, International Journal of Production Research. Vol. 36, n° 6, pp. 1515-1528, (1998).

**Shanker y Vrat (1999).**

Shanker R. and Vrat P., “Some design issues in cellular manufacturing using the fuzzy programming approach”, International Journal of Production Research, vol. 37, n°. 11, pp 2545-2563, (1999).

**Sherwin (1996).**

Sherwin. D.J. “A simple general model for echelon overhaul and repair”, Reliability Engineering and System Safety, 51, pp. 283-293, (1996).

**Sirinaovakul y Limudomsuk (2007).**

Sirinaovakul B and Limudomsuk T., “Maximum weight matching and genetic algorithm for fixed-shape facility layout problem” International Journal of Production Research. Vol. 45, n° 12, pp. 2655-2672. (2007).

**Sly (1997).**

Sly David, “Before Dynamic Simulation: Systematic Layout Design from Scratch”, Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. Technologies Corporation. Iowa State University Research Park. U.S.A (1997).

**Sotelo y Borán (2002).**

Sotelo A. Lücken and Borán B., “Multiobjective Evolutionary Algorithms in Pump Scheduling Optimization”, National University of Asunción, San Lorenzo, Paraguay (2002).

**Suresh et al. (1995).**

Suresh G., Vinod V. and Sahu S., “A Genetic algorithm for facility layout”, International Journal Production Research, vol. 33, n°. 12, pp. 3411-3423, (1995).

**Ta-Cheng Che y Peng-Sheng (2005).**

Ta-Cheng Che and Peng-Sheng You, “Immune algorithms-based approach for redundant reliability problems with multiple component choices”, Computers in Industry, 56, pp. 195-205, (2005).

**Tam y Li (1991).**

Tam K. Y and Li S. G., “ A hierarchical approach to the facility layout problem” International Journal and Production Research, vol. 29, n°. 1, pp. 165-184, (1991).

**Tam (1992).**

Tam K.Y., “Genetic Algorithms, function optimization, and facility layout design”, European Journal of Operational Research, vol. 63, n° 5, pp. 322-346. (1992).

**Tam y Chan (1998).**

Tam K. Y. and Chan. S. K., “Solving facility layout problems with geometric constraints using parallel genetic algorithms: experimentation and findings”, International Journal Production Research, Vol. 36, n°.12, pp. 3253-3272, (1998).

**Tate y Smith (1995).**

Tate David and Smith Alice, “A genetic approach to the quadratic assignment problem”, Computers Operations Research. Vol. 22, n°. 1, pp. 73-83. (1995).

**Timmons y Baughman (1981).**

Timmons M. B. and Baughman G. R., “Similitude Analysis of ventilation by the Stack Effect from an Open Ridge Livestock structure” American Society of Agricultural Engineers 0001-2351/81/2404-1030, pp. 1030-1034, (1981).

**Tompkins y Reed (1976).**

Tompkins J.A. and Reed R., “An applied model for the facilities design problem”, International Journal of Production Research, vol. 14, n°. 5, pp. 583-595, (1976).

**Tompkins et al. (1996).**

Tompkins J.A., White.J., Bozer Y., and Tanchoco J. M., “ Facilities Planning”, Editorial John Wiley and Sons, Nueva York, (1996).

**Tormos (2002).**

Tormos Martínez Bernardo, “Contribución al diagnóstico de motores basado en el análisis del lubricante usado”, Departamento de Máquinas y Motores Térmicos, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia (2002).

**Upton (1994).**

Upton D.M., “ The management of manufacturing flexibility”, California Management Review, n°. 12, pp. 72-89, (1994).

**Urban (1987).**

Urban T.L., “A multiple criteria model for the facilities layout problem”, International Journal Production Research. vol. 25, n°. 12, pp. 1805-1812, (1987).

**Uryas’ev y Vallerga (1993).**

Uryas’ev S. and Vallerga H., “Optimization of test strategies: a general approach” Reliability Engineering and System Safety. 41, pp. 155-165, (1993).

**Usher (1996).**

Usher John, “ Weibull Component Reliability-Prediction in the Presence of Masked Data” , IEEE Transactions on Reliability, vol.45, n°. 2, (1996).

**Vallhonrat y Coromitas (1991).**

Vallhonrat Josep M. y Corominas Albert, “Localización, distribución en planta y manutención”, Marcombo Boixareu Editores, España (1991).

**Vassiliadis y Pistikopoulos (1998).**

Vassiliadis C. and Pistikopoulos E. N., “ Reliability and Maintenance Considerations in Process Design under Uncertainty”. Computers & Chemical Engineering, vol. 22, pp. S521-S528, (1998).

**Vatn et al. (1996).**

Vatn J., Hokstad P., Bodsberg L., “An overall model for maintenance optimization”, Reliability Engineering and System Safety. n° 51, 241-257, (1996).

**Vaurio (1995).**

Vaurio J.K., “Optimization of and maintenance intervals based on risk and cost”, Reliability Engineering and System Safety, n°. 49, pp. 23-36, (1995).

**Vaurio (1999).**

Vaurio J.K., “Availability and cost functions for periodically inspected preventively maintained units”, Reliability Engineering and System Safety, n°. 63, pp. 133-140, (1999).

**Volkanovski et al (2008).**

Volkanovski Andrija, Mavko Borut, Tome Bosevski, Anton Causevski, Marko Cepin, “Genetic algorithm optimisation of the maintenance scheduling of generating units in a power system”. Reliability Engineering and System Safety. 93 pp. 757–767 (2008).

**Wonsang (1993).**

Wonsang Amen., Yuri Alan. “Diagnóstico de motores de encendido por compresión de automoción a partir del monitorizado de sus prestaciones”, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Tesis Doctoral Universidad Politécnica de Valencia (1993).

**Wu y Appleton. (2000).**

Wu Y. and Appleton E., “The optimisation of block layout and aisle structure by a genetic algorithm”. Computers & Industrial Engineering, vol. 41, n°. 4, pp. 371-378, (2000).

**Yepes (2002).**

Yepes Piqueras Víctor, “Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW”, Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, Tesis doctoral Universidad Politécnica de Valencia, (2002).

**Yi Jiang y Qingyan (2002).**

Yi Jiang and Qingyan Chen, "Effect of fluctuating wind direction on cross natural ventilation in buildings from large eddy simulation" *Building and Environment*, 37, pp. 379-386, (2002).

**Yuguo et al. (2000).**

Yuguo Li, Delsante Angelo, Jeff Symons, "Prediction of natural ventilation in buildings with large openings", *Building and Environment*, 35, pp. 191-206, (2000).

**Yuguo Li y Delsante (2001).**

Yuguo Li and Delsante Angelo, "Natural ventilation induced by combined wind and thermal forces", *Building and Environment*, 36, pp. 59-71, (2001).

**Zadeh (1965).**

Zadeh L.A., "Fuzzy Sets", *Information and control*, vol. 8, pp. 328-335, (1965).

**Zhang et al. (1989).**

Zhang J. S., Janni K. A., Jacobson L. D., "Modelling Natural Ventilation Induced by Combined Thermal Buoyancy and Wind", *American Society of Agricultural Engineers*, vol. 32 (6), pp. 2165-2174, (1989).