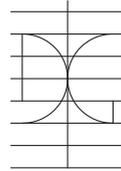


UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE VALENCIA

Departamento de Ingeniería de la Construcción

y Proyectos de Ingeniería Civil



TESIS DOCTORAL

Algoritmos híbridos para la resolución del F.L.P. (Facility Layout Problem) basados en colonias de hormigas.

Autor:

D. Pedro Jaén Gómez

Ingeniero Industrial

Director:

D. Antonio Hospitaler Pérez

Dr. Ingeniero Industrial

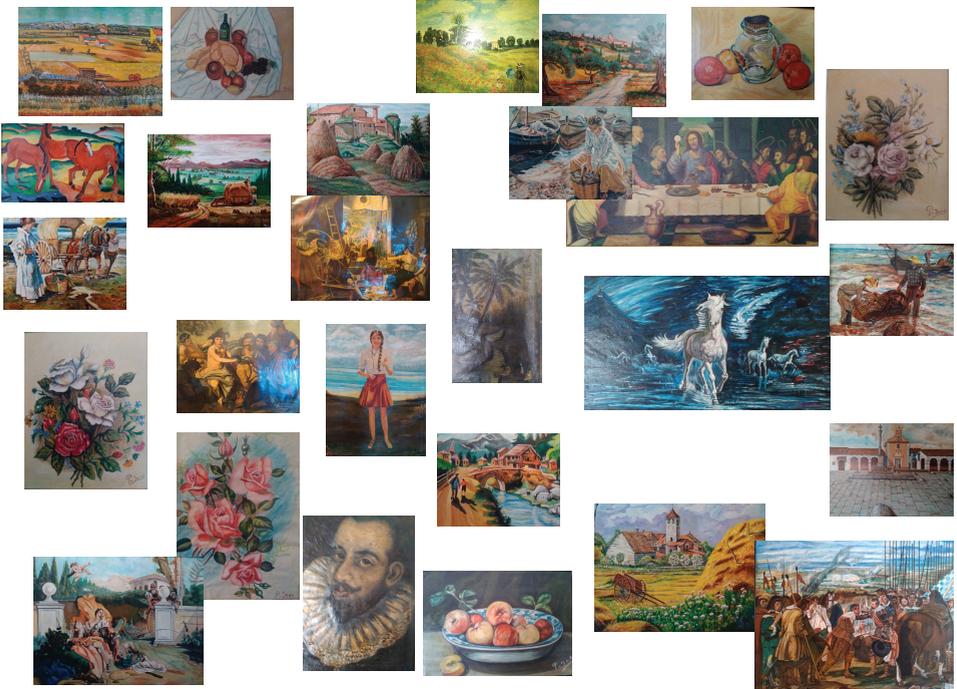
Septiembre de 2015

A la memoria de mi Padre,

el hombre más trabajador y generoso que he conocido.

Nos dejó inesperadamente el pasado 22 de agosto.

Tu esposa e hijos: por siempre en nuestros corazones.



Resumen

El problema de la distribución en planta de procesos industriales (FLP) persigue la ordenación óptima de los elementos (que en este trabajo se llamarán actividades, conceptuándose como aquellos elementos del sistema de producción que requieren espacio) de un sistema de producción y contempla, entre otros, aspectos geométricos y económicos. El aspecto económico tiene que ver con la instalación de la planta y con su operación mientras que el geométrico se relaciona con la arquitectura del sistema. De la consideración de estos aspectos se derivan diferentes formulaciones del problema según el modelo geométrico adoptado para representar la solución y según la función a optimizar, que puede incluir términos cuantitativos como costes de instalación y de operación (mantenimiento) y términos cualitativos derivados de la tabla relacional de actividades establecida desde la metodología SLP. Existe cierta tradición en la Unidad Docente de Construcción y Arquitectura Industrial (actualmente U.D de Construcciones Industriales), sobre la resolución de este problema de distribución en planta desde diversos enfoques, lo que ha originado que ya desde los años 90, yo mismo, autor de esta Tesis Doctoral, así como otros compañeros, hayamos implementado algunas aplicaciones informáticas de varios tipos para la resolución del mismo, basadas, a modo de ejemplo, en algoritmos genéticos o en lógica borrosa. El último caso el de la aplicación informática que utiliza ACO ("Ant Colony Optimization") que se presenta en este trabajo. En cualquier caso, dichas aplicaciones, a menudo utilizadas en otras investigaciones o incluso con fines docentes, han proporcionado resultados satisfactorios tanto en el plano investigador como en el académico. A principios de los 2000, cuando aparece la normativa de Protección Contra Incendios en Establecimientos Industriales, al tratarse a partir de entonces de una normativa de obligado cumplimiento en la gran mayoría de actividades de nueva planta, y el planteamiento que se siguió al realizar los trabajos y proyectos sobre casos reales fue en una primera fase la elaboración de la distribución en planta, mientras que en una segunda fase se exigía la aplicación de la normativa de protección contra incendios a la distribución en planta obtenida con anterioridad, con carácter obligatorio tanto en el ámbito industrial, como en los usos subsidiarios no industriales diferentes del principal. Cualquier distribución en planta que no cumpla los criterios normativos en todas las zonas, sean éstas industriales o no, carece de validez legal y por tanto no es viable. En una tercera fase se dota del adecuado ambiente térmico, higroscópico, acústico y lumínico a la solución obtenida. Frente a esta realidad, cada vez más plausible a partir de la entrada en vigor del Código Técnico de la Edificación, que impulsa el diseño basado en prestaciones y no en prescripciones, de la no conveniencia de desligar las fases de diseño, se ha comenzado por incluir el criterio de la sectorización en el diseño como un objetivo más mesurable en la calidad de la solución final adoptada, y por lo tanto optimizable como cualquier otro. Por ello en este trabajo se ha realizado una propuesta de algoritmo de sectorización, que funciona a partir de la información y criterios que las normativas de incendios utilizan, y se ha definido también una propuesta de función objetivo, así como una serie de parámetros que permiten considerar cómo influye esta sectorización en el trasiego de materiales (fundamentalmente flujos) a través de las distintas actividades.

Resum

El problema de la distribución en planta de procesos industriales (FLP) persigue l'ordenació òptima dels elements (que en este treball es cridaran activitats, conceptuant-se com aquells elements del sistema de producció que requereixen espai) d'un sistema de producció i contempla, entre altres, aspectes geomètrics i econòmics. L'aspecte econòmic té a veure amb la instal·lació de la planta i amb la seua operació mentres que el geomètric es relaciona amb l'arquitectura del sistema. De la consideració d'estos aspectes es deriven diferents formulacions del problema segons el model geomètric adoptat per a representar la solució i segons la funció a optimitzar, que pot incloure termes quantitativs com a costos d'instal·lació i d'operació (manutenció) i termes qualitativs derivats de la taula relacional d'activitats establida des de la metodologia SLP. Hi ha una certa tradició en la Unitat Docent de Construcció i Arquitectura Industrial (actualment U.D de Construccions Industrials) , sobre la resolució d'este problema de distribució en planta des de diversos enfocaments, la qual cosa ha originat que ja des dels anys 90, jo mateix, autor d'esta tesi, així com altres companys, hàgem implementat algunes aplicacions informàtiques de diversos tipus per a la resolució del mateix, basades, a manera d'exemple, en algorismes genètics o en lògica borrosa. L'últim cas el de l'aplicació informàtica que utilitza ACO ("Ant Colony Optimization") que es presenta en este treball. En tot cas, les dites aplicacions, sovint utilitzades en altres investigacions o inclús amb fins docents, han proporcionat resultats satisfactoris tant en el pla investigador com en l'acadèmic. A principis dels 2000, quan apareix la normativa de Protecció Contra Incendis en Establiments Industrials, al tractar-se a partir de llavors d'una normativa de compliment obligatori en la gran majoria d'activitats de nova planta, i el plantejament que es va seguir en els treballs i projectes reials va ser en una primera fase l'elaboració de la distribució en planta, mentres que en una segona fase s'exigia l'aplicació de la normativa de protecció contra incendis a la distribució en planta obtinguda amb anterioritat, amb caràcter obligatori tant en l'àmbit industrial, com en els usos subsidiar-vos no industrials diferents del principal. Qualsevol distribució en planta que no complisca els criteris normatius en totes les zones, siguen ést. En una tercera fase es dota de l'adequat ambient tèrmic, higroscòpic, acústic i lumínic a la solució obtinguda. Enfront d'esta realitat, cada vegada més plausible a partir de l'entrada en vigor del Codi Tècnic de l'Edificació, que impulsa el disseny basat en prestacions i no en prescripcions, de la no conveniència de deslligar les fases de disseny, s'ha començat per incloure el criteri de la sectorització en el disseny com un objectiu més mesurable en la qualitat de la solució final adoptada, i per tant optimitzable com qualsevol altre. Per això en este treball s'ha realitzat una proposta d'algoritme de sectorització, que funciona a partir de la informació i criteris que les normatives d'incendis utilitzen, i s'ha definit també una proposta de funció objectiu, així com una sèrie de paràmetres que permeten considerar com influïx esta sectorització en el trasbals de materials (fonamentalment fluxos) a través de les distintes activitats.

Abstract

The Facilities Layout Problem in a industrial plant (FLP) pursues the good ordenation of the integrating elements (that in this work they will call themselves facilities, understanding those elements of the production system that they require space) of a production system and it contemplates, among other, geometric and economic aspects. The economic aspect has to do with the installation of the plant and with its operation while the geometric one is related with the architecture of the system. Under consideration of these aspects they are derived different formulations of the problem according to the geometric model adopted for represent the solution and according to the function to optimize that can include quantitative terms as installation costs and operation cost (manutención) and qualitative terms derived of the chart establishing relationship of activities from the methodology SLP. Certain tradition exists in the Educational Unit of Buildings and Architecture Industrial (at the moment U.D of Industrial Buldings), on the resolution of this FLP from diverse focuses, what there is origin that already from the years 90, myself, author of this thesis, as well as other partners, let us have implemented some computer applications of several types for the resolution of the same, based, by way of example, in genetic algorithms or in fuzzy logic. The last one goal was this one implemented with ACO ("Ant Colony Optimization") that this work shows. Anyway, this applications, often used in other works or even with educational ends, they have provided satisfactory results so much in the investigating scheduling as in the academic. At the beginning of the 2000, when the normative of Industrial Buldings Fire Proofing appears, when being starting from then of a preceptive normative in the greater part of industries of new installation, and the position that was continued in the real works was: in a first phase the elaboration of the layout, while in a second phase the application of the preceptive normative of fire proofing was demanded against fires to the layout obtained previously, with obligatory character so much in the industrial field, like in the subsidiary uses that aren't industrials, different from the main one. Any layout that it doesn't complete the fire proofing normative approaches in all the areas, be these industrial or not, it lacks legal validity and therefore it's not viable. In a third phase it is endowed of the thermal appropriate atmosphere, higroscopic, acoustic and lighting to the obtained solution. In front of this reality, more and more commendable starting from the appearance of the Technical Code of Buildings, that impels the performance designing and not in prescriptions, of the non convenience of unlying the design phases, we have started including the approach of the compartmentalization in the design like another objective in the quality of the final adopted solution, and therefore optimizable like any another. Hence in this work we have been carried out a proposal of compartmentalization algorithm that works starting from the information and approaches that the normative of fires use, and we have also defined a proposal of objective function, as well as a series of parameters that allows to consider like it influences this compartmentalization in the flow of materials through the different facilities.

Índice de capítulos

1 – Introducción

2 – La planta industrial, antecedentes y concepción actual. Tipos básicos de distribución en planta.

3 – S.LP. Métodos de generación de layouts. Definición de objetivos: Flujo de materiales, Tabla relacional de actividades, Sectorización.

4 – Técnicas de toma de decisión multicriterio. Definición de fronteras de Pareto. Métricas de selección.

5 – Tratamiento del espacio. Soporte de colocación ALDEP. Métricas de distancia. Control geométrico de la solución.

6 – Introducción y estado del arte de los algoritmos híbridos basados en colonias de hormigas. Variantes implementadas.

7 – Sectorización de incendios: Normativa. Propuesta de algoritmo de sectorización.

8 – Aplicación informática implementada.

9 – Plan experimental.

10 – Conclusiones y desarrollos futuros.

11 – Bibliografía.

Tabla de contenido

Introducción y objetivos.	33
1.1. Antecedentes.	33
1.2. El problema de la distribución en planta.	36
1.3. Objeto de la investigación.	38
1.4. Evolución histórica y tratamiento del problema.	39
1.5. Planteamiento y desarrollo del estudio.	44
La planta industrial, antecedentes y concepción actual. Tipos básicos de distribución en planta.	47
2.1. Introducción.	47
2.2. El problema de la distribución en planta: lugar que ocupa en relación al concepto de la “Construcción y Arquitectura Industrial”.	48
2.2.1. Concepto de Arquitectura.	48
2.2.2. Concepto de Industria.	52
2.3. Breves reseñas históricas sobre la evolución de la construcción y la protección contra incendios en la construcción.	53
2.4. Evolución histórica de la normativa de Protección contra incendios:	57
2.5. La distribución en planta. Definición del problema.	60
2.6. Las fases de Proyecto de la actividad industrial: Lugar de la distribución en planta.	61
2.7. Objetivos de la distribución en planta.	65
2.8. Principios básicos de la distribución en planta.	66
2.9. Medios de producción.	68
2.10. Tipos básicos de distribución en planta.	70
2.10.1. Distribución en posición fija.	71
2.10.2. Distribución en cadena, en línea o de desplazamiento rápido.	72
2.10.3. Distribución por proceso, por secciones o de desplazamiento lento.	73
2.10.4. Distribución por células de fabricación flexible.	74
S.L.P. Métodos de generación de layouts. Definición de objetivos.	77
3.1. Introducción a la definición de objetivos.	77
3.2. Systematic Layout Planning (S.L.P.).	80
3.2.1. Introducción.	80

3.2.2.	Elementos base del SLP.....	80
3.2.3.	Esquema general del SLP.	82
3.2.4.	Análisis P-Q.	83
3.2.5.	Recorrido de los productos.	84
3.2.6.	Relación (cualitativa) entre actividades.....	85
3.2.7.	Determinación de los espacios.	87
3.2.8.	Integración de la información. Resolución y Generación de Alternativas.	88
3.2.9.	Métodos de generación de layouts.	89
3.2.10.	Evaluación y selección.....	89
3.3.	Métodos de generación de layouts.	90
3.4.	Formulaciones de la función objetivo del problema de distribución en planta. .	94
3.4.1.	La formulación de la F.O. cuantitativa.....	94
3.4.1.1.	Caso particular. El problema cuadrático de asignación.	98
3.4.2.	La formulación de la F.O. cualitativa.....	98
3.4.3.	La formulación de la F.O. geométrica.	99
3.4.3.1.	La valoración de la calidad formal de la solución.....	99
3.4.3.2.	Indicador escogido.	100
3.4.4.	La formulación de la F.O. para la sectorización.....	101
3.4.4.1.	Medidas de la Diafanidad.....	101
3.4.4.2.	Función objetivo implementada.	102
3.5.	La formulación multicriterio.	105
	Técnicas de toma de decisión multicriterio. Definición de las fronteras de Pareto.....	107
4.1.	Introducción.....	107
4.2.	Criterios de clasificación de técnicas multicriterio.	109
4.2.1.	Clasificación de (Waghodekar, Sahu 1986a) y (Santamarina 1995).	110
4.2.1.1.	Actuando en la generación de la alternativas.	111
4.2.1.2.	Actuando en la selección de alternativas.....	111
4.2.1.3.	Actuando en la generación y selección de alternativas.	112
4.2.2.	Clasificación de (Malakooti, Tsurushima 1989).	112
4.2.3.	Clasificación propuesta por (Montalva et al. 2012).	113
4.3.	Evaluación de soluciones.	114

4.4.	Optimización de soluciones.	115
4.4.1.	Técnicas basadas en agregación de criterios. Funciones aditivas.....	117
4.4.1.1.	Formulación general de las técnicas de agregación.	118
4.4.1.2.	Influencia de los coeficientes de ponderación en la F.O.	120
4.4.1.2.1.	Planteamientos iniciales.	120
4.4.1.2.2.	Procedimiento de ponderación.	121
4.4.1.2.3.	Análisis de sensibilidad de los coeficientes de ponderación. Concepto de eficiencia.	122
4.4.1.3.	Estimación de los costes relacionales parciales (C.R.P.).....	125
4.4.1.4.	Normalización de los costes relacionales parciales.	129
4.4.1.5.	Últimas publicaciones de funciones aditivas.	133
4.4.2.	Modelos de agregación no aditivos.	135
4.4.3.	Métodos basados en frontera de Pareto.	138
4.4.3.1.	Frontera de Pareto en otras aplicaciones de algoritmos ACO.	145
4.4.3.2.	Métodos para elegir una solución eficiente de entre las obtenidas como frontera de Pareto.	147
	Tratamiento del espacio. Métricas de distancia. Soporte de colocación ALDEP. Control geométrico de la solución.	151
5.1.	Introducción	151
5.2.	Tipos de modelización geométrica.	153
5.3.	Modelo discreto.....	155
5.4.	El modelo continuo.	158
5.5.	El modelo de los árboles de corte.....	162
5.6.	El modelo semigeométrico.....	165
5.7.	El modelo topológico.....	166
5.8.	Métricas de distancia.	168
5.8.1.	Distancia entre centroides.	169
5.8.2.	Distancia Manhattan.	170
5.8.3.	Distancia euclídea.	171
5.8.4.	Distancia Tchebycheff.	172
5.8.5.	Distancia por contorno lateral.	172
5.8.6.	Distancia "shortest path".....	173
5.8.7.	Distancia rectilínea esperada (también llamada EDIST).	174

5.8.8.	Distancia INTERSECTORIAL.....	175
5.8.9.	Otros estudios sobre distancias.....	179
5.9.	Modelo geométrico adoptado y Espacio de Soluciones.....	179
5.10.	Construcción y Representación de una Solución en el algoritmo ACO implementado.....	182
	Algoritmos híbridos basados en colonias de hormigas.....	185
6.1.	Introducción.....	185
6.2.	Antecedentes sobre técnicas basadas en colonias de hormigas.....	187
6.2.1.	Las hormigas en la naturaleza.....	189
6.2.2.	Analogía establecida.....	190
6.2.3.	Características adicionales.....	192
6.3.	Primera formulación original: algoritmo AS (Ant System).....	192
6.3.1.	Introducción a Ant System.....	192
6.3.2.	Formulación de Ant System.....	193
6.3.3.	Algoritmos de Ant System.....	195
6.3.4.	Conclusiones del funcionamiento de AS.....	196
6.3.5.	Desarrollos posteriores.....	197
6.4.	Algoritmos metaheurísticos ACO: Variantes.....	198
6.4.1.	Introducción.....	198
6.4.2.	Max-min Ant System (MMAS).....	199
6.4.3.	Ant Colony System (ACS).....	200
6.4.4.	Ranked based Ant System (AS _{rank}).....	201
6.4.5.	Comparativa entre las técnicas descritas.....	202
6.5.	Técnicas MOACO (multiobjetivo).....	203
6.5.1.	Introducción.....	203
6.5.2.	Problemas multiobjetivo con ACO.....	204
6.5.3.	Algoritmos MOACO: Bicriterion Ant.....	205
6.5.4.	Algoritmos con múltiples colonias de hormigas.....	206
6.5.5.	COMPETants.....	206
6.5.6.	Pareto Ant Colony Optimization (P-ACO).....	207
6.5.7.	Algoritmo m-ACO genérico para problemas multiobjetivo.....	207
6.5.7.1.	Construcción de soluciones.....	208

6.5.7.2.	Actualización de feromona.	208
6.5.8.	Variantes del algoritmo m-ACO para problemas multiobjetivo.	210
6.5.8.1.	m-ACO1 ($m+1,m$) para problemas multiobjetivo.	210
6.5.8.2.	m-ACO2 ($m+1,m$) para problemas multiobjetivo.	211
6.5.8.3.	m-ACO3 (1,1) para problemas multiobjetivo.	211
6.5.8.4.	m-ACO4 (1, m) para problemas multiobjetivo.	211
6.5.8.5.	Comparativa de los métodos propuestos:	212
6.6.	Formulación del algoritmo para el caso del FLP.....	213
6.7.	Estudio de los parámetros de gobierno de los algoritmos.	218
	Sectorización de incendios. Normativa. Propuesta de algoritmo de sectorización.	221
7.1.	Introducción.	221
7.2.	Cálculo del riesgo de incendio como paso previo a las medidas de sectorización.	223
7.2.1.	Modelos de análisis del riesgo.....	225
7.2.2.	Método Gretener.....	228
7.2.3.	Expresión del valor del riesgo.....	229
7.3.	Normativa Española de protección contra incendios.....	229
7.3.1.	Introducción.	229
7.3.2.	Objetivos.....	230
7.3.2.1.	CTE DB SI.	230
7.3.2.2.	RD 2267/2004, “Seguridad contra incendios en establecimientos industriales”.....	231
7.3.2.2.1.	Aplicación.	231
7.3.2.2.2.	Sectorización por usos.	232
7.4.	Clasificación de las edificaciones.	233
7.4.1.	Configuraciones en el CTE DB SI:	233
7.4.2.	Configuraciones en el RD 2264/2004.....	234
7.5.	Niveles de riesgo y sectorización.....	235
7.6.	Tipos de cálculo de los niveles de riesgo.	236
7.6.1.	Método del riesgo intrínseco (GENERAL).....	237
7.6.2.	Método del riesgo intrínseco simplificado RD 2267/2004.....	241
7.6.2.1.	Simplificación para producción.....	241

7.6.2.2.	Simplificación para almacenamiento.....	242
7.6.2.3.	Aplicación general del método simplificado.	243
7.6.2.4.	Consideraciones sobre el método simplificado.....	245
7.6.3.	Nivel de riesgo intrínseco.....	246
7.7.	Condicionantes en la configuración de la planta. Compartimentación en sectores de incendio.....	248
7.7.1.	Sectorización en el CTE DB SI.	248
7.7.2.	Sectorización en el RD 2267/2004.....	249
7.7.2.1.	Ubicaciones no permitidas de sectores de incendio con actividad industrial: 250	
7.8.	Comentarios sobre los conceptos de protección contra incendios de la normativa española y su origen.....	251
7.9.	Tablas de datos de partida necesarias en la aplicación para la modelización de la sectorización de incendios.....	251
7.10.	Propuesta de algoritmo de sectorización: Antecedentes.	255
7.11.	Criterios para la implementación del algoritmo de sectorización.	257
7.12.	Algoritmo de presectorización: función Presectoriza().	260
7.13.	Algoritmo de sectorización: función ConstruyeSectores().	261
7.14.	Definición de particiones: Cerramientos entre sectores.....	264
7.15.	Puntos de paso: Definición de puertas entre sectores.....	265
7.16.	Consideraciones sobre el cálculo de distancias en la sectorización.....	266
7.17.	Valoración de la calidad de la sectorización.	271
7.18.	Definición de la función objetivo de la sectorización.....	271
	Aplicación informática implementada.....	275
8.1.	Presentación de la aplicación.....	275
8.2.	Manual del usuario de la aplicación.	277
8.3.	Variantes de algoritmos ACO implementadas.....	289
8.3.1.	P-ACO.....	290
8.3.2.	mACO4.	292
8.3.3.	Método propio anterior:	294
8.3.4.	Método Propio nuevo 2015:	295
	Plan experimental.....	299
9.1.	Introducción.....	299

9.2.	Pruebas del algoritmo con problemas con un único objetivo.....	301
9.2.1.	Funcionamiento del algoritmo. Experiencias previas monocriterio.....	301
9.2.2.	Objetivo: relaciones TRA. Problema Tompkins&White de 7 actividades. 306	
9.2.3.	Objetivo: análisis de flujos. Problema (Armour, Buffa 1963) de 20 actividades. 309	
9.2.3.1.	Objetivo: análisis de flujos sin control geométrico y con distancia euclídea. 311	
9.2.3.2.	Objetivo: análisis de flujos sin control geométrico y con distancia Manhattan. 312	
9.2.3.3.	Objetivo: análisis de flujos con control geométrico.....	313
9.3.	Pruebas del algoritmo en modo bicriterio con distintos parámetros de funcionamiento.....	316
9.3.1.	Evolución de las fronteras de Pareto.....	316
9.3.2.	Evolución de costes con los distintos métodos de resolución. Búsqueda guiada sólo con trazas.	319
9.3.3.	Evolución de las fronteras de Pareto con los distintos métodos de resolución. 320	
9.3.4.	Utilización de la herencia (trazas) en anchos de banda.....	321
9.3.5.	Eficiencia de computación del número de individuos en tamaño de población o en iteraciones.	325
9.4.	Pruebas del algoritmo con problemas con varios objetivos.....	328
9.4.1.	Problema biobjetivo de Armour&Buffa con control geométrico propuesto por Wang. 328	
9.4.2.	Problema triobjetivo de planta quirúrgica propuesto por (Santamarina 1995). 338	
9.4.2.1.	Fronteras de Pareto biobjetivo W-R del problema triobjetivo de una planta quirúrgica propuesto por (Santamarina 1995).....	343
9.4.3.	Problema de (Tate, Smith 1995) de 20 actividades.....	346
9.5.	Pruebas del algoritmo con problemas con 4 objetivos incluyendo la sectorización.	351
9.5.1.	Problema inspirado en (Tate, Smith 1995).	351
9.5.2.	Problema definido al azar.....	361
	Conclusiones y desarrollos futuros.	375
10.1.	Conclusiones	375
10.1.1.	Conclusiones sobre la elaboración.....	375

10.1.2.	Conclusiones sobre los resultados.	376
10.2.	Desarrollos futuros.	376
10.2.1.	En el ámbito del FLP.	377
10.2.2.	En el ámbito de las técnicas ACO.	377
10.2.3.	En el ámbito de la toma de decisión multicriterio.	378
10.2.4.	En el ámbito de la protección contra incendios.	378
	Bibliografía.	381

ÍNDICE DE FIGURAS:

Figura 1 - 1 - Trofeo congreso internacional de inteligencia artificial 2014	37
Figura 1 - 2 - Arsenal de Venecia y Planta y Perfil de la cordelería del Arsenal (Subplanta). Bibliothèque Nationale, París.	40
Figura 2 - 1 - de "Vers une Architecture" de Le Corbusier (1923). Las imágenes tomadas por Le Corbusier para ilustrar su concepción de la arquitectura corresponden a plantas Industriales.....	52
Figura 2 - 2 - Edificio industrial. Silos. Fotografía de Banham.	52
Figura 2 - 3- Fábrica a prueba de fuego. Darby (1792-1793).	54
Figura 2 - 4- Galería de las Máquinas de la Exposición Universal de París de 1889, (115x420 m, 48 m de altura).	55
Figura 2 - 5 - Planificación de una actividad industrial. (Santamarina 1995).....	64
Figura 2 - 6 - Fases temporales del proyecto o planificación de una actividad industrial.	64
Figura 2 - 7 – Clasificación medios de producción	69
Figura 2 - 8 – Distribución en posición fija	71
Figura 2 - 9 – Distribución en línea.....	72
Figura 2 - 10 – Distribución por secciones.....	73
Figura 2 - 11 – Células de fabricación flexible	75
Figura 3 - 1 – Método para la obtención del layout de detalle (Jiang, Nee 2013).....	78
Figura 3 - 2 – Esquema general del S.L.P.....	82
Figura 3 - 3 - Gráfico Producto - Cantidad (P-Q) en un instante $t = t_0$	83
Figura 3 - 4 - Ejemplo de tabla matricial	85
Figura 3 - 5 - Ejemplo de tabla relaciones de actividades (TRA).....	87
Figura 3 - 6 - Planteamiento problema multicriterio. Fuente: (Santamarina 1995)	90
Figura 3 - 7 - Clasificación de los problemas FLP - (Drira et al. 2007)	92
Figura 3 - 8 - Distancia intersectorial – caso II – Sectores no adyacentes sin frontera común.....	104
Figura 4 - 1 - Publicaciones indexadas del problema FLP multiobjetivo.....	108
Figura 4 - 2 –Métodos multicriterio para el FLP (Montalva et al. 2012)	109
Figura 4 - 3 - Clasificación de (Waghodekar, Sahu 1986b)	111
Figura 4 - 4 - Clasificación de Malakooti.....	113

Figura 4 - 5 - Clasificación propuesta por (Montalva et al. 2012).	114
Figura 4 - 6 - Métodos basados en funciones agregadas.	119
Figura 4 - 7 – Modelos de agregación de objetivos	119
Figura 4 - 8 - Conjunto final de soluciones eficientes. (Santamarina 1995).	123
Figura 4 - 9 - Minimización del coste relacional total. (Santamarina 1995)	124
Figura 4 - 10 - Los coeficientes de ponderación condicionan la selección. (Santamarina 1995)	124
Figura 4 - 11 - Formulación de Rosenblatt. $\text{Min CRT} = Z = \alpha_2 \cdot C - \alpha_1 \cdot R$. (Santamarina 1995)	127
Figura 4 - 12 - Agregación de objetivos	135
Figura 4 - 13 - Métodos basados en frontera de Pareto.	138
Figura 4 - 14 – Ejemplo de frente de Pareto (Ripon et al. 2011).	138
Figura 4 - 15 - Punto dominado con la 2ª regla de dominación de Rosenblatt	139
Figura 4 - 16 - Riesgo de no generación de soluciones válidas, de (Malakooti 1989).	140
Figura 4 - 17 – Métrica de diseño para el caso biobjetivo. (a) Métrica general de diseño, (b) Métrica normalizada.	148
Figura 4 - 18 – Conjunto de puntos bien distribuidos sobre la línea utópica para un problema biobjetivo.	148
Figura 4 - 19 – Representación gráfica del método 'normal constraint' para problemas biobjetivo.	148
Figura 5 - 1 – Configuraciones no deseables	152
Figura 5 - 2 - Clasificación de los modelos de representación espacial. (Montalvá Subirats et al. 2011)	154
Figura 5 - 3 – Modelo discreto.	155
Figura 5 - 4 – Evaluación distancia entre casillas modelo discreto.	156
Figura 5 - 5 – Modelo continuo.	159
Figura 5 - 6 – Modelo de árbol de cortes (slicing tree)	162
Figura 5 - 7 – Operadores de corte	162
Figura 5 - 8 – Operadores de corte y su representación	163
Figura 5 - 9 – Codificación de una solución mediante árbol de cortes.	163
Figura 5 - 10 – Representación de árbol de cortes y Layout ((Ripon et al. 2011).	164
Figura 5 - 11 – Modelo semigeométrico.	165
Figura 5 - 12 – Representación modelos topológicos.	166
Figura 5 - 13 – Grafos planar y no planar.	167
Figura 5 - 14 - Clasificación de las métricas de la distancia.	169
Figura 5 - 15 - Métricas de distancia. Fuente (Montalvá Subirats et al. 2011)	170

Figura 5 - 16 - Distancia por contorno lateral.....	173
Figura 5 - 17 - Distancia "shortest path", (Zheng 2014).....	174
Figura 5 - 18 – Distancia intersectorial cerramiento común.....	176
Figura 5 - 19 – Distancia intersectorial sectores sin frontera común.....	177
Figura 5 - 20 – Diagrama de flujo del procedimiento de cálculo de la distancia intersectorial.....	178
Figura 5 - 21 - Representación del modelo geométrico adoptado.....	180
Figura 5 - 22 – Ancho de banda variable.....	181
Figura 5 - 23 - Construcción y representación de una solución.....	182
Figura 6 - 1 - Ilustración del experimento del camino más corto (Cordón García, Herrera Triguero 175) ...	190
Figura 6 - 2 - a)Las hormigas van de A a E, b)Se interpone un obstáculo y eligen con una probabilidad del 50%, c)El camino más corto tiene mayor depósito de feromona (Dorigo et al. 1996)	192
Figura 6 - 3 – Algoritmo propuesto por (Stutzle, Hoos 2000).....	198
Figura 6 - 4 - Algoritmos ACO según (Dorigo, Blum 2005).....	199
Figura 6 - 5 – Gráficas comparativas de las técnicas propuestas con 250 y 500 individuos (Alaya et al. 2007).	212
Figura 6 - 6 – Comparativa de las distintas técnicas MOACO (Lopez-Ibanez, Stutzle 2012).	213
Figura 6 - 7 - Representación del modelo geométrico adoptado.....	214
Figura 6 - 8 - Estrategia seguida por la hormiga k en la construcción de la solución s(k).	216
Figura 6 - 9 - Construcción y representación de una solución.....	217
Figura 7 - 1 – Árbol de eventos para fuego en oficina postal. Detectores de humo.	228
Figura 7 - 2 - Distribución en planta dividida en secciones I (bloques = actividades).....	243
Figura 7 - 3 - Introducción de datos geométricos para actividades	252
Figura 7 - 4 - Introducción de datos para la definición de niveles de riesgo-superficies.....	253
Figura 7 - 5 - Introducción de datos de cargas de fuego para cada actividad.	254
Figura 7 - 6 – Diagrama de flujo del procedimiento Presectoriza().....	261
Figura 7 - 8 – Diagrama de flujo del procedimiento ConstruyeSectores().	263
Figura 7 - 8 - Representación de sectores de incendio y puntos de paso (puertas).	266
Figura 7 - 9 - Tablas de introducción de datos - métricas de distancia.....	267
Figura 7 - 10 - Distancia intersectorial – caso I – Sectores con frontera común.....	268
Figura 7 - 11 - Distancia intersectorial – caso II – Sectores no adyacentes sin frontera común.....	269

Figura 7 - 13 – Diagrama de flujo de la función BuscaRutaIntersectorial().....	270
Figura 8 - 1 - Pantalla de presentación de la aplicación	277
Figura 8 - 2 - Pantalla principal de la aplicación	277
Figura 8 - 3 – Definir archivo nuevo.....	278
Figura 8 - 4 – Pestaña General – Define número de actividades del problema	278
Figura 8 - 5 – Definición de datos de las actividades.	279
Figura 8 - 6 – Definición de matriz de flujos.	279
Figura 8 - 7 – Definición de la TRA.....	280
Figura 8 - 8 – Definición de métricas de distancia.	280
Figura 8 - 9 – Definición de datos de la sectorización.	281
Figura 8 - 10 – Modificar datos.	281
Figura 8 - 11 – Definición del espacio discreto.	282
Figura 8 - 12 – Definición de métricas de distancia generales en un paso.....	283
Figura 8 - 13 – Definición de los parámetros de la función objetivo.	283
Figura 8 - 14 – Definición de datos normativos para la sectorización.....	284
Figura 8 - 15 – Cuadro de opciones de optimización.	284
Figura 8 - 16 – Resolución genérica simple.....	285
Figura 8 - 17 – Resolución con método propio.....	285
Figura 8 - 18 – Definición de plan experimental.	286
Figura 8 - 19 – Aviso de sectorización innecesaria.	287
Figura 8 - 20 – Ejemplo de resolución presentada en pantalla.....	287
Figura 8 - 21 – Parámetros visibles de las resoluciones.	288
Figura 8 - 22 – Ver parámetros de la resolución visualizada.....	288
Figura 8 - 23 – Ver resolución.	289
Figura 8 - 24 – Gráficos de evolución de coste obtenidos a partir de los resultados TXT.....	289
Figura 8 - 25 - Ejemplo de frente de Pareto (Ripon et al. 2011).	292
Figura 8 - 26 - Ejemplo de frente de Pareto (Ripon et al. 2011).	296
Figura 9 - 1 - Resultado experimento 1-a y 1-b. Variación de coste relacional $V(s)$ con el número de iteraciones en función del tamaño de la población.	302

Figura 9 - 2 - Variación de $V(s)$ con el número de iteraciones en función de la combinación de estrategias definidas por \square y \square	303
Figura 9 - 3 – Definición de TRA.....	306
Figura 9 - 4 – Solución obtenida por (Tompkins, White 1984).....	307
Figura 9 - 5 – Solución eficiente 1 problema (Tompkins, White 1984) de 7 actividades.....	307
Figura 9 - 6 – Solución eficiente 2 problema (Tompkins, White 1984) de 7 actividades.....	308
Figura 9 - 7 – Solución presentada por (Armour, Buffa 1963, Montalvá Subirats et al. 2011).....	311
Figura 9 - 8 Solución monocriterio flujos problema 20 actividades.....	312
Figura 9 - 9 - Solución monocriterio flujos problema 20 actividades.....	313
Figura 9 - 10 - Solución flujos problema 20 actividades (con ejemplo de control geométrico).....	314
Figura 9 - 10 – Selección de solución eficiente de Pareto con métrica normalizada.....	315
Figura 9 - 12 – Frontera de Pareto W-R en función de computación (mACO4).....	317
Figura 9 - 13 - Frontera de Pareto R-G en función de computación (mACO4).....	317
Figura 9 - 14 – Frontera de Pareto W-R en función de computación (P-ACO).....	318
Figura 9 - 15 – Fronteras W-R para mACO4 y P-ACO con distinta computación.....	318
Figura 9 - 16 – Evolución de costes sin evaporación (proceso guiado completamente por la memoria colectiva).....	319
Figura 9 - 17 - Fronteras de Pareto W-G con 3 métodos de resolución.....	320
Figura 9 - 17 – Comparativa métodos de resolución.....	321
Figura 9 - 19 - Cuadro de diálogo de definición de los parámetros del espacio discreto.....	321
Figura 9 - 20 – Solución sin herencia de ancho de banda.....	322
Figura 9 - 21 – Solución con herencia en el ancho de banda.....	322
Figura 9 - 22 – Evolución de costes con herencia del ancho de banda.....	323
Figura 9 - 23 – Solución con 200 iteraciones y 200 individuos sin herencia trazas.....	324
Figura 9 - 24 - – Solución con 200 iteraciones y 200 individuos con herencia trazas.....	324
Figura 9 - 25 – Evolución de costes 100 iteraciones – 1000 individuos.....	325
Figura 9 - 26 - Evolución de costes 1000 iteraciones – 100 individuos.....	325
Figura 9 - 27 – Comparativa costes 100 individuos-1000 individuos.....	326
Figura 9 - 28 – Mejor solución 1000 iteraciones – 100 individuos.....	326
Figura 9 - 29 – Mejor solución con 100 iteraciones – 1000 individuos.....	327
Figura 9 - 29 – Solución propuesta por (Wang et al. 2005)con $R=1.5$	328
Figura 9 - 30 – Segunda solución propuesta por (Wang et al. 2005).....	329

Figura 9 - 31 – Solución propuesta por (Wang et al. 2005) con R libre ($\equiv 1$).....	329
Figura 9 - 32 – Soluciones propuestas por (Montalvá Subirats et al. 2011),	329
Figura 9 - 34 – Solución presentada por (Armour, Buffa 1963, Montalvá Subirats et al. 2011).....	331
Figura 9 - 35– Solución presentada por (Wang et al. 2005, Montalvá Subirats et al. 2011).....	332
Figura 9 - 36 – Solución presentada por (Bozer et al. 1994, Montalvá Subirats et al. 2011).....	333
Figura 9 - 37 – Solución eficiente 1 problema (Wang et al. 2005).....	334
Figura 9 - 38 – Solución eficiente 2 problema (Wang et al. 2005).....	335
Figura 9 - 39 – Solución eficiente 3 problema (Wang et al. 2005).....	335
Figura 9 - 40 – Solución eficiente 4 problema (Wang et al. 2005).....	336
Figura 9 - 41 – Solución eficiente 5 problema (Wang et al. 2005).....	336
Figura 9 - 42 – Solución eficiente 6 problema (Wang et al. 2005).....	337
Figura 9 - 42 – Fronteras de Pareto problema de (Wang et al. 2005).	337
Figura 9 - 44 – Solución 1 propuesta por (Santamarina 1995).....	341
Figura 9 - 45 – Solución 2ª propuesta por (Santamarina 1995).....	342
Figura 9 - 46 - Fontera de Pareto con 50 individuos y 500 iteraciones.....	343
Figura 9 - 47 - Fontera de Pareto con 400 individuos y 400 iteraciones.....	344
Figura 9 - 48 – Solución al problema de (Santamarina 1995).	344
Figura 9 - 49 – Otra solución eficiente al problema de (Santamarina 1995).....	345
Figura 9 - 49 – Fronteras de Pareto W-G problema (Tate, Smith 1995)-	349
Figura 9 - 50 - – Fronteras de Pareto W-R problema (Tate, Smith 1995).....	349
Figura 9 - 52 – Solución eficiente 1 problema tricriterio.....	350
Figura 9 - 53 - Solución eficiente 2 problema tricriterio.	350
Figura 9 - 54 – Solución 1 problema incendios inspirado en (Tate, Smith 1995) celda 10 ud.	353
Figura 9 - 55 – Solución 2 problema incendios inspirado en (Tate, Smith 1995) celda 10 ud.	354
Figura 9 - 56 – Solución 3 problema incendios inspirado en (Tate, Smith 1995), celda 10 ud.	355
Figura 9 - 57 – Frontera W-R problema sectorización.	356
Figura 9 - 58 – Solución 1 problema sectorización tamaño de celda 20 ud.	357
Figura 9 - 59 – Solución 2 sectorización tamaño de celda 20 ud.	358
Figura 9 - 60 – Solución 3 sectorización con tamaño de celda 20 ud.....	359
Figura 9 - 61 - Comparativa coste de flujos considerando sectores o sin ellos.....	360
Figura 9 - 62 – Solución 1 considerando sectorización (sin distancia intersectorial).....	365
Figura 9 - 63 – Solución 2 considerando sectorización (sin distancia intersectorial).....	366

Figura 9 - 64– Solución 3 considerando sectorización (sin distancia intersectorial).	367
Figura 9 - 65 – Fronteras de Pareto W-R sin distancia intersectorial.....	368
Figura 9 - 65 – Calcular con distancia intersectorial	368
Figura 9 - 67 – Solución 1 problema diseñado considerando distancia intersectorial.	369
Figura 9 - 68 – Solución 2 problema diseñado considerando distancia intersectorial.	370
Figura 9 - 69 – Fronteras de Pareto W-R con distancia intersectorial.	371
Figura 9 - 70 – Comparativa fronteras W-R con y sin distancia intersectorial.	371
Figura 9 - 71 - Comparativa costes considerando distancia convencional o intersectorial.	372

ÍNDICE DE TABLAS:

Tabla 2 - 1 - Principios básicos de la distribución en planta	66
Tabla 3 - 1 – Escala de grados de la T.R.A.	86
Tabla 3 - 2 – Clasificación propuesta por (Santamarina 1995).....	93
Tabla 3 - 3 - Valores numéricos propuestos para la escala cualitativa de grados	98
Tabla 4 - 1 - Matriz de jerarquización de criterios (Shang 1993).	122
Tabla 4 - 2 - Preferencia de proximidad, comparada por pares de actividades, por motivos de seguridad (caso de cuatro actividades) (Shang 1993).	133
Tabla 5 - 1 – Operadores de corte y su codificación.....	163
Tabla 6 - 1 – Matriz de trazas algoritmo ACO normalizada	209
Tabla 7 - 1 – Grado de peligrosidad de los combustibles	238
Tabla 7 - 2 – Riesgo de activación.....	239
Tabla 7 - 3 - Poder calorífico de algunos materiales (RD 2267/2004)	240
Tabla 7 - 4 - Niveles de riesgo intrínseco (RD 2267/2004).....	247
Tabla 7 - 5 - Superficies máximas admisibles en función del tipo de edificio y nivel de riesgo.....	249
Tabla 8 - 1 – Ejemplo de matriz de trazas método P-ACO	291
Tabla 8 - 2 – Ejemplo de matriz de trazas método m-ACO	293
Tabla 9 - 1 - Planteamiento de la doble experiencia. Valores de los parámetros.	302
Tabla 9 - 2 - Comparación final de los resultados obtenidos, en términos de V(s). Valor del supremo: 458 udes.	304
Tabla 9 - 3 – Definición de actividades.	306
Tabla 9 - 4 – Actividades problema (Armour, Buffa 1963) 20 actividades.	309

Tabla 9 - 5 – Matriz de flujos (Armour, Buffa 1963).....	310
Tabla 9 - 6 – Detalle del cálculo de SRF_{whole} solución 1 de (Wang et al. 2005).....	330
Tabla 9 - 7 – Detalle del cálculo de SRF_{whole} solución 2 de (Wang et al. 2005).....	330
Tabla 9 - 8 – Detalle del cálculo de SRF_{whole} solución de (Armour, Buffa 1963).....	332
Tabla 9 - 9 – Detalle del cálculo de SRF_{whole} solución de (Bozer et al. 1994)	333
Tabla 9 - 10 – Problema de 18 actividades de (Santamarina 1995).....	338
Tabla 9 - 11 – Tabla de flujos del problema de (Santamarina 1995).....	339
Tabla 9 - 12 – Valores numéricos de la TRA.....	339
Tabla 9 - 13 – Tabla Relacional de Actividades (Santamarina 1995).....	340
Tabla 9 - 14 – Superficies problema (Tate, Smith 1995)	346
Tabla 9 - 15 – Matriz de flujos problema (Tate, Smith 1995).....	347
Tabla 9 - 16 – Tabla relacional de actividades problema (Tate, Smith 1995).....	348
Tabla 9 - 17 – Actividades y superficies, problema de sectorización inspirado en (Tate, Smith 1995).....	352
Tabla 9 - 18 – Parámetros sectorización de incendios problema inspirado en (Tate, Smith 1995).....	352
Tabla 9 - 19 – Superficies problema de 20 actividades diseñado para sectorización.....	361
Tabla 9 - 20 – Matriz de flujos problema definido para sectorización.....	362
Tabla 9 - 21 – TRA problema definido para sectorización.....	363
Tabla 9 - 22 – Parámetros de la sectorización, problema diseñado 'ad hoc'.....	364

Capítulo 01

Introducción y objetivos.

1.1. Antecedentes.

Desde aproximadamente mediados del siglo pasado, tras la segunda guerra mundial, la automatización de los procesos de fabricación y la ordenación de los medios de producción tanto directos como auxiliares ha sido una prioridad en el proyecto de construcción de las plantas industriales. Desde la década de los 70, se han publicado numerosos artículos y bibliografía que han supuesto otra gran cantidad de avances en la materia. Se ha intentado resolver el problema de forma exacta para un número reducido de zonas en la planta, también se han planteado enfoques más genéricos que dan lugar a gran cantidad de alternativas en la generación de soluciones, siendo en este momento la forma más adecuada de resolver el problema la utilización de computadores, requiriéndose a medida que ha avanzado la cantidad de restricciones que se imponen al problema a fin de lograr mayor calidad en la solución final un gran coste computacional, lo que ha conducido irremediabilmente a desarrollar técnicas de optimización que logren resolver el problema de forma aproximada, reduciendo la desviación de las soluciones – respecto a las óptimas ideales al mínimo posible, a la vez que el tiempo de computación es escandalosamente bajo respecto a otras soluciones tradicionales que intentan resolver el problema de forma exacta.

En el Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de ingeniería civil, y más en concreto en la unidad Docente de Construcciones Industriales, existe una línea de investigación donde se realizan trabajos en el ámbito de la distribución en planta desde hace más de 25 años, habiéndose desarrollado numerosas tesis doctorales y publicaciones al respecto, como las de los profesores (Santamarina 1995), (Contero Gonzalez 1995), (Gonzalez 2005) y más recientemente (Montalva et al. 2012). Con el ánimo de continuar avanzando en esta línea de investigación, se presenta la presente

Tesis doctoral en la que se desarrolla un algoritmo híbrido basado en colonias de hormigas, conjunto de técnicas éstas que se conocen en la bibliografía existente como ACO (Ant Colony Optimization), con hasta 4 variantes del mismo implementadas.

Esta mencionada tradición en la clásica Unidad Docente de Construcción y Arquitectura Industrial (actualmente U.D de Construcciones Industriales), sobre la resolución del problema de distribución en planta, ha originado que ya desde los años 90, el autor de esta tesis, así como otros compañeros, hayan implementado algunas aplicaciones informáticas de varios tipos para la resolución del problema de distribución en planta, basados, a modo de ejemplo, en algoritmos genéticos o en lógica borrosa. La última aplicación implementada se basa en algoritmos ACO (“Ant Colony Optimization”), cuyas variantes se expondrán en el capítulo 6 de este trabajo. En cualquier caso, dichas aplicaciones, a menudo utilizadas en otras investigaciones o incluso con fines docentes, han proporcionado resultados satisfactorios tanto en el plano investigador como en el académico.

A partir del año 2001, cuando aparece el RD 786/2001, precursor del vigente actualmente RD 2267/2004, de Protección Contra Incendios en Establecimientos Industriales, el planteamiento cambia ligeramente, teniendo en consideración que, al tratarse a partir de entonces de una normativa de obligado cumplimiento en la gran mayoría de actividades de nueva planta, y el planteamiento que se siguió fue en una primera fase la elaboración de la distribución en planta, mientras que en una segunda fase se exigía la aplicación de la normativa de protección contra incendios a la distribución en planta obtenida con anterioridad, con carácter obligatorio tanto en el ámbito industrial, como en los usos subsidiarios no industriales diferentes del principal. Cualquier distribución en planta que no cumpla los criterios normativos en todas las zonas, sean éstas industriales o no, carece de validez legal y por tanto no es viable. En una tercera fase se dota del adecuado ambiente térmico, higroscópico, acústico y lumínico a la solución obtenida.

Este planteamiento secuencial se realiza en parte por la necesidad de secuenciar el proceso de diseño, pero también por la imposibilidad de utilizar herramientas que consideren todos los criterios de diseño simultáneamente. Con este planteamiento expuesto, era más que frecuente en el desarrollo de los trabajos reales, que se encontrasen numerosas dificultades en aplicar la normativa de incendios a la solución obtenida en el primer apartado, planteando con demasiada frecuencia modificaciones necesarias (e incluso convenientes) respecto del punto de vista de la seguridad contra incendios, alterando de este modo los parámetros de la solución obtenida en el apartado anterior.

Frente a esta realidad, cada vez más plausible a partir de la entrada en vigor del Código Técnico de la edificación, que impulsa el diseño basado en prestaciones y no en prescripciones, de la no conveniencia de desligar las fases de diseño, se ha comenzado por incluir el criterio de la sectorización en el diseño como un objetivo más mesurable en la calidad de la solución final adoptada, y por lo tanto optimizable como cualquier otro.

En el momento en que surge la idea de implementar la sectorización de incendios como un objetivo más del problema de distribución en planta, por su importancia y dada la obligatoriedad de su cumplimiento, se comienza a recopilar información y a investigar en el ámbito de la sectorización de incendios, buscando en la Web Of Science con los términos clave ("sectoring", "Compartmentation", "Compartmentalization", "Fire clustering", "fire partition", "bulkead", u otros similares) obteniendo escasas referencias, apenas un par de artículos sobre aplicaciones concretas al diseño de unos grandes almacenes (Song Wenhua et al. 2006); sí se encuentra alguna patente sobre sistemas de sellado de instalaciones para asegurar la compartimentación, como en (Schmuttor, Mccauley) y (Anon.b); se estudia también la diversa normativa de incendios, en busca de algoritmos o estrategias para la obtención de una sectorización óptima, no encontrándose nada al respecto. Tampoco se dispone de información sobre valoración objetiva de la calidad de la sectorización final obtenida en un establecimiento industrial, parámetros todos ellos necesarios para la elaboración de un algoritmo como el que se pretende elaborar.

Por ello en este trabajo se ha realizado una propuesta de algoritmo de sectorización, que funciona a partir de la información y criterios que las normativas de incendios utilizan, y se ha definido también una propuesta de función objetivo, así como una serie de parámetros que permiten considerar como influye esta sectorización en el trasiego de materiales (fundamentalmente flujos) a través de las distintas actividades.

El trabajo no se ha limitado a implementar los algoritmos mencionados, sino que ha ido más allá, avanzando en el ámbito de la búsqueda multicriterio de soluciones, adoptando como criterios de diseño los siguientes:

- El control del coste debido al trasiego de materiales en la planta (llamado coste de flujos).
- El control del coste asociado a relaciones de adyacencia (mediante la tabla relacional de actividades).
- El control de la calidad geométrica en la solución final.
- La compartimentación de la planta industrial en sectores de incendio, aplicando la normativa de incendios nacional.

Es en este último hito, del que no parece existir ninguna publicación de relevancia en la bibliografía existente, en el que se han definido más rutinas y criterios de diseño 'novedosos', como la distancia que se ha denominado 'intersectorial', que es una nueva métrica que sirve para medir la distancia real que se recorre por el material cuando éste queda compartimentado por un cerramiento que debe contener el fuego durante una cantidad de tiempo determinado; o los algoritmos que permiten obtener una sectorización de forma automática a la aplicación. Todos ellos se expondrán debidamente en el documento en su capítulo correspondiente.

Esta tesis sigue la línea de los trabajos doctorales previos realizados bajo la tutela de esta Unidad Docente, entre otros los de (Santamarina 1995, Contero Gonzalez 1995, Gonzalez 2005, Diego-Mas et al. 2009, Montalva et al. 2012)

1.2. El problema de la distribución en planta.

El problema de la distribución en planta de procesos industriales (FLP) persigue la ordenación óptima de los elementos (que en este trabajo se llamarán actividades, conceptuándose como aquellos elementos del sistema de producción que requieren espacio) de un sistema de producción y contempla, entre otros, aspectos geométricos y económicos. El aspecto económico tiene que ver con la instalación de la planta y con su operación mientras que el geométrico se relaciona con la arquitectura del sistema. De la consideración de estos aspectos se derivan diferentes formulaciones del problema según el modelo geométrico adoptado para representar la solución y según la función a optimizar, que puede incluir términos cuantitativos como costes de instalación y de operación (mantenimiento) y términos cualitativos derivados de la tabla relacional de actividades establecida desde la metodología SLP (Muther, Demoor 1973).

La formulación cuantitativa clásica más simple de este problema es como un problema cuadrático de asignación (QAP), donde todas las actividades industriales se consideran iguales y cuadradas (Lawler 1963). Bajo este planteamiento monoárea de las actividades la planta industrial tiene una caracterización geométrica insuficiente lo que dificulta en general la adecuada representación y valoración de la distribución en planta de un proceso industrial de fabricación. En esencia el QAP es una formulación topológica propia de la teoría de grafos que no considera los aspectos geométricos fundamentales del problema real de la distribución en planta o "Facilities Layout Planning" (FLP).

Para resolver las dificultades propias de la representación geométrica del modelo y las dificultades de resolución del QAP se han desarrollado diferentes modelos geométricos y aplicado diversas técnicas heurísticas y de optimización (Heragu, Kusiak 1991) que permiten abordar problemas industriales reales con eficiencia y mejor grado de resolución. Los algoritmos de optimización basados en colonias de hormigas ACO se han aplicado al problema de distribución en planta formulado como un problema cuadrático de asignación (Dorigo, Gambardella 1997, Maniezzo et al. 2010) con todos los inconvenientes antes reseñados que esto conlleva. Estas técnicas se encuentran actualmente muy activas, existiendo incluso congresos específicos a tal efecto, como el reciente "Ninth international Conference of Swarm Intelligence", celebrado en Bruselas en 2014, cuyo trofeo al mejor artículo presentado en el ámbito de las hormigas era el que puede verse en la imagen:



Figura 1 - 1 - Trofeo congreso internacional de inteligencia artificial 2014

El coste ha sido, históricamente, el objetivo empleado para optimizar las alternativas generadas, pero tal y como estableció Muther no es el único, lo que confiere al problema un enfoque claramente multiobjetivo. En este trabajo se aborda el FLP en sus dos vertientes: económica y geométrica. El procedimiento propuesto se desarrolla a partir del modelo geométrico discreto del algoritmo de construcción ALDEP (Seehof, Evans 1967) al que se incorpora una estrategia de mejora basada en colonias de hormigas, configurándose de este modo un nuevo algoritmo híbrido que supera los inconvenientes geométricos de una formulación QAP, adoptándose el criterio de optimización del algoritmo ALDEP.

En general, como se expondrá en el capítulo 3 de este trabajo donde se definen las funciones de coste de cada objetivo (o funciones objetivo, F.O.), se persigue minimizar, para un periodo de tiempo determinado, una función multicriterio del tipo que se indica a continuación, donde w_{ij} el coste unitario de mantenimiento entre las actividades i y j , por unidad de tiempo y de distancia, d_{ij} la distancia entre las actividades i y j , medida con la métrica adecuada, r_{ij} la relación de adyacencia especificada en la tabla relacional de actividades $R(r_{ij})$ para el par de actividades i y j , $V(r_{ij})$ es una función de valor de la relación y $F(f_{ij})$ la matriz de adyacencia o frontera del sistema:

$$\text{Min } \mathcal{F}(W, D, R, F) = \text{Min} \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m w_{ij} \cdot d_{ij} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m V(r_{ij}) \cdot f_{ij} \right) \quad (1.1)$$

Además, en este caso se incluye el coste derivado del control geométrico de la solución, así como el que supone el cumplimiento de la normativa de protección contra incendios, la cual obliga a compartimentar la zona industrial, tradicionalmente diáfana, en zonas con una extensión máxima en función de su nivel de riesgo de incendio, a través del concepto de nivel de riesgo intrínseco, con lo que la función objetivo a minimizar consta-

rá de 4 términos como se expondrá en el capítulo 4, donde se definirán los objetivos a conseguir así como sus funciones de coste asociadas.

1.3. Objeto de la investigación.

Como ya se ha indicado al inicio del trabajo, el objeto de la investigación consiste en aplicar algoritmos híbridos basados en colonias de hormigas al problema de la distribución en planta, considerando varios aspectos en su aplicación, que finamente se enumeran a modo de resumen.

Se pretende resolver el problema de la distribución en planta en su formulación como un problema cuadrático de asignación QAP. Aunque algunas de las referencias bibliográficas que se citarán empleen variantes que no se ciñan estrictamente a esta formulación, en el caso implementado sí se hará tal cual puede encontrarse en la bibliografía de referencia.

De entre todas las variantes existentes en la bibliografía como posibles técnicas de optimización, se pretenden implementar aquellas que logren mejores soluciones con un menor coste computacionales, es decir, de forma más rápida.

Se pretende implementar el resultado final en forma de aplicación informática, de modo que cualquier usuario pueda utilizarla, sin ser un experto específico en el ámbito de la investigación en distribución en planta, sin más que conocer un número reducido de parámetros que gobiernan los gradientes de la búsqueda durante la misma, los cuales pueden ser explicados de forma somera en una ayuda o pequeño manual del usuario.

Dado el uso futuro que se pretende dar a la aplicación, también se ha considerado pertinente que un objetivo del diseño sea que la calidad geométrica de las soluciones sea aceptable y configurable por el usuario. Aunque se conocen otras técnicas de tratamiento del espacio, como por ejemplo los árboles de cortes, que tienen un gran funcionamiento y una codificación de soluciones excelentes (y este autor las ha implementado en aplicaciones similares en alguna ocasión anterior), el control geométrico se hace más complejo con su utilización y se ha optado por utilizar un soporte espacial con curvas de relleno tipo ALDEP, lo que reduce el número de soluciones posibles y permite ajustar el compromiso tiempo de computación-calidad de la solución-refinamiento de la malla sin más que variar parámetros sencillos como el ancho de banda o el tamaño de celda.

También se pretende implementar como criterio de diseño que el programa calcule, dados unos datos básicos de cargas de fuego, peligrosidad por combustibilidad de los productos y riesgo de activación (los cuales figuran en las distintas normativas de incendios

existentes de forma explícita o implícita), la sectorización de incendios 'óptima' de las distintas soluciones que la aplicación genera, entendiendo como óptima aquella que dé lugar a la mínima cantidad de sectores y que necesite menor cantidad de cerramientos *REI* (resistentes al fuego).

El lenguaje de programación escogido es *Visual Basic*, que es un lenguaje sencillo, con una curva de aprendizaje poco tortuosa que permitirá en el futuro a cualquier tercer interesado continuar con el desarrollo de otras técnicas y/u objetivos sobre la base de este paquete informático desarrollado. De hecho, y con esta intención, toda la programación se ha realizado orientada a objetos, de modo que para realizar modificaciones en muchas ocasiones no es necesario ni modificar el código existente, más allá de añadir alguna variable a las ya existentes y un nuevo módulo donde se utilicen como herramientas los objetos ya implementados pero con una algorítmica diferente o una casuística distinta (como de hecho así se ha hecho implementando hasta 4 variantes de optimización utilizando los mismos objetos).

1.4. Evolución histórica y tratamiento del problema.

El diseño de la distribución en planta es un proceso complejo en el que hay que integrar y compatibilizar multitud de ACTIVIDADES (en esta disciplina se entenderá como ACTIVIDAD (o su equivalente anglosajón "facility") a cualquier elemento del sistema de producción que tenga unos requerimientos espaciales), atendiendo a diferentes factores, a veces contradictorios.

En 1961 Muther (Muther 1968) establece un procedimiento organizado y sistemático adecuado para resolver el problema conocido como S.L.P. o "Systematic Layout Planning". "Systematic Layout Planning" establece una metodología común para resolver los posibles problemas de distribución en planta independientemente de su naturaleza. S.L.P. es aplicable a problemas de distribución de plantas industriales, locales comerciales, hospitales, oficinas, etc.

Como se indica en (Hospitaler-Pérez 2005), los planos del Arsenal de Venecia, fundado en 1104, constituyen el primer ejemplo de una distribución en planta planificada. El Arsenal de Venecia fue el corazón de la república y el fundamento de su economía y constituyó el mayor centro de producción hasta la revolución industrial. Dante Alighieri en la Divina Comedia hace referencia la intensa actividad del Arsenal. No solamente son reseñables estos hechos sino que además los procedimientos y métodos de construcción naval usados y registrados por los venecianos fueron retomados en la Segunda Guerra Mundial en la producción masiva de buques (Muther 1981).

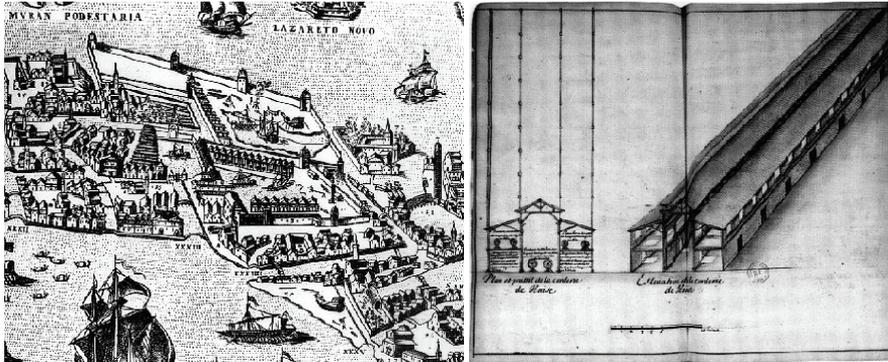


Figura 1 - 2 - Arsenal de Venecia y Planta y Perfil de la cordelería del Arsenal (Subplanta). Bibliothèque Nationale, Paris.

Una buena distribución de estaciones de trabajo contribuye en la eficiencia global de las operaciones y puede reducir los gastos operativos hasta un 50% (Tompkins et al. 1996). La primera modelización matemática del problema de distribución en planta de áreas iguales como un problema de asignación cuadrática ("Quadratic Assignment Problem", designado como QAP en la bibliografía) se hace en (Koopmans, Beckman 1957), donde se minimiza los costes derivados del manejo de materiales, que causa ubicar cada una de las máquinas en cada una de las localizaciones posibles. Cuando el problema se formula con áreas desiguales y con el ánimo de ser aplicado a distribuciones bidimensionales en casos reales, con restricciones geométricas por ejemplo, recibe el nombre de "Facility Layout Problem" o FLP. Desde entonces muchos investigadores han destacado la importancia de los QAP y su relevancia en los problemas de distribución de planta de áreas iguales. La ordenación de los elementos del sistema planta industrial se constituye como una parte de la organización del sistema "planta industrial" y como tal representa una fuente de ventajas competitivas al tener incidencia directa sobre el coste y competitividad de los productos.

"Los materiales, la maquinaria y aún los salarios han llegado a estar cada vez más estandarizados. Por lo tanto, la dirección debe asegurar, cada vez más, a través de los detalles (todos los detalles que afecten a los costes), sus márgenes de beneficio. Uno de esos importantes detalles es la distribución en planta.

Una distribución deficiente es una fuente continua de pérdidas para la compañía que la instala, llegando a veces incluso a ser antieconómico cualquier intento de mejora, razón que justifica el estudio minucioso de la misma antes de llevar a cabo la implantación definitiva.

Por desgracia, en muchos sectores no existe ni siquiera consciencia de que el problema de la implantación sea particularmente difícil ni de gran importancia". H.B. Maynard (1955), (Muther 1981).

La rápida evolución de las tecnologías de la información y de la comunicación (TIC), así como la globalización y la internacionalización de las empresas industriales han trans-

formado la concepción del posicionamiento competitivo empresarial: de la obligación rutinaria a la necesidad crítica.

"La supervivencia de las empresas pasa por la construcción de una o más ventajas competitivas, de tal modo que adquieran un posicionamiento en el mercado que las haga menos vulnerables frente a las evoluciones no deseadas del mismo y ante los movimientos que la competencia pudiera emprender de modo específico". Michel Porter (1982).

Algunas de las definiciones que han recogido diversos autores para el problema de la distribución en planta son las que a continuación se exponen:

"La buena distribución en Planta, como define la Westinghouse Electric Corporation, significa (a) implantar el equipamiento correcto, (b) coordinándolo con el método correcto, (c) en el lugar correcto, (d) para permitir el procesado de una unidad de producto de la forma más efectiva, (e) a través de la distancia más corta posible, (f) y en el menor tiempo posible. La importancia de una buena distribución en planta como un factor para asegurar la producción al menor costo queda así establecida por lo que se comprende la importancia de la misma." Sansonetti & Mallick (1945). (Tompkins, White 1984).

"La distribución en planta es el plan de, o el hecho de planificar, una ordenación óptima de los elementos industriales, incluyendo el personal, la maquinaria y equipos, almacenes, sistemas de manutención y otros servicios, junto con el diseño de la mejor estructura que contenga estas instalaciones", (Moore 1962).

"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 del taller".

"La misión de nuestro estudio se centrará en hallar una ordenación de las áreas de trabajo y del equipo que sea la más económica para llevar a cabo el proceso productivo, al mismo tiempo, que la más segura y satisfactoria para los operarios y para el entorno de la planta industrial. Se hace necesario ordenar productores, materiales, maquinaria y servicios auxiliares (mantenimiento, transporte, etc.) de modo que sea posible fabricar los productos con un coste suficientemente reducido para poder venderlo con un buen margen de beneficio en un mercado de competencia" (Muther 1981).

Tal y como se indica en (Muther 1981), cualesquiera que sean los objetivos que se plantean en una distribución en planta, éstos se pueden resumir en 6 principios que constituyen la base que rige la construcción de una distribución en planta:

- 1 - Integración conjunta de todos los factores que afectan a la distribución.
- 2 - Movimiento del material según distancias mínimas.
- 3 - Circulación del trabajo a través de la planta.
- 4 - Utilización efectiva de todo el espacio.
- 5 - Satisfacción y seguridad de los trabajadores.
- 6 - Flexibilidad de ordenación para facilitar cualquier reajuste.

Estos principios se describirán con más detalle en un capítulo posterior, donde se explicarán las bases de toda distribución en planta, los objetivos que ésta debe perseguir y se plasmarán los más importantes a modo de principios.

En el planteamiento del problema, se considerará que la planta está dividida en actividades. Se entiende por actividad, en el ámbito de una distribución en planta, a cualquier elemento del sistema de producción caracterizado por un requerimiento espacial y por un conjunto de relaciones, las actividades son los elementos del sistema. Así el sistema de producción se compone de un conjunto de elementos o actividades en interacción.

Aunque históricamente las distribuciones en planta eran el resultado del artesano que llevaba el trabajo o del técnico que proyectaba el edificio y se asignaban áreas de trabajo para misiones o servicios específicos, éstas no explicitaban ni unos principios que las rigieran ni una metodología aplicada.

Uno de los primeros autores que intentó establecer una metodología común a los problemas de Distribución en Planta fue Immer en el año 1950 (Tompkins, White 1984). Propuso un método extremadamente sencillo para resolver problemas de reordenación de plantas en las que ya existía un proceso productivo. El procedimiento, que tan sólo atiende al principio de circulación o flujo de materiales, constaba de tres fases.

Estos métodos, tal y como se entiende hoy día el problema de la distribución en planta, son incompletos y no se pueden establecer como metodología común a todos los problemas de implantación.

No es hasta 1968 cuando Muther (Muther 1968) establece un procedimiento, organizado y sistemático, adecuado para resolver el problema. Método conocido como S.L.P. o

"Systematic Layout Planning", conocido en la actualidad de forma más genérica como "FLP" (Facilities Layout Planning).

Como sucede en los problemas de análoga complejidad no existe un único método, y, por otra parte, cabe la posibilidad de establecer variantes más o menos detalladas del método adoptado. Posteriormente (Reed 1961, Nadler 1965, Apple, Deisenroth 1972, Tompkins, White 1984), entre otros, diseñan nuevos procedimientos para abordar el problema de la distribución en planta, si bien hay que decir, que de todos ellos el más ampliamente utilizado ha sido el F.L.P.

"Systematic Layout Planning" o "Facilities Layout Planning" es, en esencia, una forma organizada de enfocar los problemas de implantación. El procedimiento consiste, básicamente, en fijar un cuadro operacional de fases y una serie de procedimientos que permiten identificar, valorar y visualizar todos los elementos involucrados en la implantación y las relaciones existentes entre ellos (Muther 1968).

El F.L.P. es un procedimiento universalmente aceptado y se utiliza habitualmente en las publicaciones científicas como sistema de referencia para contextualizar las propuestas dentro del diagrama general.

Así se tiene que existen líneas de investigación y aportaciones científicas dentro de los diferentes bloques que constituyen el diagrama del procedimiento.

En el ámbito del análisis producto-cantidad (P-Q) y relacionado con el proceso de fabricación ha surgido en los últimos años la tecnología de grupo que ha supuesto un desarrollo de los procedimientos de clustering y ha desembocado en nuevos modelos organizativos de los elementos directos de producción: la célula, la semicélula y el grupo funcional.

En el ámbito de las tablas relacionales, ya sean cuantitativas, diagramas de recorrido, o cualitativas, tablas relacionales de actividades, la lógica borrosa (fuzzy logics) se utiliza como álgebra para operar con la opinión de diferentes expertos relativa a las relaciones entre los elementos del sistema y para operar con variables cuantitativas y cualitativas.

En el ámbito del diagrama relacional la teoría de grafos ha aportado metodologías para obtener grafos planares ponderados maximales (G.P.P.M.) al objeto de obtener el máximo número de adyacencias entre actividades relacionadas minimizando cruces en las líneas de flujo.

En el ámbito de la generación y evaluación de soluciones es donde más aportaciones se han producido, diversas formulaciones geométricas, algoritmos exactos, algoritmos heurísticos, métodos de construcción y métodos de mejora, métodos metaheurísticos (entre los que se destaca el que se utiliza en el presente trabajo, los algoritmos ACO (“ant Colony Optimization”) basados en colonias de hormigas que se presentarán más adelante, etc... que se expondrán con detalle en capítulos posteriores, entre ellas las que se realizan en la presente Tesis Doctoral.

1.5. Planteamiento y desarrollo del estudio.

El presente trabajo se desarrolla en una serie de capítulos, cuya descripción se adjunta a continuación:

- En el **capítulo 1** que es éste, se explica el contenido del trabajo así como los objetivos que se pretenden.
- En el **capítulo 2** se define el problema de la distribución en planta, se habla de la evolución histórica del concepto de planta industrial y que éste queda enmarcado en la disciplina de la construcción y la arquitectura industrial; también se abordan conceptos básicos y tipos básicos de distribución en planta tradicionales. También se exponen brevemente los hitos en materia de normativa de protección contra incendios.
- En el **capítulo 3** se exponen las bases del enfoque de la resolución del problema según el SLP, o aplicado al problema concreto que se trata en este trabajo en su vertiente bidimensional y geométrica conocido como FLP (“Facility Layout Planning”), incluso mediante técnicas informáticas y se clasifican los métodos existentes. También se describen los distintos objetivos que se persiguen en la distribución en planta, y se plantea su modelización y formulación para su implementación informática según diversos autores, así como la finalmente escogida en este trabajo.
- En el **capítulo 4** se analiza cómo realizar una integración de los objetivos analizados en el capítulo interior desde un punto de vista multicriterio, entendido como la mejor solución de compromiso entre todos ellos, realizando un repaso sobre las distintas alternativas de planteamiento multicriterio existentes en la bibliografía, así como la definición de los óptimos de Pareto, el concepto de soluciones dominadas y los frentes asociados a cada par de criterios.

- En el **capítulo 5** se comentan las distintas técnicas que existen para tratar el espacio en el problema FLP de distribución en planta, tanto continuas como discretas, explicando con mayor profundidad aquella utilizada en el presente documento. También se analizan las distintas alternativas y estudios existentes para el control geométrico de la solución.
- En el **capítulo 6** se exponen los primeros desarrollos y trabajos realizados basados en algoritmos de colonias de hormigas (ACO), así como su posterior evolución y aplicación de diversos problemas de ingeniería con multitud de variantes existentes en la bibliografía. Se expone su formulación y los parámetros que las gobiernan, así como ciertos comentarios sobre bibliografía existente analizando su rendimiento.
- En el **capítulo 7** se analiza la normativa nacional en materia de protección contra incendios, y se propone un algoritmo de sectorización que incluye varias rutinas diseñadas al efecto por el autor cuyos algoritmos y criterios de funcionamiento se explican.
- En el **capítulo 8** se expone el funcionamiento de la aplicación informática donde se implementan los métodos propuestos, así como la explicación de las variantes ACO implementadas respecto de las existentes en la bibliografía, dos de ellas que se implementan en el presente trabajo, y otras dos que son mezclas/variantes de las ya existentes que propone el autor de esta Tesis Doctoral.
- En el **capítulo 9** se realiza un plan experimental donde se aborda la resolución de diversos problemas de referencia de entre los existentes en la bibliografía para contrastar la validez de los algoritmos implementados, demostrando la calidad de las soluciones obtenidas respecto de otras publicadas, analizando tanto resultados como parámetros de diseño y criterios de cálculo.
- En el **capítulo 10** se exponen las conclusiones y se habla sobre los planteamientos de desarrollos futuros en la línea de investigación que se tiene en mente realizar.
- Finalmente en el **capítulo 11** se recoge toda la bibliografía utilizada en el trabajo de forma ordenada.

Capítulo 02

La planta industrial, antecedentes y concepción actual. Tipos básicos de distribución en planta.

2.1. Introducción

En este capítulo se pretende mostrar cuál es el concepto actual del sistema planta industrial, y el porqué de las características que se buscarán en la distribución en planta final, que plasma de la mejor forma posible el método S.L.P. ya comentado creado por (Muther 1968) y que se expondrá con más detalle en el siguiente capítulo. Pero ha existido un camino histórico hasta llegar al convencimiento de que las características más adecuadas para el funcionamiento de una planta industrial son las que se reseñarán al final del capítulo: por ello, con carácter previo, se analizarán los aspectos cruciales que han influido en la evolución del concepto, entre los cuales pueden enumerarse:

- Definir la disciplina que se ocupa de los problemas de distribución en planta (que como se verá es la Arquitectura Industrial), y ver en qué fase del proyecto cobra especial relevancia.
- Exponer la concepción histórica del concepto de la planta industrial, ligándolo al de la arquitectura y la construcción existente en el contexto histórico.

- Una vez llegados al convencimiento de qué características debería tener un sistema planta industrial, se expondrán los objetivos y principios básicos que debería perseguir el diseño de la misma.
- Se expondrán los tipos básicos tradicionales de distribución en planta.

No pretende exponerse la historia de la arquitectura ni de la industria de forma completa, pues ya existe gran cantidad de bibliografía sobre la materia, sino exponer una serie de reseñas, a modo de resumen, en las que aparezcan los hitos básicos que influyen en la concepción actual. Es por ello que pueden echarse en falta algunos hitos que algún autor considere importantes: únicamente se han introducido aquéllos que el autor de este documento considera relevantes.

2.2. El problema de la distribución en planta: lugar que ocupa en relación al concepto de la “Construcción y Arquitectura Industrial”.

Un análisis conceptual de los términos arquitectura – construcción e industrial, a partir de diferentes diccionarios y autores teóricos, alienta sobre la necesidad de apostar por una aproximación histórica de éstos. Las diferentes acepciones y las relaciones entre ellos se fundamentan en sus vinculaciones a lo largo del tiempo.

2.2.1. Concepto de Arquitectura.

La Arquitectura, del latín “*architecturam*”, es según el Diccionario de la Real Academia de la Lengua (Anon.a), “el arte de proyectar y construir edificios”.

Marco Vitruvio (Vitruvio Polión), en la obra *De Architectura*, I a.C: "*La Architectura es una ciencia adornada de otras muchas disciplinas y conocimientos, por el juicio de la cual pasan las obras de las otras artes. Es práctica y teórica. La práctica es una continua y expedita frecuentación del uso, ejecutada con las manos, sobre la materia correspondiente a lo que se desea formar. La teórica es la que sabe explicar y demostrar con la sutileza y leyes de la proporción, las obras ejecutadas*" (del Lib. I, cap. I) "*Estos edificios deben construirse con atención a la firmeza, comodidad y hermosura, Serán firmes cuando se profundizaren las zanjas hasta hallar un terreno sólido: y cuando se eligieren con atención y sin escasez los materiales de toda especie. La utilidad se conseguirá con la oportuna situación de las partes, de modo que no haya impedimento en el uso; y por la correspondiente colocación de cada una de ellas hacia su aspecto celeste que más le convenga. Y la hermosura, cuando el aspecto de la obra fuera agradable y de buen gusto; y sus miembros proporcionados a la simetría de sus dimensiones*" (del Lib. I, cap. III). También reconocía que "*la Arquitectura se compone de orden, que los griegos llamaban*

taxis; de disposición a la que dan el nombre de diatesis; de proporción o euritmia (simetría, decoro) y de distribución, que en griego se dice oikonomia”.

En la época renacentista Miguel Ángel utilizará términos muy similares al definirla: *“la Arquitectura no es otra cosa que orden, disposición, bella apariencia y proporción entre las partes, conveniencia y distribución”.*

Leon Battista Alberti (De Re Aedificatoria, 1452) *“El arte de la construcción en su totalidad se compone del trazado y su materialización (...) el trazado será una puesta por escrito determinada y uniforme, concebida en abstracto, realizada a base de líneas y ángulos y llevada a término por una mente y una inteligencia culta”* (del Lib. I, Cap. I).

Claude Perrault (Les dix livres d'Architecture de Vitruve ..., 1673) *“Toda la arquitectura tiene como fundamento dos principios, uno de los cuales es positivo y el otro arbitrario. El fundamento positivo es el uso y la finalidad útil y necesaria para la cual ha sido construido un edificio, tales como la solidez, la salubridad y la comodidad. El fundamento que yo llamo arbitrario es la belleza que depende de la autoridad y de la costumbre”.*

Carlo Lodoli (A. Memmo: Elementi dell'Architettura Lodoliana, 1786) *“La arquitectura es una ciencia intelectual y práctica dirigida a establecer racionalmente el buen uso y las proporciones de los artefactos y a conocer con la experiencia la naturaleza de los materiales que los componen”* (del Vol. I, Cap. VI).

Francesco Milizia (Principi di Architettura Civile, 1781) *“La Arquitectura es el Arte de Construir (...) es: 1º La base y regla de todas la otras Artes. 2º Forma la ligazón de la Sociedad Civil. 3º Produce y aumenta el comercio. 4º Impulsa la riqueza pública y privada en beneficio y en decoro del Estado, de los propietarios y de la posteridad. 5º Defiende la vida, los bienes, la libertad de los ciudadanos”* (Del Tomo I).

J. N. Louis Durand (Precis des leçons d'Architecture, 1801-1803) *“La arquitectura es el arte de componer y de realizar todos los edificios públicos y privados (...) conveniencia y economía son los medios que debe emplear naturalmente la arquitectura y las fuentes de las que debe extraer sus principios (...) para que un edificio sea conveniente es preciso que sea sólido, salubre y cómodo (...) un edificio será tanto menos costoso cuanto más simétrico, más regular y más simple sea”* (de la Introducción al Vol. I).

E. E. Viollet-Le-Duc (Dictionnaire raisonné ..., 1854-1868) *“La arquitectura es el arte de construir. Se compone de dos partes, la teoría y la práctica. La teoría comprende: el arte propiamente dicho, las reglas sugeridas por el gusto, derivadas de la tradición, y la ciencia, que se funda sobre fórmulas constantes y absolutas. La práctica es la aplicación de*

la teoría a las necesidades; es la práctica la que pliega el arte y la ciencia a la naturaleza de los materiales, al clima, a las costumbres de una época, a las necesidades de un periodo" (de la voz "Architecture").

Heinrich Wölfflin (*Renaissance und Barock*, 1888) *"La arquitectura es la expresión de un tiempo, en cuanto reproduce el ser físico del hombre, su manera de comportarse y de moverse (...) en una palabra, en cuanto revela en sus relaciones monumentales el sentido vital de una época"*.

Alois Riegl (*Spättrönsische Kunstindustrie*, 1901) *"La arquitectura es un arte utilitaria y su finalidad consiste en cada momento en la conformación de espacios limitados dentro de los cuales se ofrece a los hombres la posibilidad de libres movimientos. Según esta definición, la tarea de la arquitectura se divide en dos partes complementarias pero en cierta oposición mutua: la creación del espacio (cerrado) como tal y la creación de sus contornos"*.

El Movimiento Moderno, de la mano de Le Corbusier, reconoce en la arquitectura el papel de ordenación del espacio construido, a la vez que propugna una interpretación poética de esta, (*Vers une Architecture*, 1923) *"volumen y superficie son los elementos a través de los cuales la arquitectura se manifiesta. El volumen y la superficie son generados por la planta. La planta es el generador. Tanto peor para los que no tienen imaginación"*. Para este autor *"La arquitectura está más allá de los hechos utilitarios. La arquitectura es un hecho plástico. (...) La arquitectura es el juego sabio, correcto, magnífico de los volúmenes bajo la luz. (...) Su significado y su tarea no es sólo reflejar la construcción y absorber una función, si por función se entiende la de la utilidad pura y simple, la del confort y la elegancia práctica. La arquitectura es arte en su sentido más elevado, es orden matemático, es teoría pura, armonía completa gracias a la exacta proporción de todas las relaciones: ésta es la "función" de la arquitectura."*

Ludwig Mies van der Rohe ("Carta al Dr. Riezler" en *DIE FORM*, 2, 1927) *"No voy contra la forma, sino contra la forma como fin en sí mismo. (...) La forma como fin acaba en mero formalismo. (...) No queremos juzgar tanto los resultados como el proceso creativo. Porque es justamente esto lo que revela si la forma deriva de la vida o está inventada para su propio uso. Por esto el proceso creador es tan esencial. La vida es lo decisivo para nosotros."*

Frank Lloyd Wright ("*In the Cause of Architecture*" en *ARCHITECTURAL RECORD*, 1927-1928) *"El edificio no será, en adelante, un bloque de materiales de construcción elaborado desde fuera, como una escultura. El ambiente interno, el espacio dentro del cual se vive, es el hecho fundamental del edificio, ambiente que se expresa al exterior como espacio cerrado"*.

Henri Focillon (*La vie des formes*, 1934) "... por esencia y destino este arte se desenvuelve en un espacio "verdadero", aquél en que nos movemos y en el que nuestro cuerpo actúa. (...) Sin duda la lectura de una planta dice mucho, permite conocer lo esencial del programa y permite a un ojo experimentado captar las principales soluciones constructivas. (...) Pero esta reducción, o si se prefiere, esta abreviación de los procedimientos de trabajo no abarca toda la arquitectura, sino que la despoja de su privilegio fundamental que es el de poseer un espacio completo (...)"

Aldo Rossi ("*Architettura per i musei*", 1968) "*Arquitectura en sentido positivo es una creación inseparable de la vida y de la sociedad en la cual se manifiesta; es en gran parte un hecho colectivo. (...) Creo que se puede decir que los principios de la arquitectura, en cuanto fundamentos, no tienen historia, son fijos e inmutables, aunque las diferentes soluciones concretas sean diversas, y diversas las respuestas que los arquitectos dan a cuestiones concretas*".

Manfredo Tafuri (*Teorie e storia dell'architettura*, 1970) "... los varios componentes pueden disponerse en la obra arquitectónica según jerarquías extremadamente variables, asumiendo cada vez funciones diferentes. (...) lo específico de la arquitectura es el modo de poner en relación entre sí las diversas estructuras que confluyen en ella". "*El lenguaje de la arquitectura se forma, se define y se supera en la Historia junto con la idea misma de arquitectura. En este sentido, establecer una "gramática general" de la arquitectura es una utopía*".

Sigfried Giedion (*Space, Time, and Architecture*, 1941) "... ella (la arquitectura) se compenetra íntimamente con la vida de una época en todos sus aspectos. Cualquiera de sus elementos, desde la predilección por ciertas formas al modo de considerar los principios específicos de la edificación que parecen los más naturales, refleja las condiciones de la época de que derivan. Ella es el producto de factores de todo género, sociales, económicos, científicos, técnicos, etnológicos. En cuanto una época trata de enmascararse, su verdadera naturaleza se transparentará siempre a través de su arquitectura".

Louis Kahn (Conferencia Politécnico de Milán, 1967, en ZODIAC, 17) "*Ante todo debo decir que la arquitectura no existe. Existe una obra de arquitectura. Y una obra de arquitectura es una oferta a la arquitectura en la esperanza de que ésta obra pueda convertirse en parte del tesoro de la arquitectura. No todos los edificios son arquitectura (...) El programa que se recibe y la traducción arquitectónica que se le da deben venir del espíritu del hombre y no de las instrucciones materiales*".

Los diccionarios actuales la definen como "el arte de proyectar y construir edificios", tal como se indicó anteriormente (Diccionario de la Real Academia de la Lengua Española), o como "el arte de construir, de disponer y de ornar los edificios" (Diccionario de la Academia Francesa). Puede apreciarse que con el tiempo el término Arquitectura tiende a

convertirse en sinónimo de construcción, aunque a consta de perder el aura que poseía en épocas pasadas y servir indiferentemente para designar a todo tipo de edificios, olvidando el privilegio de la dimensión estética o simbólica.



Figura 2 - 1 - de "Vers une Architecture" de Le Corbusier (1923). Las imágenes tomadas por Le Corbusier para ilustrar su concepción de la arquitectura corresponden a plantas Industriales.

2.2.2. Concepto de Industria.

Por otro lado, la Industria, del latín *industriam* es, según el Diccionario de la Real Academia de la Lengua la *"maña y destreza o artificio para hacer una cosa"*. Contraria a ella, aunque antiguamente se reconocía ésta en el conjunto de operaciones necesarias para obtener y transformar los productos naturales o materias primas en productos útiles para el hombre, en la actualidad, la Industria, de modo global, se asimila a la actividad fabril, desde el momento en que se produce la generalización del empleo de la máquina; ésta constituye la esencia de la industria y es el elemento que la diferencia y aleja de la artesanía. En este sentido, G. Blachère afirma que *"la esencia de la industrialización es el producir un objeto sin mano de obra artesanal, con máquinas utilizadas por obreros simplemente especializados, no cualificados, o mejor, por máquinas automáticas. Ésta es la base de la industrialización"*.

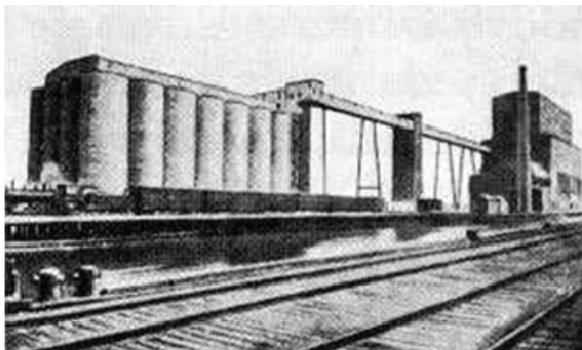


Figura 2 - 2 - Edificio industrial. Silos. Fotografía de Banham.

En este contexto, se puede entender que la Industria constituye una exigencia social que la Arquitectura conforma espacialmente y que se manifiesta en la Construcción de Plantas Industriales; entendiendo la "Planta Industrial" como una instalación compleja, constituida por diferentes secciones o sectores, físicamente separados en áreas, recintos o edificios diferentes, en los que se integran no sólo las funciones de producción, sino todas las auxiliares de la misma, tales como producción-transformación de energía, tratamiento de la misma.

La arquitectura industrial, por no estar sujeta exclusivamente a presiones estilísticas o estéticas y ante la necesidad de recoger la utilidad y la economía, ha explotado y experimentado con materiales nuevos (acero, hierro, hormigón) y ha desempeñado un papel muy importante en la génesis del movimiento moderno y en la historia de las formas arquitectónicas.

En virtud de todo este razonamiento, el profesor Hospitaler (Hospitaler-Pérez 2005) afirma que la Construcción y la Arquitectura Industrial se configuran como "**la ciencia y el arte de la conformación y cualificación de los requerimientos espaciales, funcionales y ambientales de la actividad industrial formalizados a través del proyecto y materializados mediante la construcción de Sistemas Industriales**".

Atendiendo a estas definiciones, la concepción actual de las Plantas Industriales, de la que derivan evidentemente sus tipos de distribución de los medios de producción, se expone en los apartados posteriores de este capítulo, desde una óptica interdisciplinar que entiende necesaria la coordinación de Arquitectura y Construcción, y la conveniencia de abordar su estudio mediante la teoría general de sistemas.

2.3. Breves reseñas históricas sobre la evolución de la construcción y la protección contra incendios en la construcción.

En el presente apartado se analiza la evolución histórica de la construcción en relación fundamentalmente a la diafanidad de la planta y al aspecto de la protección contra incendios.

La transformación económica de la revolución neolítica, que tuvo lugar al surgir los poblados agrícolas y a partir del nacimiento de una economía de producción gracias a la práctica de la labranza y de la ganadería, hace posible la construcción de la vivienda. El historiador Angulo Iñiguez afirma que: "*La gran novedad del periodo neolítico es pues la aparición de la Arquitectura*" (Angulo Iñiguez).

El hombre conoció el fuego a través de sus manifestaciones naturales, erupciones de volcanes, incendio de los bosques debido a los rayos, los fuegos fatuos, etc. Lo obtuvo de las fuentes naturales y lo utilizó, inicialmente, para calentarse, iluminarse y protegerse de los animales. Más tarde aprendió a crearlo por sí mismo. El fuego fue el origen de la erradicación de su vida nómada, según indica (Capote 2009).

El siglo XVIII da paso a la Revolución Industrial que desarrolla, entre otros aspectos, nuevos métodos para fundir hierro, basados en la utilización del coque (Abraham Darby, 1709) en lugar de carbón vegetal. La producción de hierro se acrecienta atendiendo a dos causas, una debida a la mejora técnica del proceso que supuso el uso del coque, lo que permitió la producción en masa, y otra como consecuencia de la demanda exigida por la construcción de maquinaria. A finales del siglo XVIII los progresos en la industrialización del hierro ponen a disposición de la industria los dos productos básicos obtenidos del mineral hierro: el hierro y la fundición, en cantidades y calidades desconocidas hasta el momento.

A partir de este momento la Arquitectura de la Industria adopta el hierro fundido como material constructivo fundamentalmente atendiendo a diversos motivos: el primero se relaciona con la producción en masa del hierro que abarata costes; el segundo, es de carácter instrumental y se refiere a la necesidad de que la estructura de la construcción ha de adaptarse a los nuevos procesos industriales, ya que las dimensiones de las nuevas máquinas exigía grandes salas con el mínimo de obstrucción (las columnas de hierro fundido reemplazan a los pilares de madera en las hilanderías de algodón inglesas); y, por último, la frecuencia de los incendios en las fábricas llevó a William Strutt a investigar las posibilidades del hierro como material para la estructura de las fábricas, construyendo en Darby (1792-1793) la primera fábrica "a prueba de fuego".

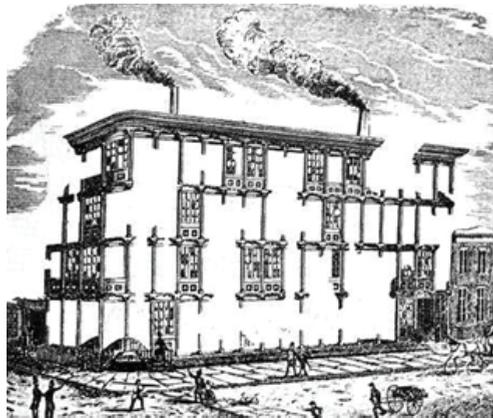


Figura 2 - 3- Fábrica a prueba de fuego. Darby (1792-1793).

En este momento la Arquitectura Industrial inicia un proceso formal diferenciador respecto de la residencial. En las antiguas construcciones industriales se aprecia la medida humana y la semejanza a la vivienda. Las dimensiones de puertas, ventanas o alturas, pueden ser algo mayores que las urbanas, pero tiene como referencia al hombre, y lo mismo puede decirse de los materiales y formas constructivas. El paso de la herramienta a la máquina supuso el cambio de la medida humana para situar el punto de referencia en la maquinaria y sus instalaciones, siendo éste un aspecto que distingue esencialmente a la nueva Arquitectura Industrial respecto de la que tradicionalmente se había asentado en las áreas urbanas.

El acero, que inicialmente fue utilizado en la construcción de raíles y buques de guerra, pasa a emplearse como material constructivo y entra de lleno en la construcción con la exposición de París de 1889.

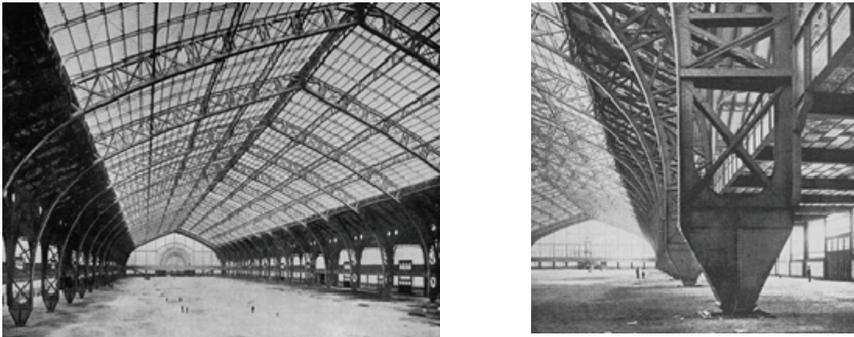


Figura 2 - 4- Galería de las Máquinas de la Exposición Universal de París de 1889, (115x420 m, 48 m de altura).

El hormigón no alcanzó su empleo corriente como material estructural hasta 1890, cuando fue utilizado en América por Ernest L. Ransome y en Francia por François Hennebique, que construyó en 1895 la fábrica de hilaturas Charles Six de Tourcoing. A pesar de estos precedentes, la arquitectura industrial no había experimentado grandes innovaciones tipológicas con el uso de los nuevos materiales, el acero y el hormigón. La fábrica seguía configurándose como un edificio en altura, con un tipo edificatorio que se mantiene por diversos motivos: en primer lugar por el insuficiente desarrollo del transporte horizontal que limitaba la ocupación extensiva del suelo. A ello se añade, el uso de la transmisión energética mediante sistemas mecánicos: árboles, poleas y correas obligaba a reducir el número de ejes para minimizar las pérdidas mecánicas y propiciaba la construcción de edificios alargados, de sección estrecha, con las máquinas formando doble fila a ambos lados del eje, organización que se optimizaba superponiendo plantas.

Finalmente, la necesidad de iluminación natural adecuada, también alentaba la construcción de edificios estrechos.

Así pues, la justificación del empleo del hormigón como material estructural se fundamentaba, entre otros aspectos, en su resistencia al fuego, resistencia mecánica, durabilidad y limpieza. En 1902 las instalaciones de la Pacific Coast Borax sufrieron un incendio de tal magnitud que los componentes metálicos del equipamiento de la planta se retorcieron y fundieron en deformes coladas mientras que los elementos de hormigón armado: suelos, pilares interiores y muros sobrevivieron. Este hecho fue aprovechado por la industria del hormigón, la Atlas Portland Cement Company, que se encargó de publicarlo haciendo que éste incendio fuera el más famoso del nuevo siglo y al que dedicó un capítulo completo en su publicación Reinforced Concrete in Factory Construction (1907) en la que el director de la división Este de la Pacific Coast Borax escribía:

“Entre alguna de las características especiales que citaremos están:

Primero: Su propiedad de ser completamente incombustible. Esto quedó absolutamente demostrado como ustedes bien saben por el incendio que sufrimos en nuestro departamento de calcinación...un incendio...que fundió todo el metal al descubierto y destruyó todos los tabiques combustibles que tenía el edificio en aquella época; pero la estructura de hormigón soportó la prueba perfectamente...; sabemos pues que nuestro edificio es absolutamente incombustible

Segundo: El coste de las reparaciones. No hay ninguna cifra de gastos en este apartado, pues el edificio es monolítico y, como el vino español, mejora con los años.

Tercero: Resistencia. Como ustedes saben nuestros suelos soportan unas cargas extraordinarias -el piso cuarto aguanta un peso de unos 7.000 kilogramos por metro cuadrado-. En los pisos inferiores hemos llegado a colocar cargas más elevadas sin dañar al edificio en lo más mínimo.

Cuarto: Limpieza. Este tipo de construcción es ideal para una fábrica porque puede mantenerse completamente limpio - es sólo cuestión de manguera y estropajo.

Creemos que la construcción de hormigón es la construcción apropiada y que el sistema Ransome es el mejor.”

El desarrollo de esta arquitectura racionalista coincide con la fase neotécnica de la industria que se caracteriza, entre otros aspectos, por la introducción de la electricidad como sistema de transmisión energética, el desarrollo de los sistemas de transporte horizontal y una nueva organización del trabajo, derivada fundamentalmente de sistemas de producción basados en largas series de productos uniformados. Las virtudes del hormigón: monolitismo, inercia para absorber las vibraciones y resistencia a la corrosión y al fuego, perdieron importancia al pasar de la construcción de edificios de varias plantas a otros de planta única, consecuencia de los nuevos requerimientos de los procesos industriales.

Todo ello deriva en un nuevo concepto arquitectónico: **la planta industrial que, caracterizada por un nuevo tipo edificatorio y por la diafanidad, consiga flexibilidad en la distribución; a partir de edificios de una planta con grandes luces entre pilares que desplaza el uso del hormigón imponiendo la utilización de estructuras metálicas.**

2.4. Evolución histórica de la normativa de Protección contra incendios:

Según el autor (Capote 2009) cita en su obra "La seguridad contra incendios en la concepción y el diseño de los edificios civiles e industriales" (Universidad de Cantabria), los hitos normativos más importantes en lo que respecta a la seguridad contra incendios pueden resumirse en éstos: (Todo esto está extraído de las obras "Principles of Fire Protection" Arthur Cote & Percy Bugbee (Arthur, Percy 1988) y NFPA, A History of British Fire Service, Blackstone, G.V. , Roudedge and Kegan, 1957, London) (Bailey 2011)

- Primer hito: Año 1189, tras un desastrosos incendio, que el primer Alcalde de Londres (GB) implantó una ordenanza donde se establecía que las edificaciones nuevas tendrían paredes de piedra y tejados de pizarra o teja, en sustitución de los cubiertos de paja.

- En 1566, una ordenanza del Ayuntamiento de Manchester (USA), trata la seguridad en el almacenamiento de combustible lo que fue el primer decreto en materia de prevención referido directamente a edificaciones industriales.

- En 1583 el Parlamento Inglés prohibió a los fabricantes de velas fundir la grasa en el interior de las viviendas, lo que constituye la primera actuación estatal europea en cuanto a las regulaciones y reglamentaciones de la protección contra incendios.

- En 1647, se obligaba a tratar las chimeneas de madera con revestimientos interiores en base a aglomerados resistentes al fuego. Después del Gran Incendio de Londres del 1666, se adoptó un código completo de regulaciones sobre edificios cuyas señas nos llegan hasta hoy.
- En 1824 la Brigada Contra Incendios de Edimburgo, comenzó a desarrollar regulaciones y normas de actuación más modernas.
- En 1830, James Braidwood, el jefe de la Brigada de Edimburgo, escribió el primer manual integral que incluía 396 normas y describía la clase de servicio que debía desarrollar un buen departamento.
- En 1835, en Norteamérica - Providence (Rhode Island) - apareció la primera Compañía Aseguradora de Fabricantes que sólo aseguraba aquellas fábricas que cumplían los códigos idóneos de prevención y protección contra incendios.
- G.V. Blackstone indica en su "Historia del Servicio Contra Incendios Británico", que el Origen de las Brigadas Inglesas radica en la formación de las brigadas de las Aseguradoras en 1667. Estas brigadas carecían de obligaciones y estatutos oficiales, y eran las Compañías Aseguradoras y no las autoridades gubernamentales quienes decidían donde debían ubicarse.

Las Directivas, Reglamentaciones, Normativas, o regulaciones, en general, establecidas hasta principios del presente Siglo se ocupaban, principalmente de la capacidad destructora del fuego y de los métodos para combatirlo o mitigarlo.

Las regulaciones características en cuanto a prevención y protección exigían el empleo de paredes de piedra o ladrillo y tejados de materiales no combustibles en los edificios, en especial en aquellos de las zonas comerciales o zonas céntricas de las ciudades.

El primer sistema de alarma de incendios municipal de los EE.UU. fue instalado en Boston en 1851, utilizando un telégrafo. El uso de este tipo de sistemas de alarma se prolongó en prácticamente todas las principales ciudades, hasta la llegada del teléfono en 1877.

Los medios activos y pasivos de protección contra incendios, aparecidos primeramente en las edificaciones industriales-empresariales, en las industrias textiles del XIX con técnicas primarias de tratamientos de enlucidos de arcilla-yeso que servía de aislamiento térmico y de protección de la estructura de madera en caso de incendio (pasivas) y a

la vez, para reducir los riesgos de propagación del incendio y limitar sus efectos, se empleaban para los pisos, un método constructivo relativamente nuevo, llamado de "combustión lenta" y que se basaba en la eliminación de piezas combustibles en la medida de lo posible y en el empleo de gruesas vigas. Los pisos muchos más gruesos, formados por dos capas de entablado machiembradas o con lengüetas de unión que incrementaba su rigidez y resistencia, permitiendo prescindir de los ristreles, que ardían muy fácilmente, e impidiendo el paso del aire a través del entablado que avivaba el fuego.

La calefacción de las industrias de entonces se obtenía como en las casa por estufas de hierro colado, causante sin duda de la rápida desaparición de las construcciones de madera y aparición de las construcciones de piedra y ladrillos. La primera solución en este sentido, evitando la propagación del fuego de un piso a otro en caso de incendio, fue el diseño de las escaleras por el exterior en una gran torre de piedra adosada a la fachada del edificio. Esta torre servía además de plataforma de carga para cada piso (Sectorización vertical).

A principios del Siglo XX, cuatro incendios en edificios en los EE.UU., la Rhoades Opera House en Boyertown, Pennsylvania (1903), el Iroquois Theatre en Chicago (1903), el Lakeview Grammar School en Collinwood, Ohio (1908), y la Triangle Shirtwaist Factory en la ciudad de Nueva York (1911), fueron los motivos principales para la creación del Comité para Protección de Vidas, "Committee on Safety to Life" de NFPA, en 1913.

2.5. La distribución en planta. Definición del problema.

Muther (Muther 1968) define la distribución en planta de la siguiente manera:

"La distribución en planta es el plan, o el acto de planificar, el ordenamiento óptimo de las actividades industriales, incluyendo personal, equipo, almacenes, sistemas de manutención de materiales, y todos los otros servicios anexos que sean necesarios para diseñar de la mejor manera posible la estructura que contenga estas actividades".

"La misión de nuestro estudio - continúa comentando el mismo autor - se centrará en hallar una ordenación de las áreas de trabajo y del equipo que sea la más económica para llevar a cabo el proceso productivo, al mismo tiempo, que la más segura y satisfactoria para los operarios y para el entorno de la planta industrial. Se hace necesario ordenar productores, materiales, maquinaria y servicios auxiliares (mantenimiento, transporte, etc.) de modo que sea posible fabricar los productos con un coste suficientemente reducido para poder venderlo con un buen margen de beneficio en un mercado de competencia".

De las definiciones anteriores se pueden extraer una serie de ideas:

- 1.- La distribución en planta se constituye como un proceso de ordenación.
- 2.- Para llevar a cabo dicho proceso es necesario realizar una planificación previa del mismo.
- 3.- En la distribución en planta se ven afectados todos los medios que participan en el proceso productivo.
- 4.- Los medios de producción que intervienen directamente en el proceso productivo son tres: los operarios, el material y la maquinaria y se les conoce como Medios de Producción Directos.
- 5.- Los Medios Auxiliares de Producción (Servicios Auxiliares para la Producción y Servicios para el personal) son aquellos que no intervienen directamente en el proceso productivo, pero sin los cuáles éste no se puede llevar a cabo.
- 6.- El objetivo es encontrar la ordenación óptima, y el óptimo se entiende como la mejor solución de compromiso entre todos los medios que se ven involucrados, de forma que sea lo más económica posible.

Históricamente, la ordenación de las áreas de trabajo, es casi tan antigua como el hombre mismo. Las primeras "distribuciones" eran producto del hombre que llevaba a cabo el trabajo (artesanalmente) o del técnico que proyectaba el edificio.

Fue entre los años 1940-1960, en E.E.U.U., cuando hubo mayor oportunidad de apreciar la gran importancia de las distribuciones en planta. Como consecuencia de la 2ª Guerra Mundial, la industria manufacturera norteamericana se vio sometida a un cambio en sus productos, lo que le obligó a plantearse la necesidad de establecer métodos de planificación de sus distribuciones en planta, al objeto de adecuar sus sistemas productivos.

La producción se puede expresar como el resultado de la aplicación del operador "organización" sobre el conjunto de operarios, materiales y maquinaria. Si se organizan estos tres elementos (operarios, materiales y maquinaria) de manera que el trabajo sea eficiente, se consigue que la producción sea eficiente. La organización (y la distribución en planta es parte de ella) tiene un efecto directamente proporcional sobre la producción.

Tras la 2ª Guerra Mundial, las primeras mejoras estuvieron enfocadas hacia la mecanización de los procesos de producción. Comenzó, en esa misma época, a aceptarse la idea de que la limpieza y la ordenación proporcionaban grandes ventajas económicas. Estudiar la ordenación de las fábricas se convirtió en un objetivo para los empresarios. Posteriormente, la especialización del trabajo llegó a ser tan grande que el manejo de materiales entre operaciones empezó a recibir mayor atención. Con el tiempo, apareció la demanda de especialistas para resolver los problemas de distribución.

Inicialmente, se tendió a agrupar las máquinas y procesos similares, alineando áreas de trabajo en filas ordenadas, delimitando pasillos y manteniendo la limpieza. Posteriormente, se procuró mantener el material en un extremo de la planta, haciéndolo circular en dirección al extremo opuesto de la misma. Hoy día, se sabe, que esos principios eran incompletos y en algunos casos hasta contradictorios. En realidad representaron soluciones a problemas determinados. El concepto de implantación evoluciona constantemente, aunque existen una serie de principios inalterables que se constituyen como una verdadera base axiomática del problema de la implantación.

2.6. Las fases de Proyecto de la actividad industrial: Lugar de la distribución en planta.

El problema de la distribución en planta queda inmerso dentro del proceso de planificación global de la actividad industrial. La planificación de una actividad industrial, se desarrolla a través del "proyecto de la actividad industrial" y consta de varias fases. Tal y como indica (Santamarina 1995):

- a) Definición del producto y del proceso productivo

La primera fase en la planificación de una actividad industrial comienza por la definición del producto a fabricar, sistema de producción (elección del proceso de producción), tecnología y dimensionado del proceso, todo ello en base a los oportunos estudios de mercado.

b) Localización o ubicación

La actividad industrial se desarrolla habitualmente, dentro de una Planta Industrial (que no necesariamente requiere una edificación supeditada a las exigencias ambientales del proceso). La fase de localización persigue determinar la ubicación más adecuada teniendo en cuenta la situación de los puntos de venta o mercados de consumidores, puntos de abastecimiento para el suministro de materias primas o productos intermedios, la interacción con otras posibles plantas, etc.

En esta fase hay que determinar:

b.1) La zona: la situación geográfica de la planta industrial.

b.2) El suelo urbano de tipo industrial. Para ello se puede proceder de dos maneras: seleccionando suelo industrial (si ya existe -polígonos industriales-) o generándolo, en caso contrario. En este segundo caso, el Urbanismo juega un papel importante en la planificación de la actividad. La generación de suelo industrial debe llevarse a cabo proponiendo la recalificación del suelo a través de alguna de las figuras urbanísticas contempladas en la legislación vigente.

b.3) La/s parcela/s en las que ubicar la planta industrial. Para ello que habrá que tener en cuenta nuevamente la disciplina urbanística, las ordenanzas (de construcción y de actividad) de los polígonos, la posibilidad de agregación y desagregación de parcelas, etc.

c) Proyecto de la Planta Industrial

Una vez elegida la ubicación, el proyecto de la planta se compone a su vez de tres etapas:

c.1) Diseño de la distribución en planta, implantación o "layout". Definido el producto, el sistema de producción, la tecnología y el dimensionado del proceso se busca la ordenación de los Medios Directos de Producción (operarios, maquinaria y materiales) que participan directamente en el

proceso productivo y de los Medios Auxiliares de Producción que no participan directamente en el proceso productivo pero sin los cuales sería imposible realizarlo. Esta es la fase de implantación propiamente dicha.

c.2) Diseño del sistema de manutención (transporte interno). Incluyéndose en este apartado todo lo relativo al sistema utilizado para el transporte interior de los Medios de Producción.

c.3) Proyecto de los edificios e instalaciones (agua, gas, electricidad - alumbrado y fuerza-, climatización...). En este apartado juega un papel importante la arquitectura industrial como arte y como técnica.

* Desde el punto de vista estructural, es necesario diseñar una estructura que soporte, resista y transmita a la cimentación, las cargas y esfuerzos a que va a estar sometida.

* Desde el punto de vista ambiental, hay que aislar y crear ciertos ambientes; aislamiento térmico, acústico, higroscópico...

* Desde el punto de vista funcional, el edificio debe estar dotado de los servicios necesarios para poder llevar a cabo el proceso productivo (red de saneamiento, aguas pluviales, infraestructura energética...) y por lo tanto deben tenerse en cuenta estos condicionantes a la hora de diseñar la edificación.

d) Construcción e instalaciones

En esta fase se realiza la construcción de las edificaciones e instalaciones proyectadas. Es la fase de ejecución.

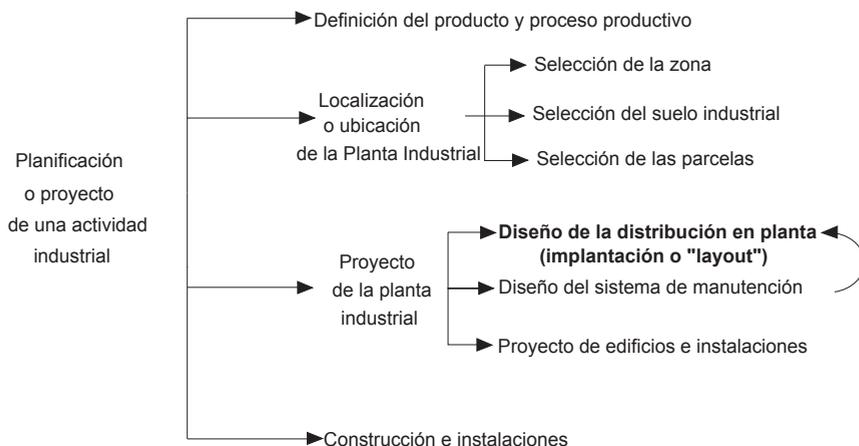


Figura 2 - 5 - Planificación de una actividad industrial. (Santamarina 1995)

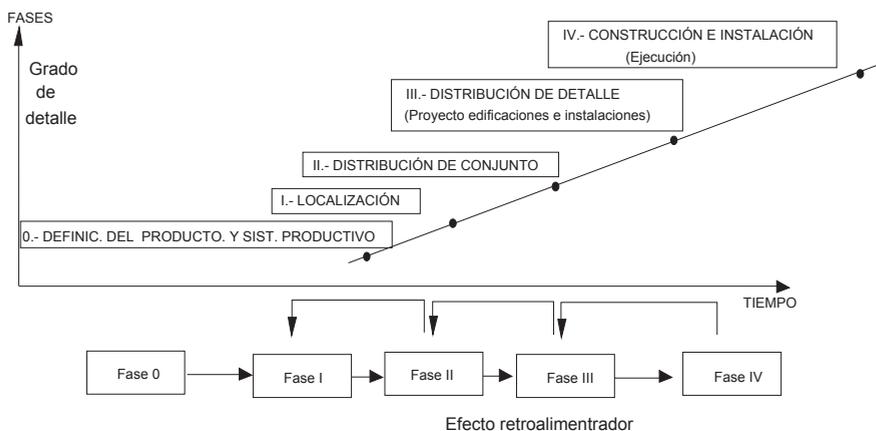


Figura 2 - 6 - Fases temporales del proyecto o planificación de una actividad industrial.

Las fases en que queda desglosado el proyecto o la planificación de la actividad industrial están íntimamente ligadas entre sí. Desde un horizonte temporal, el proceso de planificación no puede establecerse como un procedimiento puramente secuencial. Necesita retroalimentación, información sobre sí mismo, dado que una determinación en una fase puede afectar a las precedentes.

La distribución debe empezar a planificarse de forma global para después poder estudiar los detalles. Planear primero el conjunto y después los detalles, y planear la dispo-

sición ideal y a partir de ella, la disposición práctica, son dos fundamentos que se relacionan estrechamente con las fases de desarrollo de toda distribución.

2.7. Objetivos de la distribución en planta.

Muther (R. 1968), insiste en que "el objetivo perseguido con la distribución es hallar la ordenación de las áreas de trabajo y del equipo, que sea la más económica para el trabajo, al mismo tiempo que las más segura y satisfactoria para los empleados".

Más concretamente una buena distribución se traduce en una reducción del coste de fabricación, para lo que es necesario plantearse los siguientes objetivos:

- 1.- Reducir los riesgos para la salud y aumentar la seguridad de los operarios.
- 2.- Elevar la moral y la satisfacción del operario
- 3.- Incrementar la producción
- 4.- Disminuir los retrasos en la producción
- 5.- Ahorrar espacios (ya sean áreas de producción, almacenamiento o servicio)
- 6.- Reducir el manejo de materiales
- 7.- Utilizar al máximo la maquinaria, la mano de obra y/o los servicios
- 8.- Reducir el material en proceso
- 9.- Acortar el tiempo de fabricación
- 10.- Reducir el trabajo administrativo y el trabajo indirecto en general
- 11.- Lograr una supervisión fácil
- 12.- Disminuir la congestión y confusión
- 13.- Disminuir el riesgo para el material o su calidad
- 14.- Aumentar la facilidad de ajuste a los cambios de condiciones
- 15.- Otras ventajas diversas; facilitar las labores de mantenimiento, las condiciones sanitarias, el control del coste...

De una manera más directa, apunta Muther, los objetivos básicos de una distribución en planta pueden condensarse en los siguientes:

Tabla 2 - 1 - Principios básicos de la distribución en planta

1.- Integración conjunta de todos los factores que afectan a la distribución
2.- Movimiento del material según distancias mínimas
3.- Circulación del trabajo a través de la planta
4.- Utilización efectiva de todo el espacio
5.- Satisfacción y seguridad de los trabajadores
6.- Flexibilidad de ordenación para facilitar cualquier reajuste

2.8. Principios básicos de la distribución en planta.

Estos objetivos se pueden expresar en forma de principios constituyéndose éstos como una verdadera base axiomática para obtener una metodología que permita realizar de forma ordenada y sistemática la distribución en planta. Así pues, los seis principios básicos de una distribución en planta son los siguientes.

I.- Principio de la integración de conjunto

"La mejor distribución es la que integra a los operarios, los materiales, la maquinaria, las actividades, así como cualquier otro factor, de modo que resulte el compromiso mejor entre todas estas partes"

La implantación debe ser el resultado de la integración de todos sus Medios de Producción, tanto Directos como Auxiliares en una unidad operativa, convirtiendo la planta en una única máquina.

II.- Principio de la mínima distancia recorrida

"En igualdad de condiciones, es siempre mejor la distribución que permite que la distancia a recorrer por el material entre operaciones sea la más corta"

Lo más frecuente es que sea el material el Medio de Producción que se desplace. Por más que lo deseemos, no podremos eliminar por completo el movimiento, lo más aconsejable será que el recorrido sea mínimo, puesto que no añade ningún valor al producto. Es posible que el desplazamiento sea de la maquinaria o del operario, en cualquier caso será preferible siempre aquella distribución que dé lugar a un recorrido mínimo.

III.- Principio de la circulación o flujo de materiales

"En igualdad de condiciones, es mejor aquella distribución que ordene las áreas de trabajo de modo que cada operación o proceso esté en el mismo orden o secuencia en que se tratan, elaboran o montan los materiales"

Este principio es un complemento del principio de la mínima distancia. El material debe moverse progresivamente, de cada operación a la siguiente hacia su terminación. Deben evitarse, en lo posible, los retrocesos o los movimientos transversales. Este principio no implica que el material deba moverse en línea recta, ni limita el movimiento en una sola dirección, de hecho en algunas ocasiones se precisan movimientos en zigzag o en círculo. El concepto de circulación se centra en la idea de un constante movimiento hacia la terminación, con un mínimo de interrupciones, interferencias o congestiones, más bien que en una idea de dirección.

IV.- Principio del espacio cúbico

"La economía se obtiene utilizando de un modo efectivo todo el espacio disponible, tanto en vertical como en horizontal"

Básicamente, la implantación es una ordenación de los espacios ocupados por los Medios de Producción, sean éstos Directos o Auxiliares. Una buena distribución debe aprovechar la tercera dimensión, puesto que los Medios de Producción puede moverse en cualquiera de las tres dimensiones. Hay que prever, por lo tanto, la posibilidad de utilizar varias alturas a la hora de realizar la distribución, sobre todo si la disciplina urbanística limita la ocupación del suelo.

V.- Principio de la satisfacción y de la seguridad (confort)

"En igualdad de condiciones, será siempre más efectiva la distribución que haga el trabajo más satisfactorio y seguro para los operarios, los materiales y la maquinaria"

El operario desarrollará su trabajo de manera más efectiva si se encuentra satisfecho y seguro, por lo que todo lo que ayude a fomentar estas dos condiciones, aumentará la efectividad de la distribución. El concepto de seguridad es extrapolable a los restantes Medios de Producción, es decir, será beneficioso todo lo que contribuya a mantener la seguridad de los mismos.

VI.- Principio de la flexibilidad

"En igualdad de condiciones, siempre será más efectiva la distribución que pueda ser ajustada o reordenada con menos costos o inconvenientes"

Este objetivo adquiere cada día más importancia. A medida que los descubrimientos científicos, la tecnología, los transportes, etc. evolucionan, exigen que la industria también lo haga, adaptándose a ellos con la máxima rapidez y mínimo coste.

Las condiciones de trabajo de un proceso productivo varían frecuentemente (por multitud de motivos), y estos cambios afectan a la distribución en mayor o menor grado. El cambio es una parte básica de todo concepto de mejora, y su frecuencia y rapidez se van haciendo mayores cada día.

La flexibilidad, es "la capacidad de cambiar o adaptarse con poca penalización en el tiempo, esfuerzo, coste o rendimiento". Éste es un objetivo de toda distribución en planta. La flexibilidad es de carácter multidimensional; es decir, se estudia desde diferentes puntos de vista, tal y como muestra el autor reseñado. La flexibilidad en la producción debe ser entendida desde diversos puntos de vista (funcional, estado, volumen, programa, maquinaria, etc.).

2.9. Medios de producción.

Un aspecto importante para elaborar una distribución en planta son las secuencias de los procesos de fabricación. A los elementos encargados de participar en dichos procesos se les denomina "MEDIOS DIRECTOS DE PRODUCCIÓN"; pero siendo importantes, no bastan para comprender y conocer la totalidad de elementos y relaciones que se dan en el sistema "Planta Industrial". Los Servicios Anexos (Medios Auxiliares de Producción) deben ser integrados en la implantación de una manera racional.

La clasificación de estos medios directos y auxiliares es la siguiente:

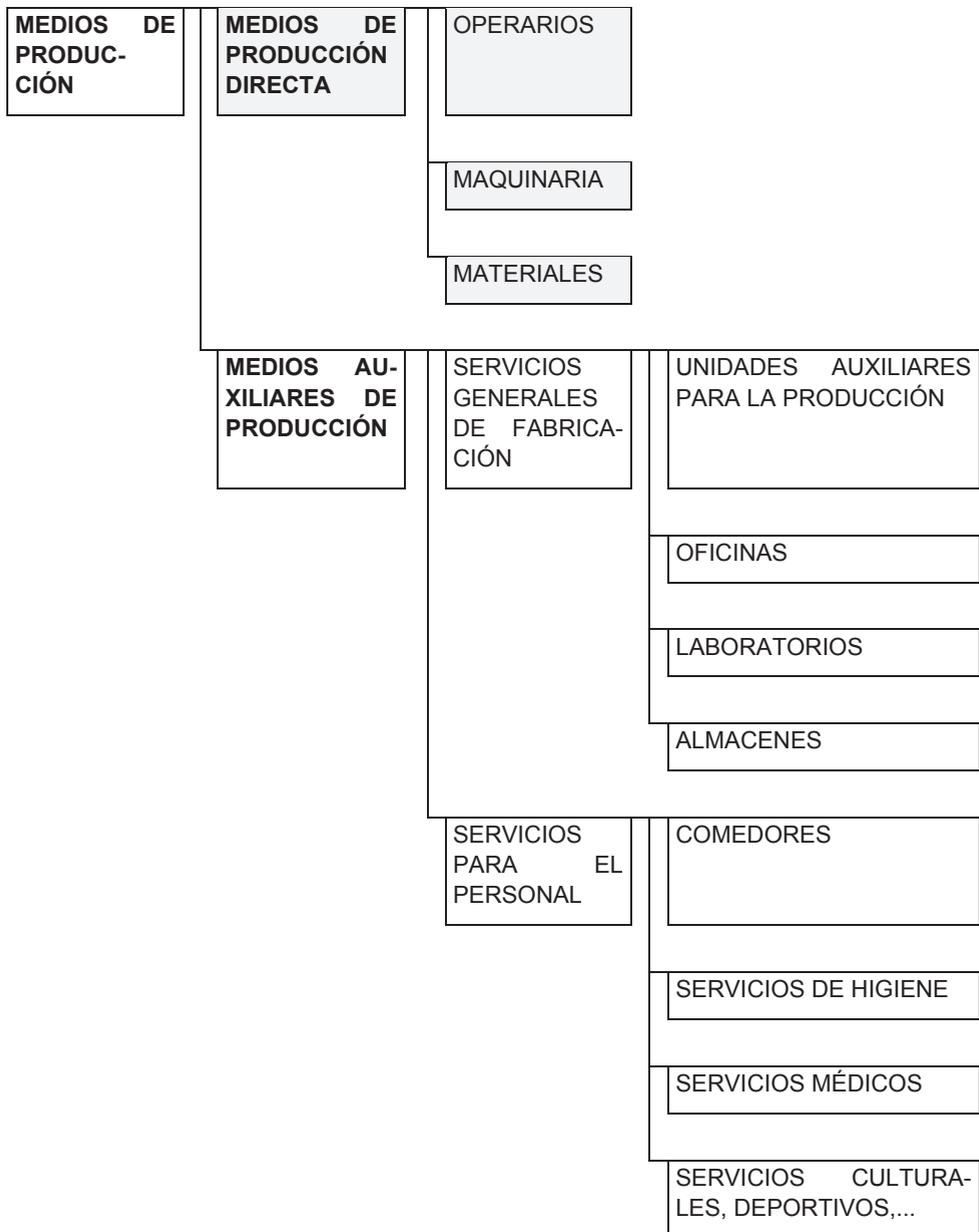


Figura 2 - 7 – Clasificación medios de producción (Hospitaler-Pérez 2005)

2.10. Tipos básicos de distribución en planta.

Los tipos básicos de distribución en planta son tres:

- 1.- Distribución por posición fija.
- 2.- Distribución en cadena, en serie, en línea o por producto.
- 3.- Distribución por proceso, por función o por secciones.

La elección de uno u otro tipo de distribución está muy relacionada con dos factores:

el movimiento de los Medios Directos de Producción y

el tipo de operación de producción que se va a realizar en la actividad industrial.

Como se indicó en apartados anteriores, la producción es el resultado obtenido de un conjunto de operarios, materiales y maquinaria (Medios Directos de Producción) actuando bajo alguna forma de dirección. El movimiento es imprescindible para que exista producción, es el elemento de relación entre los Medios de Producción Directos o Auxiliares.

El movimiento no añade valor al producto, sólo le da posición, pero es necesario e inevitable. Por otra parte supone un coste que hay que minimizar.

Además, dependiendo del tipo de operación que se realice sobre el material para la obtención del producto final, se pueden distinguir tres clases de operaciones de producción:

1.- Elaboración o fabricación:

El producto final se obtiene mediante una serie de operaciones cuya misión es cambiar la forma del material inicial. Ejemplo: mecanizado, conformado.

2.- Tratamiento:

El producto final se obtiene mediante una serie de operaciones cuya misión es cambiar las características del material de partida. Ejemplo: revenido, recocido, nitruración, pintado, pulido, barnizado, secado.

3.- Montaje:

El producto final se obtiene mediante una serie de operaciones sucesivas de adición de otras piezas o materiales sobre la pieza o material inicial o base. Ejemplo: línea de montaje de automóviles.

2.10.1. Distribución en posición fija.

En la distribución en posición fija, el material permanece en posición invariable, todos los Medios de Producción (Directos o Auxiliares) que se necesiten para llevar a cabo el proceso productivo, se desplazan hacia la posición ocupada por el material.

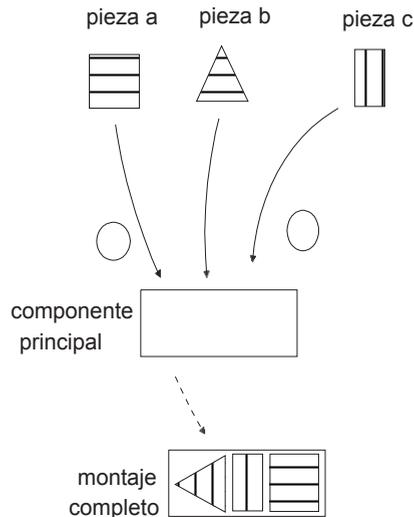


Figura 2 - 8 – Distribución en posición fija

Las características principales de este tipo de distribución son:

- La operación de transformación o tratamiento requiere tan sólo herramientas de mano o máquinas sencillas
- Se fabrica solamente una pieza o muy pocas piezas de un artículo, de tamaño voluminoso o difícil transporte.
- La efectividad de la mano de obra se basa en la habilidad de los trabajadores (se requiere mano de obra cualificada), cuando se desea hacer recaer la responsabilidad sobre la calidad del producto, en un trabajador.

La distribución por posición fija requiere mano de obra cualificada y un elevado manejo de maquinaria (aunque suele ser ligera), lo que da lugar a unos elevados costes de operación. Se utiliza cuando se trabaja con material pesado, voluminoso o muy difícil de transportar. Sus costes se disparan conforme aumenta el volumen de producción.

2.10.2. Distribución en cadena, en línea o de desplazamiento rápido.

En este tipo de distribución, cada producto o tipo de producto se realiza en un área, pero al contrario que la distribución por posición fija, el material es el medio que está en movimiento. Es decir la maquinaria y personal requerido están ordenados de acuerdo con la secuencia de operaciones.

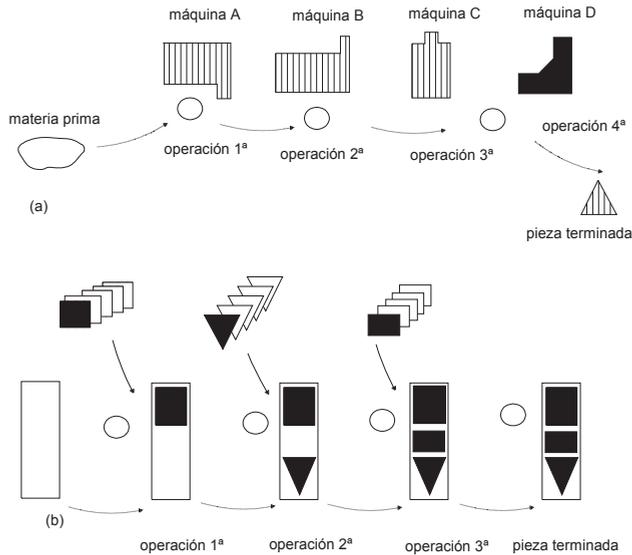


Figura 2 - 9 – Distribución en línea

Las características son:

- Hay gran cantidad de piezas o productos a fabricar durante un largo período de tiempo
- El diseño del producto está más o menos normalizado
- La demanda del producto es razonablemente estable, y el equilibrado de las operaciones y la continuidad de la circulación de materiales pueden ser logrados sin muchas dificultades.
- Se requiere:
 - 1.- Cantidad de producción y economía de la instalación: debe ser siempre la primera consideración.
 - 2.- Equilibrio: las operaciones en cadena deberán tener la misma duración.

3.- Continuidad: si el material se detiene en alguna operación, se rompe la cadena.

Cuando las cantidades de producto son elevadas, y el producto estandarizado, el fabricante tiene tendencia a la producción en cadena tanto para la elaboración y tratamiento como para el montaje. Aquí es donde predomina la especialización del trabajo aún en mayor grado.

La distribución en cadena implica una mayor inversión en maquinaria por lo que los costes fijos son los más elevados. Por otra parte exige menos manejo de materiales y mano de obra poco cualificada, lo que repercute en un menor coste por operación (costes variables).

2.10.3. Distribución por proceso, por secciones o de desplazamiento lento.

En este tipo de distribución, las operaciones de un mismo proceso o tipo de proceso están agrupadas en una misma área. Las operaciones similares y el equipo se agrupan de acuerdo con todo el proceso o función que llevan a cabo.

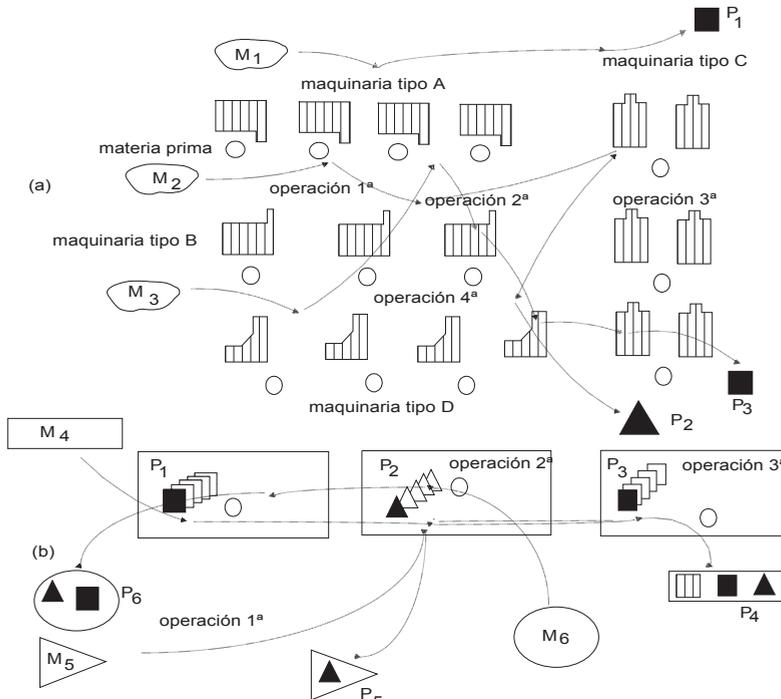


Figura 2 - 10 – Distribución por secciones

Las características son:

- La maquinaria es cara y difícil de mover o requiere un tratamiento especial
- Se fabrican diversos productos
- Hay amplias variaciones en los tiempos requeridos por las diversas operaciones, por lo que es imposible conseguir un proceso secuencial equilibrado para la fabricación
- La demanda de productos es intermitente o pequeña
- Es frecuente utilizar la misma máquina para dos o más operaciones
- Se requieren muchos puntos de inspección en la secuencia de operaciones

Las operaciones industriales más simples suelen empezar por una distribución en posición fija. Pero en cuanto un fabricante incrementa el volumen de producción se comienza a separar las operaciones y a dividir el trabajo. Esta división de las operaciones lleva consigo la especialización del operario y la eliminación del movimiento de la maquinaria. A partir de este momento, es el material el que se desplaza.

En las operaciones de elaboración y tratamiento, la mayor parte de los fabricantes de importancia media optan por desplazar el material. Si además se trabaja con diversos productos, variedades o tamaños de un producto, se suele agrupar la maquinaria de un mismo tipo. Las piezas pueden ir siendo asignadas a cualquier máquina que esté libre y los operarios pueden ser asignados a cualquier máquina. Se constituye así la producción por proceso. Igualmente, allí donde existan amplias variaciones en los tiempos de operación, como ocurre en la elaboración y tratamiento por lotes, es corriente agrupar el equipo de manejo de los lotes por función o tipo de operación.

2.10.4. Distribución por células de fabricación flexible.

Hoy día, el mercado exige variedad y rapidez. Para hacer frente a la competencia con alguna garantía de éxito es necesario disponer de sistemas productivos que permitan, siendo flexibles, plazos adecuados y costes bajos. Para alcanzar estos objetivos es posible plantear un nuevo tipo de distribución que tenga una combinación de las características propias de las distribuciones por producto y por proceso.

Este es el enfoque de la denominada "tecnología de grupos". Se propone la división de la planta industrial en unidades capaces de funcionar con cierta independencia. Son las denominadas "células de fabricación flexible".

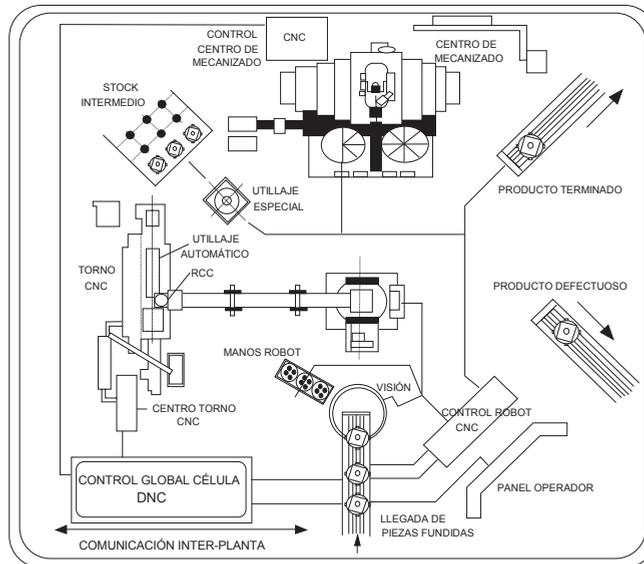


Figura 2 - 11 – Células de fabricación flexible

La célula de fabricación flexible (C.F.F.) puede definirse como el conjunto de dos o más unidades de fabricación interconectadas por un sistema de transferencia bajo la supervisión de un control central de la maquinaria, el flujo de materiales, las herramientas o útiles, los programas de fabricación de piezas y las averías y fallos.

Las células de fabricación flexibles forman un sistema integrado dentro del proceso de fabricación, sea éste de mecanizado o de montaje. Los subsistemas que forman la C.F.F. se organizan de acuerdo con la tecnología de grupos, y son:

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.

Capítulo 03

S.L.P. Métodos de generación de layouts. Definición de objetivos.

3.1. Introducción a la definición de objetivos.

El problema de la distribución en planta de procesos industriales (FLP) persigue la ordenación óptima de los elementos (actividades) de un sistema de producción y contempla, entre otros, aspectos geométricos y económicos. El aspecto económico tiene que ver con la instalación de la planta y con su operación mientras que el geométrico se relaciona con la arquitectura del sistema. De la consideración de estos aspectos se derivan diferentes formulaciones del problema según el modelo geométrico adoptado para representar la solución y según la función a optimizar, que puede incluir términos cuantitativos como costes de instalación y de operación (manutención) y términos cualitativos derivados de la tabla relacional de actividades establecida desde la metodología SLP (Muther 1968).

Durante las últimas décadas los investigadores han estado trabajando en el problema del FLP considerando varios aspectos que varían con la naturaleza de la demanda de producción, la forma de los recintos, el número de pisos, y naturaleza de la circulación material. A pesar de estas diferencias, el proceso para obtener soluciones óptimas involucran dos pasos: uno elaborar un modelo del problema FLP, y otro desarrollar un enfoque para resolverlo. El modelado ayuda evidentemente a definir el problema y considerar los factores que son imperativos en el diseño en curso.

El problema del FLP es uno de los más estudiados problemas en el campo de la optimización combinatoria. Varias formulaciones han sido desarrolladas para este problema. Los modelos se clasifican dependiendo de su naturaleza, suposiciones y objetivos. Más particularmente el FLP ha sido planteado como un modelo de problema cuadrático de asignación (QAP), un problema de conjunto de cobertura cuadrática (QSP), un problema de programación entera lineal (LIP), un problema de programación entera mezclada (MIP), y como un problema de teoría de grafos.

Recientemente, (Garcia-Hernandez et al. 2013) expone un algoritmo interactivo para tener en cuenta en el diseño aspectos cualitativos, basándose en algoritmos genéticos, propone un enfoque en el que el usuario decide qué soluciones son interesantes para seguir con ellas en el guiado del proceso de búsqueda y cuáles no lo son.

También otro enfoque curioso es el propuesto en (Jiang, Nee 2013), que propone un método para la obtención del Layout de detalle; este trabajo presenta el A-FLP para fábricas de nueva planta, que diseña el sistema in situ en tiempo real, con un método de realidad aumentada para la visualización del layout de detalle:

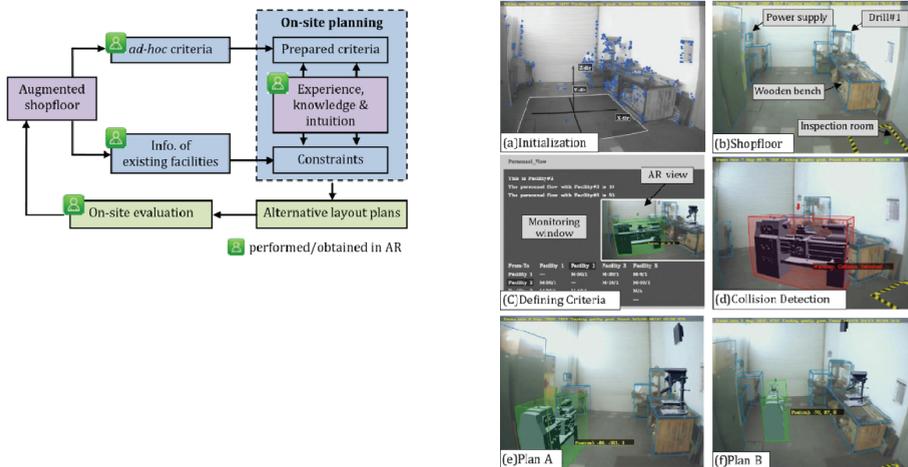


Figura 3 - 1 – Método para la obtención del layout de detalle (Jiang, Nee 2013)

Y ya en el presente año 2015, en (Keller, Buscher 2015) se propone resolver el problema como un problema de diseño secuencial (SRLP) consiste en lograr la mejor secuencia para un número de instalaciones o máquinas a lo largo de un equipo o de una línea de flujo de materiales importante, un tema que se ha intentado resolver en la bibliografía durante los 45 últimos años.

No obstante, el presente trabajo se centra en el planteamiento del FLP como QAP, que es el planteamiento más abundante en la bibliografía.

Como ya se avanzó en el capítulo anterior, de forma abstracta el problema puede enunciarse como: “*Dado un dominio D de área A con geometría conocida, desconocida o restringida, $D(A)$, se persigue ubicar en él sin superposición, sin disgregación y con calidad geométrica un conjunto de m actividades de áreas a_i , $di(a_i)$ de geometría irregular, fija o flexible, relacionadas entre sí con intensidades de relación (w_{ij} , r_{ij}) de modo que se optimice cierta función del sistema asociada a su geometría (forma), la operación y la relación(adyacencia)”.*

$$\text{Min } \mathcal{F}(W, D, R, F) = \text{Min} \left(\sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m w_{ij} \cdot d_{ij} - \sum_{i=1}^m \sum_{j=i+1}^m V(r_{ij}) \cdot f_{ij} \right) \quad (3-1)$$

Se persigue minimizar, para un periodo de tiempo determinado, la anterior función multicriterio, donde w_{ij} el coste unitario de mantenimiento entre las actividades i y j , por unidad de tiempo y de distancia, d_{ij} la distancia entre las actividades i y j , medida con la métrica adecuada, r_{ij} la relación de adyacencia especificada en la tabla relacional de actividades $R(r_{ij})$ para el par de actividades i y j , $V(r_{ij})$ es una función de valor de la relación y $F(f_{ij})$ la matriz de adyacencia o frontera del sistema.

La formulación cuantitativa clásica más simple de este problema es como un problema cuadrático de asignación (QAP), donde todas las actividades industriales se consideran iguales y cuadradas (Lawler 1963). Bajo este planteamiento monoárea de las actividades la planta industrial tiene una caracterización geométrica insuficiente lo que dificulta en general la adecuada representación y valoración de la distribución en planta de un proceso industrial de fabricación. En esencia el QAP es una formulación topológica propia de la teoría de grafos que no considera los aspectos geométricos fundamentales del problema real de la distribución en planta (FLP).

También se han realizado aportaciones para poder resolver el problema, aunque sea con algunas simplificaciones, en un tiempo polinómico, como por ejemplo en (Singh 2009), donde se propone un algoritmo aproximado para solucionar el problema del FLP con un enfoque propuesto de problema de asignación lineal para que sea resoluble en un tiempo polinómico.

Para resolver las dificultades propias de la representación geométrica del modelo y las dificultades de resolución del QAP se han desarrollado diferentes modelos geométricos y aplicado diversas técnicas heurísticas y de optimización (Heragu, Kusiak 1991) que permiten abordar problemas industriales reales con eficiencia y mejor grado de resolución. Los algoritmos de optimización basados en colonias de hormigas se han aplicado

al problema de distribución en planta formulado como un problema cuadrático de asignación (Dorigo, Gambardella 1997), (Maniezzo et al. 2010) con todos los inconvenientes antes reseñados que esto conlleva.

En este trabajo se aborda el FLP en sus dos vertientes: económica y geométrica. El procedimiento propuesto se desarrolla a partir del modelo geométrico discreto del algoritmo de construcción ALDEP (Seehof, Evans 1967) al que se incorpora una estrategia de mejora basada en colonias de hormigas, configurándose de este modo un nuevo algoritmo híbrido que supera los inconvenientes geométricos de una formulación QAP, adoptándose el criterio de optimización del algoritmo ALDEP.

3.2. Systematic Layout Planning (S.L.P.).

3.2.1. Introducción.

El diseño de la distribución en planta es un proceso complejo en el que hay que integrar y compatibilizar multitud de actividades (entendidas como cualquier elementos del Sistema de la planta industrial que tenga unos requerimientos de espacio), atendiendo a diferentes factores, a veces contradictorios.

En 1961 Muther establece un procedimiento organizado y sistemático adecuado para resolver el problema conocido como S.L.P. o "Systematic Layout Planning".

"Systematic Layout Planning" establece una metodología común para resolver los posibles problemas de distribución en planta independientemente de su naturaleza. El S.L.P. es aplicable a problemas de distribución de plantas industriales, locales comerciales, hospitales, oficinas, etc.

El S.L.P. es una forma organizada de enfocar los problemas de implantación. El procedimiento permite identificar, valorar y visualizar todos los elementos involucrados en la implantación y las relaciones existentes entre ellos.

3.2.2. Elementos base del SLP.

Los elementos influyentes en el proceso de aplicación del SLP a la ordenación de una planta industrial son cinco:

- Producto (P)

El concepto de producto abarca tanto a productos como a materiales, es decir:

productos fabricados por la empresa

las materias primas

las piezas compradas

los productos en curso

productos terminados

residuos...

- Cantidad (Q)

Se entiende como tal la cantidad de producto (tratado, elaborado o montado) o material (utilizado durante el proceso).

- Recorrido (R)

Por recorrido se entiende el proceso y orden de las operaciones; puede definirse por medio de hojas de operaciones, impresos gráficos, etc.

- Servicios (S)

Para llevar a cabo las operaciones de fabricación y montaje, debe existir un determinado número Medios Auxiliares de Producción (Servicios Generales de Fabricación y Servicios para el Personal) que permitan el normal funcionamiento de las instalaciones y productos. A menudo estos servicios anexos comprenden más espacio que los servicios de producción propiamente dichos.

- Tiempo (T)

El tiempo aparece constantemente en el proceso de la implantación, influyendo sobre los otros cuatro elementos. Se utiliza para saber cuándo deben fabricarse los productos y para determinar las cantidades de producto o material, puesto que éstas se determinan en base a un período de tiempo determinado.

3.2.3. Esquema general del SLP.

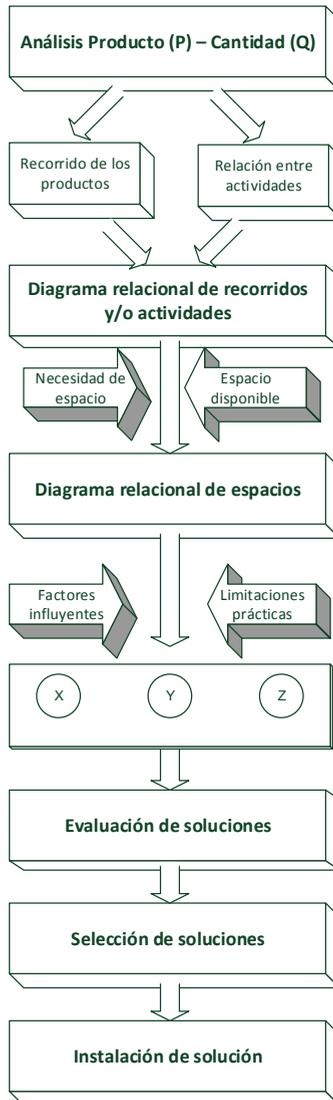


Figura 3 - 2 – Esquema general del S.L.P.

3.2.4. Análisis P-Q.

La información, tanto del producto como de las cantidades a producir o utilizar, debe servir como punto de partida al proyectista que diseña la implantación, y debe provenir del Servicio de Producción o del Servicio de Ventas, constituyendo, por tanto, un punto de partida. La cuestión fundamental que se plantea en este momento es ¿cuáles son las previsiones P, Q, T en base a las cuales se va a llevar a cabo la distribución de la planta?

Diseñar la implantación para absorber las previsiones máximas podría encarecer excesivamente la instalación, quizá lo más aconsejable sea subcontratar determinadas fases en caso de un período de demanda excesiva. Los planteamientos en cuanto a tipo y cantidad de producto pueden ser múltiples. A pesar de la complejidad del problema es necesario tomar alguna decisión y establecer ciertas previsiones en cuanto a producto y cantidad P-Q, en base a las que diseñar la implantación.

Para poder planificar la implantación, lo más aconsejable es organizar los datos referentes a previsiones de productos y cantidades en forma de histogramas ordenados de forma decreciente en función de las cantidades, en los que se relacionan los diferentes tipos de productos con las cantidades previstas para cada uno de ellos.

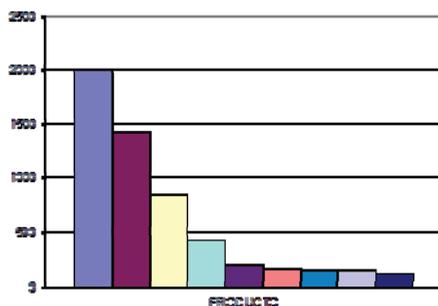


Figura 3 - 3 - Gráfico Producto - Cantidad (P-Q) en un instante $t = t_0$

3.2.5. Recorrido de los productos.

El análisis del recorrido de los productos implica la determinación de la secuencia de los movimientos de los materiales a lo largo de diversas etapas del proceso, a la par que la intensidad o la amplitud de esos desplazamientos.

El gráfico P-Q aporta información para decidir el tipo de análisis de recorrido a utilizar. Existen tres formas de llevar a cabo el análisis del recorrido de los productos.

- Diagrama de recorrido sencillo
- Diagrama multiproducto
- Tabla matricial

En los problemas de referencia que se resuelvan en el plan experimenta y en todos los capítulos donde se habla de flujo de materiales en este trabajo se usará la tabla matricial, por ser ésta la forma más adecuada para mostrar toda la información en una única table de datos general para el proceso, que además en el caso de FLP estático es un invariante del Sistema productivo. Este diagrama se denomina también Diagrama Cruzado y si se indican las distancias Diagrama de Trayecto.

Sobre las unidades de medida, puede afirmarse que cuando los materiales son parecidos o más o menos homogéneos, se pueden utilizar las unidades tales como toneladas, litros, cargas de palets, etc. para medir la intensidad de los desplazamientos. El problema aparece cuando los materiales involucrados son heterogéneos. Se hace muy difícil medir entonces la intensidad de recorrido pues se tiene que recurrir a transformar unidades de medida con el fin de normalizar las intensidades. Para salvar este inconveniente se ha establecido la Cuenta MAG (MAGnitud), que mide la carga de transporte de cualquier producto en cualquier condición. El uso de la unidad MAG es preferible al de las unidades de volumen o de superficie por varias razones; no hay una relación directa entre la transportabilidad o la manejabilidad de los productos y el volumen y, además, la utilización de medidas de volúmenes obligaría a que las cifras tuvieran una precisión superior a la posiblemente fuera práctico determinar. Puede consultarse su definición y aplicación precise en la bibliografía.

La tabla matricial se construye de la siguiente manera: los puestos de trabajo o las operaciones se indican en el mismo orden horizontal y verticalmente como cabezas de filas y columnas. Cada casilla de intersección fila-columna se utiliza para registrar el movimiento "DE" una operación "A" otra, también se indican el número de productos que efectúan el movimiento y la intensidad total registrada (pudiendo utilizar para ello la cuenta MAG).

HASTA / DESDE	ESTAMPAR	NORMALIZAR	MECANIZAR	DESBARBAR	PINTAR	CHAPAR	REVESTIR	PULIR	ENVOLVER	EMBALAR Y EXPEDIR
ESTAMPAR		14	8	6	14				1	27
NORMALIZAR					17	1				
MECANIZAR				3	2	2				1
DESBARBAR		4						1	3	2
PINTAR				1		19		13	2	
CHAPAR							22			
REVESTIR								22		
PULIR					2				33	
ENVOLVER										39
EMBALAR Y EXPEDIR										

Figura 3 - 4 - Ejemplo de tabla matricial

3.2.6. Relación (cualitativa) entre actividades.

El análisis del recorrido, siendo importante, no basta para comprender y conocer la totalidad de elementos y relaciones que se dan en el sistema "Planta Industrial". Hay razones que apoyan esta afirmación:

Los Servicios Anexos (Medios Auxiliares de Producción) deben ser integrados en la implantación de una manera racional.

- A veces el recorrido de los productos es relativamente poco importante (como ocurre, por ejemplo, en la industria de la joyería o de la electrónica) al no existir circulación apreciable de materiales.
- El análisis del recorrido no refleja el conjunto de relaciones existentes entre las actividades o secciones y los sistemas de manutención, los Servicios Anexos, etc.
- Entre los Medios Auxiliares de Producción, no suele existir circulación de materiales pero si relaciones.

Para plasmar este tipo de relaciones, de carácter cualitativo, se utiliza la llamada “Tabla Relacional de Actividades”, que es un cuadro organizado en diagonal en el que se plasman las relaciones de cada actividad con las demás. En ella se evalúa la necesidad de proximidad entre cada par de actividades atendiendo a diferentes motivos.

Es importante resaltar el carácter bilateral de las relaciones entre actividades que se estudian a través de la T.R.A., a diferencia de lo que ocurría por ejemplo con la Tabla Matricial utilizada en el Análisis de los Recorridos; puesto que en ella lo que se medía era el flujo de materiales "de" una actividad "a" otra. La escala de valoración utilizada para reflejar la conveniencia de la proximidad de las actividades, propuesta por Muther (Muther 1981) para la T.R.A. queda indicada en la siguiente tabla:

Tabla 3 - 1 – Escala de grados de la T.R.A.

CÓDIGO	INDICA RELACIÓN	COLOR ASOCIADO
A	Absolutamente necesaria	Rojo
E	Especialmente importante	Amarillo
I	Importante	Verde
O	Ordinaria	Azul
U	Sin importancia ("Unimportant")	-
X	Rechazable	Marrón

Con el fin de que todo quede plasmado de una manera organizada, se asigna un número a cada uno de los motivos, bajo los que se estudian las relaciones. En la parte inferior de la casilla se indican así cuales son los motivos que justifican el valor adoptado para la relación.

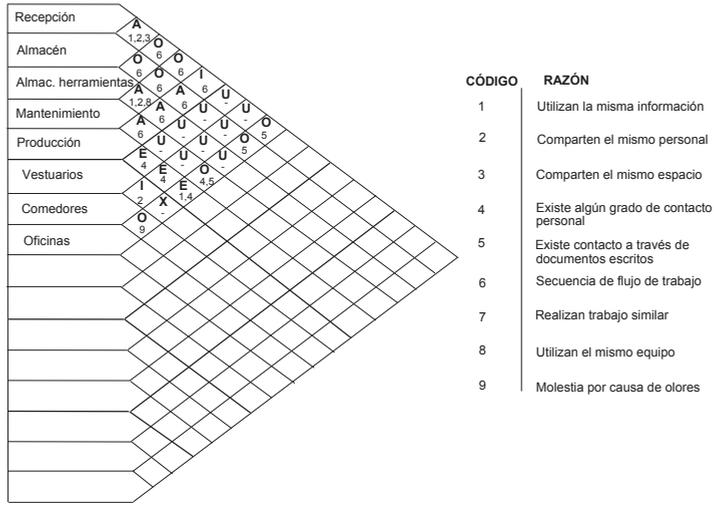


Figura 3 - 5 - Ejemplo de tabla relaciones de actividades (TRA)

3.2.7. Determinación de los espacios.

El hecho de no haber tenido en cuenta los espacios hasta ahora no quiere decir que el cálculo de los espacios deba esperar a que las actividades ya figuren en el Diagrama.

Por otra parte, tal y como se comentó en el capítulo anterior al hablar de las fases de Proyecto de la actividad industrial, las dos primeras fases de la implantación no son independientes; la localización no adquiere carácter definitivo hasta que no se desarrolla, al menos en parte, la implantación del conjunto o "block layout". Realmente para decidir la localización, se ha de conocer cuáles son las necesidades de espacio, si bien, a veces es suficiente con tener cierta aproximación.

No obstante, este punto es delicado dado que el espacio es un recurso escaso, y por otra parte afinar demasiado sería perjudicial porque limitaría la flexibilidad de la implantación todavía no desarrollada totalmente. Además los continuos cambios (tecnológicos, en los productos, en la demanda, etc.) obligan a prever posibles expansiones.

Antes de pasar a detallar los diferentes métodos que se pueden utilizar para abordar el problema, es preciso indicar que como punto de partida será necesario elaborar un inventario lo más completo posible de las máquinas y las instalaciones (recordemos que en realidad no hace falta que sea totalmente preciso hasta la fase de "layout de detalle"). Para ello se puede utilizar las hojas de datos o impresos de taller, documentos en los que se incluye información acerca de las dimensiones y características o incluso fotografías (o planos) de los objetos a inventariar.

De todas formas, sea cual sea el método que se utilice, es necesario conocer como punto de partida, la capacidad de producción del sistema, cuestión nada trivial en la que interviene la previsión del mercado, entre otros factores. En algunos casos, la superficie necesaria depende de las reglas de gestión que se prevé aplicar, las cuales, en general, estarán condicionadas por el sistema de información disponible. Por ejemplo el espacio requerido por un artículo en un almacén depende del tipo de gestión de los stocks, un sistema J.I.T. -just in time- tendrá unos requerimientos de espacio distintos, menores, que los de un sistema en que la dirección de operaciones sea, digamos, tradicional, etc.

Los procedimientos para determinar las necesidades de espacio son variados, y pueden consultarse en la bibliografía. Se citan algunos de ellos:

- La implantación aproximada
- La tendencia de los ratios
- Las normas de espacio
- La conversion
- El cálculo. Método de Guerchet.

3.2.8. Integración de la información. Resolución y Generación de Alternativas.

La etapa de síntesis para la obtención de alternativas de distribución en Planta de la Planta Industrial depende de la calidad de la información elaborada hasta el momento y de los medios, fundamentalmente informáticos, ("hardware" y "software") que disponga el proyectista.

Se pueden distinguir dos enfoques:

- Uno, manual, se utiliza incluso en combinación con procedimientos automáticos, para ajustar la solución. Por ejemplo, puede utilizarse teoría de grafos para obtener un diagrama relacional de espacios y varias alternativas para su posterior evaluación y selección empleando cualquier técnica multicriterio clásica.
- Otro basado en la utilización de los llamados "**Métodos de Generación de Layouts**" (M.G.L.), constituidos por algoritmos diseñados al efecto que trabajan con la información elaborada en las etapas anteriores (Tabla Relacional de Actividades, Análisis del Recorrido de los Productos, Espacio necesario, Espacio disponible,). En estos se integra tanto la información, como habitualmente, un método de generación de soluciones y un método de evaluación, si es el caso, multicriterio.

3.2.9. Métodos de generación de layouts.

Se entiende por "Métodos de Generación de Layouts", al conjunto de técnicas que ayudan al proyectista en la búsqueda de una solución para la implantación de la Planta Industrial.

Los Métodos de Generación de Layouts consiguen una ordenación topológica de las actividades llegando los más sofisticados a alcanzar un control geométrico muy aceptable para su posterior aplicación en la distribución de detalle.

Estos métodos surgen a raíz de la formulación matemática del problema de la distribución, iniciada por Koopmans y Beckmann (Koopmans, Beckman 1957), como un problema cuadrático de asignación (Q.A.P.- "Quadratic Assignment Problem").

3.2.10. Evaluación y selección.

Como ya se ha indicado en varias ocasiones, para la correcta resolución del FLP se hace necesario un enfoque multicriterio del problema de la distribución en planta:

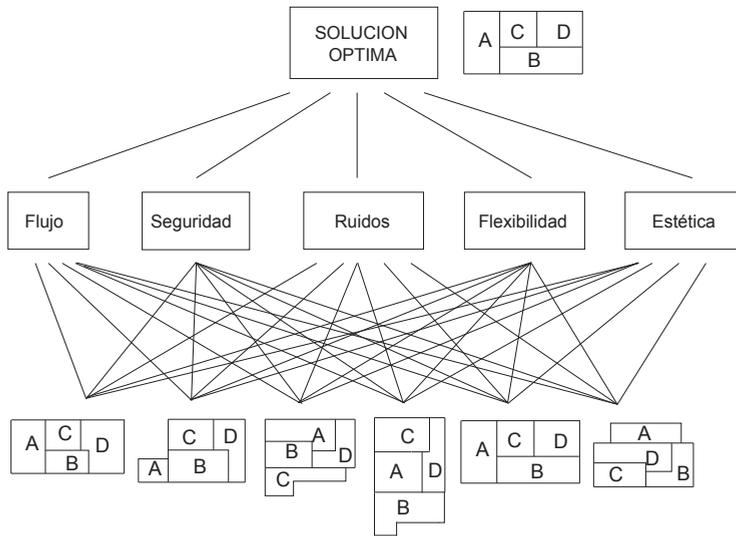


Figura 3 - 6 - Planteamiento problema multicriterio. Fuente: (Santamarina 1995)

Las premisas que asientan estos métodos que siguen la metodología multicriterio son:

- Se tiene un conjunto de soluciones (alternativas de implantación).
- Se tiene un conjunto de puntos de vista, criterios o factores, con una escala y un factor de peso, con los que evaluar cada solución.
- Se desea que la selección obtenga la implantación más satisfactoria desde la mayoría de los puntos de vista.

Se expondrán las técnicas existentes y más adecuadas en el siguiente capítulo de esta Tesis Doctoral.

3.3. Métodos de generación de layouts.

Como ya se ha comentado, se entiende por "Métodos de Generación de Layouts", al conjunto de técnicas que ayudan al proyectista en la búsqueda de una solución para la implantación de la Planta Industrial.

Como indica (Santamarina 1995) desde las metodologías propuestas por Buffa, Muther, Reed o Nadler, que fueron puramente manuales, y se presentaron entre 1950-1965, y tras la formulación realizada por (Koopmans, Beckman 1957) como un problema cuadrático de asignación, se han desarrollado durante las últimas décadas, gran cantidad de métodos para abordar la resolución del problema.

Los primeros de ellos fueron métodos exactos. La búsqueda de la solución óptima se abordaba mediante técnicas enumerativas o semienumerativas (procedimientos de "branch and bound"). Posteriormente, como consecuencia de la complejidad del problema, aparecen un conjunto de métodos de naturaleza heurística que se extienden hasta hoy día.

Actualmente, los investigadores trabajan con varios métodos aproximados, incluyendo aproximaciones metaheurísticas y búsqueda local ("local search") para encontrar soluciones óptimas para estos problemas en tiempos razonables de computación ((Balakrishnan et al. 2003, Ramkumar et al. 2008). Las técnicas que mayor auge tienen actualmente para la resolución del problema son:

- búsqueda tabú
- lógica borrosa
- computación evolucionista (algoritmos genéticos)
- "simulated annealing"
- Algoritmos basados en colonias de hormigas (ACO)
- Algoritmos basados en enjambres de partículas (PSO)
- Sistemas híbridos basados en realidad virtual (VR)

Uno de los problemas añadidos es el control geométrico alcanzado en la fase de "distribución de conjunto", que en el caso de algunos de los métodos derivados de estas técnicas llega a ser prácticamente absoluto, lo que posibilita el enlace directo con la fase de distribución de detalle.

Además de la técnica que se utilice para resolver el problema, también pueden realizarse otras taxonomías de los métodos de generación de "layouts" (M.G.L.). Por otra parte, aspirar a crear una taxonomía completa de los mismos es una tarea muy difícil, debido a su diversidad y constante evolución. Una clasificación de los tipos de problema FLP puede verse en (Dira et al. 2007):

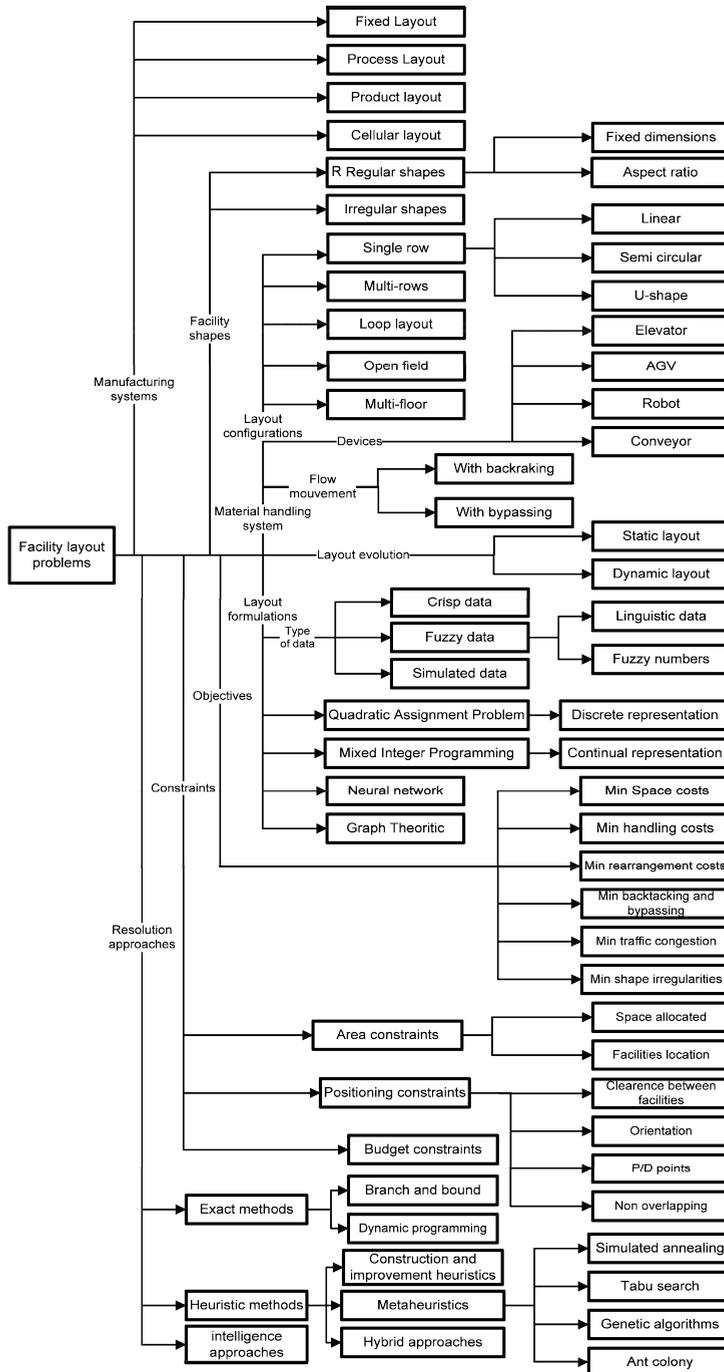


Figura 3 - 7 - Clasificación de los problemas FLP - (Drira et al. 2007)

También puede exponerse la realizada por (Santamarina 1995):

Tabla 3 - 2 – Clasificación propuesta por (Santamarina 1995)

Por la forma de generar la solución
<ul style="list-style-type: none"> - Métodos de Construcción. Aldep, Corelap, Planet (Apple, Deisenroth 1972), Shape, entre otros y, en general, los basados en árboles de corte, teoría de grafos y en algunos casos, lógica borrosa.) - Métodos de Mejora (Craft (Armour, Buffa 1963), H63 (Hillier 1963), HC63-66 (Hillier, Connors 1966), COL, "Biased Sampling"(Nugent et al. 1968), TSP, Cofad (Tompkins, Reed 1976), entre otros, y en general, los métodos basados en "simulated annealing" y búsqueda tabú.) - Métodos Híbridos (Flac (Scriabin, Vergin 1985), Discon (Drezner, Barak 1986), entre otros, y en general, los basados en algoritmos genéticos)
Por la técnica utilizada en la ubicación de las actividades
<ul style="list-style-type: none"> - Métodos basados en Técnicas Discretas - Métodos basado en Técnicas de Corte (Stockmeyer 1983, Wong, Liu 1986, Montreuil, Ratliff 1989, Tam, Li 1992) - Métodos basados en Técnicas Analíticas (Heragu, Kusiak 1991, Tam, Li 1991)
Por la técnica empleada para resolver el problema
<ul style="list-style-type: none"> - Métodos Exactos <ul style="list-style-type: none"> - Métodos Enumerativos - Métodos Semienumerativos - Métodos Heurísticos <ul style="list-style-type: none"> - Métodos Generales - Métodos basados en Teoría de Grafos - Métodos basados en "Simulated Annealing" - Métodos basados en Lógica Borrosa - Métodos basados en Búsqueda Tabú - Métodos basados en Computación Evolucionista

Por la naturaleza de la función objetivo

- Métodos Cuantitativos
- Métodos Cualitativos
- Métodos Multicriterio
 - o En la Generación de Alternativas
 - o En la Selección de Alternativas
 - o En la Generación y Selección de Alternativas

3.4. Formulaciones de la función objetivo del problema de distribución en planta.

Las formulaciones de la función objetivo del problema de distribución en planta están íntimamente relacionadas con los objetivos y principios enunciados en el capítulo anterior. El problema que se plantea tiene cuatro inconvenientes:

- No todos los objetivos son cuantificables.
- Los objetivos medibles no utilizan unidades homogéneas.
- Algunos objetivos son calificables.
- No todos los objetivos son medibles a partir de un “block layout” requiriéndose la distribución de detalle y la definición del proyecto básico de la Planta Industrial.

Como consecuencia de estas consideraciones las diversas formulaciones de la función objetivo (que se designará en adelante F.O.) se estructuran en cuatro grandes bloques:

- La formulación de la F.O. cuantitativa (para el análisis de flujos).
- La formulación de la F.O. cualitativa (para el análisis de relaciones).
- La formulación de la F.O. geométrica (para el control geométrico).
- La formulación de la F.O. de sectorización (para la definición de la sectorización).

3.4.1. La formulación de la F.O. cuantitativa.

Las primeras referencias de este tipo de formulación aparecen en 1957 (Koopmans, Beckman 1957) en la formulación de problemas de localización industrial, que cuando no existe flujo entre plantas se pueden reducir en un caso a un problema lineal de asig-

nación (L.A.P.) y en el caso de haberlo a un problema cuadrático de asignación (Q.A.P). Posteriores referencias, y la aplicación al problema de la distribución en planta se encuentran en (Lawler 1963, Gilmore 1962, Hillier, Connors 1966).

La función de coste se compone de dos términos:

- uno correspondiente al coste asociado a la intensidad de flujo de material entre actividades, a través de la intensidad relacional w_{ij} , y
- otro debido al coste ubicación de las actividades en una determinada posición, b_i .

La expresión cuantitativa del coste c_{ij} entre dos actividades es:

$$c_{ij} = w_{ij} \cdot d_{ij} \quad (3-2)$$

donde:

w_{ij} es, para un sistema de mantenimiento dado, el coste del transporte entre las actividades i y j por unidad de tiempo y unidad de distancia. Así pues w_{ij} dependerá del flujo entre actividades y del sistema de mantenimiento empleado.

d_{ij} la distancia entre las actividades i y j respectivamente, es decir, de la geometría. Dicha distancia, en el caso de actividades multidimensionales, corresponde a la distancia entre centros de gravedad de las mismas.

Por lo tanto el coste C de una distribución en planta con m actividades, se puede establecer como:

$$C = \sum_{i=1}^m b_i + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m w_{ij} d_{ij} \quad (3-3)$$

Tal y como indica (Santamarina 1995), la práctica totalidad de los métodos de generación de "layouts" diseñados mediante funciones objetivo de naturaleza cuantitativa utilizan el coste derivado del transporte de materiales por creer éste el más relevante en el cómputo global de los costes de funcionamiento del sistema productivo:

"The cost of moving material from one manufacturing area to another is a complete loss insofar as its effect upon the value of the product is concerned. For this reason it should be considered a manufacturing evil that must be completely eliminated or reduced to an absolute minimum", (Cameron 1952).

despreciando incluso, los costes fijos generados como consecuencia de la ubicación de las diferentes actividades en los lugares a que definitivamente son asignadas (Lawler

1963). Con este método las actividades quedan ubicadas en función de la secuencia de operaciones desarrolladas en el proceso productivo y el recorrido de los productos determina la distribución en planta.

Esta formulación cuantitativa asume varias hipótesis simplificadoras:

- La hipótesis de que la relación entre el coste de manutención de los materiales y la distancia recorrida es lineal. Esta hipótesis es asumida por la mayoría de los autores, no obstante, en (Nugent et al. 1968) se apunta la necesidad de analizar el sistema de manutención empleado, para valorar el coste asociado al movimiento del material en la planta, ya que en muchas ocasiones los operarios invierten parte de su tiempo en operaciones de carga y descarga que deberían computarse a efectos de coste. Otro factor a tener en cuenta, es que en muchas ocasiones no está definido el sistema de manutención a emplear, que normalmente viene condicionado por la implantación, con lo cual los datos de coste son en gran parte aproximados. Por ello ciertos autores como (Tompkins, Reed 1976, Dowlatshahi 1994) proponen integrar la elección del sistema de manutención en el proceso de elaboración de la distribución en planta.
- La segunda es considerar que la distancia recorrida por los materiales, corresponde a la distancia entre centroides de las actividades entre las que hay que transportar dicho material. Llevada esta hipótesis al límite, pueden darse situaciones en las que se obtengan configuraciones no factibles.
- Se asume régimen permanente relativa a los datos de flujo de material. Para el planteamiento dinámico existen numerosas formulaciones de lo que se ha denominado DFLP. Pueden consultarse en referencias como (Hongtrakul et al. 1998, Suo, Liu 2008).

La formulación cuantitativa tiene su interés en aquellas plantas que albergan procesos de fabricación y productos que implican un elevado coste de manutención o transporte interior como ya se comentó en el capítulo anterior. En esta situación el objetivo consiste en encontrar aquella distribución en planta que minimice los costes debidos a la manutención y trasiego de materiales. Se ha de considerar que la manutención es inevitable dado que es el activador del movimiento necesario para la producción y posición del producto pero no añade valor al mismo y supone un coste que reduce la competitividad del producto fabricado.

La formulación cuantitativa se aplica sobre modelos geométricos discretos, continuos, árboles de corte y modelos semigeométricos, no se aplica en modelos topológicos dado que en ellos no se considera la geometría.

Teniendo en cuenta la discretización y empleando el concepto de variable de asignación que permite expresar la distancia d_{ij} en función de ella, la expresión del coste puede ponerse de la forma:

$$C = \sum_{i=1}^m \sum_{k=1}^n \frac{b_{ik}}{n_i} x_{ik} + \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \frac{w_{ij}}{n_i \cdot n_j} \cdot d_{kl} \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (3-4)$$

Con lo que el problema puede ponerse como:

$$\text{Min } C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^c \frac{w_{ij}}{c_i \cdot c_j} \cdot d_{kl} \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (3-5)$$

Con lo que el planteamiento del problema consiste en encontrar aquella configuración del sistema definida por la matriz de asignación \underline{x} que minimice el coste de la implantación cumpliendo con las siguientes restricciones:

$$\sum_{i=1}^n x_{ik} = n_i \quad \forall i, \quad i = 1 \dots m \quad (3-6)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{ik} = 1 \quad \forall i, \quad i = 1 \dots n \quad (3-7)$$

$$x_{ik} = 0 \text{ ó } 1 \quad (x_{ik} = x_{ik}^2) \quad (3-8)$$

Los métodos que utilizan la formulación cuantitativa utilizan como medida de la intensidad relacional entre actividades, el flujo de material entre las mismas (w_{ij}), y a partir de él, el coste asociado al mismo.

Ya desde el principio del desarrollo de las técnicas de implantación, con el trabajo de (Cameron 1952), es palpable la consideración preferente de que el coste derivado del transporte de materiales es el determinante en el cómputo global de los costes de funcionamiento de un sistema productivo.

Sin embargo, en aquellas plantas, donde el Recorrido de los Productos es relativamente poco importante o incluso irrelevante, al apenas existir circulación de materiales, la aplicación de esta formulación carece de sentido.

Por último, cabe señalar, que esta formulación no es la más adecuada para realizar la integración de los Medios Auxiliares de Producción (Servicios Auxiliares para la Producción y Servicios para el Personal) puesto que las intensidades relacionales existentes entre éstos y los Medios Directos de Producción no se pueden expresar convenientemente en la mayoría de los casos a través del Recorrido de los Productos.

3.4.1.1. Caso particular. El problema cuadrático de asignación.

En el caso de tratar con un problema equidimensional la condición de ocupación pasa a ser:

$$\sum_{k=1}^n x_{ik} = 1 \quad \forall i, \quad i = 1 \dots m \quad (3-9)$$

con lo que se obtiene la formulación habitual del problema cuadrático de asignación (Q.A.P).

En la bibliografía existente sobre el problema de distribución en planta, la mayor parte de los autores se ha centrado en la resolución de este problema matemático, al que bajo ciertas condiciones se puede reducir el problema real. Muestra de ello, es que la mayor parte de los problemas de test existentes son de este tipo, siendo difícil de encontrar autores que propongan problemas tipo de la clase multidimensional.

3.4.2. La formulación de la F.O. cualitativa.

Esta formulación utiliza la información contenida en la Tabla Relacional de actividades (T.R.A.) a través de la cual se califica la importancia o la necesidad de la adyacencia de dos actividades en la distribución en planta $R(r_{ij})$.

Normalmente se emplea una codificación del tipo A, E, I, O, U, X para calificar la relación entre actividades ($r_{ij} \in \{A, E, I, O, U, X\}$), sin embargo, la manipulación de la información contenida en esta tabla, dada las características de los programas de cálculo, se debe realizar a través de una transformación que asigne a cada código de calificación un valor numérico equivalente $V(r_{ij})$.

Tabla 3 - 3 - Valores numéricos propuestos para la escala cualitativa de grados

Referencia	A	E	I	O	U	X
(Dutta, Sahu 1982, Moore 1971)	6	5	4	3	2	1
(Fortenberry, Cox 1985)	5	4	3	2	1	-1
(Tompkins, White 1984, Chen, Sha 1999)	64	16	4	1	0	-1024
(Urban 1987)	4	3	2	1	0	-1
(Ye, Zhou 2007)	5	4	3	2	1	0

La formulación cualitativa busca el maximizar el coeficiente de relación global “closeness rating” R de la distribución en planta, que representaría aquella disposición geométrica o topológica (en grafos dos nodos son adyacentes cuando están unidos por una arista) que mejor recoge las preferencias en las relaciones de adyacencia entre actividades. Su expresión sería la siguiente (en el caso de m actividades):

$$\text{maximizar } R = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m X_{ij} \quad (3-10)$$

donde $X_{ij} = \begin{cases} r_{ij} & \text{si ambos departamentos tienen frontera común} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$

En el caso del problema equidimensional la formulación puede formularse utilizando las variables de asignación como:

$$\text{maximizar } R = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n C_{ijkl} \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (3-11)$$

3.4.3. La formulación de la F.O. geométrica.

Esta formulación no se puede establecer a priori, es decir, se necesita conocer una disposición concreta de actividades para poder evaluar la calidad de la misma. Existen multitud de indicadores, estudiados en trabajos como la Tesis Doctoral de (Montalvá Subirats et al. 2011), que propone la utilización de algunos de ellos, de entre los que se eligen los que se utilizarán en este trabajo.

3.4.3.1. La valoración de la calidad formal de la solución.

En general, en cualquier algoritmo en el que se pretendan optimizar varios criterios, fundamentalmente el de minimizar el coste asociado al transporte de materiales, si se utiliza una métrica de distancia clásica que tenga en cuenta la distancia entre centro de gravedad de cada zona, progresivamente se tiende hacia geometrías más y más degeneradas. Cuando se habla de geometrías degeneradas, se entiende, formas geométricas muy alejadas de las formas rectangulares deseadas (o cuadradas con ratio la unidad). Es por lo tanto necesario establecer algún mecanismo que permita cuantificar la calidad formal de las soluciones obtenidas, para de esta manera poder incorporar dicho control de alguna manera en la resolución del problema.

Como se indica en numerosos trabajos, como en (Contero Gonzalez 1995, Santamarina 1995), se recogen numerosas referencias a indicadores de control geométrico, como por ejemplo el expuesto en (Bozer et al. 1994, Raoot, Rakshit 1993a), donde se proponen unos coeficientes que tratan de cuantificar la calidad formal de una actividad. El primer

coeficiente formal se basa en el hecho que un objeto al incrementar la irregularidad de su superficie va aumentando progresivamente en la longitud de su perímetro. Por lo que si P_i es el perímetro de una actividad y A_i su área, el coeficiente P_i/A_i mide la irregularidad de la forma. El perímetro mínimo que se puede obtener es el que corresponde a una forma cuadrada, y tiene por expresión:

$$P_i^* = 4\sqrt{A_i} \quad (3-12)$$

Por lo tanto, suponiendo que la forma cuadrada sea la óptima, se puede establecer un coeficiente normalizado $\Omega 1_i$ que tiene por expresión:

$$\Omega 1_i = \frac{P_i/A_i}{P_i^*/A_i} = \frac{P_i}{P_i^*} = \frac{P_i}{4\sqrt{A_i}} \quad (3-13)$$

3.4.3.2. Indicador escogido.

Posteriormente, (Montalva et al. 2012) apunta que este indicador aparece con idéntica formulación, pero bajo el nombre de SR (*Shape Ratio*) en (Wang et al. 2005), como parte básica de un indicador global de configuración.

Aunque se podrían incluir otros criterios, de entre los que algunos de ellos serán comentados en un capítulo posterior, por simplicidad y eficiencia, dado que se aplica con relativa facilidad y logra un control bastante aceptable, será éste único indicador el que se utilizará para realizar el control geométrico.

Realmente utilizaremos uno muy similar, que se propone en (Wang et al. 2005) que es similar al indicado, pero se trata de un indicador de configuración global llamado SRF_{whole} ("*Shape Ratio Factor*") como parte de una función multiplicativa con la que resuelve el problema geométrico del FLP.

Los autores proponen emplear el indicador clásico de perímetro Ω , al que llaman SR, de cada una de las n actividades de la configuración, agregándolo en un indicador SRF_w , obtenido como la media geométrica de los mismos:

$$F.O._{\text{geométrica}} = SRF_w = \left(\prod_{i=1}^n SR_i \right)^{1/n} = \left(\prod_{i=1}^n \frac{P_i}{4\sqrt{A_i}} \right)^{1/n} \geq 1 \quad (3-14)$$

Según indica (Montalvá Subirats et al. 2011), para el caso ideal en el que todas las actividades tuvieran una forma cuadrada, el indicador SRF_w adquiere un valor igual a la unidad, siendo éste el valor utópico ideal del indicador. El valor de SRF_w obtenido debe de ser minimizado de la misma manera que era parte de una función objetivo multiplicativa que se minimiza en el artículo de Wang.

3.4.4. La formulación de la F.O. para la sectorización.

Esta formulación puede definirse fundamentalmente en dos términos:

- Uno relativo a la diafanidad, a través del número de sectores, siendo mejor aquella configuración que menos sectorice la planta industrial.
- Otro relativo al coste asociado a la construcción, medible a partir de la cantidad de superficie de cerramientos a construir.

En la bibliografía existen referencias a dicha medida de la diafanidad, no respecto a la protección contra incendios pero sí respecto de las particiones que pueden existir en una distribución en planta debido a la existencia de barreras físicas, almacenes, oficinas, etc. Una recopilación de estos indicadores puede consultarse en (Montalva et al. 2012), de los cuales se expone un breve resumen:

3.4.4.1. Medidas de la Diafanidad.

Se describe la diafanidad (Lin, Sharp 1999) como la extensión de la planta que está libre de elementos constructivos que puedan afectar a la efectividad de la asignación espacial en una determinada configuración. Hay tres elementos constructivos que afectan a este indicador: tabiques, pilares y escaleras (o ascensores). Una de las fuentes del desaprovechamiento espacial en los edificios industriales, se producen habitualmente por un incorrecto posicionamiento de estos elementos constructivos.

- Los tabiques influyen en las posibles ubicaciones de las actividades, pues fraccionan la planta.
- Los pilares afectan al posicionamiento de la maquinaria, así como a los medios de mantenimiento. Los autores llaman a los espacios en los que hay algunos pilares interiores, Espacio Semi-Abierto (ESA) y a los espacios sin columnas interiores Espacio Abierto (EA).
- Las escaleras (o ascensores) afectarán al sistema de mantenimiento, a la distancia recorrida por los productos o por los trabajadores. Así en un edificio de oficinas (o de viviendas) las escaleras deben estar situadas en el centro (para reducir así

los recorridos de los trabajadores) y sin embargo en un edificio de producción, es más adecuado que esté en una esquina para aumentar el espacio libre. Dado que en este trabajo el software implementado sólo trata el caso de una altura, no se tendrá en cuenta la presencia de escaleras.

Para calcular el indicador, los autores emplean los conceptos de espacio abierto, semiaabierto y el ratio k que mide la forma que adoptan las actividades en una determinada configuración. Los aspectos a considerar en este indicador de diafanidad son:

- La existencia de tabiques o pilares.
- El número de tabiques y pilares.
- Ubicación y tamaño de los tabiques y pilares.
- El factor de forma de de cada recinto.

(Lin, Sharp 1999) proponen emplear dos tipos de medida:

1ª) Empleando la siguiente expresión (donde ff es el factor de forma):

$$\text{Diafanidad}_1 = \frac{\sum \left[(EA) \cdot (ff)^{0.5} + (ESA) \cdot (ff)^{0.5} / [(n^\circ \text{ columnas}) + 1]^{1/3} \right]}{n^\circ \text{ de partes}} \quad (3-15)$$

2ª) Proponen emplear dos expresiones, según existan o no particiones. En este caso sólo interesa aquella en que existe sectorización (es decir, hay particiones):

Si existen particiones:

$$\text{Diafanidad}_2 = (\text{ratio } k_{\text{comp}})^{1/5} \cdot \text{Diafanidad}_1 \quad (3-16)$$

3.4.4.2. Función objetivo implementada.

Se ha optado por establecer los siguientes criterios en la F.O. que mide la calidad de la sectorización:

- Una penalización en forma de producto que es función del número de sectores. Se ha considerado que una función adecuada para medir la penalización necesaria en función del número de sectores podría ser el factorial de este parámetro:

$$\text{Penalización por } n^\circ \text{ sectores} = S! \quad \text{donde } S = n^\circ \text{ de sectores} \quad (3-17)$$

- Un término de coste asociado a una función de coste de construcción derivada de la sectorización, que depende directa y fundamentalmente de los metros cuadrados de cerramiento de partición a construir.

$$\text{Min } C_{\text{sectorización}} = S! \cdot \sum_{i=1}^{n^{\circ}\text{cerra}} \sum_{j=1}^{n^{\circ}\text{mientos tramos}} 1 \quad (3-18)$$

Se suma una unidad (1) por tramo dado que en el planteamiento discreto tipo ALDEP que se ha realizado en este trabajo todos los tramos (cada tramo se corresponde con el lado de una casilla) son iguales en longitud y únicamente cambia su orientación.

No es necesario incluir en estas expresiones los cerramientos de fachada, pues estos siempre existen y al tratarse en la mayoría de ocasiones en proyectos de nueva planta de edificios alejados de otros establecimientos industriales como mínimo una distancia igual a los retranqueos (normalmente mínimo 3 metros) no necesitarán cumplir condición alguna de resistencia al fuego (REI) más allá de las franjas de encuentro entre sectores (en la normativa española 1 metro).

Además, hay que tener en cuenta que, como se verá posteriormente, se ha incluido la posibilidad de que el programa calcule con la norma de distancia que se ha definido como "distancia intersectorial", teniendo en cuenta que para comunicar actividades que se encuentran en sectores distintos, hay que pasar por un punto de paso obligado que son las puertas del sector. De este modo, e implícitamente, hay un coste asociado a la sectorización que aunque no aparece directamente en la función objetivo, sí se tiene en cuenta en la computación del coste asociado al trasiego de materiales al evaluar el coste asociado a los flujos, pues las distancias a recorrer por los medios de manutención en general serán mayores con sectores de por medio que sin ellos:

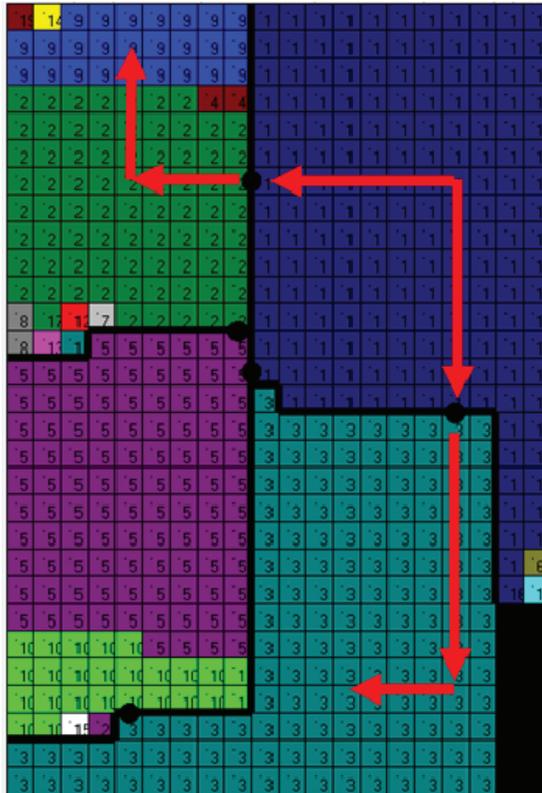


Figura 3 - 8 - Distancia intersectorial – caso II – Sectores no adyacentes sin frontera común

Esta distancia se describe con mayor detalle en el siguiente capítulo correspondiente al modelo geométrico adoptado en este trabajo.

Teniendo en cuenta las consideraciones reseñadas, la F.O. para medir la calidad de la sectorización queda como se indica:

$$\text{Min } C_{\text{sectorización}} = S! \cdot \sum_{i=1}^{n^{\circ}\text{cerra}} \sum_{j=1}^{n^{\circ}\text{mientos tramos}} 1 \quad (3-19)$$

3.5. La formulación multicriterio.

El utilizar las formulaciones anteriormente indicadas tiene limitaciones, ya que restringen el número y tipo de factores que intervienen en la elaboración de la distribución en planta, y dirigen la búsqueda a un número de objetivos muy restringido.

Para comprobarlo, basta recordar alguno de los objetivos de la distribución en planta para entender que la formulación cuantitativa y cualitativa sólo representan una primera aproximación en la búsqueda de la solución óptima.

En primer lugar hay que establecer que el objetivo no es evaluar una solución de acuerdo con un conjunto de criterios sino construir la solución o mejorar una solución de acuerdo con esos criterios (Santamarina 1995). La mayor parte de los autores que abordan este problema, lo hacen a través de funciones de coste multicriterio, utilizando diversas técnicas, para agregar los diferentes objetivos. La forma más extendida de realizar esta agregación es por medio de la suma ponderada.

Autores como (R. 1968, Tompkins, White 1984) aluden al carácter multicriterio del problema de la implantación, lo que conduce a varias posibilidades como la formulación de una F.O. que incluya todos los objetivos, con criterios de selección que varían según los distintos planteamientos que pueden realizarse. Una amplia explicación de todos los planteamientos históricos existentes en la bibliografía puede encontrarse en el capítulo siguiente.

Capítulo 04

Técnicas de toma de decisión multicriterio. Definición de las fronteras de Pareto.

4.1. Introducción.

En el capítulo anterior se expusieron los objetivos que en términos generales (y de forma independiente) persigue el problema del FLP, y más en concreto los tratados en esta Tesis Doctoral, resumidos en cuatro objetivos a evaluar durante el proceso de construcción y selección de candidatos; éstos eran los siguientes:

- Criterio Cuantitativo del flujo de materiales
- Criterio Cualitativo de las relaciones
- Criterio geométrico (control de la calidad formal)
- Criterio sectorización (minimización de los sectores de incendios).

Como ya se adelantó también en el capítulo anterior, la mayoría de autores (e incluso la propia lógica) proponen afrontar el problema del FLP como un problema multicriterio, lo cual hace que la mejor elección sea aquella ideal que fuese la mejor respecto de todos los puntos de vista. El utilizar las formulaciones monocriterio indicadas en el capítulo anterior tiene limitaciones, ya que restringen el número y tipo de factores que intervienen en la elaboración de la distribución en planta, y dirigen la búsqueda a un número de objetivos muy restringido. Como además, por norma general, algunos de estos criterios de diseño son contrapuestos, de modo que al minimizar uno de ellos aumentan algunos de

los otros (suponiendo que éstos deban ser también minimizados) se hace bastante improbable que la mejor solución respecto de todos los criterios pueda ser lograda con la misma configuración de planta, apareciendo durante el proceso soluciones que son mejores respecto de algunos de los criterios, empeorándose a su vez algún otro respecto de otras soluciones estudiadas. Es por esto, que surge la necesidad de imponer algún criterio de selección que sea capaz de aseverar cuándo una solución es mejor que otra, teniendo en cuenta lo anteriormente expuesto, es decir, que dicha solución mejorará a algunas otras respecto de algunos criterios (que no todos) mientras que respecto de otros, será peor.

Autores como Muther (Muther 1968) y Tompkins (Tompkins, White 1984) hacen una clara referencia al carácter multicriterio del problema de la implantación. En (Tompkins, White 1984) se cita la necesidad de reconocer la naturaleza multicriterio del problema de la Distribución en Planta:

*"Given certain interactions that occur among the departments, generally speaking, the facility layout problem is concerned with determining the **most efficient** arrangement of the departments subject to constraints imposed by the site plan, the building, the departmental area/service requirements, and the decision maker"*

En la figura siguiente se muestra el número de publicaciones indexadas localizadas en la "Web of science" que estudian el problema del FLP bajo un planteamiento multiobjetivo:

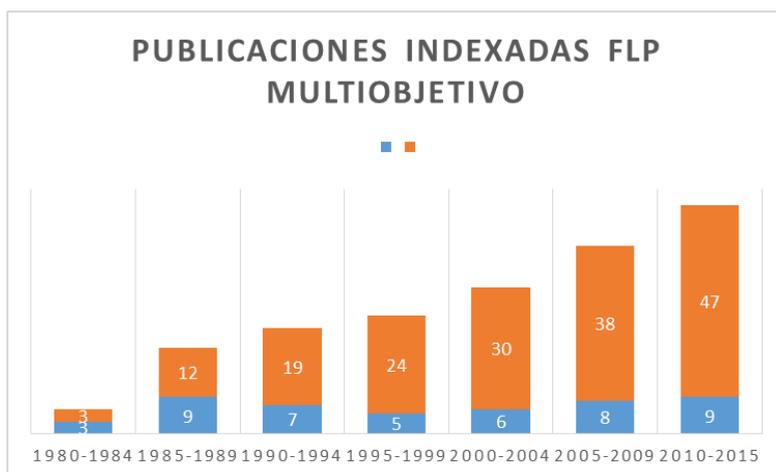


Figura 4 - 1 - Publicaciones indexadas del problema FLP multiobjetivo.

Más recientemente, (Montalva et al. 2012) realizan una taxonomía de los métodos existentes, y proponen una clasificación que puede verse en el cuadro siguiente:



Figura 4 - 2 –Métodos multicriterio para el FLP (Montalva et al. 2012)

Se expondrán en este capítulo, de entre los métodos existentes, aquellos más significativos, siguiendo de alguna manera la clasificación indicada.

4.2. Criterios de clasificación de técnicas multicriterio.

Como ya se ha indicado en varias ocasiones a lo largo de este trabajo, el problema del FLP es un problema que difícilmente puede enfocarse bajo un planteamiento que no sea multicriterio (no así como sucede con otros como el clásico QAP u otros, por ejemplo); es por esto que ya autores como Muther (R. 1968) y Tompkins (Tompkins, White 1984) hacen una clara referencia al carácter multicriterio del problema de la implantación. Existen numerosos enfoques, como se verá a continuación.

Las mayoría de los autores que abordan este problema, lo hacen a través de funciones de coste multicriterio, utilizando diversas técnicas, para agregar los diferentes objetivos. La forma más extendida de realizar esta agregación es por medio de una suma ponderada. A cada criterio se le asigna un coeficiente de ponderación que muestra la importancia relativa del mismo frente al resto. (Rosenblatt 1979, Rosenblatt, Sinuany-Stern 1986, Dutta, Sahu 1982, Urban 1987, Malakooti, Tsurushima 1989, Harmonosky, Tothoro 1992, Sarin et al. 1992, Shang 1993). Aunque también existen otras técnicas de agregación, no aditivas como las propuestas en (Fortenberry, Cox 1985).

Otra familia de métodos es la utilización de procedimientos de jerarquización. De entre ellos el método Electre ("Elimination et choix traduisant la réalité") introducido por Bernard Roy en 1968 es el más utilizado.

También en la bibliografía aparecen técnicas interactivas, como la propuesta por (Malakooti 1987) en la que presentan un método de agregación parcial interactivo. Mediante un procedimiento iterativo (de construcción y mejora) se van generando y evaluando alternativas secuencialmente. La evaluación la realiza uno o varios expertos en base a diferentes criterios. Las opiniones expresadas son tenidas en cuenta a la hora de generar la siguiente alternativa, guiando así el procedimiento de mejora.

Otra familia de métodos se basan en el empleo de la lógica difusa, (Gobelny 1987, Raoot, Rakshit 1993a), que es una herramienta especialmente adaptada al manejo de

información no precisa y a la valoración del grado de cumplimiento de diferentes proposiciones que modelizan la calidad de una implantación.

Se pueden encontrar en la bibliografía existente varios estados del arte de las aproximaciones que han realizado los diferentes autores al problema de distribución en planta desde una perspectiva multiobjetivo. Se examinan gran parte de las publicaciones realizadas en el campo en (Matai, Singh 2008), haciendo especial hincapié a la línea de trabajo de (Chen, Sha 2005); se citan los artículos más importantes en el campo, pero se dejan de lado muchas de las aportaciones realizadas en los últimos años. Una de las más exhaustivas y recientes recopilaciones se recogen en el trabajo realizado por (Montalva et al. 2012), y son las siguientes:

- (Waghodekar, Sahu 1986a)
- (Santamarina 1995)
- (Malakooti, Tsurushima 1989)

Además, (Montalva et al. 2012) indican que es necesario realizar un estado del arte minucioso y más actual en este campo para poder situar las metodologías propuestas en el mismo de una manera precisa y marcar posibles líneas de investigación. También expone que el número de publicaciones en revistas internacionales en los 30 años de vigencia del problema ha sido constante y en los últimos años se ha visto incrementado, después de una época en la que no aparecieron apenas nuevas líneas de investigación en el campo. Las clasificaciones propuestas hasta la actualidad en este campo son las de Waghodekar y Malakooti, y propone otra que resume y recoge las citadas que se expondrá al finalizar la explicación de las mismas.

4.2.1. Clasificación de (Waghodekar, Sahu 1986a) y (Santamarina 1995).

En (Waghodekar, Sahu 1986a) se encuentra una primera clasificación de las técnicas multiobjetivo aplicadas al FLP, según el momento del proceso de optimización en el que se tiene en cuenta el carácter multicriterio del problema. Además de esta una revisión inicial, también se realiza una descripción de los objetivos que se pueden emplear en la formulación del problema.

Se puede calificar esta clasificación de incipiente, pues se produce en un momento en el que únicamente se habían publicado ocho artículos en este campo, que aún era incipiente. Los autores aportan una clasificación inicial de las publicaciones hasta ese momento en la que incluye técnicas como el MUCFAL (Sayin 1981) y las técnicas MFLAP propuestas por (Waghodekar, Sahu 1986a), así como una segunda la MFLAPSA que no se llegó a publicar.

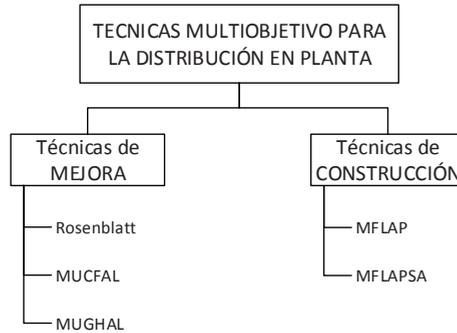


Figura 4 - 3 - Clasificación de (Waghodekar, Sahu 1986b)

De todas las referencias del problema encontradas en la bibliografía, la distribución de las mismas según esta clasificación es la que se muestra a continuación, destacando el hecho de que la gran mayoría de referencias se pueden enmarcar dentro de técnicas de mejora.

Como afirma (Santamarina 1995), la Distribución en Planta se constituye, por sí misma, como un problema de naturaleza multicriterio. Para abordar el problema de la Distribución, admitiendo su naturaleza multicriterio, es posible actuar en tres estadios, según la clasificación propuesta por (Santamarina 1995, Waghodekar, Sahu 1986a):

- En la generación de la alternativas (utilizando una técnica de construcción).
- En la selección de la alternativa, mediante una técnica de mejora.
- En la generación y selección de la alternativa, mediante una técnica híbrida de construcción y mejora.

4.2.1.1. Actuando en la generación de la alternativas.

En este tipo de métodos, la Distribución es el resultado de una serie de decisiones tomadas bajo diferentes criterios. Las técnicas de generación de alternativas basadas en conjuntos difusos "Fuzzy sets" pertenecen a este grupo (Evans et al. 1987, Grobelny 1987).

4.2.1.2. Actuando en la selección de alternativas.

El procedimiento de selección se lleva a cabo mediante alguna metodología de análisis multicriterio. El procedimiento de selección, a su vez, se puede desarrollar de dos formas distintas:

- Utilizando en la formulación del problema una función objetivo resultante de la agregación de los criterios que se desea contemplar. La forma más habitual de hacerlo es a través de modelos aditivos (suma versión ponderada). A cada criterio se le asigna un coeficiente de ponderación que muestra la importancia relativa del mismo frente al resto. (Rosenblatt 1979, Rosenblatt, Sinuany-Stern 1986, Dutta, Sahu 1982, Urban 1987, Harmonosky, Tothero 1992, Malakooti 1989, Sarin et al. 1992, Shang 1993, Suresh, Sahu 1993) proponen un modelo aditivo y un criterio del tipo "simulated annealing" como procedimiento de optimización. También existen otros modelos no aditivos (Fortenberry, Cox 1985).
- Utilizando procedimientos de jerarquización, como por ejemplo el método Electre ("Elimination et choix traduisant la réalité") u otros similares.

4.2.1.3. Actuando en la generación y selección de alternativas.

En 1984, Malakooti y D'Souza (Malakooti 1987) proponen un método de agregación parcial interactivo. Es un procedimiento iterativo (de construcción y mejora) en el que se van generando y evaluando alternativas secuencialmente. La evaluación la realiza uno o varios expertos bajo diferentes criterios. Las opiniones expresadas son tenidas en cuenta a la hora de generar la siguiente alternativa, guiando así el procedimiento de mejora.

Destacan también aquí algunos métodos basados en lógica difusa, (Raoot, Rakshit 1993b). Sobresale Raoot, dentro de este grupo, por proponer un método combinado de construcción y mejora. El procedimiento de construcción está basado en la lógica difusa y la mejora se lleva a cabo mediante el método Electre.

La mayor parte de la bibliografía queda enmarcada en el segundo grupo de métodos de la clasificación expuesta. Concretamente, son métodos en los que el análisis multicriterio se realiza en la fase de selección, pues utilizan técnicas de mejora. La mayoría de ellos utilizan funciones objetivo de naturaleza aditiva.

4.2.2. Clasificación de (Malakooti, Tsurushima 1989).

Puede encontrarse una segunda clasificación de las técnicas multiobjetivo aplicadas al problema FLP en (Malakooti, Tsurushima 1989), considerando el momento en el que se tiene en cuenta el carácter multicriterio del problema.

Esta es la clasificación que mayor número de referencias tiene en la bibliografía, y en ella, el autor describe tres grandes grupos de técnicas:

- Técnicas que generan una serie de soluciones que son eficientes sin centrarse en cual de todas ellas es la óptima.

- Técnicas en las que se evalúa en primer lugar los pesos que hay que darle a cada uno de los objetivos, para pasar después a optimizar la función objetivo con los pesos obtenidos.
- Métodos interactivos entre expertos y diseñador, que tienen en cuenta el carácter multiobjetivo del problema en el proceso de generación de la solución.

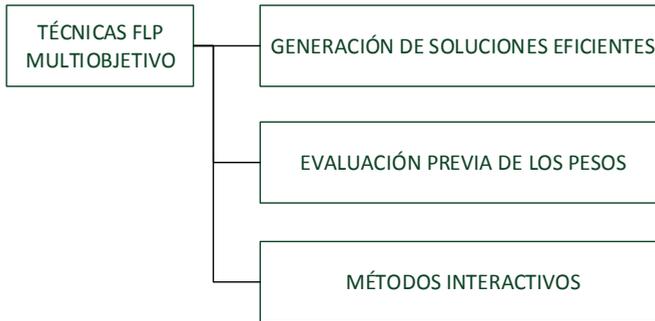


Figura 4 - 4 - Clasificación de Malakooti.

Al igual que se hizo con la clasificación anterior, las técnicas se distribuyen en los distintos grupos tal y como se muestra en la figura anterior, destacando que la mayor parte de las referencias quedan enmarcadas en la generación de soluciones eficientes.

4.2.3. Clasificación propuesta por (Montalva et al. 2012).

En el estudio de las diferentes referencias publicadas en el ámbito del problema de distribución en planta multiobjetivo, el autor ha decidido estructurar y organizar las mismas atendiendo a una clasificación diferente a las comentadas anteriormente.

En un primer nivel, se distribuyen las publicaciones en dos grandes grupos en función de la forma en la que se aborda el problema:

- Evaluación de Soluciones: En un primer grupo se incluyen las referencias que tienen como objetivo fundamental determinar la mejor de las soluciones de un conjunto de layouts generados mediante cualquier técnica de construcción.
- Optimización de Soluciones: En este segundo grupo se incluyen todas las referencias que tienen como objetivo la generación de soluciones optimizadas a partir de un layout original. Todas estas técnicas se pueden clasificar en función de cómo se realiza la optimización bien a través de una función objetivo en la que se agregan todos los objetivos o bien se afronta el problema como multiobjetivo a través de un conjunto de soluciones que conforman la frontera de Pareto.



Figura 4 - 5 - Clasificación propuesta por (Montalva et al. 2012).

4.3. Evaluación de soluciones.

Algunos autores se han acercado al problema de distribución en planta desde el punto de vista de la selección de diferentes alternativas (o evaluación de soluciones). En sus propuestas, se generan una serie de soluciones, mediante cualquier técnica de generación existente y posteriormente se evalúan, obteniendo de entre las soluciones generadas la mejor atendiendo a los diferentes objetivos. Algunas de las aportaciones más relevantes son las que a continuación se exponen:

- En (Malakooti, Tsurushima 1989), se propone una metodología mixta MCDM-ES, que combina los conceptos de la toma de decisiones multicriterio y de un sistema experto. En una primera fase, el sistema experto construye una serie de soluciones según los criterios establecidos por los conocimientos previos y criterios de los expertos, con lo cual se actúa en la fase de construcción de la solución, que no es generado de forma aleatoria. En la segunda fase, de mejora, se permite a los expertos modificar la posición de algunas actividades para mejorar la calidad de la solución. Estos cambios sólo se pueden hacer por el panel de expertos y son guiados por ellos, sin emplear ninguna heurística de mejora.
- (Cambron, Evans 1991) generan seis soluciones de un mismo problema de distribución en planta de 25 actividades de área desigual mediante técnicas como CRAFT, CORELAP, ALDEP y una generación manual que posteriormente son clasificadas atendiendo a diferentes criterios. En concreto se evalúan criterios tanto cuantitativos (eficiencia de movimiento de materiales y personal, espacios muertos...) como cualitativos (Seguridad, Control de Ruidos, Supervisión del trabajo, Estética...), mediante una técnica AHP (Analytic Hierarchy Process) descrita en (Saaty 1986).
- (Lin, Sharp 1999) hace una nueva aproximación al problema de evaluación de alternativas en un problema de distribución en planta. En trabajos anteriores establecieron una serie de 18 objetivos, que se materializan a través de indicadores, que, un vez jerarquizados son el marco de trabajo para evaluar las alternativas. Se hace un especial hincapié a la forma de generar los pesos de cada criterio, así como de la normalización de los mismos.

- (Yang, Kuo 2003) plantean una técnica que no está basada en la agregación de objetivos, sino que emplean DEA (Data Envelopment Analysis) para realizar la selección de la mejor solución de entre las generadas. Se plantea el problema atendiendo a criterios tanto cuantitativos (Flujo, Adyacencia y Factor de Forma) como cualitativos (Flexibilidad, Accesibilidad y Mantenimiento). Los criterios cualitativos se ponderan y evalúan mediante AHP, y los cualitativos se evalúan una vez construida la solución (que se hace mediante SPIRAL). La decisión sobre cual es mejor solución de entre las generadas se realiza mediante DEA, que es una aproximación no paramétrica, que no requiere ningún supuesto sobre la forma de la función objetivo.
- (Yang, Hung 2007) se hace un planteamiento del problema de decisión con múltiples objetivos (similar a (Yang, Kuo 2003)) donde se debe elegir la mejor entre distintas soluciones a un problema de distribución en planta. Emplean las mismas soluciones obtenidas en artículos anteriores, atendiendo a los mismos criterios y determinan la mejor de ellas empleando una variación de la metodología TOPSIS (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution) establecida en (Hwang, Yoon 1981), la cual se fundamenta en el principio de que la alternativa elegida debe situarse a la menor distancia de la solución óptima y a la mayor distancia a la solución pésima. La metodología, a la que llaman Fuzzy TOPSIS, introduce conceptos de la lógica borrosa, obteniendo soluciones aceptables.

4.4. Optimización de soluciones.

Gran parte de los autores que se han aproximado al problema de distribución en planta desde un punto de vista multiobjetivo, lo hacen desde una de las formulaciones del problema como es la del Quadratic Assignment Problem (QAP) y más concretamente en el QAP monocasilla de áreas iguales. Este problema fue planteado en (Koopmans, Beckman 1957) y en el mismo se deben asignar n actividades a n localizaciones, de manera que el coste total resultante del producto de los flujos por las distancias entre actividades sea mínimo. En el problema generalizado las áreas de las n actividades pueden tener valores distintos, sin embargo en el problema monocasilla son iguales, de valor unidad y de geometría cuadrada. En este tipo de formulación, cada actividad solo puede ser asignada a una localización, no permitiendo la superposición de las mismas

La formulación QAP del problema de distribución en planta, exige la definición de una variable binaria de asignación que se expresa así:

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si la actividad } i \text{ ocupa la posición } k. \\ 0 & \text{en caso contrario.} \end{cases} \quad (4-1)$$

La nomenclatura que se emplea en la formulación del QAP generalizado (Francis, White 1974) es la siguiente:

- n Número de actividades.
- ub Número de localizaciones.
- A_i Área total de la actividad i .
- a_{ik} Coste de colocar la actividad i en la localización k .

- f_{ij} Flujo de materiales entre la actividad i y la act. j para un periodo de referencia.
 c_{ij} Coste de transporte por unidad de distancia, una unidad de producto desde la actividad i a la actividad j .
 d_{kl} Distancia de la localización k a la localización l .

Con las siguientes consideraciones:

- a_{ik} incluye exclusivamente el coste de instalación
- f_{ij} es independiente de la localización de las actividades.
- c_{ij} es independiente de las actividades, depende del sistema de manutención.
- Es más barato transportar material directamente desde la actividad i a una actividad j que a través de una tercera localización.

Con todas las consideraciones y nomenclatura anteriormente expuesta, la formulación del problema de distribución en planta como un QAP generalizado queda de la siguiente forma:

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{ub} a_{ik} \cdot x_{ik} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{ub} \sum_{l=1}^{ub} f_{ij} \cdot c_{ij} \cdot d_{kl} \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (4-2)$$

Sujeto a las restricciones:

$$\sum_{k=1}^{ub} x_{ik} = A_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4-3)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ik} = 1 \quad k = 1, 2, \dots, ub \quad (4-4)$$

$$x_{ik} = x_{ik}^2 \quad (4-5)$$

El primer término de la expresión a minimizar supone el coste de asignar la actividad i a la localización k , es lo que se llama el coste de instalación. Este término se considera nulo en todas las formulaciones multiobjetivo del problema de distribución en planta existentes en la bibliografía, supondría una penalización (penalty geométrico) por asignar actividades a ciertas zonas “prohibidas” de la planta como fosos o escaleras.

El segundo término de la expresión, computa el coste de transporte de materiales entre las actividades i y j , cuando están localizadas en las posiciones k y l , esta forma de plantear el problema en términos de coste de transporte es una formulación cuantitativa.

En las formulaciones QAP multiobjetivo del FLP revisadas en toda la bibliografía, el coste de implantación es nulo, y en la mayor de ellas, se reducen al modelo monocasilla ($n=ub$), que puede ser reducida a la siguiente expresión:

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n m_{ijkl} \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (4-6)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{k=1}^n x_{ik} = 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4-7)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ik} = 1 \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (4-8)$$

$$x_{ik} = x_{ik}^2 \quad (4-9)$$

En la que m_{ijkl} es la función objetivo del problema, en el caso monoobjetivo cuantitativo de la formulación del QAP $m_{ijkl} = a_{ijkl} = f_{ij} \cdot c_{ij} \cdot d_{kl}$, y en el resto de aproximaciones multiobjetivo varía tal y como veremos en apartados posteriores. Esta misma formulación del problema es válida, para el caso monocasilla y en aquellas situaciones en las que el coste de instalación de la actividad no fuera nulo, empleando la función objetivo: $m_{ijkl} = a_{ijkl} = c_{ik} + f_{ij} \cdot c_{ij} \cdot d_{kl}$. Siendo c_{ik} el coste de implantar la actividad i en la posición k .

4.4.1. Técnicas basadas en agregación de criterios. Funciones aditivas.

La distribución final debe ser una solución de compromiso entre las exigencias establecidas por los diferentes criterios. Las diferentes configuraciones que se generan, pueden calificarse de forma muy dispar en función del criterio elegido de valoración. Estas diferentes valoraciones surgen de la imposibilidad material de satisfacer todas las necesidades de adyacencia que establecen los diferentes criterios. Como consecuencia de ello, bajo cada uno de los criterios, cada alternativa (distribución) que se evalúa tiene un coste parcial C_i (que representa la valoración obtenida en aplicación del criterio i). El coste relacional total CT del sistema (distribución), en los modelos aditivos es la suma ponderada de los costes parciales.

Rosenblatt (Rosenblatt 1979, Rosenblatt, Sinuany-Stern 1986) es el primer autor que combina en la función objetivo criterios cuantitativos (coste derivado del transporte de materiales) y cualitativos (expresando las necesidades de proximidad a través de la TRA). Tras él, (Dutta, Sahu 1982), Fortenberry y Cox con un modelo no aditivo (Forten-

berry, Cox 1985) y Urban (Urban 1987) proponen nuevas modificaciones aceptando la combinación de dos criterios.

Malakooti y D'Souza amplían posteriormente el número de criterios en la función objetivo introduciendo aspectos como la flexibilidad del sistema o la eficiencia del proceso productivo a través de la minimización de tiempo de producción (Malakooti 1987).

Como se indica en (Santamarina 1995), la distribución final debe ser una solución de compromiso entre las exigencias establecidas por los diferentes criterios. Bajo cada uno de ellos, las necesidades de proximidad entre actividades son diferentes. Cuando se genera una distribución, salvo en el caso de muy bajo número de actividades, en general, no es posible respetar todas las necesidades de proximidad entre actividades.

Como consecuencia, bajo cada uno de los criterios, cada alternativa (distribución) que se evalúa tiene un coste relacional parcial CRP (que representa el incumplimiento de las proximidades requeridas bajo dicho criterio). El coste relacional total CRT del sistema (distribución) en los modelos aditivos es la suma ponderada de los costes relacionales parciales. Cada sumando (CRP) se pondera mediante un coeficiente que muestra la importancia relativa del criterio en cuestión frente a los restantes (α_u).

El principal problema que se plantea al intentar sumar los CRP para determinar el CRT es la falta de homogeneidad en las unidades utilizadas en la estimación de los diversos CRP.

4.4.1.1. Formulación general de las técnicas de agregación.

Esta formulación toma la ya indicada como "Problema cuadrático de asignación" modificando su estructura para permitir la agregación de varios criterios. Su expresión matemática es la siguiente:

$$\text{Min} \quad \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^{ub} a_{ik} \cdot x_{ik} + \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^{ub} \sum_{l=1}^{ub} f_{ij} \cdot c_{ij} \cdot d_{kl} \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (4-10)$$

Sujeto a las siguientes restricciones:

$$\sum_{k=1}^{ub} x_{ik} = A_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (4-11)$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ik} = 1 \quad k = 1, 2, \dots, ub \quad (4-12)$$

$$x_{ik} = x_{ik}^2 \quad (4-13)$$

La mayor parte de las publicaciones de la bibliografía quedan enmarcadas en este grupo, en el que los objetivos son agregados en una única función objetivo. La agregación de objetivos se realiza bien mediante una función aditiva o mediante una función multiplicativa.



Figura 4 - 6 - Métodos basados en funciones agregadas.

Bajo el planteamiento de Función objetivo agregada aditiva, se deben obtener en primer lugar los pesos de los m objetivos (ω_u), cumpliéndose en la mayor parte de los casos que $\sum \omega_u = 1$. Una vez obtenidos los pesos, todos ellos se agregan obteniendo un valor único de la función objetivo m_{ijkl} que debe ser minimizada, en general:

$$m_{ijkl} = \sum_{u=1}^m \omega_u \cdot f_{ijkl,u} \tag{4-14}$$

- donde:
- ω_u Es el peso de objetivo u -ésimo.
 - $f_{ijkl,u}$ Es el valor del objetivo u -ésimo.

Dentro de los métodos aditivos se pueden encontrar dos formas de realizar la ponderación: por un lado aquellas publicaciones que emplean una adición pura, en la que los pesos no son normalizados, por tanto la suma no tiene en cuenta la posible disparidad entre las magnitudes de los objetivos, y por otro lado los métodos aditivos normalizados, en los que sí que se realiza una homogeneización de los distintos objetivos, para que la función a optimizar sea lo más uniforme posible.



Figura 4 - 7 – Modelos de agregación de objetivos

Como indica (Santamarina 1995), la forma generalizada de la función objetivo (F.O.) en los modelos aditivos es:

$$CRT = \sum_{u=1}^h \alpha_u \cdot CRP_u \quad (4-15)$$

siendo CRP_u el coste relacional parcial bajo el criterio u -ésimo.

Así, el coste relacional total (CRT) del sistema puede variar en función de:

- Los coeficientes de ponderación utilizados (α_u).
- Los indicadores utilizados para la estimación de los costes relacionales parciales (CRP_u).
- El mecanismo utilizado para la normalización de los CRP.

4.4.1.2. Influencia de los coeficientes de ponderación en la F.O.

El principal problema que se plantea al intentar sumar los costes parciales es la falta de homogeneidad en la unidades utilizadas en la estimación de los diversos costes. Además no es fácil establecer el valor de los coeficientes de ponderación, ya que siempre está presente una componente subjetiva en la determinación de los mismos, lo cual normalmente se realiza por medio de opiniones expresadas por expertos.

4.4.1.2.1. Planteamientos iniciales.

(Rosenblatt 1979) establece dos funciones objetivo, a las que llama Z_x (F.O. de coste de transporte, por tanto a minimizar) y Z_y (F.O. de índice de cercanía, por tanto a maximizar), combinándolas ambas en un único problema a resolver:

$$Min Z = \alpha_2 \cdot z_x - \alpha_1 \cdot z_y = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n (\alpha_2 \cdot a_{ijkl} - \alpha_1 \cdot w_{ijkl}) \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (4-15)$$

$$\alpha_2 + \alpha_1 = 1 \quad y \quad \alpha_2, \alpha_1 \geq 0 \quad (4-16)$$

Sujeto a las restricciones habituales del QAP ya formuladas, relativas a los pesos de los criterios cuantitativos (α_2) y cualitativos (α_1) que tienen una relación lineal. Por tanto la función que relaciona ambos criterios es aditiva ponderada, y se formula:

$$m_{ijkl} = \alpha_2 \cdot a_{ijkl} - \alpha_1 \cdot w_{ijkl} \quad (4-17)$$

En esta formulación se introduce el término del índice de cercanía de las actividades i - j , mediante el término w_{ijkl} , que adquiere el siguiente valor:

$$w_{ijkl} = \begin{cases} r_{ij} & \text{si las posiciones } k \text{ y } l \text{ tienen frontera común} \\ 0 & \text{en cualquier otra situación} \end{cases} \quad (4-18)$$

r_{ij} índice de cercanía deseado para las actividades i y j

Define, por primera vez el concepto de layout eficiente: "...*Un layout es eficiente si una mejora, medida en uno de los criterios, solo se puede obtener aceptando una pérdida en el otro criterio...*" establece también el concepto de solución dominada (aunque no la llame de esta manera). Describe este concepto mediante un par de soluciones i y j tales que:

$$\text{Si } R_j \leq R_i \wedge C_j \geq C_i / \forall \alpha_1, \alpha_2 \geq 0 : \alpha_2 \cdot C_i - \alpha_1 \cdot R_i \leq \alpha_2 \cdot C_j - \alpha_1 \cdot R_j \quad (4-19)$$

4.4.1.2.2. Procedimiento de ponderación.

Se establece en (Shang 1993). Este autor propone un procedimiento sistemático para la determinación de los mismos. Como punto de partida requiere una matriz de jerarquización de criterios $C(c_{ij})$, en la que se comparan los criterios dos a dos y se estima la importancia relativa de un criterio frente a otro. Esta matriz se elabora con las opiniones expresadas por expertos. La matriz $C(c_{ij})$ es cuadrada ($h \times h$), siendo h el número de criterios bajo los cuales se quiere realizar la distribución y contiene "1" en la diagonal principal.

La metodología se realiza en dos etapas, una primera en la que se determinan los pesos de cada uno de los criterios (cuantitativos y cualitativos), mediante AHP y una segunda en la que se realiza la optimización del problema. Otra característica a destacar es que el autor insiste en que es necesario partir de una solución inicial que tenga una calidad elevada, para poder llegar a óptimos locales.

Para ello se establece, en primer lugar, una escala de valores (de 1 a 9, donde 1 representa la indiferencia absoluta y 9 una importancia extrema). Cada elemento de la matriz $C(c_{ij})$ representa el grado de preferencia por el cumplimiento de las exigencias derivadas del criterio " i " frente a las exigencias derivadas del criterio " j ". De forma genérica, cada elemento de la matriz muestra la importancia relativa del criterio " i " frente al " j ". Una vez fijado el valor del elemento c_{ij} , se define el valor del elemento c_{ji} como su inverso (si $c_{ij} = 9$, $c_{ji} = 1/9$). La importancia relativa de cada criterio frente a los restantes (α_i) se determina de la forma:

$$\alpha_i = \frac{\sum_{j=1}^h C_{ij}}{\sum_{i=1}^h \sum_{j=1}^h C_{ij}} \quad (4-20)$$

Tabla 4 - 1 - Matriz de jerarquización de criterios (Shang 1993).

	Safety	Noise	Flexibility	Aesthetics	Temperature	WIP	α_i
Safety	1	8	6	9	7	6	0.552
Noise	1/8	1	3	7	1/2	1/3	0.110
Flexibility	1/6	1/3	1	2	1/2	1	0.067
Aesthetics	1/9	1/7	1/2	1	1/3	1/2	0.037
Temperature	1/7	2	2	3	1	1	0.116
WIP	1/6	3	1	2	1	1	0.119

Otro enfoque más reciente se encuentra en (Sangwan, Kodali 2006) donde se plantea el problema con una función aditiva ponderada, del mismo estilo que la propuesta en (Dutta, Sahu 1982), con los mismos objetivos, el coste de transporte de materiales (MHC) y un índice de cercanía.

En este caso los pesos de cada uno de los objetivos se obtienen mediante una combinación de lógica borrosa y AHP y la diferencia fundamental con otros procedimientos es que los valores de los índices de cercanía entre actividades se obtienen mediante lógica borrosa, y configuran lo que los autores denominan la Fuzzy Closeness Rating Matrix.

4.4.1.2.3. Análisis de sensibilidad de los coeficientes de ponderación. Concepto de eficiencia.

En principio, y variando según el tipo de problema, no es trivial determinar la importancia relativa de unos criterios frente a otros. En (Rosenblatt 1979, Rosenblatt, Sinuany-Stern 1986, Malakooti 1987, Malakooti, Tsurushima 1989) se propone realizar un análisis de sensibilidad de los mismos.

El procedimiento es sencillo, se trata de determinar cuál la distribución más adecuada bajo diferentes coeficientes de ponderación para poder determinar la sensibilidad de la distribución elegida ante la variación de los mismos.

Para ello se utiliza, por una parte, alguna estrategia que permita generar diferentes distribuciones; y por otra, algún mecanismo de evaluación de las mismas que permita identificar secuencialmente las que son eficientes.

"A plant layout is said to be efficient if an improvement, as measured by one criterion, can be obtained only by accepting a loss, as measured by another criterion".

Una distribución Y^* es eficiente, si y sólo si, no existe otra distribución Y' / Y^* sea superada o igualada por Y' bajo todos los puntos de vista, e Y^* es superada por alguna distribución Y' , bajo al menos, un punto de vista.

Si una distribución Y^* supera o iguala desde cada uno de los puntos de vista a alguna solución considerada eficiente en etapas anteriores (Y'), simplemente es mejor que ella (o igual, si la iguala en todos los criterios), en ese caso la distribución que es superada (Y') es excluida del grupo de eficientes.

El procedimiento propuesto por estos autores comienza por formar un conjunto de distribuciones eficientes para después elegir, entre ellas, la más adecuada. Por ejemplo, si el objetivo de un problema de Distribución en Planta es minimizar los costes relacionales parciales CRP_1 (coste derivado del transporte de materiales) y CRP_2 (coste derivado de la falta de proximidad entre actividades por motivos de seguridad), y se ha obtenido el conjunto de soluciones eficientes $\{S_1, S_2, S_3\}$, es posible delimitar, asumiendo la linealidad de los costes, la zona del plano de las soluciones que son eficientes o superiores respecto a dicho conjunto (zona sombreada), como se comenta en (Santamarina 1995).

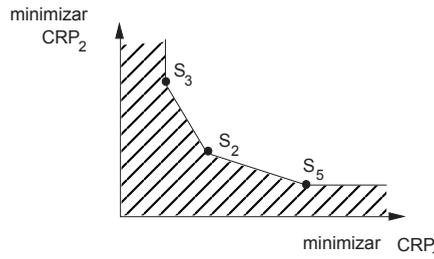


Figura 4 - 8 - Conjunto final de soluciones eficientes. (Santamarina 1995)

Fijados los coeficientes de ponderación α_1 y α_2 , la distribución (solución) eficiente más adecuada será la que minimice el coste relacional total:

$$CRT = \alpha_1 \cdot CRP_1 + \alpha_2 \cdot CRP_2 \quad (4-21)$$

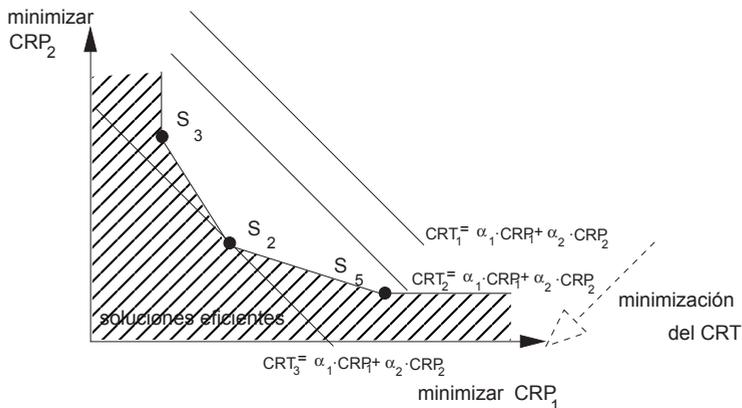


Figura 4 - 9 - Minimización del coste relativo total. (Santamarina 1995)

Para establecer el análisis de sensibilidad, simplemente se repite el procedimiento variando los valores de los coeficientes de ponderación (α_1 y α_2), con lo que varía la pendiente de la recta y por lo tanto la elección de la solución eficiente que finalmente es elegida.

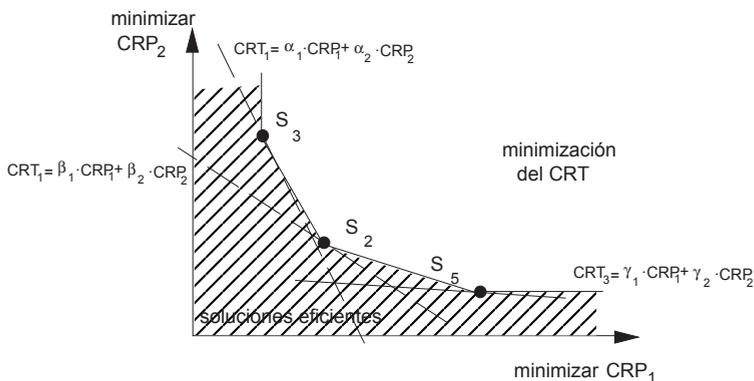


Figura 4 - 10 - Los coeficientes de ponderación condicionan la selección. (Santamarina 1995)

Repitiendo el procedimiento varias veces, se puede determinar bajo qué intervalos de variación de los coeficientes de ponderación (α_1 y α_2) una distribución eficiente se mantiene como la más adecuada.

4.4.1.3. Estimación de los costes relacionales parciales (C.R.P.).

Rosenblatt (Rosenblatt 1979, Rosenblatt, Sinuany-Stern 1986) es el primer autor que combina en la función objetivo criterios cuantitativos (coste derivado del transporte de materiales) y cualitativos (expresando las necesidades de proximidad a través de la TRA). Tras él, (Dutta, Sahu 1982), Fortenberry y Cox con un modelo no aditivo (Fortenberry, Cox 1985) y Urban (Urban 1987) proponen nuevas modificaciones aceptando la combinación de dos criterios.

Malakooti y D'Souza amplían posteriormente el número de criterios en la función objetivo introduciendo aspectos como la flexibilidad del sistema o la eficiencia del proceso productivo a través de la minimización de tiempo de producción (Malakooti 1987).

Respecto a los indicadores propuestos para la estimación de los CRP, cada autor propone los que estima más relevantes. Rosenblatt (Rosenblatt 1979, Rosenblatt, Sinuany-Stern 1986) formula el problema bajo un planteamiento discreto y monoárea, de la siguiente manera:

$$\text{Min } Z = \alpha_2 C - \alpha_1 R = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n (\alpha_2 \cdot a_{ikjl} - \alpha_1 \cdot w_{ikjl}) \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (4-22)$$

cumpliéndose las siguientes restricciones:

$$\sum_{i=1}^n x_{ik} = 1; \quad k=1, 2, \dots, n \text{ (no superposicion)} \quad (4-23)$$

$$\sum_{k=1}^n x_{ik} = 1; \quad i=1, 2, \dots, n \text{ (actividades monoarea)} \quad (4-24)$$

$$x_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{si la actividad "i" está en l a posición k} \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (4-25)$$

$$\alpha_1 + \alpha_2 = 1 \quad (4-26)$$

siendo:

i, j = subíndices que identifican actividades concretas.

k, l = subíndices que identifican las unidades de espacio resultantes de la discretización del dominio.

C_{ik} = coste unitario, derivado de ubicar la actividad i en la posición k .

$$a_{ijkl} = \begin{cases} f_{ij} \cdot d_{kl} & \text{si } i \neq j \\ f_{ii} \cdot d_{kl} + c_{ik} & \text{si } i = j \end{cases} \quad (4-27)$$

f_{ij} = coste derivado del transporte de materiales por unidad de distancia recorrida entre las actividades i y j .

d_{kl} = distancia física existente entre los centros de gravedad de las posiciones k y l , definida como:

$$d_{kl} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (4-28)$$

α_1 y α_2 = coeficientes de ponderación de la importancia relativa del coste derivado del flujo de materiales (criterio cuantitativo) frente al criterio cualitativo.

$$w_{ijkl} = \begin{cases} tra_{ij}, \text{ valor en la TRA entre las actividades } i \text{ y } j, \text{ si ambas tienen frontera común} & (4-29) \\ 0, \text{ en caso contrario} \end{cases}$$

Los CRP vienen representados por:

- a_{ijkl} : coste derivado del transporte de materiales entre actividades, incluyendo el de localización de cada actividad en su ubicación.
- w_{ijkl} : coste relacional derivado del incumplimiento de las necesidades de proximidad entre actividades, previa transformación de las intensidades relacionales expresadas en la TRA mediante una escala numérica.

Para estudiar la eficiencia de las alternativas que se van generando se determinan los valores de:

$$R = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n w_{ijkl} \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad C = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n a_{ijkl} \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (4-30)$$

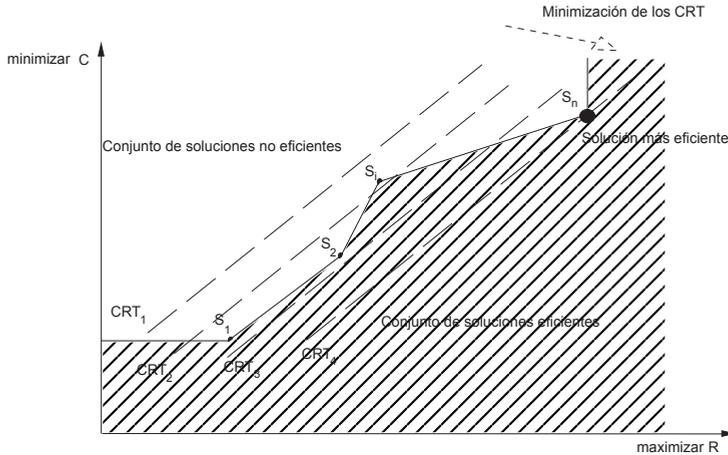


Figura 4 - 11 - Formulación de Rosenblatt. $\text{Min CRT} = Z = \alpha_2 \cdot C - \alpha_1 \cdot R$. (Santamarina 1995)

(Dutta, Sahu 1982) un procedimiento conocido con el nombre "Mughal", en esencia muy parecido al anterior, que produce, en general, soluciones más económicas que las propuestas por Rosenblatt. La formulación del problema es idéntica a la expuesta, aunque la metodología presenta sutiles diferencias respecto al método anterior.

- Rosenblatt crea el conjunto de soluciones eficientes mediante el algoritmo Aldep, mientras que Dutta y Shau lo hacen mediante Craft.
- En el CRP derivado de la TRA, Rosenblatt incluye el valor del ratio de proximidad sólo entre aquéllos pares de departamentos entre los que existe frontera común, y por frontera común entiende algún punto de contacto entre actividades, ya sea por alguno de sus lados o por sus esquinas (en diagonal). Dutta y Shau sólo incluyen el valor relacional si el punto de contacto entre actividades se establece a través de alguno de sus lados. Evidentemente, por esta última razón, Dutta y Shau obtienen soluciones de menor coste, puesto que es una formulación más restrictiva, obligando a las actividades con mayores valores relacionales a estar en contacto directamente (ya que se persigue maximizar R, o minimizar -R).

(Urban 1987) propone un nuevo modelo aditivo, que formula de la siguiente manera:

$$\text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n a_{ijkl} x_{ik} x_{jl} \tag{4-31}$$

sometido a las mismas restricciones que los casos anteriores - por tratarse también de un problema de distribución de actividades monocasilla, siendo:

$$a_{ijkl} = (f_{ij} + c \cdot r_{ij}) \cdot d_{kl} \tag{4-32}$$

f_{ij} = coste derivado del flujo de materiales entre actividades.

r_{ij} = valor relacional en la tabla relacional de actividades entre las actividades i y j transformado a través de alguna escala numérica.

d_{kl} = la misma distancia que en la formulación anterior.

$c(c \geq 0)$ = una constante que determina la importancia relativa del aspecto cualitativo frente al cuantitativo.

La constante (c) tiene una doble misión, por una parte, mostrar la importancia relativa de unos criterios frente a otros, y por otra, realizar una labor de normalización de unidades.

Un valor nulo en dicha constante se traduce en una consideración del problema desde un punto de vista puramente cuantitativo, despreciando, por tanto, las relaciones cualitativas. A menos que exista alguna razón específica para enfatizar alguno de los aspectos, el autor propone $c = \max f_{ij} / i, j = 1, 2, \dots, n$. De esta manera, nunca una relación de tipo $X(-1)$ puede añadir un término positivo a la función de coste. Además, cuanto mayor es el valor relacional mayor es la penalización incluida y por lo tanto se intentará que ambas actividades estén lo más próximas que sea posible en la solución final.

Con esta formulación se consigue la separación de actividades con relación X independientemente del flujo que exista entre ellas.

(Malakooti 1989) presenta una formulación generalizada del problema planteado por (Rosenblatt 1979), ampliando el número de criterios a optimizar incluidos en la función objetivo.

Ya no sólo es interesante optimizar el coste derivado del transporte de materiales entre actividades. Se necesita también que las distribuciones proporcionen la máxima flexibilidad al sistema productivo y que los sistemas de mantenimiento sean eficientes.

Definen la flexibilidad como la facilidad con que las actividades se pueden agrupar o reagrupar y proponen utilizar la TRA como un indicador de la misma. Una actividad que necesita de forma inexorable estar junto a otra para poder desarrollarse con normalidad es poco flexible. Utilizando la escala A-E-I-O-U-X se puede indicar si la necesidad de proximidad entre pares de actividades es absolutamente necesaria, especialmente importante, importante, ordinaria, sin importancia o rechazable.

Proponen, por otro lado, la optimización de la eficiencia del proceso productivo a través de la minimización del tiempo empleado en el mismo.

La formulación, extendida a h criterios, queda de la siguiente manera:

$$\text{Max } f_1(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n a_{1ikj} x_{ik} x_{jl} \quad (4-33)$$

$$\text{Max } f_2(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n a_{2ikj} x_{ik} x_{jl} \quad (4-34)$$

...

$$\text{Max } f_u(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n a_{uikj} x_{ik} x_{jl} \quad (4-35)$$

...

$$\text{Max } f_h(x) = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n a_{hikj} x_{ik} x_{jl} \quad (4-36)$$

cumpliéndose las restricciones de no superposición, para el caso de actividades mono-casilla, y siendo a_{uikj} la puntuación obtenida según el criterio u -ésimo por el hecho de que la actividad i esté en la posición k y la actividad j , en la l .

La función objetivo que se intenta optimizar es la siguiente:

$$\text{Max } \pm \alpha_1 f_1(x) \pm \alpha_2 f_2(x) \pm \dots \pm \alpha_h f_h(x) \quad (4-37)$$

cumpliéndose que:

$$\alpha_1 + \alpha_2 + \dots + \alpha_h = 1 \quad (4-38)$$

Maximizar o minimizar y la elección del signo positivo o negativo para cada criterio queda en función de la naturaleza del indicador utilizado para la medición del mismo.

(Malakooti 1987) propone, incluso, estudiar las preferencias de unas distribuciones frente a otras en función de la opinión de diferentes expertos, evaluando la importancia relativa de unas opiniones frente a otras, según la relevancia de la persona que emite la opinión, y guiando el proceso de mejora de las distribuciones en función de dichas opiniones.

4.4.1.4. Normalización de los costes relacionales parciales.

Finalmente, un tercer grupo de autores, aceptando la validez del modelo aditivo, coinciden en la necesidad de normalizar los CRP obtenidos por los diversos estimadores, pro-

poniendo para ello un conjunto de técnicas. Destacan en esta línea Harmonosky y Tothero (Harmonosky, Tothero 1992, Sarin et al. 1992, Shang 1993).

(Urban 1987) hace hincapié en la necesidad de normalizar las unidades empleadas en la estimación de los CRP. En (Harmonosky, Tothero 1992) se pone nuevamente en tela de juicio la validez de las técnicas multicriterio basadas en la utilización de CRP no normalizados. Los CRP se calculan mediante estimadores diseñados al efecto, lo que se traduce en la aparición de magnitudes "incomensurables".

Así, el CRP del sistema derivado del alejamiento de actividades entre las que existe flujo de materiales es el originado por el coste de transporte de los mismos y tiene sentido económico. El coste derivado de la necesidad de proximidad entre actividades (expresada a través de la TRA) se incluye en la función objetivo por medio de una transformación numérica de las intensidades relacionales, aumentando tanto más cuanto mayor sea la separación entre actividades entre las que existe una intensidad relacional elevada. Las diferentes magnitudes utilizadas para cuantificar los CRP hacen necesaria la inclusión de coeficientes normalizadores para homogeneizar las unidades del coste.

El procedimiento comienza por cuantificar las relaciones existentes entre pares de actividades bajo los diferentes criterios. Estas relaciones se expresan en forma de matrices, formándose una nueva matriz de relaciones $W_u(w_{ij,u})$ cada vez que se evalúa un nuevo criterio.

Para la normalización de las unidades, se procede de la siguiente manera:

$$t_{ij,u} = \frac{W_{ij,u}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij,u}} \quad (4-39)$$

siendo:

$w_{ij,u}$ = el valor de la intensidad relacional existente entre las actividades i y j bajo el criterio u -ésimo.

$t_{ij,u}$ = el valor relacional normalizado entre las actividades i y j bajo el criterio u -ésimo.

El objetivo perseguido es:

$$\text{Min } F.O. = \text{Min} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n \sum_{u=1}^h \alpha_u t_{ij,u} d_{kl} x_{ik} x_{jl} \quad (4-40)$$

cumpléndose que:

$$(4-41) \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n t_{ij,u} = 1 \quad \forall u$$

h = número de criterios contemplados.

α_u = coeficiente que representa la importancia relativa del criterio u-ésimo.

Añadiendo, además, las restricciones correspondientes a un planteamiento de actividades monoárea.

(Sarin et al. 1992) proponen un modelo de decisión multicriterio muy parecido al anterior. El objetivo perseguido por el autor es la normalización de los CRP a través de la normalización de las intensidades relacionales. De esa manera, los CRP resultantes se expresan directamente en magnitudes "conmensurables". El autor reconoce bajo la denominación "valor de preferencia" entre pares de actividades (vp_{ij}) a la intensidad relacional normalizada. La innovación aparece en la forma de determinar el vp_{ij} . Para su estimación propone la utilización de funciones de transformación.

El valor de preferencia global (vpg_{ij}) resultante de la integración de los valores de preferencia estimados bajo los diferentes criterios:

$$vpg_{ij} = \sum_{u=1}^h \alpha_u \cdot vp_{ij,u} \tag{4-41}$$

vpg_{ij} = valor de preferencia global (intensidad relacional normalizada resultante del conjunto de criterios) existente entre las actividades i y j .

$vp_{u,ij}$ = valor de preferencia (intensidad relacional normalizada) entre las actividades i y j bajo el criterio u-ésimo.

α_u = coeficiente de ponderación que muestra la importancia relativa del factor u-ésimo frente al resto de factores.

La forma de agregar los valores de los diferentes criterios queda supeditada a la propia naturaleza del problema, admitiendo la posibilidad de modelos no aditivos.

Una vez generadas diferentes distribuciones, el autor propone la búsqueda de aquella solución que maximice el Ratio de Preferencia Total (RPT), definido como:

$$Max \quad RPT = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \frac{vpg_{ij}}{d_{ij}} \tag{4-42}$$

donde d_{ij} = la distancia entre los centros de gravedad de las actividades i y j .

Finalmente (Shang 1993) presenta en 1993 una función objetivo del tipo:

$$Min \quad \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n a_{ijkl} x_{ik} x_{jl} \tag{4-43}$$

sometida a las restricciones propias de un problema de distribución de actividades monoárea en el que existen el mismo número de actividades (n) que de posibles ubicaciones (n), donde:

$$a_{ikjl} = d_{kl}(a \cdot f_{ij} + b \cdot c \cdot r_{ij}) \quad (4-44)$$

siendo:

d_{kl} = la distancia rectilínea entre centros de gravedad de las casillas k y l (ocupadas por las actividades i y j).

a = importancia relativa del criterio "coste del transporte de materiales entre actividades" frente al resto de criterios, calculada mediante una matriz de jerarquización de criterios.

b = suma de las importancias relativas correspondientes a los criterios cualitativos, calculadas mediante una matriz de jerarquización de criterios.

c = un coeficiente normalizador de unidades del tipo:

$$c = \frac{\max f_{ij}}{\bar{r}_{ij}} \quad (4-45)$$

r_{ij} = intensidad relacional entre las actividades i y j resultante de la agregación de todos los criterios de naturaleza cualitativa, estimada a través de un procedimiento de análisis jerárquico.

\bar{r}_{ij} = valor medio de las intensidades relacionales existentes entre las actividades resultante de la agregación de los criterios de naturaleza cualitativa. Para eliminar la posibilidad de indeterminación por la obtención de un valor promedio nulo se eliminan las que sean menores que la unidad.

f_{ij} = coste, por unidad de distancia, derivado del flujo de materiales entre las actividades i y j .

La innovación de este método estriba en la forma en que se lleva a cabo la normalización de las unidades y la estimación de las intensidades relacionales entre actividades resultantes de la agregación de los criterios cualitativos. Se utiliza para ello un procedimiento de análisis jerárquico:

1º) Se determinan los criterios bajo los cuales se quiere estimar la intensidad relacional entre actividades. Shang propone como criterios

- la seguridad
- las molestias ocasionadas por niveles sonoros excesivos
- la flexibilidad
- la estética
- la temperatura
- el trabajo en curso.

2º) Se expresa, a través de una escala de valores, la preferencia de proximidad entre pares de actividades bajo los diferentes criterios. Los valores se organizan en forma de matrices $P(p_{ij,u})$, donde $p_{ij,u}$ representa la preferencia de proximidad del par "i" frente al par "j" bajo el criterio u -ésimo.

Tabla 4 - 2 - Preferencia de proximidad, comparada por pares de actividades, por motivos de seguridad (caso de cuatro actividades) (Shang 1993).

seguridad	(1,2)	(1,3)	(1,4)	(2,3)	(2,4)	(3,4)
(1,2)	1	1/3	2	1	1/4	3
(1,3)	3	1	5	4	2	1/3
(1,4)	1/2	1/5	1	1/3	1	1/5
(2,3)	1	1/4	3	1	2	1/2
(2,4)	4	1/2	1	1/2	1	6
(3,4)	1/3	3	5	2	1/6	1

3°) Se calcula la necesidad relativa de proximidad de cada par de actividades bajo los diferentes criterios:

$$n_{ij,u} = \frac{\sum_{j=1}^t p_{ij,u}}{\sum_{i=1}^t \sum_{j=1}^t p_{ij,u}} \quad (4-46)$$

siendo:

t = el número de pares de actividades que se comparan.

$p_{ij,u}$ = el valor que muestra la preferencia de proximidad del par "i" sobre el par "j" bajo el criterio u-ésimo.

$n_{ij,u}$ = necesidad relativa de proximidad de cada par de actividades bajo el criterio u-ésimo.

4°) Se calcula la intensidad relacional final (la "necesidad global de proximidad") entre actividades, resultante de la agregación de las necesidades relativas de proximidad bajo cada criterio:

$$w_{ij} = \sum_{u=1}^h \alpha_u \cdot n_{ij,u} \quad (4-47)$$

siendo:

α_u = la importancia relativa del criterio u-ésimo, calculada mediante una matriz de jerarquización de criterios.

4.4.1.5. Últimas publicaciones de funciones aditivas.

En (Chen y Sha 1999) y (Sha y Chen 2001), los autores plantean una formulación muy similar a la introducida por (Khare, Khare y Neema 1988), en la que se emplea una aproximación al problema de distribución en planta mediante una función objetivo aditiva ponderada, en la que la normalización de los objetivos se realiza con parámetros estadísticos. El problema se formula como un QAP sujeto a las restricciones clásicas del problema (ver 4.6 a 4.9), en el que m_{ijkl} es la función objetivo:

$$m_{ijkl} = \sum_{u=1}^m \alpha_u \cdot U_u \quad (4-48)$$

Donde: α_u Son los pesos del objetivo u-ésimo.

U_u Es el valor normalizado del objetivo u-ésimo.

Para el cálculo del valor normalizado de cada uno de los objetivos, se basan en que si la función de coste de la solución se aproxima a una distribución normal, la función de coste de cada uno de los m objetivos también se puede aproximar. Por tanto, podemos determinar las cotas superiores e inferiores, correspondientes a un nivel de confianza α , para cada objetivo u, como:

$$\begin{aligned} LCL_u &= M_u - r \cdot \sigma_u \\ UCL_u &= M_u + r \cdot \sigma_u \end{aligned} \quad (4-49)$$

Donde: M_u Es el valor medio de la distribución de coste de la solución.

σ_u Es la desviación típica de la distribución de coste.

R Es el nivel de confianza fijado por el diseñador.

Si el valor del objetivo u-ésimo es P_u , su valor normalizado será:

$$U_u = \frac{P_u - LCL_u}{UCL_u - LCL_u} = \frac{P_u - LCL_u}{2 \cdot r \cdot \sigma_u} \quad (4-50)$$

Los autores introducen un indicador global de la solución, al que llaman POS (Probabilidad de Superioridad), que mide la probabilidad de una solución (cuyo coste global sea LS) de ser mejor que las demás, y que se obtiene de la siguiente expresión:

$$POS = 1 - p\left(Z \leq \frac{LS - 0.5}{\sqrt{1/12 \cdot \sum_{u=1}^m \alpha_u}}\right) \quad (4-51)$$

Se construye la solución inicial mediante CORELAP y aplican una mejora mediante intercambio de actividades, quedándose con aquel intercambio que genere un mayor decremento del coste. Aplican la metodología a un ejemplo propio de 10 actividades, y comparan los resultados aplicando la normalización de (Harmonosky y Totho 1992), obteniendo mejores resultados con su metodología.

Una de las últimas publicaciones relativas al problema multiobjetivo de distribución en planta es la de (Singh, Singh 2009), en ella los autores realizan una aproximación al problema con una formulación QAP monocasilla, y teniendo en cuenta cuatro objetivos, dos cualitativos (índice de cercanía y movimientos peligrosos) y dos cuantitativos (MHC y MHT).

Emplean una función objetivo aditiva ponderada, con los valores de los objetivos normalizados y con pesos para cada uno de ellos, en concreto, para el caso de 4 objetivos, la función sería la siguiente:

$$m_{ijkl} = w_1 \cdot f_{ij} \cdot d_{kl} - w_2 \cdot cr_{ij} + w_3 \cdot mht_{ij} + w_4 \cdot hm_{ij} \quad (4-52)$$

donde w_u son los pesos de cada uno de los objetivos.

Los autores proponen una heurística de 3 fases para conseguir optimizar el problema QAP.

4.4.2. Modelos de agregación no aditivos.

Una segunda forma de realizar la agregación de los objetivos en una sola función es hacerlo mediante una función multiplicativa, en la que los distintos objetivos se multiplican (o dividen), sin necesidad de ponderación entre ellos.



Figura 4 - 12 - Agregación de objetivos

En estos casos, la función objetivo m_{ijkl} adopta la siguiente forma genérica para cada uno de los m objetivos:

$$m_{ijkl} = \prod_{u=1}^m f_{ijkl,u} \quad (4-53)$$

Donde: $f_{ijkl,u}$ Es el valor del objetivo u -ésimo.

En la bibliografía se encuentran, entre otras, estas referencias que empleen esta formulación para resolver el problema.

En (Fortenberry, Cox 1985) se propone un modelo no aditivo muy criticado posteriormente. La formulación de la función objetivo es la siguiente:

$$\text{Min } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n a_{ikl} b_{ikl} x_{ik} x_{jl} \quad (4-54)$$

siendo:

$$a_{kij} = f_{ij} d_{kl}$$

f_{ij} = coste derivado del flujo de materiales entre las actividades i y j .

d_{kl} = distancia rectilínea entre las casillas k y l .

b_{ikij} = TRA_{ij} (mediante transformación numérica).

Con este modelo, el valor relacional de las actividades muestra más influencia en el resultado final que en los modelos aditivos anteriores, puesto que no sólo se cuentan las actividades con frontera común. Además se incluye un valor numérico negativo en las relaciones de tipo X, con lo que se consigue la separación de actividades con relación de tipo X.

El inconveniente de este modelo es doble:

- Las actividades más penalizadas son aquéllas entre las que existe una relación de tipo X, sea cual sea el flujo de materiales entre las mismas.
- No permite que dos actividades entre las que no existe flujo influyan sobre el valor de la función objetivo, lo que impide que el valor relacional cualitativo decida sobre la adyacencia final entre actividades.

Hasta 13 años después no aparece el siguiente modelo multiplicativo, y es en (Islier 1998) donde se presenta una formulación multicriterio con agregación multiplicativa para el problema de distribución en planta y resuelve la optimización mediante el uso de algoritmos genéticos.

La formulación matricial propuesta, considera tres factores: un factor de carga (t), un factor de forma (s) y un factor de desviación (h), combinados en una función agregada multiplicativa que maximiza.

El modelo planteado por Islier se formula como:

$$\text{Max } \left(\frac{t}{s \cdot h} \right) \quad (4-54)$$

s.t.

$$\begin{aligned}
\sum_{k=1}^n a_{ijk} &\leq 1 && \forall i, j \\
\underline{A}_k &\leq \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^h a_{ijk} \leq \overline{A}_k && \forall k \\
\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^h \sum_{k=1}^n a_{ijk} &\leq a \cdot h
\end{aligned} \tag{4-55}$$

La primera restricción evita la superposición de actividades ($a_{ijk}=1$ si la actividad k está en la posición ij -ésima), la segunda controla que el área de una actividad esté entre los límites admisibles inferior y superior, por tanto se permite introducir actividades con holgura (en esta restricción a es el número de filas y h el número de columnas) y la tercera limita el número de celdas ocupadas a las disponibles en el recinto ($a \cdot h$).

(Wang et al. 2005), presentan una formulación multicriterio con agregación multiplicativa para el problema de distribución en planta y resuelve la optimización mediante el uso de algoritmos genéticos.

Esta formulación es una variación de la de (Islier 1998) y considera tres criterios cuantitativos, como son: factor de coste de mantenimiento (MFFC, similar al MHC), factor de forma de la configuración (SRF_{config}) y un factor de utilización del área total (AUF_{config}). Todos ellos son combinados en una función agregada multiplicativa (a la que llama "idoneidad") que posteriormente maximiza. La expresión de la función objetivo es la siguiente:

$$\text{Max } \frac{1}{TLC} = \frac{1}{MFFC} \cdot \frac{AUF_{config}}{SRF_{config}} \tag{4-56}$$

s.t.

$$\begin{aligned}
\sum_{k=1}^n a_{ijk} &\leq 1 && \forall \text{ posición } i, j \\
\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^h a_{ijk} &\leq A_k && \forall \text{ actividad } k \\
\sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^h \sum_{k=1}^n a_{ijk} &\leq a \cdot h
\end{aligned} \tag{4-57}$$

Donde: TLC Coste total de la distribución.

$a_{ijk}=1$ Si la posición i, j está ocupada por la actividad k (0 sino).

A_k Área requerida por la actividad k .

a Número de columnas del dominio.

h Número de filas del dominio.

4.4.3. Métodos basados en frontera de Pareto.

Siguiendo con la clasificación que propone (Montalvá Subirats et al. 2011), existe una aproximación completamente diferente a lo ya expuesto, que consiste en considerar el problema de distribución en planta multiobjetivo desde el punto de vista de un conjunto de soluciones eficientes, o soluciones de Pareto. En este caso no se busca una única solución como resultado óptimo al problema (ya sea local o absoluto) sino un conjunto de soluciones que son eficientes, es decir que bajo uno o más objetivos son mejores que el resto.

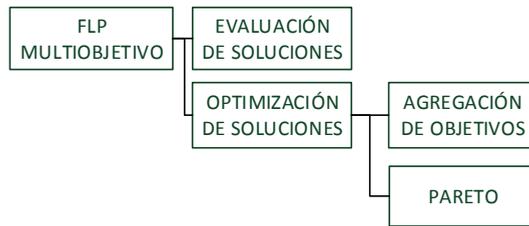


Figura 4 - 13 - Métodos basados en frontera de Pareto.

En este caso no tiene sentido hablar de una función objetivo, pues la optimización no se realiza atendiendo a un único valor resultante de la combinación de los objetivos, sino que en cada caso hay que ver si la solución entra a formar parte del conjunto de Pareto o no, para así aceptarlo.

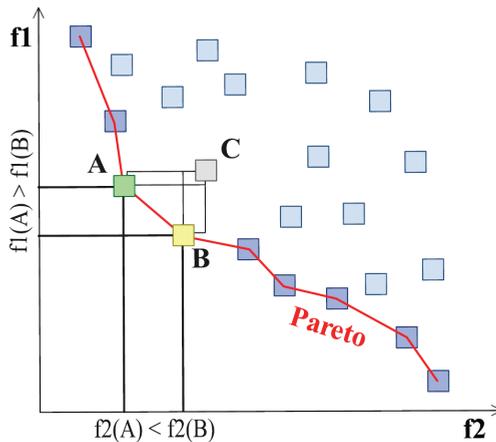


Figura 4 - 14 – Ejemplo de frente de Pareto (Ripon et al. 2011).

Algunas de las referencias mencionadas combinan la aproximación como frontera de Pareto con un proceso posterior de selección de alternativas, en todos los casos con ELECTRE (“elimination et choix traduisant la réalité”), para determinar qué solución del conjunto se toma como óptima.

La primera publicación que trató el problema desde un punto de vista multiobjetivo (Rosenblatt 1979) ya hablaba de un conjunto de soluciones eficientes, de algunas soluciones dominadas, aunque el tratamiento que se daba al proceso de optimización no respondía propiamente al planteamiento de Pareto, pero ya se hizo hincapié en el concepto de conjunto de soluciones eficientes.

Las distintas aproximaciones que existen, por parte de diversos autores, se exponen a continuación:

- La primera aproximación la hacen (Rosenblatt, Sinuany-Stern 1986), los cuales introducen el término de “*Discrete Efficient Frontier (DEF)*”, que es análogo a la frontera de Pareto. En esta publicación se plantea una regla de dominación tal que ésta: si se ordenan las soluciones que pertenecen a la DEF, según uno de los criterios (por ejemplo el MHC, al que llama C) en orden descendente ($C_i \leq C_{i+1}$), entonces para cualquier valor de α , la solución i es dominada por otras soluciones si:

$$\frac{R_i - R_{i-1}}{C_i - C_{i-1}} < \frac{R_{i+1} - R_i}{C_{i+1} - C_i} \quad (4-58)$$

Esta segunda regla de dominación elimina soluciones que nunca son óptimas (no existe ningún valor de α que haga que el valor de la función objetivo sea mínimo entre todas las soluciones). Esta regla hace que valores como el punto i mostrado en la figura queden excluidos de la DEF, aunque no sean puntos dominados por la primera regla.

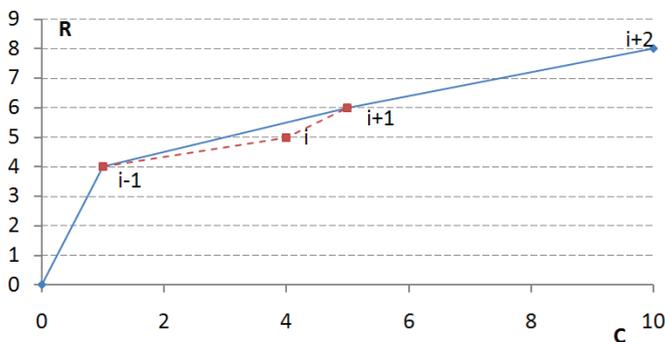


Figura 4 - 15 - Punto dominado con la 2ª regla de dominación de Rosenblatt.

Los autores proponen una expresión para determinar en qué rangos de los pesos α , es cada solución la dominante, para la solución i sería la siguiente.

$$\alpha_i = \frac{R_i - R_{i-1}}{R_i - R_{i-1} + C_i - C_{i-1}} \tag{4-59}$$

- (Malakooti, Tsurushima 1989) establecen la primera referencia del problema de FLP como un problema multiobjetivo en términos del conjunto eficiente de Pareto, aunque sin dar su nombre directamente. Las aportaciones son determinantes en dos aspectos: por un lado establece una clasificación de las metodologías con las que se aborda el problema FLP multiobjetivo (como ya se ha expuesto en anteriormente en este mismo capítulo), y en segundo lugar, porque es el primer autor que habla de un conjunto de soluciones eficientes (que conformaran la frontera de Pareto) con un planteamiento muy similar al actual.

El autor hace una crítica de los modelos basados en funciones de agregación aditivas, pues pueden aparecer algunos problemas que tienen que ver con los valores de los pesos, si estos son fijos, ya que únicamente se generarán soluciones que (en el caso de un problema bicriterio) estén en la recta: $z = w_1 \cdot f_1 + w_2 \cdot f_2$, no siendo posible generar soluciones que, pese a ser mejores no se encuentran en esa recta (la solución B es tan válida como las soluciones A,C y D).

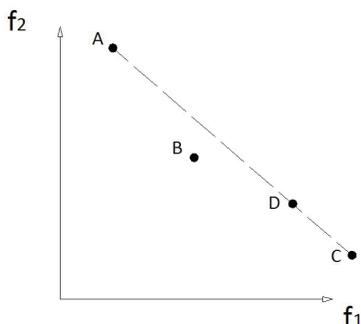


Figura 4 - 16 - Riesgo de no generación de soluciones válidas, de (Malakooti 1989).

El autor también clasifica la forma en la que se puede formular el problema multiobjetivo:

- Como un *QAP multiobjetivo*, con tantas funciones como objetivos tenga el problema (es lo que llamamos en este trabajo un enfoque Pareto del problema).

- Como un *QAP monobjetivo*, con una sola función objetivo en la que se agregan (ponderados y normalizados), todos los objetivos.

Como ya se comentó con anterioridad, el autor acuña el término configuración *localmente eficiente*, que es aquella solución que es eficiente respecto a todas sus configuraciones adyacentes (una configuración X_{n+1} es adyacente a una configuración X_n , si se obtiene intercambiando dos actividades, o como comentamos en el presente trabajo $n+1$ está en la vecindad de n).

Además propone una heurística que está muy cerca del planteamiento de frontera de Pareto, pues aplica su metodología al problema de 9 actividades (monocasilla) enunciado en (Malakooti 1987), de la siguiente forma: genera todas las soluciones del problema ($9!=362880$), de ellas extrae todas las soluciones eficientes frente a los 3 objetivos (MHC, tiempo de flujo de materiales y flexibilidad), que resultan ser 111 configuraciones “realmente eficientes”.

A continuación genera 5 combinaciones de pesos de cada uno de los 3 objetivos, y genera soluciones aleatorias con cada uno de ellos, para después plantear el problema en términos de eficiencia local. Genera las soluciones de la vecindad y va agregando soluciones al conjunto de soluciones eficientes. De esta manera procede con las 5 combinaciones de pesos y obtiene un conjunto de soluciones “localmente eficientes” de 102 configuraciones, de las que únicamente una de ellas es dominada por soluciones “realmente eficientes”.

El planteamiento de Malakooti es afrontar el problema por una búsqueda por entornos, y la aleatoriedad de los pesos permite explorar una amplia zona del espacio de soluciones.

- En el artículo (Raoot, Rakshit 1993b), los autores proponen una metodología multicriterio en la que emplean una técnica de lógica difusa basada en “diseño lingüístico”, mediante el que se genera un conjunto de alternativas eficientes, que después se seleccionan mediante una metodología ELECTRE.

Los objetivos que emplean son:

- Coste de transporte de materiales.
- Indicadores de cercanía: Facilidad del personal, Facilidad de supervisión y seguridad.

La técnica sitúa las actividades en un determinado orden y posteriormente evalúa la calidad de la alternativa mediante el valor normalizado de MTV (*Mean Truth Value*) que debe ser maximizado entre actividades, lo que da lugar a una matriz (*Truth Value Matrix*).

No emplea ninguna heurística específica de mejora, sino que propone el intercambio manual de dos actividades y la comparación de ambas, empleando el término de **Eficiencia de una solución**, empleando una técnica Pareto pa-

ra decidir si la solución es o no es eficiente respecto al resto, y por tanto entra a formar parte de la frontera de Pareto.

En una fase posterior del proceso, se determina qué solución del conjunto de las eficientes es la solución óptima mediante una técnica ELECTRE. La metodología propuesta se aplica a un ejemplo de 8 actividades de (Tompkins 1978), el relleno de las actividades se hace mediante una técnica continua tipo *Flexbay*.

- En (Tuzkaya et al. 2005) aparece por primera vez una aproximación al problema de distribución en planta mediante un algoritmo basado en MOSA (Optimización Multiobjetivo con *Simulated Annealing*).

Los autores plantean una técnica basada en el algoritmo UMOSA, que se describe en el capítulo 2 del presente trabajo y que acepta soluciones parcial o totalmente negativas con una probabilidad de transición baja, por lo que es capaz de salir de mínimos locales.

En concreto, esta técnica contempla tres situaciones diferentes, en las que se adoptan tres estrategias frente a la decisión de pasar a la solución generada. Las tres situaciones son diferentes en función de que supone pasar de la solución actual (X_n) a la generada (X_{n+1}):

- Situación 1: Mejora de todos los objetivos. Utiliza siempre la estrategia 1.
- Situación 2: Mejora de algún objetivo y el empeoramiento de otros. Puede decidir utilizar la estrategia 1, 2 o 3.
- Situación 3: Empeoramiento de todos los objetivos. Utiliza la estrategia 3.

Las tres estrategias a seguir son las siguientes:

- Estrategia 1: Aceptar la nueva solución (X_{n+1}) con una probabilidad $p=1$.
- Estrategia 2: La probabilidad de aceptar la nueva solución (X_{n+1}) se calcula con una “aproximación escalarizante de objetivos”.

En realidad lo que se propone en esta estrategia es calcular el valor de la solución actual y la propuesta mediante una función objetivo ponderada aditiva (a la que llama $S(Z, \lambda)$), calculando después el valor del incremento de esa función (Δs):

$$s(Z, \lambda) = \sum_{k=1}^m \lambda_k \cdot z_k \tag{4-60}$$

$$\sum_{k=1}^m \lambda_k = 1 \quad \text{con } \lambda_k > 0 \quad \forall k$$

Donde k es cada uno de los m objetivos y λ_k es el peso del objetivo k -ésimo, posteriormente, la probabilidad de transición a la nueva solución será:

$$p = \begin{cases} 1 & \text{si } \Delta s \leq 0 \\ e^{(-\Delta s/T_n)} & \text{si } \Delta s > 0 \end{cases} \quad (4-61)$$

donde: T_n es la temperatura en el escalón de temperatura n -ésimo.

- Estrategia 3: La probabilidad de aceptar la nueva solución (X_{n+1}) se calcula con una "aproximación escalarizante de la probabilidad".

En este caso para calcular la probabilidad de transición a una solución peor desde todos los objetivos, se debe determinar el valor del incremento en cada uno de los k criterios (Δz_k), para determinar después el valor de π_k de la siguiente expresión:

$$\pi_k = \begin{cases} e^{(-\Delta z_k/T_n)} & \text{si } \Delta z_k > 0 \\ 1 & \text{si } \Delta z_k \leq 0 \end{cases} \quad (4-62)$$

Una vez realizado para los m criterios, se agregan, empleando una de las dos expresiones siguientes:

$$p = \prod_{k=1}^m (\pi_k)^{\lambda_k} \quad (4-63)$$

$$p = \min(\pi_k)^{\lambda_k} \quad (4-64)$$

donde T_n es la temperatura en el escalón de temperatura n -ésimo.

Los objetivos empleados son el coste derivado del flujo de materiales (MHC) así como la adyacencia entre actividades. Toda esta formulación la aplica a un ejemplo propio de 10 actividades de área desigual, con un relleno continuo.

- En (Aiello et al. 2006) se encuentra una nueva aproximación problema de distribución en planta multiobjetivo de actividades con áreas desiguales, desde el punto de vista del óptimo de Pareto.

Los autores plantean el problema multiobjetivo con la finalidad de encontrar una frontera de Pareto y a partir de ella y mediante una técnica ELECTRE, determinar la solución óptima, tal y como hacían (Raoot, Rakshit 1993b).

Los objetivos que se plantean son los siguientes:

- *Cuantitativos*: MHC (flujo de materiales entre actividades) y un *Aspect Ratio* de cada una de las actividades.

- *Cualitativos*: Adyacencia (cuantificada a partir de un índice de cercanía, r_{ij}) y Distancia Requerida (cuantificada a través de un índice de distancia, s_{ij}).

Emplean un modelo geométrico continuo tipo *flexbay*, y como heurística de optimización emplea algoritmos genéticos (NSGA-II). Todo ello lo aplican a un ejemplo propio de 20 actividades sobre el que aplica la metodología.

- En su artículo (Ye, Zhou 2007) plantean una nueva heurística híbrida entre algoritmos genéticos y Tabú Search (GATS) para la optimización del problema, que se aborda en su vertiente de actividades de diferente tamaño y con pasillos.

Los objetivos que emplean los autores son el flujo de materiales (MHC) y el índice de cercanía de las actividades (CR), como en la mayor parte de las referencias anteriores.

La metodología se aplica sobre un ejemplo propio de 11 actividades de diferente área, con un recinto con pasillos y dimensiones fijos, aplicando también optimización multiobjetivo con *Annealing* (MOSA) y con *Tabú Search* (MOTS), generando 3 fronteras de Pareto con cada una de las técnicas de optimización.

- En (Sahin, Türkbey 2009) se hace una aproximación al problema de distribución en planta de procesos industriales basado en el conjunto eficiente de Pareto con una heurística de SA.

Los autores plantean el problema QAP monocasilla atendiendo a los dos objetivos clásicos, como son el coste de transporte de materiales (MHC) y el índice de cercanía de actividades (CR), que tal y como se ha comentado en toda la bibliografía descrita son un criterio cuantitativo (MHC) y otro cualitativo (CR).

Los autores formulan el problema con dos funciones objetivo independientes (lo que en (Malakooti, Tsurushima 1989) se denomina Problema I) de las que va obteniendo valores para después combinarlos en una función aditiva ponderada que utiliza en el proceso de optimización mediante SA. Cada uno de los dos objetivos se cuantifican por separado y luego se suman multiplicados por unos pesos w_1 y w_2 . Uno de los aspectos menos claros del artículo es cómo determinan los valores de esos pesos y como se formula esa función aditiva, pues los criterios son antagónicos, por tanto lo más probable es que el valor de E se obtenga:

$$E_{ij} = w_1 \cdot E_{\text{cost}} - w_2 \cdot E_{\text{closeness}} \quad (4-65)$$

El valor de la función objetivo aditiva ponderada E , se utiliza como referencia a la hora de determinar si se acepta una nueva solución, en el criterio de aceptación del *Simulated Annealing*. Se determina el valor de la distancia existente entre la solución actual y la mejor solución existente (o solución de referencia, que es aquella con un menor valor de la función objetivo E_c):

$$\Delta E = E_{ii} - E_c \quad (4-66)$$

Si $\Delta E \leq 0$ la solución es mejor que la solución de referencia, con lo cual entra en el conjunto de Pareto, y pasa a ser la nueva solución de referencia. Si $\Delta E > 0$, la solución no forma parte del conjunto de Pareto y se aceptará con una probabilidad de transición $p = e^{-\Delta E/T}$.

Los autores plantean una heurística similar a la establecida en el presente trabajo y que será discutida en apartados posteriores, la misma es aplicada a una serie de problemas QAP monocasilla de 6, 8, 12, 15, 20 y 30 actividades recogidos de (Fortenberry, Cox 1985, Suresh, Sahu 1993) y comparados con soluciones obtenidas en las referencias que se han ido comentando en el estado del arte de este trabajo. Obtienen las fronteras de Pareto de cada uno de los problemas, que están formadas por un número variable de puntos, algunos de ellos históricos y otros determinados por los autores.

- En (Ripon et al. 2011) se presenta un aproximación evolucionista mediante algoritmos genéticos para resolver el FLP con áreas desiguales, presentado un conjunto de Pareto de soluciones eficientes que optimizan varios objetivos simultáneamente, resultando sus experimentos en la obtención de soluciones eficientes respecto de varios objetivos y por tanto de aplicación directa en casos reales.

De todas las referencias bibliográficas citadas, la mayoría emplean el coste debido al flujo de materiales como uno de sus objetivos, acompañándolo en el mayor número de casos de un indicador de proximidad.

4.4.3.1. Frontera de Pareto en otras aplicaciones de algoritmos ACO.

Existen en la bibliografía varios planteamientos interesantes basados en la frontera de Pareto, que utilizan además algoritmos tipo ACO para obtener las soluciones. A continuación se hace un repaso de los mismos:

- En el trabajo (Lopez-Ibanez, Stutzle 2012) "Un análisis experimental de las elecciones de diseño de los algoritmos de optimización ACO de objetivo múltiple"

tiple”, los autores realizan lo siguiente: Ha habido algunas propuestas sobre cómo aplicar la optimización metaheurística basada en colonias de hormigas (ACO) a los problemas de optimización combinatorios de objetivo múltiple (MOCOPs). En su trabajo proponen una nueva formulación ACO de estos algoritmos de objetivo múltiple (MOACO), basada en añadir componentes específicos para lograr los múltiples objetivos a la metaheurística del algoritmo básico ACO. Son ejemplos de estos componentes específicos, por ejemplo, cómo usan la feromona y la información heurística para representar los objetivos múltiples, o cómo seleccionar las mejores soluciones para actualizar la información de la feromona, o cómo definen los pesos para agregar los distintos objetivos. Esta formulación revela gran cantidad de semejanzas que las que anteriormente se habían supuesto en el diseño y elecciones de la mayoría de los algoritmos de MOACO (Multi-Objective Ant Colony Optimization) existentes. La contribución principal de este artículo es un análisis experimental sobre las elecciones de diseño y cómo afectan a la calidad y la forma de la frontera de Pareto que se generaron en cada algoritmo MOACO. Este estudio provee las pautas generales de comprender cómo los algoritmos MOACO trabajan, y cómo mejorar su diseño.

- En el trabajo (Xu et al. 2013), que lleva por título “Un problema de planificación biobjetivo sobre grupos de máquinas vía un sistema de colonias de hormigas basado en Pareto”, se investigan la eficiencia y tiempos de resolución de lotes de problemas biobjetivo sobre un conjunto idéntico de computadoras conectadas en paralelo. Cada máquina puede procesar simultáneamente tantos trabajos en paralelo como permita la capacidad de la máquina. Cada trabajo se define por su tiempo de procesamiento, de preparación, la fecha límite de resolución y su tamaño. El tiempo de procesamiento y el tiempo de finalización de un grupo se representa por el mayor tiempo de proceso y el tiempo de lanzamiento de todos los trabajos del grupo. Para este problema se desarrolla un algoritmo de planificación basado en un problema multiobjetivo de optimización (MOACO) de colonias de hormigas llamado “Pareto Ant Colony System” (PACS). Sobre la base de las características constructivas de PACS, se utilizó un nuevo mecanismo de construcción de la solución con el propósito de que el algoritmo propuesto tenía la habilidad de explorar y explotar mejor el espacio de soluciones. Además, correspondiéndose con las necesidades del nuevo mecanismo de construcción, se utilizó una estrategia de listas de candidatos y una integración con la información heurística, con el fin de reducir el espacio de búsqueda y dirigir la búsqueda hacia las regiones más prometedoras. Los resultados de experimento demostraron que PACS mostró una calidad superior comparado con los otros algoritmos de referencia, especialmente para los ejemplos de mayor tamaño.
- Otra de las recientes referencias es (Dubois-Lacoste et al. 2015), trabajo titulado “Búsqueda local de Pareto en cualquier momento”, donde se expone que la técnica de búsqueda local de Pareto (PLS) es un método de búsqueda

local efectivo y sencillo para resolver problemas de optimización combinatorios multiobjetivo. Es también un componente crucial de muchos algoritmos existentes aplicados a tales problemas. Sin embargo, PLS no es demasiado efectivo cuando no se aplica antes de la terminación del algoritmo. En otras palabras, PLS puede tener mal comportamiento dependiendo del momento de aplicación. En el trabajo, se estudia el efecto de varios parámetros en algoritmos PLS en función de su momento de aplicación. Se muestra que cualquier algoritmo PLS puede mejorarse utilizando componentes algorítmicos alternativos. También se propone el método Dynagrid, consistente en una discretización dinámica del espacio de soluciones que ayuda a PLS a converger más rápido a una buena aproximación de la frontera de Pareto (que todavía puede ser mejorado si hay más tiempo disponible para la resolución). Sus resultados demuestran que las nuevas variantes de PLS no sólo mejoran significativamente el comportamiento del PLS original, sino que además puede obtener mejores resultados para tiempos de cálculo mayores.

4.4.3.2. Métodos para elegir una solución eficiente de entre las obtenidas como frontera de Pareto.

Revisando la bibliografía también existen métodos para, una vez finalizado el proceso iterativo y creado el conjunto eficiente de soluciones de Pareto, seleccionar sólo una de ellas como aquella que mejor solución de compromiso supone para todos los criterios. Para ello se usan métricas de distancia n -dimensionales (donde n es el número de criterios) de modo que se escoge aquella solución cuya distancia al punto utopía de Pareto respecto de todos los criterios es la mínima (integrada como una distancia euclídea).

Por tanto, en esencia, bastará con calcular el valor de la utopía de Pareto para cada criterio, y una vez fijado hallar la distancia del valor real para ese criterio de la solución, y calcular la distancia existente como distancia euclídea; si se hace esto para todos los criterios, la solución del frente cuya distancia sea menor a dichos valores utópicos de Pareto será la solución más eficiente de entre todas las obtenidas.

Dicho procedimiento está inspirado en el trabajo (Messac et al. 2003), cuyo funcionamiento se expone a continuación:

- En primer lugar hay que determinar los mínimos alcanzados por cada criterio de diseño y definir el punto utopía de Pareto. En las figuras se ilustra el caso bicriterio pero no hay pérdida de generalidad en su aplicación al caso de n criterios.

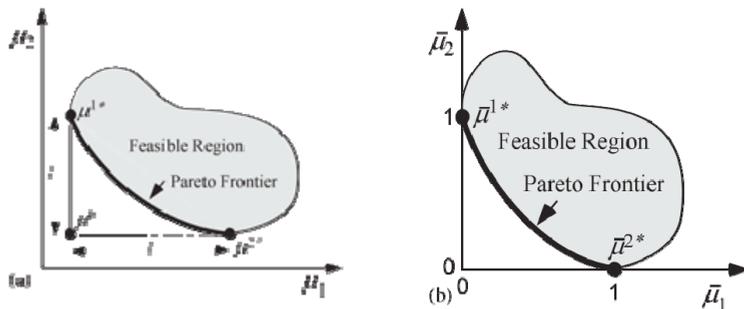


Figura 4 - 17 – Métrica de diseño para el caso biobjetivo. (a) Métrica general de diseño, (b) Métrica normalizada.

- A continuación se normalizan los valores, de modo que se tienen los extremos con valor la unidad.
- Después se busca el punto (de entre los encontrados en la frontera de Pareto) que se encuentre más cercano a la recta que une dichos valores normalizados, utilizando una métrica de distancia (por ejemplo, euclídea).

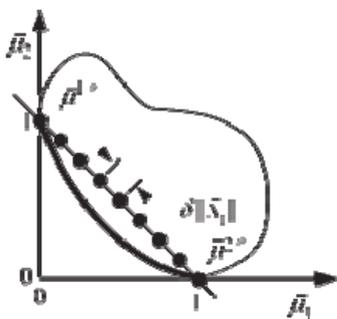


Figura 4 - 18 – Conjunto de puntos bien distribuidos sobre la línea utópica para un problema biobjetivo.

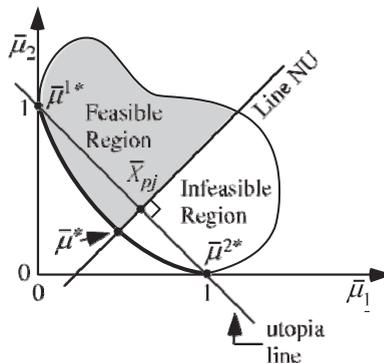


Figura 4 - 19 – Representación gráfica del método ‘normal constraint’ para problemas biobjetivo.

También podría implementarse el método descrito en otra referencia (Messac, Mattson 2002) para generar una conjunto de puntos de Pareto bien distribuidos a lo largo de la frontera usando programación física para obtener fronteras lo más uniformes posibles en

todas sus zonas, pero finalmente no se han implementado por ser rigurosos con la aplicación de los métodos ACO que se expondrán en el capítulo 6. Queda como tarea pendiente para modificar los algoritmos implementados y comparar su comportamiento con los originales propuestos en este trabajo.

Capítulo 05

Tratamiento del espacio. Métricas de distancia. Soporte de colocación ALDEP. Control geométrico de la solución.

5.1. Introducción

Uno de los problemas fundamentales que suele darse en la obtención de soluciones eficientes, es que la optimización del problema respecto a algunos puntos de vista suele tender a degenerar geoméricamente las soluciones. El caso típico sucede con el coste asociado a los flujos con métrica de distancia Manhattan o euclídea, donde se mide la distancia entre centros de gravedad, y se tiende a degenerar la forma de las actividades de modo que se tiende a distribuciones tipo sandwich, pues es con esta configuración donde la distancia en una dirección es menor, tendiendo la otra hasta el infinito si el modelo es continuo y no se imponen restricciones. De ahí la importancia de adoptar medidas de control geométrico para obtener soluciones factibles con una calidad geométrica aceptable que permita ubicar de la forma correcta la maquinaria, teniéndose en cada recinto correspondiente a cada proceso una forma adecuada para aquellos equipos que ha de albergar, tanto en relación de aspecto como en compacidad.

De este modo, en ocasiones, se obtienen soluciones óptimas respecto del aspecto monocriterio de minimizar el flujo de materiales, a costa de tener conforme se minimiza el flujo un aspecto geométrico de peor calidad.

D	D	D	D	D	D	D	D
D	C	C	C	C	C	C	D
D	C	B	B	B	B	C	D
D	C	B	A	A	B	C	D
D	C	B	A	A	B	C	D
D	C	B	B	B	B	C	D
D	C	C	C	C	C	C	D
D	D	D	D	D	D	D	D

D	D	D	D	D	D
C	C	C	C	C	C
B	B	B	B	B	B
A	A	A	A	A	A

a) Disposición "diana"

b) Disposición "sandwich"

Figura 5 - 1 – Configuraciones no deseables

Finalmente, la solución al problema será incluir un criterio geométrico a minimizar, como otro aspecto más al optimizar la solución, y cuyo tratamiento e integración con el resto dependerá de la técnica de decisión multicriterio de entre las expuestas en el capítulo anterior, o bien de definir las correspondientes fronteras de Pareto, y así elegir alguna de las soluciones eficientes de Pareto, que sea eficiente respecto de todos los criterios a optimizar; también puede utilizarse alguna técnica multicriterio de las que se han visto en el capítulo correspondiente para la elección de alguna solución eficiente del frente de Pareto.

Tal y como indican (Montalva et al. 2012), los aspectos geométricos básicos del FLP son el tamaño y forma de las actividades, el modelo de representación del espacio y su métrica y la forma y número de pisos de la planta industrial o del dominio de ubicación, el modo en que son tratados determina la configuración espacial de las soluciones. Estos aspectos, de principal importancia en el proyecto y construcción de complejos industriales no son contemplados por una formulación QAP y se abordan de manera explícita en este trabajo.

Existen varios trabajos realizados en este Departamento de Ingeniería de la Construcción y Proyectos de Ingeniería Civil de la UPV que tratan ya desde hace tiempo el problema del soporte espacial en el FLP, como por ejemplo los realizados por (Santamarina 1995, Contero Gonzalez 1995, Gonzalez 2005). Más recientemente, y también en el entorno de la UPV se han realizado trabajos específicos sobre el tema del que trata este capítulo, es decir, aportaciones al control geométrico con tratamiento multiobjetivo en el FLP, como los trabajos realizados por (Diego-Más 2006, Montalvá Subirats et al. 2011). En ellos, entre otras referencias, se inspira la base de este capítulo, actualizando el estado del arte a la fecha actual.

5.2. Tipos de modelización geométrica.

El problema de síntesis geométrica de la distribución en planta consiste en dado un conjunto de m actividades relacionadas, con geometría libres o fijas, de áreas a_i , y dado un dominio, de geometría fija o libre, y con un área A , con capacidad geométrica ($A \geq \sum a_i$), en ubicar dentro de él el conjunto de m actividades, sin superposición (problema 2D), de modo que se maximice cierta función Objetivo.

Los diferentes tratamientos geométricos que existen en la bibliografía para su aplicación al problema del FLP objeto de esta Tesis Doctoral pueden clasificarse en:

- Discretos con o sin directriz de colocación (Seehof, Evans 1967),
- curvas de Hilbert (Bozer et al. 1994) o Space Filling Curves -SFC- (Moon et al. 2001, Hamilton, Rau-Chaplin 2008, Yang, Tan 2015)
- continuos (absmodel) (Heragu, Kusiak 1991),
- “multi-bay” (Meller 1997),
- “cut-trees” (Tam, Li 1992), grafos (Seppänen, Moore 1970),
- esqueletos (Montreuil, Ratliff 1989),
- “scatter diagrams” (Drezner, Barak 1986)
- “gridding” (Ishibuchi, Murata 1996) entre otros.

En la reciente Tesis Doctoral realizada por (Montalvá Subirats et al. 2011) que tuvo por objeto el análisis del aspecto geométrico en el problema del FLP, se califica este problema de definición del modelo espacial como una de las primeras decisiones fundamentales a tomar a la hora de abordar el problema de distribución en planta de establecimientos industriales es el relativo al modelo de representación espacial que se va a emplear. Indica que en la bibliografía se pueden encontrar dos líneas claramente diferenciadas en este punto del problema:

- La primera línea de trabajo emplea un modelo espacial **topológico**, basado en teoría de grafos, tanto para el planteamiento como para la resolución del problema. Este enfoque es muy empleado en aquellas referencias en las que se utilizan objetivos cualitativos.
- La segunda emplea un modelo espacial **geométrico** a la hora de colocar las actividades sobre el plano, o sobre el espacio. En esta línea es en la que se encuentran la mayor parte de los trabajos, por ello se dedicará un mayor nivel de detalle en este apartado.

En la figura se muestra una clasificación, de entre los encontrados en la bibliografía consultada, de los distintos modelos de conformación espacial empleados en las distin-

tas variantes del problema de implantación industrial. Si se opta por los modelos geométricos se abre un amplio abanico de opciones en función del espacio empleado, ya sea unidimensional, en cuyo caso el problema será un SRLP (*Single Row Layout Problem*) como en (Keller, Buscher 2015), bidimensional, al que se denomina FLP (*Facility Layout Problem*) como en (Drira et al. 2007) y el caso de más de dos dimensiones. La tendencia actual es el empleo de dos dimensiones y media, integrando varias plantas iguales con conexiones entre ellas (como montacargas, escaleras, etc.), el MFLP (*Multi Facility Layout Problem*) o bien una formulación que emplee plenamente las 3 dimensiones. En cada uno de los modelos geométricos a su vez también se distingue el planteamiento espacial continuo o discreto, pues la formulación del problema es distinta.

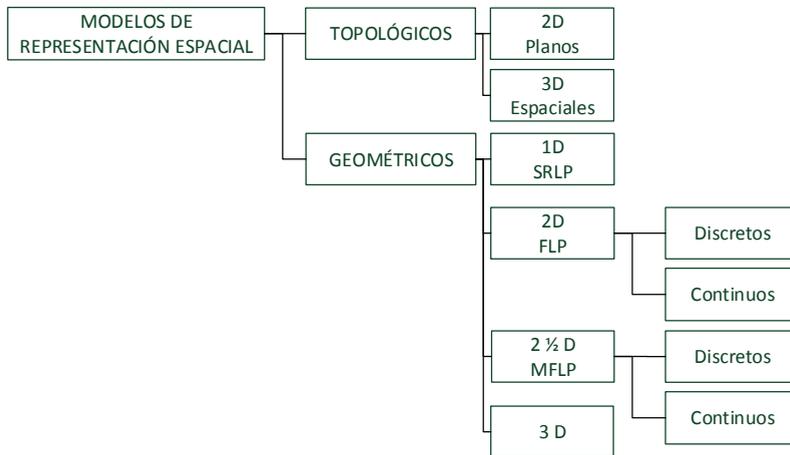


Figura 5 - 2 - Clasificación de los modelos de representación espacial. (Montalvá Subirats et al. 2011)

Figura 5.2.1

A fin de clarificar la exposición, se explicarán los siguientes modelos por este orden:

- Modelo discreto
- Modelo continuo
- Modelo de árboles de corte
- Modelo semigeométrico
- Modelo topológico

5.3. Modelo discreto.

La representación geométrica, con un modelo discreto, parte de un dominio D de geometría conocida y área A , $D(A)$, donde se deben ubicar sin superposición m actividades industriales o elementos del sistema de producción de área a_i y geometría libre $D_i(a_i)$.

Por geometría libre, se entiende que no existe ninguna forma, ni coeficiente de aspecto q definido a priori para cualquiera de las actividades que restrinja su forma geométrica.

El dominio D se discretiza en una retícula de n subdominios elementales o celdas de área a ($n \cdot a = A$). De esta forma se produce la siguiente transformación:

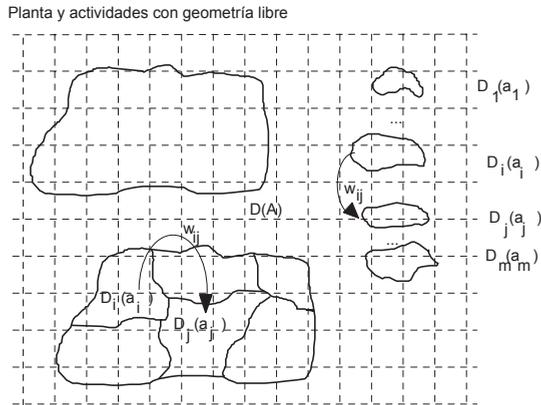


Figura 5 - 3 – Modelo discreto.

Como consecuencia de la discretización, el dominio D se transforma en un conjunto de n ubicaciones, a las que se debe asignar las m actividades.

$$D(A) \longrightarrow D(n, a) \quad (5-1)$$

$$D_i(A_i) \longrightarrow D_i(n_i, a) / A_i = n_i \cdot a$$

Cada actividad i tiene entonces asociado un conjunto S_i de n_i celdas elementales sobre el que se distribuye denominado conjunto de asignación.

El tamaño del espacio de configuraciones posibles del sistema discreto es:

$$N = C_n^{n_1} \cdot \prod_{i=2}^m C_{n - \sum_{k=1}^{i-1} n_k}^{n_i} = \frac{n!}{\prod_{i=1}^m n_i!} \quad (5-2)$$

Donde C_a^b son combinaciones de a elementos tomados de b en b , m es el número de actividades, n el número de celdas de la discretización, y n_k el número de celdas de la actividad k .

La métrica utilizada para medir en el dominio D es la métrica Manhattan o métrica en norma subuno, de este modo la distancia entre dos celdas k, ℓ , con coordenadas respectivas $(x_k, y_k), (x_\ell, y_\ell)$ puede expresarse como:

$$d_{k\ell} = |x_k - x_\ell| + |y_k - y_\ell| \tag{5-3}$$

Además como consecuencia de la discretización y de la métrica utilizada se puede establecer una matriz $d(d_{k\ell})$ que recoge las distancias existentes entre las diferente celdas en las que ha sido discretizado el dominio D y que representa la geometría del mismo.

Se define una variable binaria de asignación x_{ik} que adopta el valor de 1 cuando la actividad i ocupa la celda k y 0 en caso contrario. De este modo la configuración del sistema, la distribución en planta, puede expresarse a través de la matriz de asignación $x(x_{ik})$.

A partir de la anterior definición el conjunto de asignación de una actividad i (conjunto de celdas que ocupa la actividad i) puede expresarse como:

$$S_i = \{k / x_{ik} = 1 \} \tag{5-4}$$

Análogamente y basándose en la variable de asignación y a la métrica definida es posible expresar la distancia entre dos actividades i, j (d_{ij}) para una configuración dada del sistema $x(x_{ik})$ del siguiente modo:

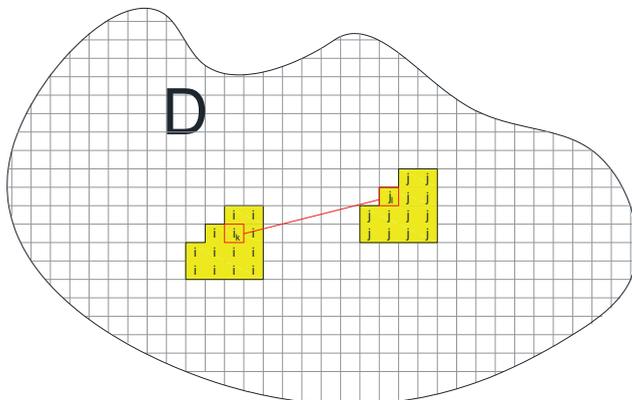


Figura 5 - 4 – Evaluación distancia entre casillas modelo discreto

se define el valor d_{kj} (la distancia de una celda "k" a la actividad "j") utilizando la expresión:

$$d_{kj} = \frac{1}{n_j} \sum_{i \in S_j} d_{ki} = \frac{1}{n_j} \sum_{l=1}^n d_{kl} x_{jl} \quad (5-5)$$

análogamente se definirá la distancia de la actividad "i" a la actividad "j" para una configuración dada $x(x_{ik})$ como:

$$d_{ij} = \frac{1}{n_i} \sum_{k \in S_i} d_{kj} = \frac{1}{n_i} \sum_{k=1}^n d_{kj} x_{ik} = \frac{1}{n_i n_j} \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n d_{kl} x_{jl} x_{ik} \quad (5-6)$$

Las condiciones de ocupación y la de no superposición pueden expresarse como:

$$\begin{aligned} \sum_{k=1}^n x_{ik} &= n_i, \quad \forall i, \quad i=1, \dots, m \\ \sum_{k=1}^m x_{ik} &= 1, \quad \forall i, \quad i=1, \dots, n \end{aligned} \quad (5-7)$$

Y reformulando el problema de la siguiente manera, la expresión del coste relacional en C en función de las variables de asignación es:

$$C = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n C_{ikjl} \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (5-8)$$

$$\text{donde} \quad C_{ikjl} = \frac{w_{ij}}{n_i \cdot n_j} \cdot d_{kl}$$

Con lo que el planteamiento del problema consiste en encontrar aquella configuración del sistema definido por la matriz de asignación x que minimice el coste relacional sin superposición, quedando el problema enunciado como:

$$\text{Min } C = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n C_{ikjl} \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (5-9)$$

con las siguientes restricciones:

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^m a_i &\leq A \\ \sum_{k=1}^n x_{ik} &= n_i \quad \forall i, \quad i=1 \dots m \end{aligned} \quad (5-10)$$

condición que viene impuesta por las necesidades espaciales de cada actividad. De este modo el problema de distribución en planta puede expresarse como:

MIN $G(x_{ik})$

RESTRICCIONES:

$$\sum_{k=1}^n x_{ik} = n_i \quad \forall i, \quad i = 1..m \quad (5-11)$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ik} = 1 \quad \forall k, \quad k = 1..n$$

$$x_{ik} = 0 \text{ ó } 1 \quad (x_{ik} = x_{ik}^2)$$

5.4. El modelo continuo.

Uno de los modelos de representación que se podrían denominar de tipo continuo es el propuesto en (Heragu, Kusiak 1991, Tam, Li 1991, Heragu, Kusiak 1992) en el que una actividad i , tiene a priori asignada una forma rectangular y se caracteriza por:

- sus dimensiones largo (ℓ_i) y alto (b_i) y
- su ubicación dada por la posición de su centro de gravedad de coordenadas (x_i, y_i) .

Además, en el modelo se establecen holguras de valor $d_{min,ij}$ que corresponden a la separación mínima que debe existir entre el contorno de las actividades i y j .

En la figura a continuación se representa gráficamente un esquema de este modelo.

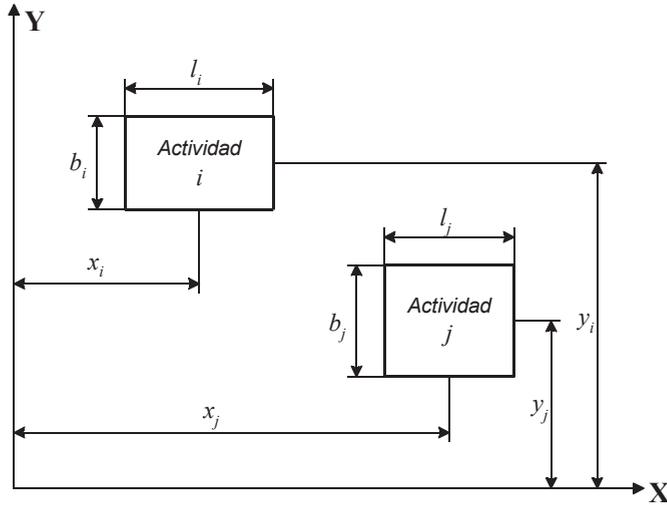


Figura 5 - 5 – Modelo continuo.

Este modelo, al igual que el discreto, utiliza la distancia Manhattan para medir la distancia entre la actividad “ i ” y la “ j ” teniendo por expresión:

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (5-12)$$

La condición de no-superposición o solapamiento se expresa teniendo en cuenta las holguras como:

$$\begin{aligned} |x_i - x_j| &\geq \frac{1}{2}(\ell_i + \ell_j) + d_{\min_{ij}}, & i = 1, \dots, n-1 & \quad j = i+1, \dots, n \\ |y_i - y_j| &\geq \frac{1}{2}(b_i + b_j) + d_{\min_{ij}}, & i = 1, \dots, n-1 & \quad j = i+1, \dots, n \end{aligned} \quad (5-13)$$

Las restricciones geométricas de inclusión en un dominio $V \times H$ pueden expresarse como:

$$\begin{aligned} x_i + \frac{\ell_i}{2} &\leq H & i = 1, \dots, n \\ x_i - \frac{\ell_i}{2} &\geq 0 & i = 1, \dots, n \\ y_i + \frac{b_i}{2} &\leq V & i = 1, \dots, n \\ y_i - \frac{b_i}{2} &\geq 0 & i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (5-14)$$

Otro tipo de restricciones que se pueden incluir, contemplando el caso en que las actividades no sean rígidas, y sólo se conozca a priori el área a_i de cada una de ellas y su longitud mínima L_{min} .

Entonces se deberían añadir las siguientes ecuaciones a la lista de restricciones geométricas:

$$\begin{aligned} \ell_i &\geq L \min_i & i = 1, \dots, n \\ b_i &= \frac{a_i}{\ell_i} & i = 1, \dots, n \end{aligned} \quad (5-15)$$

El coeficiente de aspecto q_i , es la relación ancho/alto, que se define como:

$$q_i = \frac{\text{anchura}_{\text{actividad } i}}{\text{altura}_{\text{actividad } i}} = \frac{\ell_i}{b_i} = \frac{a_i}{b_i^2} \quad (5-16)$$

- 1) puede estar acotado en un determinado valor para cada actividad de tal forma que se puede establecer la siguiente desigualdad para cada una de ellas:

$$q_{i \min} \leq q_i \leq q_{i \max} \quad (5-17)$$

- 2) En el caso de que la actividad sea del tipo "rígido", es decir, que no esté permitido un cambio en su coeficiente de aspecto, entonces

$$q_{i, \min} = q_{i, \max} \quad (5-18)$$

- 3) Si la actividad es de orientación libre, entonces deberá verificar además la condición:

$$\frac{1}{q_{i \max}} \leq \frac{1}{q_i} \leq \frac{1}{q_{i \min}} \quad (5-19)$$

La geometría final obtenida, viene dada como consecuencia de aplicar un algoritmo de optimización, que toma como función de coste, una del tipo cuantitativo, cualitativo o multicriterio, como las vistas en capítulos anteriores que satisfaga las restricciones geométricas.

De este modo el problema de distribución en planta puede expresarse como:

MIN $G(x_i, y_i)$

RESTRICCIONES:

$$|x_i - x_j| \geq \frac{1}{2}(\ell_i + \ell_j) + d_{\min_{ij}}, \quad i=1, \dots, n-1 \quad j=i+1, \dots, n \quad (5-20)$$

$$|y_i - y_j| \geq \frac{1}{2}(b_i + b_j) + d_{\min_{ij}}, \quad i=1, \dots, n-1 \quad j=i+1, \dots, n$$

$$x_i + \frac{\ell_i}{2} \leq H \quad i=1, \dots, n$$

$$x_i - \frac{\ell_i}{2} \geq 0 \quad i=1, \dots, n$$

$$y_i + \frac{b_i}{2} \leq V \quad i=1, \dots, n$$

$$y_i - \frac{b_i}{2} \geq 0 \quad i=1, \dots, n$$

$$\ell_i \geq L \min_i \quad i=1, \dots, n$$

$$b_i = \frac{a_i}{\ell_i} \quad i=1, \dots, n$$

$$q_{i \min} \leq q_i \leq q_{i \max}$$

$$\frac{1}{q_{i \max}} \leq \frac{1}{q_i} \leq \frac{1}{q_{i \min}}$$

5.5. El modelo de los árboles de corte.

La representación de la distribución mediante árboles de corte, tiene sus inicios a principio de los años 80 como se recoge en las referencias (Wong, Liu 1986, Tam, Li 1992).

Mediante esta técnica, la distribución se genera a base de dividir recursivamente el dominio de partida $D(A)$ mediante funciones de corte binarias (Santamarina 1995).

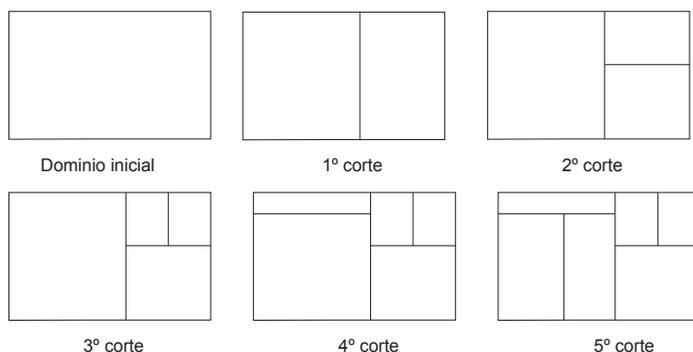


Figura 5 - 6 – Modelo de árbol de cortes (slicing tree)

Una función de corte binaria se compone de un dominio sobre el que se aplica, un operador de corte binario \otimes y un par de actividades (i,j) de áreas (a_i, a_j) (operandos) a ubicar en el dominio D' de área A' con la condición de que $A' = a_i + a_j$.

$$F(\otimes, \boxed{D'}, \boxed{a_i}, \boxed{a_j}) = \boxed{\begin{matrix} D' \\ a_i / a_j \end{matrix}}$$

Figura 5 - 7 – Operadores de corte

La naturaleza de los operadores de corte (\otimes) puede ser cualquiera caracterizándose por direcciones y orientaciones.

Una propiedad exigible a los operadores es la de no producir roturas o disgregaciones de las actividades. Lo habitual es utilizar dos direcciones perpendiculares (cortes verticales y horizontales, respecto a algún sistema de referencia previamente definido) para dividir el dominio de partida, que a priori puede tener cualquier geometría.

Tabla 5 - 1 – Operadores de corte y su codificación.

⊗		ORIENTACIÓN		
		OPERADORES LINEALES ORTOGONALES	HORIZONTAL VERTICAL	ARRIBA (a) IZQUIERDA (i)

En la siguiente figura se representa el efecto y la notación de los diferentes operadores antes expuestos $\otimes \in \{d,i,a,b\}$ cuando se aplican a un par de actividades (1,2) de áreas a_1 y a_2 sobre un dominio concreto.

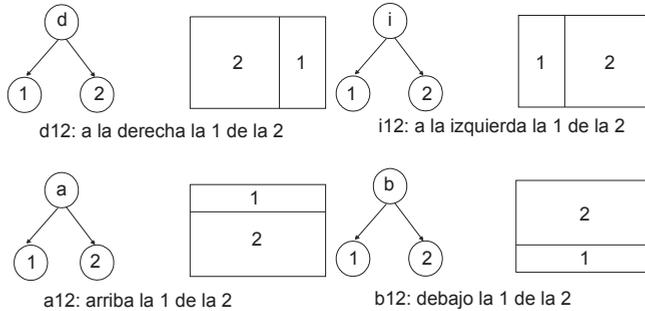
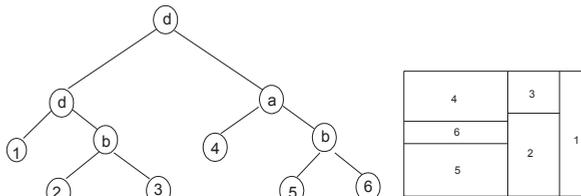


Figura 5 - 8 – Operadores de corte y su representación

La función de corte también se puede aplicar sobre dos conjuntos de actividades y un dominio D con capacidad geométrica estricta para contenerlas.

Las funciones de corte se concatenan en una estructura de árbol binario en lo que viene en llamarse árbol de corte permitiendo la representación esquemática y unívoca de una configuración de la distribución en planta. Así subdividiendo sucesivamente los conjuntos de actividades mediante operadores de corte se genera (construye) la distribución.

Un árbol de corte se puede representar mediante una cadena de caracteres como sigue $d(d(1,b(2,3)), a(4,b(5,6))) = dd1b23a4b56$ (Santamarina 1995)



Representación del árbol y la solución que contiene en forma de cadena

dd1b23a4b56

Figura 5 - 9 – Codificación de una solución mediante árbol de cortes.

Una cota superior del tamaño del espacio de configuraciones que puede representar un modelo geométrico basado en árboles de corte puede expresarse como:

$$N = p^{m-1} \prod_{i=0}^{m-2} C_{n-i}^2 = \left(\frac{p}{2}\right)^{m-1} m!(m-1)! \tag{5-21}$$

donde p es la cardinalidad del conjunto de operadores, m el número de actividades y son las combinaciones de a elementos tomados de b en b .

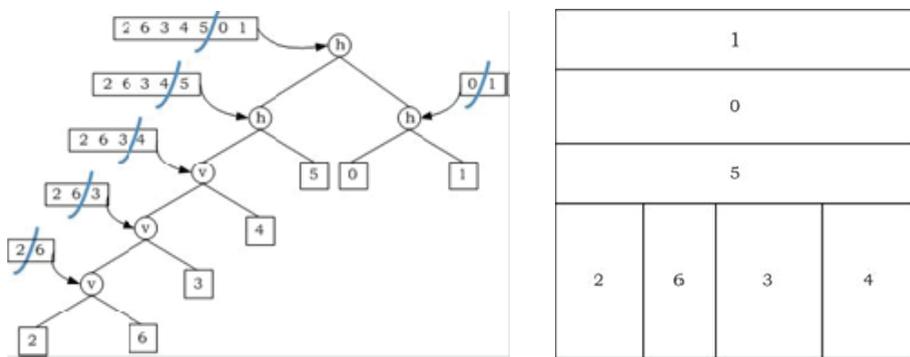


Figura 5 - 10 – Representación de árbol de cortes y Layout ((Ripon et al. 2011))

En este punto el problema consiste en encontrar: la estructura de árbol y el conjunto de operadores que minimice una determinada función objetivo cumpliendo un conjunto de restricciones.

Habitualmente el problema se resuelve en dos etapas, una la búsqueda del árbol óptimo y otra, para un árbol dado es decir fijada una estructura, el conjunto de operadores. Para utilizar este tipo de técnicas es necesario, como paso previo al proceso divisivo del dominio, agrupar las actividades en función de sus afinidades, determinando así qué actividades deben quedar en cada uno de los subdominios en que se divide la planta.

Existen numerosas técnicas para determinar la forma de agrupar las actividades en clases homogéneas. Las técnicas de agrupamiento, también conocidas por el término anglosajón "clustering" del análisis multivariante fueron desarrolladas a tal fin. Dentro del análisis multivariante, los métodos de análisis "clúster" pretenden clasificar un conjunto heterogéneo de elementos (individuos o variables) en grupos que reflejen las relaciones existentes entre los mismos.

A diferencia de otras áreas del análisis multivariante, el análisis "cluster" ha sido desarrollado principalmente por usuarios aplicados que buscaban soluciones a problemas concretos y no por estadísticos teóricos. En consecuencia, es evidente la falta de una teoría general de referencia que englobe las muy diversas técnicas existentes en la bibliografía. No obstante, las técnicas de "clustering" no representan la única vía para conseguir el agrupamiento de las actividades. Así las técnicas basadas en teoría de grafos también buscan, en sus primeras fases, la organización o agrupación de las actividades en función de sus afinidades.

Tratan de ordenar topológicamente las actividades, de forma que queden adyacentes aquellas actividades entre las que existe mayor intensidad relacional (mayor afinidad), lo que se conoce, en teoría de grafos, como el grafo planar ponderado maximal, (Montreuil, Ratliff 1989, Seppänen, Moore 1970), entre otros.

5.6. El modelo semigeométrico.

El modelo semigeométrico, obedece al problema equidimensional de distribución en planta y se caracteriza por considerar que todas las actividades tienen la misma área, es decir no se considera el área.

Aunque este planteamiento no se corresponde con el FLP que es el que realmente se corresponde con el problema industrial, es éste el modelo más ampliamente utilizado y sobre el se han desarrollado la mayoría de los algoritmos existentes tanto exactos o heurísticos.

El objetivo del modelo no es otro que encontrar la estructura topológica del sistema para en una fase posterior pasar a la construcción geométrica. Se pretende obtener el diagrama relacional de actividades (*DRA*) como un grafo planar ponderado maximal.

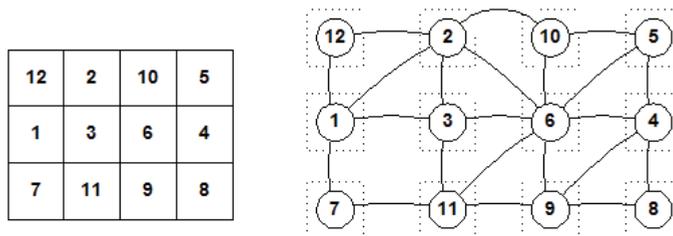


Figura 5 - 11 – Modelo semigeométrico.

El tamaño del espacio de configuraciones posibles es este caso $N=m!$

La formulación del problema es similar a la del problema discreto de la siguiente manera:

MIN $G(x_{ik})$

RESTRICCIONES:

$$\sum_{k=1}^n x_{ik} = n_i = 1 \quad \forall i, \quad i = 1..m$$

$$\sum_{i=1}^m x_{ik} = 1 \quad \forall k, \quad k = 1..n$$

$$x_{ik} = 0 \text{ ó } 1 \quad (x_{ik} = x_{ik}^2)$$
(5-22)

5.7. El modelo topológico.

El modelo topológico persigue construir un diagrama relacional de actividades y/o recorridos de modo que no se produzcan cruzamientos (principio de la circulación) y sean adyacentes las actividades con máxima relación o estén separadas las incompatibles (principio de la mínima distancia, principio de la seguridad y confort, principio de integración). Es un modelo que no contempla la geometría de las actividades y lo que persigue es encontrar la estructura topológica del sistema.

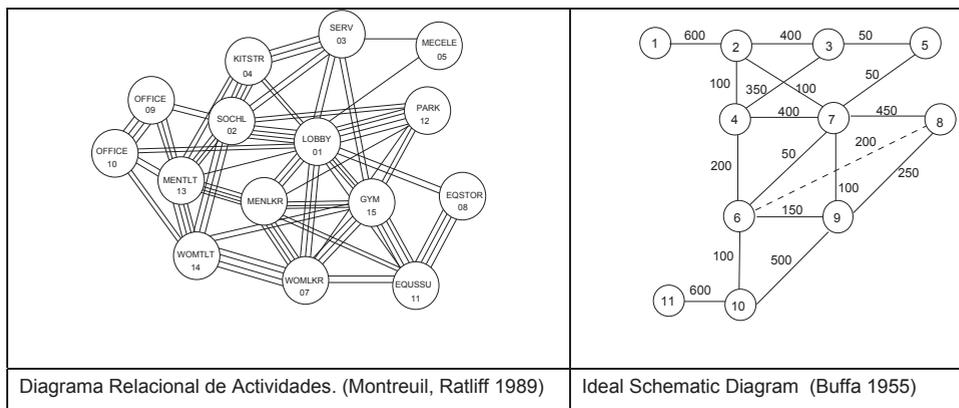


Figura 5 - 12 – Representación modelos topológicos.

Un grafo G está formado por un conjunto de nodos conectados por arcos, denominados vértices y aristas respectivamente, y se representa como $G=G(V,A)$ donde V es el conjunto de los vértices v_i y A el conjunto de las aristas (v_i, v_j) . El conjunto de los vértices del grafo G se denota como $V(G)$, y el conjunto de las aristas como $A(G)$.

En el caso de que las aristas no tengan un sentido definido, es decir queden identificadas por un par no ordenado de vértice se dice que el grafo es no dirigido. En caso contrario se trata de un grafo dirigido.

El tipo de grafos de interés en el problema de distribución en planta es el de los no dirigidos, ya que el tipo de relaciones, que se establecen entre las actividades representadas por los vértices del grafo, responden habitualmente a las relaciones representadas en el "diagrama relacional de actividades" (R. 1968), en el que se expresa la conveniencia de que dos actividades ocupen posiciones adyacentes en la distribución. $G(a_i, r_{ij})$

El número de pares no ordenados distintos en un grafo con n vértices es $\frac{1}{2}n(n-1)$. Un grafo no dirigido de n vértices con $\frac{1}{2}n(n-1)$ aristas se dice que es completo. Si (v_1, v_2) es una arista de $A(G)$, entonces se dice que los vértices v_1 y v_2 son adyacentes.

Un grafo es ponderado, si tienen pesos asociados a sus aristas, que pueden ser utilizados como parámetros de coste o beneficio. Un grafo es planar, si al menos tiene una representación bidimensional, en que sus aristas sólo se intersectan en los vértices. Se define como grafo planar maximal a aquel grafo planar que deja de serlo si se le añade una arista más:

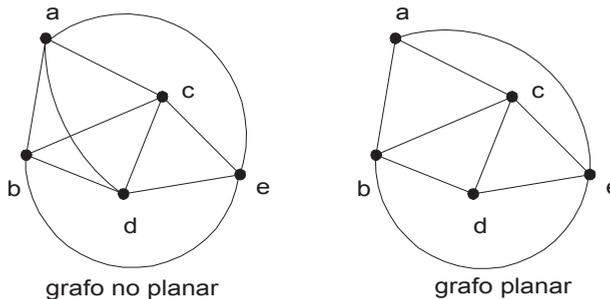


Figura 5 - 13 – Grafos planar y no planar.

La ecuación de Euler liga el número de caras, vértices y aristas en un grafo conexo planar. Una propiedad de los grafos conexos planares de m vértices es que el número de aristas es máximo cuando cada cara está rodeada exactamente por tres aristas lo que equivale a que todas las caras del grafo sean triangulares, incluida la cara infinita.

Una propiedad de los grafos triangulares es que $2a = 3c$, con lo que sustituyendo en la ecuación de Euler, el número máximo de aristas es $a = 3v - 6$, con lo que el número máximo de relaciones de m actividades expresables mediante un grafo plano asciende a: $r = 3m - 6$.

De este modo el tanto por ciento de relaciones que se pueden representar en un grafo planar en función del número de actividades, como se indica en la figura, en casos reales, en los que número de actividades puede ser mayor de 20, no llega ni al 30% de las posibles.

5.8. Métricas de distancia.

Uno de los aspectos geométricos a tener en cuenta en el planteamiento del problema de distribución en planta es el relativo a la métrica que se emplee para determinar la distancia entre las actividades del problema a optimizar. La distancia entre las actividades es un parámetro clave, pues contribuye de una manera significativa en la función objetivo a minimizar.

En el problema de distribución en planta se pueden distinguir dos distancias que todo el proceso de definición del mismo:

- *Distancia geométrica*: Este valor viene determinado por las áreas de las actividades, tomándose de forma habitual la distancia Euclídea.
- *Distancia de recorrido*: Es la distancia que van a recorrer los materiales al ir de una actividad a otra. A la hora de determinar esta distancia es muy importante la métrica que se seleccione, pues los valores pueden ser muy distintos.

La selección de una u otra métrica de la distancia de recorrido depende fundamentalmente de los siguientes factores:

- *Tipo de problema*: Según se esté tratando el diseño de bloques o el diseño de detalle.
- *Modelo geométrico*: Según se emplee un modelo topológico o geométrico.
- *Sistema de manutención*: Cada sistema de manutención puede asimilarse a una métrica concreta.

De entre las métricas más empleadas en la bibliografía se pueden destacar las mostradas en la figura. Cada una de estas es apropiada para una determinada fase del problema o bien para un modelo geométrico concreto, aunque conviene analizarlas en detalle.

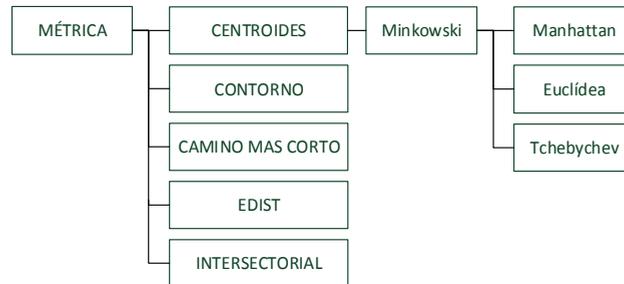


Figura 5 - 14 - Clasificación de las métricas de la distancia.

Así, por ejemplo, en la fase de diseño de bloques (o *block layout*), en la que la posición de los puntos de entrada y salida de las actividades no están aun definidos, la distancia entre las mismas se toma respecto al centro de gravedad, siendo para ello valido cualquier métrica Minkowski, la EDIST o la nueva que se define en este trabajo, la intersectorial. En el diseño de detalle, cuando ya se conocen los puntos de entrada y salida de cada una de las actividades se puede emplear una métrica por contorno lateral.

Sin embargo, si se emplea un modelo geométrico topológico, puede resultar adecuado emplear una métrica del tipo camino más corto.

También existen autores que proponen emplear métricas heterogéneas (Ozdemir et al. 2003), es decir dar la posibilidad de emplear distintos sistemas de manutención en función del flujo entre actividades en función del tipo de sistema de manutención entre actividades, que es lo que permite realizar la aplicación implementada y que es la opción que se ha valorado como más realista para realizar simulaciones en trabajos reales, en el caso de que la aplicación se utilice, como así está previsto, con fines docentes.

5.8.1. Distancia entre centroides.

En la fase de *block layout* habitualmente se emplea la distancia entre centroides como métrica, debido a que en esta fase del diseño, se suele desconocer el punto de entrada y salida de materiales de la actividad, por tanto, se toma como punto más representativo el centro de gravedad de la actividad.

Todas las distancias entre centroides empleadas se fundamentan en la métrica Minkowski que, se rige por la siguiente expresión:

$$d_{ij}(p) = \left(\sum_{k=1}^{DI} |x_{ik} - x_{jk}|^p \right)^{1/p} \quad (5-23)$$

Donde: DI es el número de dimensiones consideradas.
 $p > 0$ es un parámetro que determina la métrica particular utilizada.

De esta formulación se extraen las tres métricas de distancia más empleadas en el problema del FLP, las cuales serán escogidas por pares de actividades en función del tipo de sistema de mantenimiento que se utilice. Cuando concurren varias de ellas a un mismo par de actividades, se dimensionará en general con la más desfavorable, entendiéndose tal como aquella que requiere mayor distancia a recorrer (para efectuar un diseño conservador del lado de la seguridad). Pueden verse en la figura:

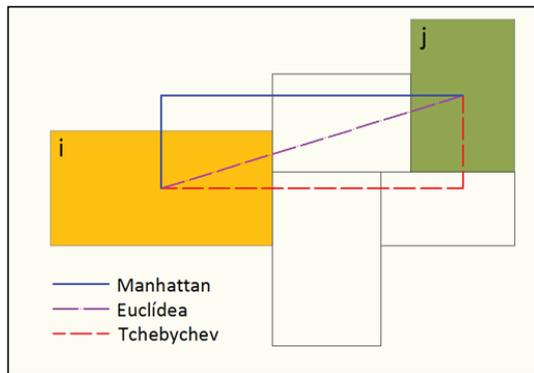


Figura 5 - 15 - Métricas de distancia. Fuente (Montalvá Subirats et al. 2011)

5.8.2. Distancia Manhattan.

También se le conoce como métrica rectilínea, de ciudad o rectangular, se obtiene al aplicar en la ecuación del punto anterior con $p=1$. Esta distancia, es frecuentemente utilizada porque es fácil de calcular y es la mejor aproximación al movimiento real de los elementos de mantenimiento en problemas prácticos, donde la mantenimiento se realiza a través de una retícula de pasillos con transporte de materiales en carretillas elevadoras, transpaletas o AGVs.

La distancia rectilínea para el caso de dos dimensiones (x,y) se calcula con la siguiente expresión:

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (5-24)$$

que representa los incrementos de horizontales y verticales entre los centros de gravedad de las actividades i y j , como si de un taxi se tratase moviéndose por una retícula de manzanas perfectamente ortogona, como sucede en el centro de NYC, a excepción de Broadway Av. (de ahí su nombre).

Esta métrica es la empleada en la gran mayoría de las referencias bibliográficas del problema de distribución en planta de establecimientos industriales, y será la que se utilice en gran parte de los ejemplos del presente trabajo, aunque la aplicación se ha implementado de modo que la distancia a utilizar entre cada par de actividades sea completamente diversa y configurable a voluntad.

5.8.3. Distancia euclídea.

Obtenida de aplicar el parámetro $p=2$ en la ecuación expuesta con anterioridad es la distancia más corta entre dos puntos, la distancia rectilínea, aunque en el caso del problema de distribución en planta no suele emplearse, pues suele ser una medida poco realista considerando que la planta una vez realizada la instalación ya no es diáfana, existiendo obstáculos a superar en fase de explotación o funcionamiento, dado que la mayor parte de los sistemas de mantenimiento no pueden cruzar por el espacio ocupado por otras actividades al tener estas sus propios equipos y máquinas de trabajo.

La distancia Euclídea para el caso de dos dimensiones (x,y) se calcula con la siguiente expresión:

$$d_{ij} = \left((x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \right)^{1/2} \quad (5-25)$$

Este tipo de métrica sería adecuada en aquellas plantas en las que el flujo de materiales se realizara mediante conveyors, cintas transportadoras o conductos automatizados (Ozdemir et al. 2003).

5.8.4. Distancia Tchebycheff.

Esta métrica se obtiene al aplicar el valor de $p=\infty$ en la ecuación general, que para el caso de dos dimensiones (x,y) adoptará la siguiente expresión:

$$d_{ij} = \max(|x_i - x_j|, |y_i - y_j|) \quad (5-26)$$

La distancia Tchebycheff se corresponde con el problema de manutención en una industria de maquinaria pesada que se lleva a cabo mediante puentes grúa con dos motores independientes, uno permitiendo el movimiento en la dirección del eje longitudinal (de las x) y el otro en la dirección transversal (eje de las y).

El tiempo necesario para realizar el movimiento desde el centro de la actividad i al centro de la actividad j depende de la mayor de las distancias de los ejes x e y , pues el sistema de manutención empleado comienza el movimiento independiente al mismo tiempo. Esto es obviamente una simplificación de la realidad, pues en un sistema real habría que tener en cuenta el hecho de que ambos desplazamiento no tienen por qué producirse a la misma velocidad, aunque en términos generales se considera una aproximación adecuada.

5.8.5. Distancia por contorno lateral.

Otra posibilidad es emplear una métrica que no esté basada en la métrica Minkowski, como es la distancia por contorno lateral, que expone (Montalvá Subirats et al. 2011). Esta distancia se emplea en problemas de distribución de detalle, en los que se conoce el punto de entrada y salida de cada una de las actividades. También se utilizará una muy similar que se define en este trabajo como aportación, que será la llamada Distancia Intersectorial, la cuál se utilizará para medir la distancia entre actividades que pertenecen a sectores de incendio diferentes.

La distancia recorre el camino que deben seguir los materiales desde el punto de salida de una determinada actividad i hasta otra actividad j . En la figura se puede observar un ejemplo de distancia por contorno lateral entre dos actividades, que puede ser distinta si el movimiento de materiales es desde i hasta j (en azul) o es de j hasta i (en morado).

La distancia por el contorno es diferente al resto de métricas dado que esta representa la distancia actual del trayecto a lo largo de pasillos que debe seguir una carretilla o vehículo autoguiado. Se pueden encontrar aplicaciones de éste tipo de métrica al problema de distribución en planta en (Norman et al. 2001, Kim, Goetschalckx 2005).

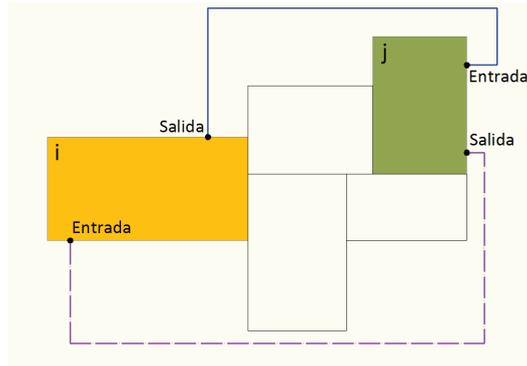


Figura 5 - 16 - Distancia por contorno lateral.

El siguiente paso tras obtener la posición de las actividades, como se expone en (Benson, Foote 1997) es la generación de los pasillos y la ubicación de las puertas de cada recinto. En el caso de la distancia interesectorial, por simplificar el proceso y limitar la intervención del protectista, las puertas de paso entre sectores se colocarán aproximadamente en el centro de cada cerramiento de separación entre sectores de incendio. Estos conceptos se explicarán con detalle en el capítulo 7, donde se explicará la normativa de incendios y el algoritmo de sectorización propuesto.

5.8.6. Distancia “shortest path”.

Cuando se emplea un modelo geométrico basado en teoría de grafos, puede utilizarse una métrica adecuada para el layout de detalle que es la métrica del camino más corto (*shortest path*). En problemas localización de industrias, ésta métrica es utilizada para determinar la distancia entre dos lugares. La posición de las actividades se representa mediante un grafo compuesto por nodos y arcos, donde los nodos representan las actividades y un arco entre un par de nodos representa la distancia o tiempo de transporte entre las actividades. Una de las últimas referencias encontradas en la bibliografía para su aplicación a casos reales se hace en (Zheng 2014):

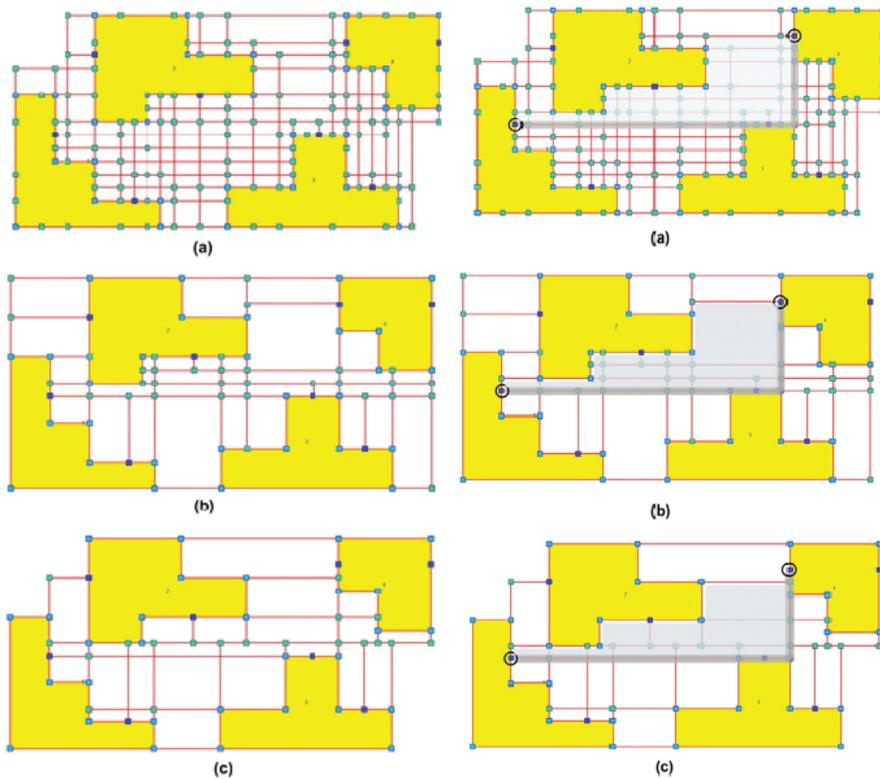


Figura 5 - 17 - Distancia "shortest path", (Zheng 2014)

5.8.7. Distancia rectilínea esperada (también llamada EDIST).

(Bozer, Meller 1997) proponen la distancia rectilínea esperada o EDIST, otra de las métricas no basadas en Minkowski para su aplicación al problema del FLP en su fase de *block layout*, cuya interpretación es la siguiente:

- Se tienen dos regiones planares R_i y R_j que representan a las actividades i y j respectivamente, con un área total igual a A_i y A_j . Sean $(x_i, y_i) \in R_i$ y $(x_j, y_j) \in R_j$ las coordenadas de dos puntos de ambas regiones muestreados aleatoriamente.
- Dado que la posición de cada punto es específica para una función de probabilidad uniforme sobre ambas regiones, la distancia rectilínea esperada (EDIST) entre las dos actividades i y j (d_{ij}) queda fijada mediante la expresión:

$$EDIST_{ij}(d_{ij}) = \int_{x_i \in R_i} \int_{y_i \in R_i} \int_{x_j \in R_j} \int_{y_j \in R_j} \frac{1}{A_i} \cdot \frac{1}{A_j} (|x_i - x_j| + |y_i - y_j|) dy_j \cdot dx_j \cdot dy_i \cdot dx_i \quad (5-27)$$

Si se emplea un modelo geométrico discreto (con c casillas) y se expresa el problema en variables de asignación, la distancia EDIST entre ambas actividades se determina mediante la siguiente expresión:

$$EDIST_{ij}(d_{ij}) = \sum_{k=1}^c \sum_{l=1}^c \frac{1}{c_i \cdot c_j} (|x_k - x_l| + |y_k - y_l|) \cdot x_{ik} \cdot x_{jl} \quad (5-28)$$

donde: $x_{ik} = 1$ si la posición k está ocupada por la actividad i y 0 en caso contrario.

$x_{jl} = 1$ si la posición l está ocupada por la actividad j y 0 en caso contrario.

La métrica EDIST es una buena medida para el control geométrico de forma indirecta en el caso de algunas configuraciones no deseables (diana y sándwich, ver figura 5.1), en las que la métrica Minkowski da valores muy bajos mientras que la métrica EDIST las penaliza.

5.8.8. Distancia INTERSECTORIAL.

Otra de las métricas no basadas en Minkowski que se pueden emplear en el problema de distribución en planta, que se propone en este trabajo para poder medir la distancia real recorrida entre actividades cuando la planta está dividida en sectores de incendios por los cerramientos que la compartimentan, es una aportación de este trabajo, y se define como DISTANCIA INTERSECTORIAL.

Esta distancia es de nueva creación, no existe en la bibliografía, aunque una vez ideada consultando en la bibliografía se encuentran similitudes con la publicada en (Benson, Foote 1997) que ellos llaman DoorFAST, y se trata de una distancia que se calcula pasando entre recintos que tienen puertas, por lo que la idea es muy similar.

La diferencia fundamental es que esta distancia distingue dos casos, uno en el que las actividades pertenecen al mismo sector de incendios y otro en el que pertenecen a sectores distintos. La formulación sería la siguiente:

- Actividades que pertenecen al mismo sector: El trasiego de materiales se hará tal cual se haya indicado en la matriz de métricas de distancia entre pares de actividades, de modo que ésta puede ser euclídea, Manhattan, Tchebycheff o EDIST, o una combinación de todas ellas, y no se diferencia en nada de las ya expuestas.

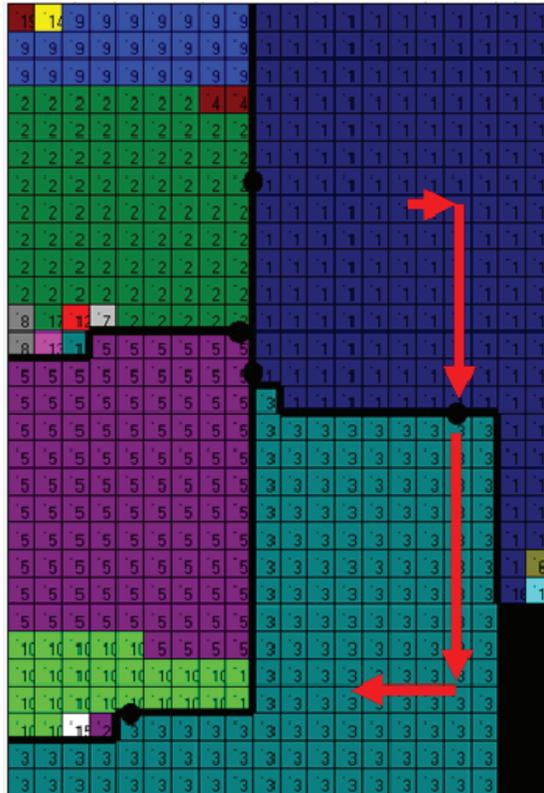


Figura 5 - 18 – Distancia intersectorial cerramiento común

- Actividades que pertenecen a sectores de incendios distintos: En este caso, el trasiego de materiales se efectuará a través de 3 componentes:
 - Una primera componente que consistirá en transportar el material hasta la salida de sector de origen más próxima a la entrada más próxima del sector de destino, que puede hacerse con la métrica que se haya indicado hasta la puerta más próxima del sector de origen.
 - Una segunda componente que consistirá en transportar el material desde la salida de sector de origen más próxima hasta la entrada más próxima del sector de destino, que normalmente se hará utilizando la métrica Manhattan. En general este planteamiento estará del lado de la seguridad, pues se desconoce a priori si existirán sistemas de mantenimiento automáticos o si ésta, entre sectores, se realizará a través de carretillas, y por lo tanto a través de pasillos (que será lo habitual salvo caso de existir conveyors o cintas transportadoras automatizadas entre esas actividades).

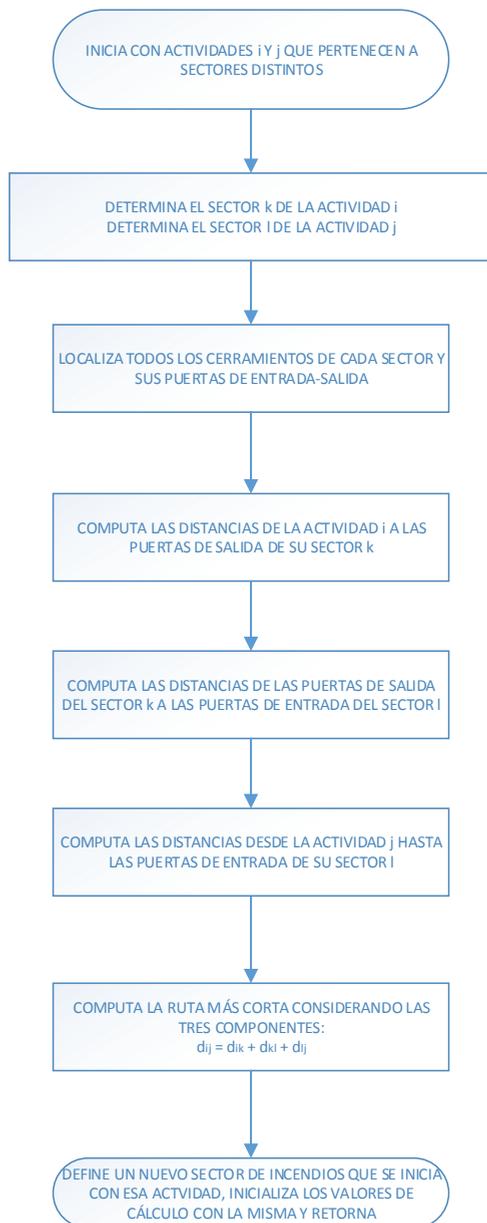


Figura 5 - 20 – Diagrama de flujo del procedimiento de cálculo de la distancia intersectorial

5.8.9. Otros estudios sobre distancias

Existen otros enfoques y aportaciones más recientes al problema del cálculo de distancias para el FLP, como los que se citan a continuación:

- El trabajo (Lasrado, Nazzal 2011) hace una aportación al problema de los bucles, en el trabajo "Diseño de una instalación de fabricación con cinta transportadora en bucle cerrado utilizando teoría de colas y algoritmos genéticos". La metodología que se propone soluciona el problema de diseño del Layout en bucle con cinta transportadora manejando un sistema de atajos y utilizando una métrica basada en el rendimiento de las como criterio de diseño.
- En (Hale et al. 2012), en el trabajo "Un método de construcción mejorado para el diseño de layouts", se define una función de distancia esperada que se define como la expectativa probabilística de la métrica de distancia de que se trate (rectilínea, euclídea, etc.) en que los parámetros involucrados son definidos por unos vectores aleatorios en el espacio euclidean bidimensional. Este estudio proporciona una técnica de construcción para el diseño que incluye algunas mejoras sobre el procedimiento de diseño sistemático conocido como (SLP). El objetivo aquí es minimizar el error producido por el uso de las distancias entre centroides entre las actividades.
- En (Date et al. 2014), trabajo llamado "Reglas de dominancia para para la colocación óptima de una instalación de tamaño finito sobre una distribución existente", se revisa el problema de colocar una instalación rectangular de tamaño finito de dimensiones conocidas, cuando ya existen otras otras instalaciones rectangulares en el dominio. Todas las instalaciones interactúan entre sí a través de sendos puntos de E/S y el recorrido entre ellos sucede de acuerdo con la métrica rectilínea. El objetivo es encontrar la colocación óptima de la nueva instalación, con ayuda de una serie de reglas de dominancia, que reducen el número viable de posibles lugares de colocación que tienen que ser evaluados.

5.9. Modelo geométrico adoptado y Espacio de Soluciones.

Tal y como indican (Montalva et al. 2012), los aspectos geométricos básicos del FLP son el tamaño y forma de las actividades, el modelo de representación del espacio y su métrica y la forma y número de alturas de la planta industrial o del dominio de ubicación, el modo en que son tratados determina la configuración espacial de las soluciones. Estos aspectos, de principal importancia en el proyecto y construcción de complejos industriales no son contemplados por una formulación QAP y se abordan de manera explícita en este trabajo.

Los diferentes tratamientos geométricos del problema pueden clasificarse en: discretos (Seehof, Evans 1967), discretos con directriz de colocación (utilizando rellenos oscilatorios, curvas de Hilbert (Bozer et al. 1994) o Space Filling Curves-SFC, continuos (abs-model) (Heragu, Kusiak 1991), "multi-bay" (Meller 1997), "cut-trees" (Tam, Li 1992), grafos (Seppänen, Moore 1970), esqueletos (Montreuil, Ratliff 1989), "scatter diagrams" (Drezner, Barak 1986) y "gridding" (Ishibuchi, Murata 1996) entre otros.

Para tratar los aspectos geométricos del problema existen básicamente dos vías, una introduciendo explícitamente en la formulación un conjunto de restricciones o penaltis relacionados con la forma, dimensión y posición de las actividades y otra implícitamente a través del propio modelo geométrico adoptado, la métrica y la representación.

En el presente trabajo se adopta un modelo discreto como el visto al inicio de este capítulo, y el control geométrico de agregación, el cual evita la segregación de actividades, está asociado implícitamente al procedimiento de construcción de las soluciones. La codificación de dicha solución y el tamaño del espacio de soluciones es función del modelo geométrico adoptado. El modelo geométrico discreto requiere la transformación del problema continuo a partir de un módulo de discretización u^2 . A menor tamaño de celda mayor control geométrico pero mayor exigencia de computación, a menor tamaño, menor espacio de soluciones, menor tiempo de computación, pero peor control en la forma de las actividades; por lo tanto, el tamaño de celda debe ser bien ajustado para lograr una solución de compromiso que proporcione un buen control geométrico en un tiempo aceptable de resolución del problema. Como ya se explicó, a consecuencia de la discretización el dominio $D(A)$ se transforma en un conjunto de $n=p \cdot q$ ubicaciones de área u^2 , $D(p, q, u^2)$, debiendo cumplirse que $A \leq p \cdot q \cdot u^2$, donde se desea ubicar m actividades $d_i(a_i)$ de área a_i , que se han transformado en $d_i(n_i, u^2)$ de modo que $a_i \leq n_i \cdot u^2$, sin superposición de actividades, sin rotura de las mismas y optimizando la función objetivo que corresponda al problema a resolver, formulada tal y como se vio en el capítulo 4.

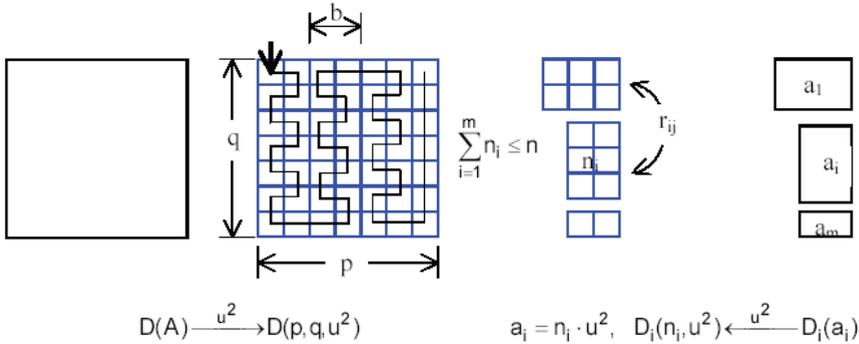


Figura 5 - 21 - Representación del modelo geométrico adoptado.

Para evitar la rotura o disgregación de actividades que podría ocasionarse con una ubicación libre se adopta una directriz, una SFC, de tipo oscilatorio propia del algoritmo ALDEP (Seehof, Evans 1967) que se caracteriza por una amplitud de avance b , también llamado ancho de banda, que según sea el relleno horizontal o vertical verificará $1 \leq b \leq p$; $1 \leq b \leq q$. En el presente trabajo se utilizará siempre un número de filas impar y un relleno oscilatorio empezando por la casilla superior izquierda, con un ancho de banda que puede ser fijo o variable, parámetro este configurable en la aplicación. En la figura siguiente puede verse un ejemplo obtenido con ancho de banda variable:

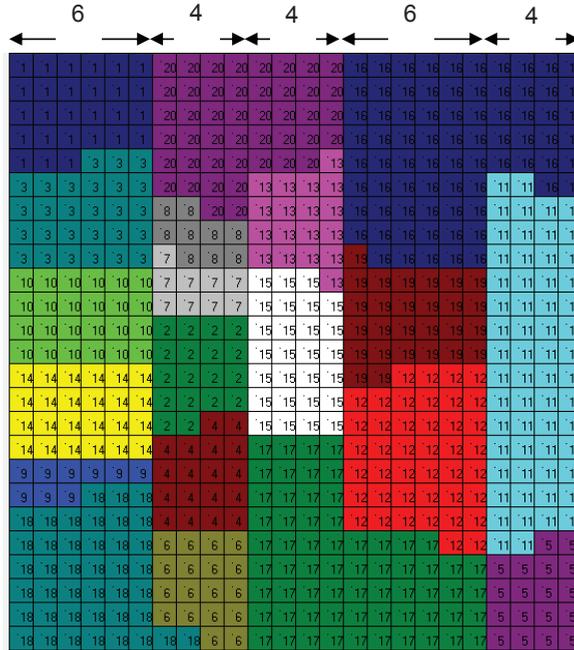


Figura 5 - 22 – Ancho de banda variable.

Para un domino dado $D(p,q,u^2)$ el espacio de soluciones $\{S(u)\}$ está constituido por el conjunto de configuraciones que verifican las restricciones del problema, las soluciones, que pueden generarse colocando secuencialmente las m actividades en el dominio siguiendo la directriz de la SFC (Space Filling Curve, anteriormente expuesta). En este caso el tamaño del espacio de soluciones vale:

$$|\{S(u, SFC(ALDEP))\}| = (p + q) \cdot m! = (p + q) \cdot m! . \tag{5-29}$$

donde $p+q$ es número de posibles directrices o SFCs que pueden obtenerse en el marco del método ALDEP. En el caso de ubicación libre puede demostrarse que el tamaño de posibles configuraciones viene determinado por la expresión:

$$|\{C(u)\}| = (p \cdot q)! \prod_{i=1}^m n_i! \tag{5-30}$$

que es mayor que el de soluciones, $\{S(u)\} \subset \{C(u)\}$, dado que algunas configuraciones presentaran disgregación de actividades y no serán solución del problema. En general el empleo de SFC supone una importante reducción del tamaño del espacio de soluciones pero garantiza que cualquier configuración generada será solución.

5.10. Construcción y Representación de una Solución en el algoritmo ACO implementado.

Dado un dominio discreto $D(p, q, u^2)$ y una SFC(definida por su ancho de banda b y las reglas de movimiento comentadas en el punto anterior) una solución se representa mediante una lista de ordenada actividades $(\dots, a_i, \dots, a_j, \dots)$ que corresponde al orden de entrada al dominio $D(p, q, u^2)$ siguiendo la directriz SFC(b). De este modo una solución queda representada por una lista de índices que se corresponden con la secuencia de actividades y un apéndice que hace referencia al dominio (p, q, u^2) y a la SFC (b): $s = \{a_p, \dots, a_i, a_j, \dots, a_q, p, q, b\}$.

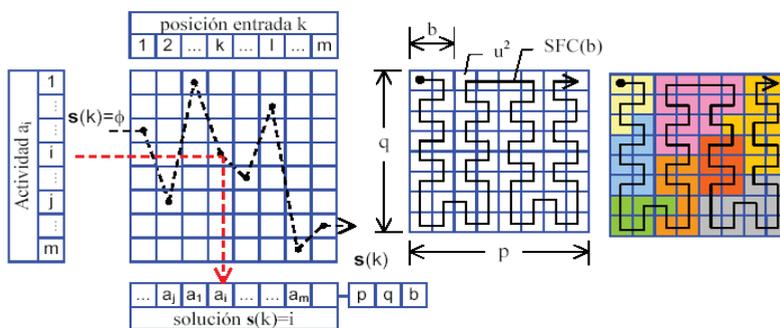


Figura 5 - 23 - Construcción y representación de una solución.

Capítulo 06

Algoritmos híbridos basados en colonias de hormigas.

6.1. Introducción.

Como ya se ha explicado en numerosas ocasiones, el emplazamiento adecuado en el diseño y ubicación de las instalaciones sobre el edificio son muy importantes para aumentar la eficiencia, la productividad y la seguridad. La formulación de este problema se corresponde con el llamado FLP (“Facility Layout Problem”), cuya resolución puede abordarse, como ya se ha expuesto en capítulos anteriores, de numerosas formas y enfoques. Con este propósito (el de resolver el problema del FLP y otros similares) existen en la bibliografía multitud de algoritmos metaheurísticos, como son por ejemplo los algoritmos genéticos (GA), optimización basada en cúmulos de partículas (PSO), y optimización basada en colonias de hormigas (ACO). Todos ellos se han utilizado en algunas ocasiones para la resolución del problema FLP, en el que las instalaciones son colocadas en ubicaciones de modo que se minimiza el coste asociado a algunos parámetros del proceso productivo y la construcción.

Puede encontrarse una amplia recopilación de todas estas técnicas de optimización y sus fundamentos, por ejemplo en la Tesis Doctoral de (Montalvá Subirats et al. 2011), aunque no es el objetivo de este capítulo realizar dicha recopilación, sino simplemente justificar someramente la elección de la técnica (frente a otras existentes) en esta introducción para posteriormente exponer sus fundamentos y comentar su evolución y variantes.

Cada técnica posee sus propios parámetros para manejar la velocidad y dirección de convergencia; en los algoritmos genéticos se usa el concepto de cruzamiento y mutación, de modo que la técnica incrementa la diversidad de las soluciones y evita el bloqueo del algoritmo en óptimos locales. En los algoritmos basados en colonias de hormigas son otros, que se expondrán a continuación, valga a grandes rasgos adelantar que se tratará de la información heurística disponible (local) y los rastros de feromona de la/s colonia/s (información global). En cualquier caso, cada técnica ofrece unas ventajas e inconvenientes que deben ser considerados en función del problema a resolver.

Existen trabajos, algunos de ellos muy recientes, de este mismo año (Adrian et al. 2015), donde se ajustan los parámetros óptimos para cada algoritmo usando un enfoque de diseño de experimentos (DOE). En estos trabajos también se comparan los rendimientos de tres algoritmos (los algoritmos genéticos (GA), la optimización basada en cúmulos de partículas (PSO), y la optimización basada en colonias de hormigas (ACO)) a través de la resolución de dos casos existentes en la literatura.

En el mencionado trabajo se comparan tanto la eficacia, la eficiencia, y la regularidad. Se usó la prueba ANOVA para comparar los rendimientos (el análisis de la varianza ANOVA, ANalysis Of VAriance, es una colección de modelos estadísticos y sus procedimientos asociados, en el cual la varianza está particionada en ciertos componentes debidos a diferentes variables explicativas). Los resultados manifiestan la capacidad de cada método modificado en resolver los problemas de diseño de la instalación eficazmente, eficientemente y de forma estable.

En el trabajo citado, se usaron dos casos hipotéticos existentes en la literatura para valorar el rendimiento de GA, PSO y ACO para resolver el problema de diseño FLP. Algunas de las conclusiones que se extraen sobre la base de los análisis y los resultados obtenidos durante los experimentos son las siguientes:

1. El mejor valor de la función objetivo en este estudio fue 90, mientras el mejor valor obtenido por (Yeh 1995) era de 93. Esto se debe a la modificación en los algoritmos que permiten explorar en busca de la solución óptima global. El resultado demuestra que los métodos usados son adecuados para la resolución del problema.
2. El tamaño de población es el parámetro de diseño más significativo e incluyente para la calidad de la solución final. Los tamaños de población necesarios en GA y PSO son mayores que los requeridos en ACO para conseguir los mejores resultados.

3. Todos métodos fueron implementados similarmente en relación con la eficacia. Sin embargo, PSO parece conseguir la media mínima de coste (mínima dispersión) en comparación con GA y ACO. Esto se debe a la inclusión y puesta en práctica de concepto de locura en el mecanismo de PSO.
4. En relación con la eficiencia, ACO y el rendimiento de GA son de gran calidad respecto a PSO. ACO es el algoritmo más rápido en converger al coste mínimo. Todavía, esto carece de relevancia para problemas de tamaño pequeño, pues la resolución se hace en escasos segundos, pero gana relevancia en problemas de gran tamaño con gran número de departamentos y restricciones.
5. Respecto a la regularidad, todos los métodos demostraron ser consistentes para encontrar soluciones en ambos casos. Esto es atribuible a la introducción de parámetros que previenen que algoritmo quede bloqueado en óptimos locales y poder explorar mejor el espacio de soluciones para converger hacia los mejores objetivos.

Teniendo todo esto en consideración, cualquiera de los tres métodos podría ser válido para resolver el problema. De hecho existen multitud de referencias en la bibliografía que resuelven este problema y otros similares con todas estas mencionadas técnicas metaheurísticas. En este caso se ha optado por algoritmos ACO a la vista de lo anteriormente expuesto fundamentalmente por el hecho de necesitar menores tamaños de población para alcanzar los objetivos, lo que redundaría en convergencias más rápidas de modo que se podrá realizar una mayor exploración del espacio de soluciones para evitar la convergencia en óptimos locales (a igualdad de tiempo computacional) y no existir ninguna manifiesta desventaja frente a los demás.

6.2. Antecedentes sobre técnicas basadas en colonias de hormigas.

Los algoritmos basados en colonias de hormigas son una de las aproximaciones más recientes a los problemas de optimización. La primera vez que se formuló fue en (Colorni et al. 1992), entre cuyos autores figuraba el autor más prolijo en la publicación de dichos algoritmos, Marco Dorigo.

Estos algoritmos están inspirados en el comportamiento de las hormigas reales en la naturaleza (Dorigo et al. 1996), y más específicamente, por la comunicación indirecta entre hormigas dentro de la colonia vía la secreción de feromona química. Dentro de la comunidad de la inteligencia artificial (IA), los algoritmos de colonias de hormigas se consideran incluidos en la categoría de inteligencia de enjambre (Dorigo et al. 2000a). La inteligencia de enjambres abarca la puesta en práctica de sistemas inteligentes multi-agente que están basados en el comportamiento de enjambres de insectos en mundo real, como una herramienta de resolución del problema a resolver. Se han desarrollado

también otros algoritmos similares basados en, por ejemplo, el comportamiento de enjambres de avispas y abejas.

Como ya se ha comentado, los algoritmos de hormiga son los algoritmos de optimización motivados e inspirados en el comportamiento de hormigas reales en la búsqueda de alimentos en la naturaleza. Presentado en el a comienzos de 1990s, los algoritmos de colonias de hormigas tienen por objetivo encontrar soluciones aproximadas para los problemas de optimización. A través del uso de hormigas artificiales y su comunicación indirecta vía feromona sintética. Se revisarán tanto los primeros algoritmos de colonias de hormigas, así como su desarrollo, para acabar con las actuales técnicas metaheurísticas ACO (Ant Colony Optimization).

A partir del éxito del algoritmo de hormigas original (Ant System) propuesto por (Dorigo et al. 1996), desarrollos posteriores han conducido a la evolución de la técnica inicial hasta una técnica de optimización general de uso mayoritario conocida como Algoritmo Basados en Colonias de hormigas (Ant Colony Optimización (ACO)), que fue formalizado después como una técnica metaheurística actual por (Dorigo et al. 1999). Otros ejemplos de técnicas metaheurísticas incluyen simulated annealing (Kirkpatrick et al. 1983), búsqueda tabú (Glover 1990b, Glover 1990a) y la búsqueda local ("local search") (Lourenco et al. 2003).

Existen multitud de aplicaciones de las técnicas ACO realizadas en los últimos años, tanto para el FLP como para otros muchos problemas de optimización. Algunas de las referencias pueden encontrarse en la siguiente lista:

- A Walk into Metaheuristics for Engineering Optimization: Principles, Methods and Recent Trends (Xiong et al. 2015)
- Two New Clustering Algorithms for Vehicular Ad-Hoc Network Based on Ant Colony System (Fathian et al. 2015)
- A new heuristic based on local best solution for permutation flow shop scheduling (Chen et al. 2015)
- A New Approach ACO for Solving the Compromise Economic and Emission with the Wind Energy (Khodja et al. 2014)
- A decision support system for a long-distance routing problem. based on the ant colony optimization metaheuristic (Sicilia et al. 2014)
- Ant colony optimisation for vehicle traffic systems: applications and challenges (Jabbarpour et al. 2014)
- A comparative study of Multi-Objective Ant Colony Optimization algorithms for the Time and Space Assembly Line Balancing Problem (Rada-Vilela et al. 2013)
- A max-min ant colony system for assembly sequence planning (Yu, Wang 2013)

- Fuzzy Ant Supervised by PSO and Simplified Ant Supervised PSO Applied to TSP (Tavares Neto, Godinho Filho 2013)
- Ant colony algorithms in MANETs: A review (Singh et al. 2012)
- Integrating Simulation and Ant Colony Optimization to Improve the Service Facility Layout in aStation (Lee 2012)
- A survey: Ant Colony Optimization based recent research and implementation on several engineering domain (Mohan, Baskaran 2012)
- Multi-Objective Ant Colony Algorithm in EPC Risk Control (Hu et al. 2012)

Y específicamente sobre FLP:

- A biased random-key genetic algorithm for the unequal area facility layout problem (Goncalves, Resende 2015).
- Applying Ant System for solving Unequal Area Facility Layout Problems (Komarudin, Wong 2010).
- Solving facility layout problems using Flexible Bay Structure representation and Ant System algorithm (Wong, Komarudin 2010)
- STaTS: A Slicing Tree and Tabu Search based heuristic for the unequal area facility layout problema (Scholz et al. 2009).

6.2.1. Las hormigas en la naturaleza.

La ingeniosa idea de optimización que subyace tras los algoritmos de hormigas se inspira en las observaciones de campo sobre el comportamiento real de las hormigas en la naturaleza, y además, en el fenómeno conocido en terminología anglosajona como 'stigmergy' (**estigmergia** [*hyphenation: es·tig·mer·gia;*] (Dorigo et al. 2000a) que se define como el mecanismo de coordinación espontánea, indirecta entre agentes o acciones, donde el rastro dejado en el ambiente por una acción estimula el funcionamiento de una acción subsecuente, por iguales o un diverso agente).

Se trata en definitiva de una inteligencia grupal. Este término fue presentado en 1958 por Grasse (Grasse 1958); estimergia hace referencia a la comunicación indirecta entre un sistema emergente auto-organizado vía elementos individuales que modifican su ambiente local; es un mecanismo de la coordinación indirecta entre agentes y/o acciones. Estudios experimentales llevados a cabo por (Goss et al. 1989) que analizaron la naturaleza grupal de las colonias de hormigas, donde las hormigas se comunican indirectamente colocando senderos de feromona, la cual dichas hormigas tienden a seguir después. Los experimentos realizados por los autores citados demostraron la conver-

gencia de los senderos de hormigas y por consiguiente la tendencia de las hormigas a seguir un rastro que contiene la concentración más alta del depósito de feromona.

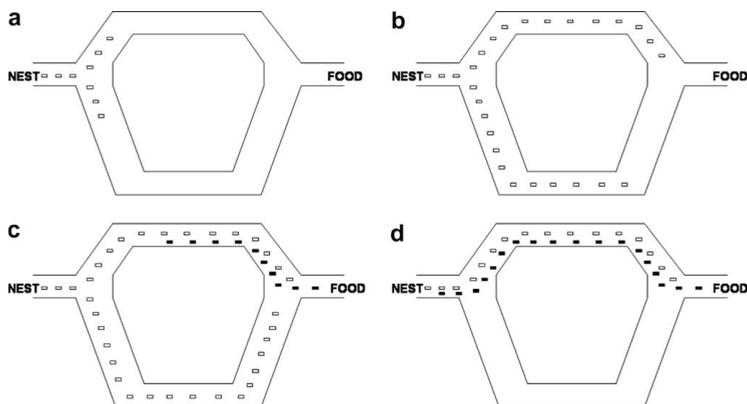


Figura 6 - 1 - Ilustración del experimento del camino más corto (Cordón García, Herrera Triguero 175)

6.2.2. Analogía establecida.

Examinemos el experimento conocido como “puente más corto”, que se ha expuesto en la figura anterior; el experimento (Goss et al. 1989) indica una diagrama que representa dos senderos posibles entre un nido y un origen de comida, con la ruta superior más corta en longitud que la otra. Inicialmente, cuando las hormigas dejan el nido buscando alimento, aproximadamente la mitad de las hormigas seguirán a la ruta superior y la otra mitad la inferior. Debido a que el sendero superior es más corto que el inferior, las hormigas que siguen el sendero superior llegarán al origen antes que las otras. En cuanto una hormiga ha recolectado comida, regresa al nido por la misma ruta y deja un rastro de feromona colocado en el camino hacia la fuente de comida que, a fuerza de colocar feromona en el camino, refuerza el rastro de feromona a lo largo de este sendero. Estas hormigas regresarán al nido reforzando el rastro de feromona en adelante para todo el sendero superior. Cualquier hormiga que deje el nido ahora tenderá con mayor preferencia a perseguir el sendero superior del nido a la comida debido a la concentración de feromona más alta a lo largo de este camino, al igual que cualquier hormiga que regrese al nido desde la fuente de comida. De este modo, al final la mayoría, si no todas, de las hormigas terminarán por seguir la ruta superior y se consigue la convergencia en el sendero más corto.

En esencia, este comportamiento que se observa en la búsqueda de alimento en el comportamiento real de las hormigas en la naturaleza puede ser descrito de una manera computacional como una solución de un sistema multiagente inteligente, un problema de optimización para la obtención de la ruta más corta, donde los agentes del sistema son hormigas. Son estas observaciones las que motivaron el primer algoritmo de hormiga (Dorigo et al. 1996), que originalmente se aplicaron al conocido problema del viajante.

La transición de la hormiga natural a la colonia artificial involucre el uso de agentes computacionales simples que trabajen cooperativamente, y se comuniquen a través de un rastro de feromona artificial. Desde un punto de vista iterativo, cada hormiga que desarrolle su camino de un lugar S_i a otro lugar S_j , es guiada fundamentalmente por dos factores principales:

1. Una información heurística: una medida de la preferencia heurística (que es propia de cada problema) para moverse desde S_i a S_j . Esta información es conocida a priori por el algoritmo y no es modificada durante el proceso.
2. Un rastro de feromona artificial: una medición del depósito de feromona de las hormigas en iteraciones previas de S_i a S_j . En otras palabras una medición del aprendizaje " hasta ahora", un aprendizaje de la preferencia. Esta información es modificada durante el algoritmo por las hormigas artificiales.

Se exponen a continuación las propiedades principales que se asocian a la Hormiga artificial (Garcia-Martinez et al. 2004) y (Stutzle, Dorigo 2002):

- que cada hormiga artificial tiene que una memoria interna consistente en almacenar la ruta seguida por la hormiga (las rutas seguidas anteriormente).
- iniciando la ruta en una actividad $S_{initial}$, cada hormiga trata de formar una ruta viable que sea solución para el problema en particular, moviéndose de un modo iterativo por su espacio/ambiente de búsqueda.
- que los factores de orientación involucrados en el movimiento de las hormigas toman la forma de una regla de transición que se aplica antes de cada movimiento desde S_i a S_j . La regla de transición puede también incluir restricciones adicionales específicas del problema y puede utilizar también la memoria interna de las hormigas.
- La cantidad de feromona que cada hormiga deposita se regula por una regla de actualización de feromona específica de cada problema.
- Las hormigas pueden depositar feromona en los estados finales, o incluso en las transiciones.
- El depósito de feromona puede realizarse durante cada paso durante la construcción de la solución. Esto se denomina en la bibliografía existente como "online Step-by-step pheromone trial update".
- Por otra parte las hormigas pueden volver sobre sus senderos una vez la solución está completamente construida y solamente entonces se produce el depósito de feromona en las rutas individuales. Esto es conocido como "online delayed pheromone Update".

6.2.3. Características adicionales.

Además de las propiedades indicadas anteriormente, artificialmente las hormigas pueden también poseer algunas características para mejorar su rendimiento que no tiene por qué existir en su naturaleza real. Son ejemplos de éstas características adicionales ampliamente usadas el incluir la búsqueda local (Lourenco et al. 2003), (Dorigo, Gambardella 1997) y la lista de candidatas (Dorigo, Gambardella 1997), (Dorigo et al. 1999).

Dependiendo del problema en cuestión, pueden introducirse en el algoritmo acciones adicionales a través de un 'daemon' (demonio). Las acciones del 'daemon' influyen en la orientación de la búsqueda de las hormigas durante tiempo de ejecución de algoritmo y pueden ser usados para acelerar la convergencia. Un ejemplo de una acción de 'daemon' puede ser añadir una cantidad extra de feromona a la mejor solución, la cual deja un rastro adicional al final de cada iteración.

6.3. Primera formulación original: algoritmo AS (Ant System).

6.3.1. Introducción a Ant System.

El primer algoritmo de hormiga, llamado 'Ant System' (sistema de hormigas), (AS), fue desarrollado durante los años 90 por (Dorigo et al. 1996) publicado en el trabajo "Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents". Se utilizó como base de pruebas para contrastar el algoritmo el conocido problema del viajante, problema de referencia éste ampliamente conocido.

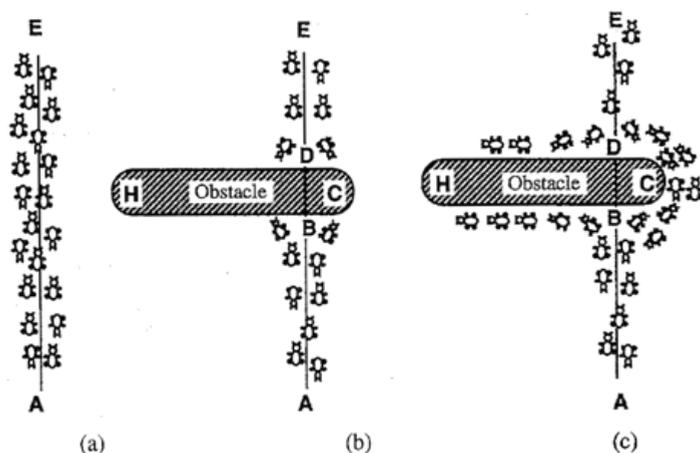


Figura 6 - 2 - a) Las hormigas van de A a E, b) Se interpone un obstáculo y eligen con una probabilidad del 50%, c) El camino más corto tiene mayor depósito de feromona (Dorigo et al. 1996)

Para un conjunto de lugares m , el problema del viajante involucra la conclusión del trayecto con la duración más breve, con la condición de que durante el viaje se visita cada lugar solamente una vez. En otras palabras, se trata de encontrarla ruta más corta para visitar cada pueblo una vez, finalizando de nuevo en el lugar de origen. En el caso de la formulación euclídea se considera la distancia del camino entre cualquier par de lugares concretos i y j como d_{ij} y su formulación corresponde con dicha distancia. Nada impide formular la distancia con otras métricas como se verá en capítulos posteriores de esta tesis, e incluso con una mezcla de todas ellas en función de aquéllas que mejor representen cada desplazamiento a realizar entre pares de actividades.

Cada hormiga del sistema cumple las siguientes características:

- Una hormiga determina qué lugar visitar usando una regla de transición que es una función de la distancia con el lugar y la cantidad de feromona presente en la ruta orientándose hacia adelante
- Los lugares ya visitados se añaden a una lista tabú y ya no pueden volver a ser seleccionados.
- Una vez completo el camino, la hormiga tiende un sendero de feromona hacia adelante sobre cada ruta que visitó en el viaje.

6.3.2. Formulación de Ant System.

La formulación que presentaron (Dorigo et al. 1996) para Ant System se aplica en este caso al problema del viajante, Las ecuaciones que se presentan se aplicarán más adelante en este trabajo, con ligeras modificaciones, al problema del FLP, pero se expone en este apartado la formulación inicial original.

Una iteración se define aquí como el intervalo $(t, t+1)$ donde cada una de las N hormigas se ha movido una vez. Entonces se define una época cada número de repeticiones, cuando cada hormiga ha terminado un trayecto completo. Después de cada etapa (iteración) se actualizan las trazas de intensidad de feromona, de acuerdo con la siguiente expresión:

$$\tau_{ij}(t+n) = \rho \cdot \tau_{ij}(t) + \Delta\tau_{ij} \quad (6-1)$$

donde ρ es un coeficiente tal que $(1-\rho)$ representa la evaporación del rastro de feromona entre las etapas t y $t+n$.

$$\Delta\tau_{ij} = \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (6-2)$$

donde $\Delta\tau_{ij}^k$ es el depósito de feromona dejado en el tramo (i,j) por la hormiga k entre las iteraciones t y $t+n$. Su valor se calcula así:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \left\{ \begin{array}{l} \frac{Q}{L_k}, \text{ si la hormiga } k \text{ pasa de } i \text{ a } j \text{ en la iteración} \\ 0, \text{ de otro modo} \end{array} \right\} \quad (6-3)$$

donde Q es una constante y L_k es la longitud de la ruta realizada por la hormiga k .

El coeficiente ρ se toma con valor <1 para impedir acumulación ilimitada de feromona; de hecho en la mayoría de aplicaciones se acota tanto superior como inferiormente. Además, suele inicializarse con un valor constante en la primera iteración para hacer equiprobable la elección de cualquier camino (al principio) y no bloquear la solución únicamente hacia las rutas hechas por los individuos de la primera iteración desde ya el inicio.

Cada vez que una hormiga elige un paso en su camino, ese lugar que visita se introduce en una lista tabú de modo que no se puede volver a visitar. Dichos pasos tabú se introducen en un vector creciente que puede designarse como $tabú_k(s)$. Un elemento s de la lista tabú se designaría como $tabú_k(s)$.

Se define también, para el caso concreto del problema del viajante, un parámetro η_{ij} que es llamado visibilidad, que para el caso concreto de este problema adoptaría el valor ($\eta_{ij} = 1/d_{ij}$). Se corresponde con la información heurística existente en el problema; en el caso concreto del FLP puede tratarse de la intensidad de flujo, los costes, las relaciones de la TRA, o cualquier otra información de que se disponga para ser utilizada durante el proceso de diseño. Esta información suele ser fija para un problema dado, sea cual sea la variante del método utilizada.

Se establece una regla de transición probabilística de i a j para una hormiga k que tiene por expresión:

$$p_{ij}^k(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k \text{ permitidos}} [\tau_{ik}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ik}]^\beta} \quad \forall j \notin s(t,k) \\ 0 \quad \forall j \in s(t,k) \end{array} \right. \quad (6-4)$$

Donde α y β son parámetros que tienen en cuenta la importancia relativa entre la feromona y la visibilidad; de este modo aquellas rutas con mayor intensidad de feromona tienen mayor probabilidad de ser escogidas según la regla indicada.

6.3.3. Algoritmos de Ant System.

A continuación se expone el algoritmo básico de funcionamiento utilizado en esta formulación de "Ant System":

Paso 1 – Inicializar

$t=0$

contador de ciclos=0

Para cada arco (i,j) fijar un valor inicial $\tau_{ij}(t)=c$, y $\Delta\tau_{ij}=0$

Colocar las m hormigas en los n puntos

Paso 2 – Poner $s=1$ (s =índice de la lista *tabú*)

Desde $k=1$ a m hacer

Colocar el nodo de origen para la hormiga k en $tabú_k(s)$.

Paso 3 – Repetir hasta que la lista *tabú* esté llena.

$s=s+1$

desde $k=1$ a m hacer

elegir el destino j al que moverse, con probabilidad $p_{ij}^k(t)$

(en la etapa t , la hormiga k está en $i = tabú_k(s-1)$)

Mover la hormiga k hacia j

Poner j en $tabú_k(s)$

Paso 4 – desde $k=1$ hasta m hacer

Mover la hormiga k desde $tabú_k(n)$ hacia $tabú_k(1)$

Calcular la longitud L_k de la ruta hecha por la hormiga k

Encontrar la ruta más corta realizada

Para cada arco (i,j)

Desde $k=1$ a m hacer

$$\Delta \tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q}{L_k}, & \text{si la hormiga } k \text{ pasa de } i \text{ a } j \text{ en la iteración} \\ 0, & \text{de otro modo} \end{cases}$$

$$\Delta \tau_{ij} = \Delta \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}^k$$

Paso 5 – Para cada arco (i,j) calcular $\tau_{ij}(t+n)$,

según la ecuación $\tau_{ij}(t+n) = \rho \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}^k$

poner $t=t+n$

poner contador=contador+1

Para cada arco (i,j) poner $\Delta \tau_{ij} = 0$

Paso 6 – si contador < contador_máximo entonces

Limpia lista tabú

Volver al Paso-2

En caso contrario mostrar camino más corto

Finalizar

6.3.4. Conclusiones del funcionamiento de AS.

Se probaron varias formas de dejar el rastro de feromona, una primera colocando el rastro en cada paso, sin finalizar el recorrido completo, y otra una vez habiendo finalizado el recorrido.

Se realizaron varios experimentos, con distintos valores de α , β , ρ . En esta formulación ρ se define como persistencia, mientras que la evaporación sería $(1-\rho)$. Las conclusiones fueron éstas:

- Las mejores soluciones se obtuvieron con valores intermedios de ρ ($\rho=0.5$).
- Con valores grandes de α el algoritmo se estanca rápido, no llegando a alcanzar soluciones realmente buenas.
- Si no se da suficiente importancia a las trazas de feromona, el algoritmo, aunque no se estanca, no encuentra buenas soluciones.
- Las mejores soluciones se obtuvieron para valores intermedios de α y β , en el intervalo $[1 \text{ a } 5]$ se obtuvieron valores igualmente buenos con un número similar de iteraciones.

- El algoritmo se comporta igualmente bien independientemente del tamaño del problema, es decir, que estos parámetros son independientes del tamaño del problema.

También se realizaron experimentos para detectar el comportamiento del algoritmo en función de que todas las hormigas partan del mismo punto, o de que cada una partiese de un punto aleatorio. También se experimentó probando alguna estrategia elitista. Los resultados fueron:

- En los test se determinó que el número óptimo de individuos está próximo al número de actividades (en este caso ciudades) del problema.
- En todos los ensayos realizados, el colocar los puntos de partida para cada hormiga de modo que estos estén uniformemente distribuidos condujo a mejores resultados.
- Se probó la estrategia elitista de reforzar la feromona en la mejor solución global; se encontró que no debe realizarse esto para todos los individuos, pues si el depósito de feromona se realiza por parte de demasiados individuos se produce la convergencia prematura, estancándose en la búsqueda de óptimos locales.
- El proceso estocástico que rige la evolución de la matriz de probabilidades es un proceso de Markov con memoria infinita, y gana peso en la decisión conforme el proceso evoluciona. Si el proceso está bien guiado habrá varios elementos no nulos en cada fila de la misma, y el proceso no se estanca.

En este planteamiento inicial, la regla de probabilidad se realiza mediante producto. Existen también numerosos desarrollos donde la regla es aditiva con suma ponderada. En el primer caso se obtiene mayor velocidad de convergencia, en el segundo dicha convergencia es más paulatina. En la presente tesis doctoral las variantes que se presentan utilizan la variante aditiva.

6.3.5. Desarrollos posteriores.

El éxito en la aplicación de “Ant System” al problema de referencia del viajante (Gambardella et al. 1999) fue grande, y esto condujo al desarrollo de la técnica metaheurística ACO (Dorigo et al. 2000b).

La técnica metaheurística ACO fue desarrollada para describir, de una manera más general, un método más global para resolver problemas combinatorios mediante soluciones aproximadas basadas en el comportamiento de hormigas reales en la naturaleza. De este modo, todas las aplicaciones específicas de la técnica metaheurística ACO

pueden ser descritas genéricamente como ‘algoritmos de colonias de hormigas’, sin embargo, los algoritmos basados en hormigas no se limitan únicamente a la técnica ACO, como se expondrá más adelante en un punto de este capítulo.

6.4. Algoritmos metaheurísticos ACO: Variantes.

6.4.1. Introducción.

Sobre el planteamiento original se han realizado numerosas variantes, las cuales se exponen en este apartado de este capítulo. Como ya se ha comentado, estas técnicas metaheurísticas ACO se han desarrollado para describir, de una manera más general, un método más global para resolver problemas combinatorios mediante soluciones aproximadas basadas en el comportamiento de hormigas reales en la naturaleza. De este modo, todas las aplicaciones específicas de la técnica metaheurística ACO pueden ser descritas genéricamente como ‘algoritmos de la hormiga’. En general estas técnicas son variantes sobre la idea original de “Ant System” que ya se ha analizado anteriormente. Cualquier algoritmo basado en ACO que se implemente sigue un algoritmo muy similar a éste (Stutzle, Hoos 2000):

```

procedure ACO algorithm for static combinatorial problems
  Set parameters, initialize pheromone trails
  while (termination condition not met) do
    ConstructSolutions
    ApplyLocalSearch      % optional
    UpdateTrails
  end
end

```

Figura 6 - 3 – Algoritmo propuesto por (Stutzle, Hoos 2000)

O de forma similar, el propuesto por (Dorigo, Blum 2005):

Algorithm 1 The framework of a basic ACO algorithm

input: An instance P of a CO problem model $P = (S, f, _)$.

InitializePheromoneValues(T)

$S_{bs} \leftarrow \text{NULL}$

while termination conditions not met **do**

$S_{iter} \leftarrow \emptyset$

for $j = 1, \dots, n_a$ **do**

$s \leftarrow \text{ConstructSolution}(T)$

if s is a valid solution **then**

$s \leftarrow \text{LocalSearch}(s)$ {optional}

if $(f(s) < f(S_{bs}))$ or $(S_{bs} = \text{NULL})$ **then** $S_{bs} \leftarrow s$

```

    Siter ← Siter ∪ {s}
  end if
end for
ApplyPheromoneUpdate(T, Siter, Sbs)
end while
output: The best-so-far solution Sbs

```

Figura 6 - 4 - Algoritmos ACO según (Dorigo, Blum 2005)

A continuación se expone las variantes ACO más relevantes publicadas hasta el momento sobre la base de “Ant System”.

6.4.2. Max-min Ant System (MMAS).

El algoritmo Max - Min Ant System (MMAS) (Stutzle, Hoos 2000) es diferente del AS original en tres aspectos principales:

- Solamente la mejor hormiga actualiza los rastros de feromona. Esta hormiga será la mejor de la iteración en curso (“local best”), o la mejor desde el inicio del proceso (“global best”).
- Para evitar la convergencia prematura, la función de actualización de feromona está acotada tanto por arriba como por abajo en el intervalo $[\tau_{\min}, \tau_{\max}]$.
- Para lograr una mayor exploración inicial del espacio de soluciones, se actualiza la matriz de trazas a un valor τ_{\max} al inicio del proceso.

Inicialmente las m hormigas se posicionan en aleatoriamente en m localizaciones. En los pasos siguientes, cada vez que una hormiga se mueve lo hace siguiendo la siguiente regla de probabilidad:

$$P_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k, \text{ permitidos}} [\tau_{ik}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ik}]^\beta} \quad \forall j \notin s(t, k) \quad (6-5)$$

La actualización de feromona se hace al final del proceso, cuando todas las hormigas han completado su recorrido, siguiendo la siguiente expresión:

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}^{k, \text{best}}(t) \quad (6-6)$$

Y el valor del depósito de traza se evalúa como sigue:

$$\Delta \tau_{ij}^{k,best}(t) = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{f(s^{best})}, \text{ si la hormiga } k \text{ pasa de } i \text{ a } j \text{ en la iteración} \\ 0, \text{ de otro modo} \end{array} \right\} \quad (6-7)$$

donde $f(s^{best})$ se corresponde con la función de coste asociada a la mejor solución de la iteración o la mejor solución global.

El acotar el valor de la feromona puede expresarse como:

$$\tau_{ij} \leftarrow \text{máx} \left\{ \tau_{\min}, \text{mín} \left\{ (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}^{k,best} \right\} \right\} \quad (6-8)$$

En esta variante se hace una discusión sobre los valores mínimos de máximos de τ a utilizar, haciendo uso de teoría de límites, llegando a la conclusión de que en todos los casos, la calidad media de la solución es mejor cuando se usan valores límite bajos para el depósito de feromona.

En general, también es beneficioso inicializar la matriz de trazas de la forma indicada, salvo en el caso de problemas con poca complejidad y escaso número de actividades.

Otra conclusión es que los resultados fueron mucho mejores utilizando el criterio de actualización de feromona basado en el mejor de cada iteración, frente al mejor global; esto lo ratifica el hecho de que el peor resultado entre todos los ensayos realizados con la actualización por el mejor individuo de cada iteración, es mejor que la media de los logrados con la actualización por la mejor solución global.

6.4.3. Ant Colony System (ACS).

El sistema de colonias de hormigas (ACS) (Dorigo, Gambardella 1997), (Gambardella, Dorigo 1996); el algoritmo de (Gambardella, Dorigo 1996) es diferente principalmente por tres cosas:

- ACS usa una regla de transición diferente, llamada 'regla proporcional pseudoaleatoria'. Si se tiene una hormiga k ubicada en la posición i , $q_0 \in [0, 1]$ es un parámetro, y q un valor aleatorio en $[0, 1]$, entonces el siguiente nodo, j , es escogido de acuerdo con la siguiente regla de probabilidad:

$$\begin{aligned}
 & \text{si } q \leq q_0 : \\
 & \rightarrow p_{ij}^k(t) = \begin{cases} 1 & \text{si } s = \arg \max [\tau_{ij}(t) \cdot [\eta_{ij}]^\beta] \quad \forall j \notin s(t, k) \\ 0 & \forall j \in s(t, k) \end{cases} \\
 & \text{si } q > q_0 : \\
 & \rightarrow p_{ij}^k(t) = \begin{cases} \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k \text{ permitidos}} [\tau_{ik}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ik}]^\beta} & \forall j \notin s(t, k) \\ 0 & \forall j \in s(t, k) \end{cases}
 \end{aligned} \tag{6-9}$$

- Sólo el “daemon” o demonio actualiza la feromona, con una estrategia que se denomina “actualización de feromona offline”, y no cada hormiga individual, para ello ACS considera sólo la hormiga que genera la mejor solución global, según la expresión siguiente:

$$\begin{aligned}
 \tau_{ij} & \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} \\
 \tau_{ij} & \leftarrow \tau_{ij} + \rho \cdot f(S^{\text{global-best}})
 \end{aligned} \tag{6-10}$$

- Más de acuerdo con el comportamiento natural de las hormigas, ACS utiliza una actualización de feromona local, además de la feromona ya comentada que se actualiza al final de cada iteración (la actualización de feromona que fue llamada ‘offline’ anteriormente, fuera de línea). Cada hormiga lleva a cabo la actualización de feromona después de cada paso de construcción, aplicando feromona al último sendero atravesado de acuerdo con la siguiente función de actualización (llamada en las referencias “step-by-step pheromone trail update”), actualización de feromona paso a paso (donde τ_0 es el valor inicial de feromona):

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \rho \cdot \tau_0 \tag{6-11}$$

6.4.4. Ranked based Ant System (AS_{rank}).

El sistema de hormigas AS_{rank} (Bullnheimer et al. 1997, Bullnheimer et al. 1999, Narasimha, Kumar 2011) incluye el concepto de ranking en el procedimiento de actualización de la feromona. Se clasifican las N hormigas de acuerdo a su calidad decreciente de sus soluciones, (por ejemplo, la longitud de sus trayectos). Las trazas de feromona son actualizadas fuera de línea en forma de una acción de ‘daemon’ de modo que solamente las $\sigma - 1$ rutas de las mejores hormigas reciben una cantidad de feromona, y la cantidad a depositar depende del rango de la hormiga en el ranking y por lo tanto de la calidad de

su solución directamente. Además, las rutas atravesadas por la mejor solución global, L_{gb} , recibe un cantidad adicional de feromona que depende de la calidad de esa solución, ponderada por el parámetro σ .

La expresión para actualizar las trazas de feromona sería la siguiente:

$$\tau_{ij} = \rho \cdot \tau_{ij} + \Delta \tau_{ij}^{global-best} + \Delta \tau_{ij}^{rank} \quad (6-12)$$

donde:

$$\Delta \tau_{ij}^{rank} = \begin{cases} \sum_{\mu=1}^{\sigma-1} (\sigma - \mu) \frac{Q}{L_{\mu}} & \text{si la hormiga } \mu \text{ pasa por } (i, j) \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (6-13)$$

$$\Delta \tau_{ij}^{global-best} = \begin{cases} \sigma \frac{Q}{L^{global-best}} & \text{si la mejor hormiga pasa por } (i, j) \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}$$

6.4.5. Comparativa entre las técnicas descritas.

Como se muestra en (Dorigo et al. 2000b), que comparan el rendimiento de los cuatro algoritmos de hormiga descritos, realizando un análisis basado en el rendimiento de cada uno de estos algoritmos aplicados a varios ejemplos de referencia. De estos resultados puede extraerse el resultado de cada uno de ellos para los problemas de referencia utilizados. El algoritmo de MMAS (Stutzle, Hoos 2000) fue el que mejor funcionó, seguido de ACS, después de AS_{rank} , y AS fue el peor de los cuatro.

La inclusión de estos resultados aquí se hace simplemente a título de ofrecer una idea sobre el rendimiento que ofrecen tales modificaciones algorítmicas. Para mayor detalle de estos resultados y los parámetros de los experimentos consultar (Lopez-Ibanez, Stutzle 2012).

Desde un planteamiento más general, en el trabajo realizado por (Dorigo, Blum 2005) se realizan una serie de análisis sobre las directrices generales de algoritmos ACO, y se proponen una serie de teoremas y límites para algunos de los parámetros que guían la búsqueda, que constituyen una serie de reglas generales de utilidad en la formulación de las variantes sobre estos algoritmos.

6.5. Técnicas MOACO (multiobjetivo).

6.5.1. Introducción.

En muchos problemas de optimización de la vida real hay varios objetivos a optimizar. Para tales problemas de objetivo múltiple, no existe generalmente una única mejor solución, sino un conjunto de soluciones que mejoran a las demás respecto de algunos de los objetivos.

Este juego es llamado conjunto de Pareto o soluciones no dominadas. Esta multiplicidad de las soluciones se explica por el hecho de que los objetivos son en general opuestos. Por ejemplo, si se quiere elegir un automóvil usado para comprar, lo queremos en buen estado, pero también lo más barato que sea posible. Más formalmente, un problema de optimización de objetivo múltiple

(MOP) puede definirse por un cuarteto (X, D, C, F) donde ese X es un vector de n variables de decisión, i.e., $=$ de $X(x_1, \dots, x_n)$; D es un vector de n que fija el valor de los dominios de las variables de decisión, i.e., $=$ de $D(d_1, \dots, d_n)$; C es un conjunto de restricciones sobre X , i.e., un conjunto de ligaduras que restringen los valores que las variables puede tomar simultáneamente; y F es un vector de $m \geq 2$ funciones objetivo. $F(X) = (F_1(X), F_2(X), \dots, F_m(X))$; sin pérdida de generalidad, se asume que estas funciones objetivo diferentes deben ser todas minimizadas (en ocasiones las funciones deben ser maximizadas, puede simplemente multiplicarse por -1).

El espacio de las soluciones candidato, llamado $E(X, D, C)$, es el conjunto de valores v de D que satisface todas las restricciones de C . Se define un orden parcial de relación de la siguiente manera: una solución v de $E(X, D, C)$ domina a otra v' de $E(X, D, C)$, si v es por lo menos tan buena como v' para cada uno de los m criterios a optimizar, y estrictamente mejor que v' para al menos uno de éstos.

El objetivo de un MOP (X, D, C, F) es descubrir el conjunto de Pareto de todas as soluciones no dominadas.

Uno de los primeros esfuerzos de desarrollo se hizo en (Garcia-Martinez et al. 2007), clasificando los algoritmos existentes de acuerdo con el uso de una o varias matrices de feromona y el uso de una o varias matrices de información heurística. Se expone también un estudio comparativo experimental para el bTSP de estos algoritmos analizados.

En esta tesis, se propone un enfoque sobre la base de Ant Colony Optimización (ACO) para resolver esta clase de problemas.

En este apartado de este capítulo se describen las características principales de los algoritmos ACO existentes para solucionar problemas de objetivo múltiple. En primer lugar se presenta un algoritmo ACO genérico para los problemas de objetivo múltiple, que es una generalización de los enfoques propuestos previos. En segundo lugar se presentan cuatro particularizaciones diferentes de este algoritmo genérico, y finalmente se describen la mochila multiobjetivo. Los estudios experimentales y criterios para la elección del método más adecuado para el estudio de cada problema pueden consultarse en (Alaya et al. 2007).

También pueden plantearse todos los algoritmos de MOACO como algoritmos compuestos de un algoritmo ACO subyacente cuyas reglas se usan para construir las soluciones (de entre los ya analizados, AS, MMAS, etc.) o actualizar la feromona. Estos algoritmos pueden ser extendidos a través de componentes específicas que los hacen adecuados a resolver los problemas de optimización de objetivo múltiple. A decir verdad, los algoritmos de MOACO existentes pueden ser clasificados en tales términos, como indica (Lopez-Ibanez, Stutzle 2012). Según ellos indican, podría definirse cualquier técnica MOACO siguiendo esta expresión:

MOACO = Técnica ACO utilizada + componentes específicos Multiobjetivo

La técnica ACO será alguna de las aquí ya expuestas (AS, MMAS, ACS, ...).

6.5.2. Problemas multiobjetivo con ACO.

Diferentes trabajos han presentado los algoritmos ACO para resolver los problemas de objetivo múltiple. Estos algoritmos difieren principalmente respecto a los tres puntos siguientes:

- **Trazas de feromona:** La cantidad de feromona a colocar en una componente representa la experiencia pasada de la colonia con respecto a la elección de este componente. Cuando hay solamente un objetivo, esta experiencia pasada se define con respecto a este objetivo. Sin embargo, cuando hay varios objetivos, pueden considerarse dos estrategias diferentes.

Una primera estrategia es considerar una única estructura de feromona, como se propone en (Mariano, Morales 1999), (Gravel et al. 2002) y (McMullen 2001). En este caso, la cantidad de feromona colocada por las hormigas es definida con respecto a un conjunto de los distintos objetivos. Una segunda estrategia es considerar varias estructuras de feromona, como se propone en (Gambardella et al. 1999, Iredi et al. 2001, Doerner et al. 2004, Bullnheimer et al. 1999). En este caso, cada estructura se asocia generalmente a un objetivo diferente y a una colonia de hormigas diferente; cada colonia tiene su propia estructura de feromona.

- **Selección de soluciones:** Cuando se actualizan los senderos de feromona, hay que decidir cuál o cuáles de las soluciones obtenidas dejarán rastro de feromona. Una primera posibilidad es que sólo las mejores soluciones que encuentren los mejores valores para cada criterio en el ciclo actual dejen rastro, como se propone en (Doerner et al. 2004, Dorigo, Gambardella 1997). Una segunda posibilidad es que la deje cada solución no dominada del frente de Pareto. En este caso, pueden dejar traza todas las soluciones del frente de Pareto, o solamente las nuevas soluciones no dominadas de la iteración actual, como se propone en (Iredi et al. 2001).
- **Definición de los factores heurísticos:** Cuando se formulan las soluciones, a cada paso que da un candidato, se utiliza una probabilidad de transición que depende de dos factores: uno el factor de feromona y otro un factor heurístico. La definición de la feromona del primer factor depende de la definición de la feromona explicada anteriormente. Para la definición del factor heurístico, se plantean dos estrategias diferentes. Una primera estrategia es considerar un conjunto de entre los diferentes objetivos en una única matriz heurística con toda la información, como se propone en (Doerner et al. 2004, Bullnheimer et al. 1997, Gravel et al. 2002). Una segunda estrategia es considerar cada objetivo diferente por separado, como se propone en (Mariano, Morales 1999), (Iredi et al. 2001), (Gambardella et al. 1999). En este caso, generalmente hay una colonia distinta para cada objetivo.

6.5.3. Algoritmos MOACO: Bicriterion Ant.

Desarrollado en (Iredi et al. 2001) es un algoritmo MOACO biobjetivo que usa matrices tanto heurísticas como de feromona distintas para cada objetivo, las cuales se combinan por medio de un producto ponderado. Las expresiones son las siguientes:

$$\begin{aligned}\tau_{ij} &= (\tau_{ij}^1)^{(1-\lambda_k)} \cdot (\tau_{ij}^2)^{(\lambda_k)} \\ \eta_{ij} &= (\eta_{ij}^1)^{(1-\lambda_k)} \cdot (\eta_{ij}^2)^{(\lambda_k)}\end{aligned}\tag{6-14}$$

donde τ_1 y τ_2 son las matrices de trazas con la feromona de ambos objetivos, y η_1 y η_2 las matrices heurísticas que contienen la información de cada objetivo. Cada peso $0 \leq \lambda_k \leq 1$ se asocia a una hormiga k , por tanto hay tantos pesos como hormigas.

En la propuesta original, (Iredi et al. 2001) sugieren actualizar las matrices de trazas utilizando un conjunto de soluciones no dominadas encontradas en cada iteración. Sin embargo, esta aproximación sólo funciona si las matrices de feromona son heterogé-

neas, esto es, cuando cada matriz de feromona posee elementos distintos en la solución. Para el bTSP y otros problemas, esta actualización redundante en varias matrices similares que no aportan información adicional, como se indica en (Lopez-Ibanez, Stutzle 2012). (Garcia-Martinez et al. 2007) propone actualizar las matrices de feromona con los mejores valores de las funciones objetivo para cada criterio y su matriz correspondiente.

6.5.4. Algoritmos con múltiples colonias de hormigas.

Recibe el nombre de MACS (Multiple Ant Colony System), y fue propuesto por (Pinto et al. 2005). Difiere del anteriormente expuesto Bicriterion Ant en el uso de una única matriz de feromona en vez de varias. Como sucede en BA, MACS usa varias matrices heurísticas para cada objetivo, que se agrega por medio de producto ponderado con diferentes pesos para hormiga k , como ya se expuso.

En MACS la información de la traza se actualiza con las soluciones no dominadas. Sin embargo, usa un incremento $\Delta\tau=1$ para el depósito de feromona, dado que todas las soluciones actualizan la misma matriz de trazas.

6.5.5. COMPETants.

La propuesta original se hizo en (Doerner et al. 2002), formulada como una colonia multiobjetivo con una colonia para cada objetivo. Cada colonia tiene una matriz heurística y otra de feromona y construye sus soluciones de forma independiente, exceptuando a un pequeño número de hormigas llamadas "espías", las cuales agregan ambas matrices de feromona mediante suma ponderada (con pesos iguales) usando también la primera o la segunda matriz heurística, creando de este modo dos soluciones. Finalmente, un número de hormigas de cada colonia se usan para actualizar cada matriz de feromona de sus colonias.

Es posible formular COMPETants como un algoritmo de una única colonia que usa múltiples matrices tanto heurísticas como de feromona, que son agregadas mediante suma ponderada. En primer lugar deben definirse los pesos como $[0,0.5,1]$.

$$\tau_{ij} = (1 - \lambda_k) (\tau_{ij}^1) + \lambda_k \cdot (\tau_{ij}^2) \tag{6-15}$$

El criterio de actualización de feromona difiere tanto de BA como de MACS. En la formulación de una única colonia, cada matriz se actualiza con la mejor solución respecto de su objetivo.

Para simplificar, puede hacerse que cada tercio de las hormigas usen uno de los pesos, aunque también puede modificarse esto conforme el algoritmo evolucione. Como en MMAS, cada matriz de trazas se actualiza sólo con una solución, la mejor respecto al objetivo que le corresponde. Se usa un incremento de traza $\Delta\tau=1$ como depósito, dado que las soluciones usadas para actualizar cada objetivo son distintas, pueden tener valores muy diferentes.

6.5.6. Pareto Ant Colony Optimization (P-ACO).

Recibe el nombre de P-ACO (Pareto Ant Colony Optimization), y fue propuesto por (Doerner et al. 2004). Se caracteriza por la utilización de varias matrices de feromona, una para cada objetivo, que se agregan por medio de suma ponderada, frente al producto ponderado que se usa en BA. Cada hormiga k usa un conjunto de pesos distinto para agregar las matrices de feromona. Cada matriz se actualiza con la mejor solución y la segunda mejor para el objetivo correspondiente a cada una de ellas. Esto es equivalente al criterio elitista de actualización de COMPETants, pero con dos individuos en lugar de uno. Se utiliza un depósito constante de feromona $\Delta\tau=1$.

En la propuesta original se considera una única matriz heurística, dado que es complicado en ocasiones definir esta información heurística de forma apriorística para todos los objetivos. En publicaciones posteriores, y dependiendo del problema a resolver, se utilizan con bastante éxito numerosas matrices heurísticas, una para cada objetivo, como en (Schilde et al. 2009); estas matrices se agregan del mismo modo que las de trazas, mediante suma ponderada.

Aunque suele ser más ventajosa la configuración del algoritmo utilizando varias matrices heurísticas, en este trabajo se implementará sólo una agregada dada la dificultad de definir esta información para algunos de los objetivos del problema del FLP a resolver.

6.5.7. Algoritmo m-ACO genérico para problemas multiobjetivo.

En este apartado, se expone una base de algoritmo ACO genérico para problemas de objetivo múltiple. Este algoritmo será expuesto en variantes diferentes que se describirán más adelante.

El algoritmo genérico, llamado m-ACO, expuesto en (Alaya et al. 2007), está implícitamente parametrizado por el problema multiobjetivo (“Multi Objective Problem”) $MOP (X, D, C, F)$ a resolver, tal que X es un vector con las n variables de decisión, D un vector con los n conjuntos que definen los dominios de las variables, C es el conjunto de restricciones en X , y F es el vector con las $m \geq 2$ funciones objetivo (F.O.). En este caso se considera que las hormigas construyen las soluciones a modo de grafo $G (V, E)$ cuya definición depende del problema a resolver, y que los rastros de feromona se asocian a los vértices y/o aristas de este grafo. También se asume que la información heurística se define para cada objetivo.

m-ACO está también parametrizado por el número de colonias de hormigas ($\# Col$) y el número de estructuras de feromona consideradas. Básicamente, el algoritmo sigue el esquema de MAX - MIN Ant System (Stutzle, Hoos 2000) (MMAS). Inicialmente, se inicializan las trazas de feromona hasta un valor límite superior como ya se explicó en la exposición del algoritmo original. Entonces, en cada iteración cada hormiga construye una solución, y se actualizan las trazas de feromona. Para prevenir la convergencia prematura, se limitan las trazas de feromona entre los límites máximo y mínimo. El algoritmo finaliza cuando se llega al número máximo de iteraciones indicado.

6.5.7.1. Construcción de soluciones.

En cada iteración, se escoge un vértice del grafo de construcción G de entre un conjunto de vértices candidato; éste es añadido a la solución S y el conjunto de vértices candidato es actualizado retirando el vértice añadido. El vértice v_i a ser añadido a la solución S por la hormiga de la colonia es escogido al azar, siguiendo una regla de probabilidad definida de la siguiente manera:

$$P_{ij}^k(t) = \frac{[\tau_{ij}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ij}]^\beta}{\sum_{k \text{ permitidos}} [\tau_{ik}(t)]^\alpha \cdot [\eta_{ik}]^\beta} \quad \forall j \notin s(t, k) \quad (6-16)$$

Donde alfa y beta son las ponderaciones correspondientes a la feromona y a los factores heurísticos del vértice candidato v_i (son dos parámetros que determinan su importancia relativa).

La definición de estos dos factores depende del problema a resolver y son los mismos que se explicaron en la exposición de los algoritmos monocriterio.

6.5.7.2. Actualización de feromona.

En cuanto todas hormigas han formulado sus soluciones, los senderos de feromona son actualizados como habitualmente en los algoritmos ACO: En primer lugar, los senderos

de feromona son reducidos por una constante que simula la evaporación ($\rho \in [0,1]$); después, se coloca cierto rastro de feromona sobre las componentes de la mejor solución.

$$\tau_{ij} \leftarrow (1 - \rho) \cdot \tau_{ij} + \Delta \cdot \tau_{ij} \quad (6-17)$$

En algunas referencias como (Ghezail et al. 2006) y otras, aparecen las expresiones para el cálculo de la traza a partir de multiplicar por (ρ) el incremento de traza actual y sumarle $(1-\rho)$ por la traza anterior. En la opinión del autor de este trabajo, esto no es correcto, pues si se parte de un dato de evaporación nula, por ejemplo, al multiplicar la traza actual siempre por un valor nulo, la feromona no guiaría el proceso, manteniéndose constante e igual a la inicial la matriz de trazas, produciéndose el efecto contrario al deseado. Por lo tanto, proponemos, como así se hace en parte de la bibliografía consultada, multiplicar el incremento de traza por 1 y la traza anterior, ésta sí, por $(1-\rho)$.

En el tratamiento del valor de las trazas puede optarse por dos estrategias: una agregativa pura que luego transforma en probabilidad los mismos, y otra que normaliza los valores para que ya aparezcan en las casillas correspondientes con valores que como máximo son la unidad. En este caso se ha optado por normalizar los valores tras cada iteración, de modo que se suman todos y se divide cada uno de ellos por el total obtenido, siendo el mayor valor, en el límite, la unidad, quedando con el aspecto siguiente:

Tabla 6 - 1 – Matriz de trazas algoritmo ACO normalizada

0	0.01	0	0	0.51	0	0	0	0.37	0.01	0.07	0.1	0.01	0	0	0	0	0.01	0	
0	0	0	0	0	0	0.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.15	0	0
0.37	0	0	0	0.36	0	0.15	0	0	0	0	0.31	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0.02	0.13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.92	0
0.05	0	0	0	0	0.59	0	0	0	0.01	0	0	0	0.21	0	0	0	0.13	0	0
0	0	0.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.09	0.08	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0.95	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.94
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.74	0	0	0	0.3	0	0
0.02	0	0	0	0	0	0	0	0.53	0	0	0.49	0	0	0	0	0	0	0	0
0.41	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.03	0	0.29	0.02	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.82	0	0	0.01
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.95	0	0	0	0
0	0	0.16	0	0	0	0	0	0.06	0	0	0	0.74	0	0	0	0	0	0	0
0.08	0	0	0.88	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.88	0.05	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0.05	0	0	0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0.92	0	0	0	0
0	0	0	0	0.05	0.17	0	0	0	0	0	0	0.2	0	0	0	0.04	0	0	0

0	0.92	0.02	0.02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.03	0	0	0	0	0	0	0	0	0.92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

6.5.8. Variantes del algoritmo m-ACO para problemas multiobjetivo.

Se proponen las siguientes variantes en (Alaya et al. 2007), que siguen exponiéndose casi en sentido literal en publicaciones posteriores y recientes como (Lopez-Ibanez, Stutzle 2012):

6.5.8.1. m-ACO1 (m+1,m) para problemas multiobjetivo.

Para esta variante, el número de colonias #Col se toma como $m + 1$ y el número de las estructuras de feromona como m , donde $m = |F|$ Es el número de los objetivos a optimizar. Cada colonia considera un único objetivo diferente, usando su propia estructura de feromona e información heurística.

Para desarrollar las soluciones, se añade una colonia de objetivo múltiple adicional que tiene por objetivo optimizar todos los objetivos.

- **Definición de feromona:** El factor de feromona a considerar por cada colonia es la de un solo objetivo, y cada colonia tiene por objeto optimizar una única función objetivo, que se define con respecto a la estructura de feromona correspondiente a ese objetivo; dependiendo de la aplicación considerada, puede definirse como la cantidad de feromona a colocar en los vértices o en las aristas de la solución.

El factor de feromona a utilizar por la colonia de objetivo múltiple es escogido al azar para cada iteración de entre todos los existentes.

- **Definición de los factores heurísticos.** El factor heurístico a utilizar por cada colonia que busca un único objetivo es la información heurística correspondiente a ese objetivo.

El factor heurístico de la colonia $m+1$ de objetivo múltiple es la suma de informaciones heurísticas del resto de objetivos.

- **Actualización de feromona:** Para cada colonia con un solo objetivo, se coloca feromona sobre los componentes de la mejor solución obtenida por la colonia para ese único objetivo. El valor del rastro depende tanto de la calidad de la solución del objetivo como de la mayor solución global obtenida en todo el proceso hasta ese momento.

De la colonia que minimiza todos los objetivos mantiene un conjunto de soluciones que se corresponden con las mejores de cada objetivo. Ésta deja feromona en cada estructura de feromona mono objetivo.

6.5.8.2. m-ACO2 ($m+1,m$) para problemas multiobjetivo.

Esta variante es bastante parecida a la anterior. Para esta variante, el número de colonias # Col se toma también como $m + 1$ y el número de las estructuras de feromona como m , donde $m = |F|$ Es el número de los objetivos a optimizar. Cada colonia considera un único objetivo diferente, usando su propia estructura de feromona e información heurística.

Para desarrollar las soluciones, se añade una colonia de objetivo múltiple adicional que tiene por objetivo optimizar todos los objetivos, al igual que en la variante anterior. La única diferencia es que la matriz de feromona de esta colonia multiobjetivo se construye agregando la información de la feromona del resto de colonias mono objetivo.

6.5.8.3. m-ACO3 (1,1) para problemas multiobjetivo.

En este caso, solo se utiliza una colonia de hormigas y una estructura de feromona.

- **Definición de feromona:** El factor de feromona a considerar es único para toda la colonia.
- **Definición de los factores heurísticos.** El factor heurística utilizar por la única colonia se corresponde con la suma de la información heurística correspondiente a todos los objetivos, condensados en una única matriz heurística.
- **Actualización de feromona:** Una vez finalizada cada iteración, se almacenan todas las soluciones no dominadas en el frente de Pareto. La cantidad de feromona a colocar es 1, y se hace sobre los componentes de todas las soluciones no dominadas

6.5.8.4. m-ACO4 (1, m) para problemas multiobjetivo.

En este caso, solo se utiliza una colonia de hormigas, pero tantas estructuras de feromona como objetivos.

- **Definición de feromona:** En cada paso de la construcción de la solución, se escoge aleatoriamente un objetivo a optimizar. El factor de feromona a considerar en cada paso es el del objetivo seleccionado.

- **Definición de los factores heurísticos.** El factor heurístico a utilizar por la única colonia se corresponde con la suma de la información heurística correspondiente a todos los objetivos, condensados en una única matriz heurística.

- **Actualización de feromona:** Una vez finalizada cada iteración, se almacena la mejor solución obtenida para cada objetivo. La cantidad de feromona a colocar depende de la calidad de la solución mono objetivo y de la calidad de la mejor solución global obtenida.

6.5.8.5. Comparativa de los métodos propuestos:

En (Alaya et al. 2007) se realiza una comparativa de estas técnicas, llegándose a la conclusión de que la que mejores resultados obtiene para el caso multiobjetivo es mA-CO4, tanto para problemas de menor tamaño como para problemas mayores. Esto probablemente se debe a la elección aleatoria a cada paso del criterio a optimizar, lo que no condiciona en absoluto la guía de la búsqueda para ningún criterio en concreto, lo que hace explorar más ampliamente el espacio de soluciones.

Experimentos posteriores realizados por (Lopez-Ibanez, Stutzle 2012) comparando diversas técnicas multicriterio, pero en este caso para el problema del viajante, obtuvieron gráficas con el rendimiento de las distintas variantes de los algoritmos descritos que se muestran a continuación:

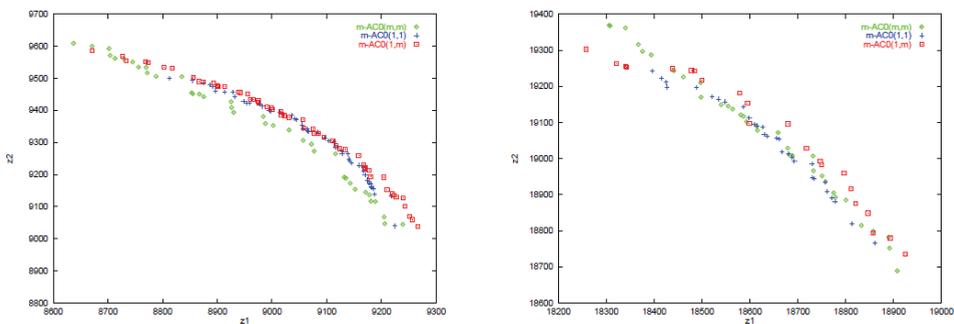


Figura 6 - 5 – Gráficas comparativas de las técnicas propuestas con 250 y 500 individuos (Alaya et al. 2007).

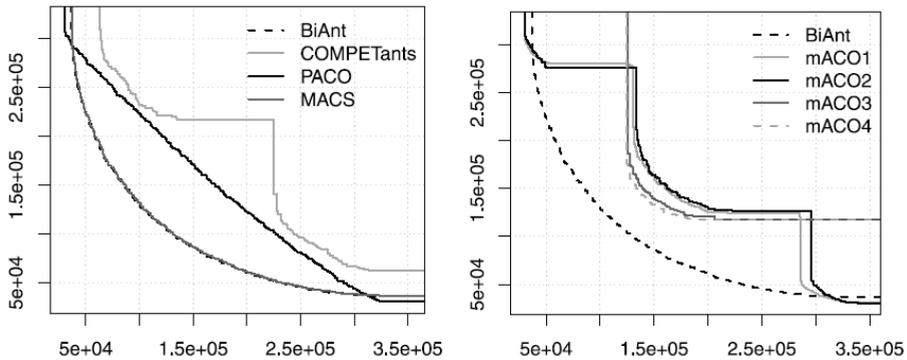


Figura 6 - 6 – Comparativa de las distintas técnicas MOACO (Lopez-Ibanez, Stutzle 2012).

En los análisis realizados por (Lopez-Ibanez, Stutzle 2012), las que mejores resultados obtuvieron fueron BiCriterionAnts, mACO4 y P-ACO. En el caso de este trabajo se han adoptado como métodos P-ACO y mACO4, por servir para un número de criterios indeterminado (en este caso se contemplan hasta 4) de modo que se facilitarán desarrollos posteriores implementando más criterios sobre el mismo soporte implementado.

6.6. Formulación del algoritmo para el caso del FLP.

El algoritmo de colonias de hormigas se basa, como ya se ha indicado anteriormente, en el establecimiento de una analogía entre el mecanismo natural que utilizan las hormigas para encontrar y explotar una fuente de alimentos, basado en el rastro de feromona que dejan en su recorrido de búsqueda, y el proceso de optimización desarrollado. Se expone aquí en concreto qué representa cada uno de los elementos de que constan estos algoritmos en el caso particular del problema del FLP. Aunque se han formulado técnicas multicriterio, en este caso y sin pérdida de generalidad, se plantea la explicación con un único objetivo, mediante una función objetivo designada por V .

Así, cuando un conjunto de H hormigas salen del hormiguero en busca de alimento la trayectoria de cada una de ellas será aleatoria e iniciarán un proceso de búsqueda en el que cada hormiga irá dejando un rastro de feromona. La primera hormiga que encuentra alimento volverá al hormiguero siguiendo la traza que ha dejado lo que, además de permitirle regresar al punto de partida, reforzará la intensidad de la traza en ese recorrido exitoso. Cuando un nuevo conjunto de hormigas salga ahora del hormiguero la probabilidad de selección de una trayectoria es directamente proporcional a la intensidad de la traza, lo que permite la explotación de las fuentes de alimentos sin impedir, dado el

carácter aleatorio de la selección del camino, la exploración de nuevas fuentes. La evaporación natural de la feromona también incide en la apertura de nuevas vías de exploración.

En el caso concreto de este problema, los caminos seguidos por las hormigas representan la secuencia de colocación de las actividades involucradas en el proceso. Se recuerda que en el ámbito del FLP se definió en un capítulo anterior el concepto de actividad o “facility” como: “cualquier elemento del sistema de producción que tiene unos requerimientos espaciales”. Por lo tanto, cada hormiga, en cada iteración, genera una secuencia de actividades que, teniendo un soporte de colocación definido (se recuerda que se utiliza un soporte tipo ALDEP, como se expuso en el capítulo correspondiente), conduce a una distribución en planta concreta.

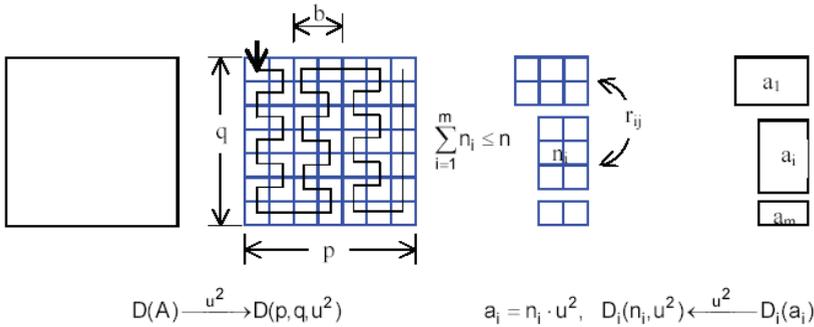


Figura 6 - 7 - Representación del modelo geométrico adoptado.

El soporte de colocación puede dejarse como un valor fijo o variable, en los parámetros que lo definen: tamaño de celda discreta, ancho de banda y ratio global del dominio de ubicación. En el caso de dejarlos variables, a su vez puede darse la opción de que éstos sean aleatorios, o de que utilicen criterios de herencia basados en la traza (tanto para el ratio global como para el ancho de banda), adquiriendo más probabilidad de persistencia en las sucesivas iteraciones los ratios y los anchos de banda que conducen a las mejores soluciones.

El mecanismo de búsqueda de cada hormiga, tal y como ya se ha comentado, se basa en la información almacenada en la memoria colectiva del sistema grabada químicamente en el soporte físico del suelo (las trazas de feromona ya comentadas), en la memoria a corto plazo o tabú que impide que una hormiga retorne por el mismo camino sin alimento (lista de actividades a ubicar en la planta bidimensional) y en el sistema de “sensorización” de cada hormiga que le permite hacer búsquedas en la vecindad y orientarse localmente (lo que se llama información heurística). Estos tres elementos configuran la estructura del algoritmo.

Un algoritmo de colonias de hormigas se configura a partir de un conjunto de H hormigas y de una secuencia de T etapas o pasos. En cada etapa de índice t , cada una de las H hormigas construye una solución $s(t,k)$. Las hormigas construyen su solución asignando a cada posición j de $s(t,k)$ una actividad i de modo que $s(t,k,j)=i$. Para una etapa t cada una de las hormigas en su proceso de construcción de la solución deja en la matriz de recorridos o de trazas (actividad, posición) un rastro de intensidad proporcional a la calidad de la solución obtenida. La traza puede depositarse tanto sobre la posición como sobre el arco. El incremento de traza se calcula (para un caso en el que el objetivo únicamente fueran las relaciones de adyacencia):

$$\Delta\tau(t,k,i,j) = \frac{V(s(t,k))}{V_{\max}} \quad \forall i,j / s(t,k,j) = i. \quad (6-18)$$

El incremento total de traza que dejan el conjunto de las H hormigas en una etapa t puede ponerse como:

$$\Delta\tau(t,i,j) = \sum_{k=1}^H \Delta\tau(t,k,i,j). \quad (6-19)$$

La evaporación es una operación de atenuación que permite nuevas exploraciones en el espacio de soluciones. Una evaporación nula explotaría en exceso la solución actual provocando convergencias prematuras. De este modo el total de la traza al final de una etapa t teniendo en cuenta la tasa de evaporación ρ puede ponerse como:

$$\tau(t,i,j) = (1-\rho) \cdot \tau(t-1,i,j) + \Delta\tau(t,i,j) \quad (6-20)$$

En una etapa t , una hormiga k selecciona una actividad i para asignarla a una determinada posición j ,

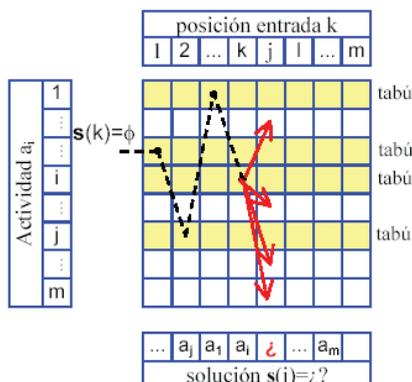


Figura 6 - 8 - Estrategia seguida por la hormiga k en la construcción de la solución $s(k)$.

La construcción de la solución se hace a partir de la probabilidad de que una hormiga k seleccione una actividad i para una posición j , $p(t, k, i, j) = p(s(t, k, j) = i)$ que se determina a partir de los siguientes tres criterios:

- Una lista tabú constituida por el conjunto de actividades ya asignadas hasta la posición $j-1$ y que no son candidatas para la posición j . Esta lista tabú, incluida en el vector solución $s(t, k)$ que construye la hormiga k constituye su memoria individual a corto plazo.
- La matriz de traza $T(t, i, j)$ que es la información histórica del proceso modificada por la evaporación y constituye la memoria colectiva del sistema y que indica cual ha sido la mejor asignación a una determinada posición j hasta el paso t .
- Un criterio de máximo aprovechamiento o de búsqueda local por el que una hormiga k intenta seleccionar para la posición j la actividad i que potencialmente maximice el valor de la fracción de la solución construida (este criterio es similar al de la visibilidad utilizado en (Dorigo et al. 1996) y la valoración es análoga a la presentada en CORELAP (Lee, Moore 1967).

En realidad, lo que se hace es depositar la feromona en el arco, no en la posición. De este modo la probabilidad de que la hormiga k asigne la actividad i a la posición j en la etapa t viene definida por:

$$p(t,k,i,j) = \begin{cases} 0 & \forall i \in s(t,k) \\ \alpha \cdot \frac{\tau(t,i,j)}{\sum_{\forall \ell \in s(t,k)} \tau(t,\ell,j)} + \beta \cdot \frac{\sum_{\forall q \in s(t,k)} V(r_{iq})}{\sum_{\forall \ell \in s(t,k)} \sum_{\forall q \in s(t,k)} V(r_{i\ell})} & \forall i \notin s(t,k). \end{cases} \quad (6-21)$$

debiendo cumplirse que $\alpha + \beta = 1$. Donde α es el coeficiente que muestra la ponderación asociada a la memoria colectiva frente a β que representa la ponderación de la búsqueda local en la configuración de la estrategia de optimización del algoritmo.

Aunque en la mayoría de formulaciones existentes en la bibliografía, los valores de alfa y beta oscilan entre 1 y 5, dado que dichos parámetros sólo miden la importancia relativa del uno frente al otro, en este trabajo se ha optado por normalizar y hacer que la suma de ambos sea igual a 1.

Definida la probabilidad de selección de cada una de las actividades candidatas a la posición j la hormiga k selecciona una actividad i por el "método de la ruleta". De este modo cada una de las H hormigas construye una solución en cada etapa t .

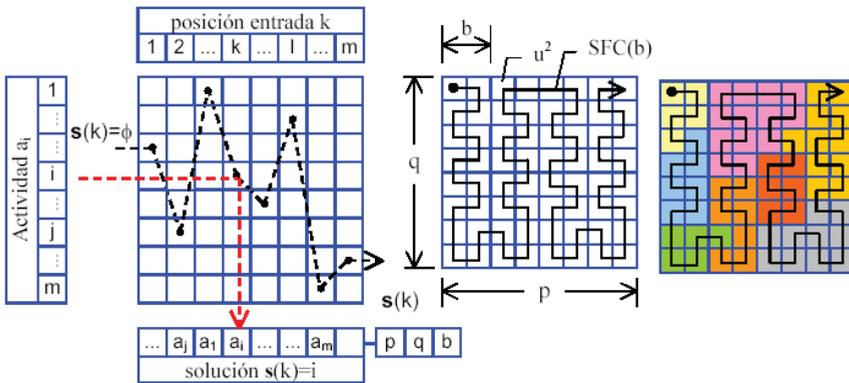


Figura 6 - 9 - Construcción y representación de una solución.

El criterio de parada del algoritmo se establece bien por convergencia, cuando tras C etapas la mejor solución no cambia o bien se limita el máximo número de etapas. El sencillo pseudocódigo del algoritmo puede encontrarse en los apartados previos de este capítulo, o bien en la bibliografía (Dorigo et al. 1996), (Colorni et al. 1992).

Existen varias formas de depositar el rastro de feromona, durante el proceso de construcción o al finalizar el mismo. Normalmente los mejores resultados se producen cuando la feromona se deposita al finalizar la construcción de soluciones de la iteración, y siguiendo criterios de depósito elitistas; la mayoría de variantes contemplan depósito de feromona de la mejor solución en cada iteración, o de las dos mejores soluciones, para cada criterio a optimizar.

También existen variantes respecto a la forma de dejar el rastro: éste puede dejarse sobre la posición (i) o sobre el arco ($i-j$). Inicialmente se implementó el dejar el rastro sobre la posición; posteriormente se probó a implementar el arco, lo que proporcionó mejores resultados, siendo ésta finalmente la solución adoptada en todas las variantes de los algoritmos implementados.

6.7. Estudio de los parámetros de gobierno de los algoritmos.

Existen numerosos trabajos que estudian el comportamiento, la convergencia, el tamaño de población y los distintos parámetros que gobiernan esta técnica de optimización en su vertiente multiobjetivo. Una de las últimas tendencias, llevada a cabo en trabajos como (Lopez-Ibanez, Stutzle 2010a, Lopez-Ibanez, Stutzle 2010b, Bezerra et al. 2012, Radulescu et al. 2013, Lopez-Ibanez, Stuetzle 2014, Mascia et al. 2014, Caceres et al. 2014) es la configuración automática de los parámetros del algoritmo. Las conclusiones fundamentales que se extraen de estos trabajos, aunque se apliquen al problema del viajante y no al del FLP, pueden ser de utilidad en la toma de decisiones al implementar los algoritmos y pueden resumirse en éstas:

- De entre las variantes mACO expuestas las que mejor funcionan son las versiones 3 y 4 son las que consiguen un mejor ajuste de las fronteras de Pareto, presentando las variantes 1 y 2 grandes huecos en las mismas.
- Suma ponderada versus producto ponderado: En los experimentos realizados en (Lopez-Ibanez, Stutzle 2012), indican que en los primeros experimentos realizados indican que se observan unos mejores resultados con el producto ponderado que con la suma ponderada. Dado que el producto suele ser menos eficiente que la agregación, se opta por dar un tiempo límite de cálculo a los algoritmos MOACO. Se observa que el producto ponderado lleva a cabo muchas menos repeticiones que el mismo algoritmo usando suma ponderada y, por lo tanto, valoran menos soluciones candidatas. Por ejemplo, en el caso de BicriterionAnt se pueden llevar a cabo cuatro veces más iteraciones con la suma ponderada que con el producto. Los nuevos experimentos llevados a cabo confirman estos resultados.
- Otra de las conclusiones es que, en el caso de que sea posible, los algoritmos multicriterio funcionan mejor si puede definirse una matriz heurística para cada

criterio. Aunque en el caso del FLP, cabe indicar que en general esto no es posible a priori para todos los criterios.

- Independientemente del número de matrices de trazas, funciona mejor la actualización de éstas mediante el criterio de usar las soluciones no-dominadas que usar las mejores para cada objetivo.
- También proponen usar pesos distintos en cada iteración, lo que conduce a mejores resultados que el mantenerlos durante todo el proceso. A su vez, el uso de múltiples pesos evita que la frontera de Pareto esté mal distribuida, haciendo una buena búsqueda sólo en la dirección de los pesos; esto se palía aumentando el número de pesos para explorar todas las direcciones de la frontera de Pareto.
- En lo que respecta a los parámetros α y β , indican que los mejores resultados se producen con valores de $\alpha=1$ y $\beta=5$. También indican que parece necesario el uso de valores grandes de evaporación, a fin de evitar la rápida convergencia del algoritmo para mejorar la búsqueda, que en el caso de varios criterios debe ser más exhaustiva (en su caso utilizan $\rho=0.98$).
- En el caso de utilización de P-ACO, aconsejan que sea con búsqueda local y también que se use la suma ponderada (frente al producto) y la estrategia de actualización de feromona "best-of-objective".

Con el ánimo de no tener que fijar dichos parámetros, sino que sea el propio método el que los defina y explore de la forma más extensa posible el espacio de soluciones, se ha implementado una variante memética que recoge las virtudes de los dos mejores métodos contrastados encontrados en la bibliografía (P-ACO y mACO4) que además decide automáticamente los valores de evaporación, así como los parámetros α y β ; se le ha denominado "método Propio Nuevo".

Capítulo 07

Sectorización de incendios. Normativa. Propuesta de algoritmo de sectorización.

7.1. Introducción.

Dentro de las cuestiones relacionadas con el diseño, más en concreto en la rama de la seguridad contra incendios pueden identificarse aspectos que se refieren tanto a la seguridad de los bienes como la de las personas, sin ser ambos mutuamente excluyentes, ya que una acción que aumente la seguridad de los bienes puede también aumentar simultáneamente la de las personas. Los principales aspectos que pueden identificarse son los siguientes, tal y como se cita en (Fundación MAPFRE 1997):

- Control de la ignición: Se logra contralando la inflamabilidad de los materiales de cada recinto. Por medio de un correcto mantenimiento del edificio. Mediante una adecuada gestión de la seguridad contra incendios.
- Control de los medios de evacuación: Puede lograrse por la imposición de exigencias legales sobre las vías de evacuación y la adecuada implementación de planes de emergencia.
- Detección: Instalación de medios que permitan la detección del fuego, preferiblemente en sus primeras etapas de desarrollo.
- Control de la propagación: Diseñando de forma que se controle la propagación del incendio acotando éste: por características propias como la sectorización.

Controlando distancias entre edificios. Por medios mecánicos: ventilación, cortinas de humo, instalaciones (rociadores, ...).

- Prevención del colapso estructural: Exigencia de estabilidad e integridad de la estructura durante el incendio.

En la presente Tesis Doctoral, se desarrolla como uno de los objetivos a perseguir en el diseño del layout lo que se ha citado como “control de la propagación”. Consiste básicamente en utilizar elementos verticales y horizontales de compartimentación, que sólo será satisfactoria si no existen pasos para el humo o las llamas a través de la envolvente de la partición (sector de incendios). El incendio puede propagarse por el interior de un edificio más allá de su punto de origen si las barreras previstas no son capaces de contenerlo adecuadamente. Puede además producirse el problema adicional de la propagación a través de las canalizaciones y conductos de las instalaciones, que no se encuentren correctamente sellados.

Toda gran construcción debe ser dividida en sectores verticales, horizontales o con una combinación de ambos. En el caso que nos ocupa se tratará básicamente la compartimentación a nivel de una única planta, forma ésta en la que se desarrollan la mayor parte de actividades industriales. Las reglas que rigen la sectorización, por lo general, son poco claras sobre las razones por las que se han seleccionado los valores que limitan las dimensiones del comportamiento. Es probable que la mayoría de criterios obedezcan a historia y experiencias pasadas, que pueden no ser válidas en adelante con los medios de perfeccionamiento y los avances en materia de protección contra incendios, diseño y extinción.

Esta limitación de la extensión en sectores de incendio tiene como finalidad limitar la propagación del fuego a todo el edificio, aunque también puede venir impuesta por el adecuado diseño de la evacuación: sobre todo en edificios en altura, puede permitir la evacuación por fases de un edificio, de modo que primero son evacuadas las plantas contenidas en el sector de incendios afectado por el fuego, y las plantas restantes posteriormente. Las reglas que rigen la sectorización son, en general, poco claras en el sentido de los motivos por los que se adoptan los valores preceptivos definidos, expresados como áreas o volúmenes máximos que limitan las dimensiones máximas de los sectores. Como ya se ha indicado, muy probablemente estén basados en experiencias pasadas, lo cual plantea la validez de los mismos en todos los escenarios considerando los avances realizados en la disciplina.

Con la intención de implementar todas estas medidas de control en los edificios, se han desarrollado a lo largo de los años numerosas normativas a modo de legislación de control, con la finalidad de proteger a las personas y limitar los daños en el caso de que se produzca un incendio. Dicho control reglamentario puede realizarse por normas nacionales o internacionales. El control legislativo generalmente toma la forma de reglamentos sobre edificaciones; se citarán a continuación las vigentes actualmente en el marco na-

cional, que servirán como referencia para la elaboración del algoritmo de valoración del criterio de diseño que se utilizará para medir la calidad de cada solución respecto a la compartimentación de incendios.

Se pretende incluir en este capítulo de esta Tesis Doctoral la explicación mínima necesaria al respecto de la normativa que se implementará y se aplicará como objetivo en el diseño del problema FLP, así como los algoritmos desarrollados a partir de las prescripciones de dichas normativas. En este caso concreto el trabajo se ciñe a las exigencias de la normativa nacional en España, sin pérdida de generalidad para su posible aplicación a cualquier otra, pues la gran mayoría se basan en conceptos y preceptos similares.

Se tratará el caso nacional, pues la normativa de obligado cumplimiento en materia de protección contra incendios es diferente en los distintos países miembros de la Unión Europea. Si existe un consenso en cuanto a algunas regulaciones muy básicas entre los países miembros de la UE, como la Directiva de Productos de la Construcción, la Directiva de Seguridad y Salud Laboral, etc., pero en cuanto al nivel de implantación real de la seguridad contra incendios en los establecimientos industriales y comerciales no existen un criterio unánime. El CEN (Comité Europeo de Estandarización) es el encargado de emitir las normas de estandarización EN-UNE, que sólo son de obligado cumplimiento si las ratifica un reglamento dentro de cada país miembro; en materia de protección contra incendios, las normas EN-UNE emitidas se refieren a exigencias y métodos de ensayo, de fabricación y de rendimiento para instalaciones, y suelen definir los criterios de diseño y fabricación de los diferentes elementos que componen la instalación y en algunos casos también definen cómo deben instalarse. Esta falta de unanimidad hará que se utilice sólo la normativa de ámbito nacional, la cual se expone a continuación.

7.2. Cálculo del riesgo de incendio como paso previo a las medidas de sectorización.

Como se verá posteriormente, la normativa requiere calificar el edificio para poder aplicarle las prescripciones o las medidas de seguridad que en ella se recogen. En el caso de las estructuras con usos de edificación, será necesario determinar el uso para poder entrar a aplicar los criterios normativos; esto se hace así considerando que cada uso se corresponde, muy aproximadamente, con unos valores estándar de carga de fuego presentes en sus dependencias. En el ámbito industrial, y dada la variabilidad que tienen las industrias, no basta con conocer el uso, y hay que caracterizar el riesgo de forma más precisa, a través de algún método que permita evaluar la carga de fuego, expresada de un modo u otro, que tiene dicho establecimiento en sus instalaciones y/o dependencias. Se citan a continuación, sin entrar en excesivo detalle, estos métodos “grosso modo”, para posteriormente exponer con más detalle el método y la normativa que lo recoge, que es la española, en puntos posteriores de este trabajo, dado que es el que se va a aplicar y se ha implementado en la aplicación informática que resuelve el FLP.

Los métodos de evaluación del riesgo de incendio más conocidos y utilizados tradicionalmente en la normativa nacional española para el cálculo de la carga de fuego han sido:

- Método de los factores α y del coeficiente K (Barcelona y Madrid)
- Método Gretener (Zaragoza) (NTP-37 del INSHT)
- Método MESERI, (MAPFRE), simplificación del Gretener
- Método de Gustav Purt (NTP-100 del INSHT)
- Método del índice de incendio y explosión (Dow Chemical Comp.)
- Eurocódigo ENV 1991-2-2
- Método del riesgo intrínseco (Carga de fuego ponderada) →RD 2267/2004
- Anejo B DB SI

También se ha consultado bibliografía internacional, a fin de recopilar, aunque no se entrará en profundidad en esta materia, los que se utilizan en otros ámbitos internacionales. En algunos escritos, como en (European study into the Fire Risk to European Cultural Heritage 2003), se analizan los métodos existentes en la normativa internacional, donde indica que se pueden citar como métodos de evaluación del riesgo más utilizados los siguientes:

- Un método basado en ranking o índices, llamado "Método Greterner".
- Otro método basado en índices llamado FRAME, basado en el método Gretener y otros similares.
- El método "Fire Risk Index Method".
- Un método basado en árbol de eventos.
- Un método probabilístico puro, que utiliza el nivel de confianza β .

En el citado documento se propone la utilización del método Gretener. También se adjuntan ejemplos de aplicación de cada uno de los métodos comentados.

En este trabajo se utilizará la norma española y el método del riesgo intrínseco, con la carga de fuego ponderada y corregida, quedando pendiente para desarrollos futuros el análisis de la normativa internacional así como la equivalencia de algunos parámetros de dichas normativas con los existentes en la norma española o en el método Gretener general.

7.2.1. Modelos de análisis del riesgo.

Con carácter general, y en cualquier estudio de gestión del riesgo, se utilizan parámetros basados en estadística, involucrando costes, beneficios y calidad de las instalaciones y la ingeniería. La incertidumbre es una característica de todos estos parámetros. En general el equilibrio entre todas ellas implica la aplicación de alguna teoría para la toma de decisión.

El riesgo puede definirse como la probabilidad de que un evento concreto e indeseable suceda en determinadas circunstancias alcanzado con una determinada certidumbre. El riesgo de incendio se define en la norma ISO 16732-1:2012 como:

- Cuando se define el riesgo en un escenario de eventos, la combinación de la probabilidad de que se dé ese evento o escenario y sus consecuencias.
- Cuando se define como un riesgo de diseño, la combinación de probabilidades y consecuencias de todos los eventos y escenarios asociados al diseño.

Cada decisión que se hace en seguridad de incendios es una decisión de riesgo tanto si es tratada como tal o no lo es. Dado que las herramientas científicas que permiten analizar cuantitativamente el riesgo han extendido su uso, pueden realizarse análisis adecuados siempre que se elija adecuadamente el contexto de dicho análisis del riesgo.

Las decisiones sobre el riesgo de incendio no sólo involucran las etapas técnicas de la estimación del riesgo, sino que también requieren identificar un nivel de riesgo asumible, lo cual es más una labor social que técnica.

El análisis del riesgo es básicamente una aproximación estructurada a la toma de decisión, donde entran en juego ciertas incertidumbres. Existen varias técnicas o aproximaciones al análisis del riesgo, tanto cuantitativas como cualitativas.

En los diferentes tipos de análisis del riesgo hay algunas razones para preferir uno de ellos o descartarlo. Algunas características adecuadas para un método son:

- Integración de la seguridad de las personas como una propiedad más de la protección.
- La posibilidad de contemplar el incendio premeditado.

- La posibilidad tener una estimación del coste en la gestión del riesgo.

Y otras para descartarlo:

- La protección no es el objetivo principal. Los métodos que se utilizan para proteger a las personas contienen inherentemente un sacrificio del edificio en favor de las personas. Hay que valorar en función de la importancia del edificio y de su uso.
- El tiempo para obtener una solución al problema debe estar en consonancia con la importancia de la construcción. Un método que requiera un equipo multidisciplinar o un tiempo de computación excesivo no es adecuado para edificios normales o de poca importancia.
- Debe ser adecuado a la actividad que se desarrolla en el edificio: por ejemplo, un método para el riesgo de explosión en industria química no es adecuado para otro tipo de industrias.
- El método pertenece a una organización que tiene los derechos de uso y no es accesible al resto de potenciales usuarios.

Conceptualmente un método ha de tener los siguientes componentes:

- Identificar los peligros de incendio.
- Cuantificar las consecuencias y la probabilidad de incendio.
- Identificar el control de los riesgos.
- Cuantificar el impacto de las opciones en los riesgos y peligros.
- Seleccionar una protección adecuada.

Y más en concreto los dos objetivos que debe conseguir cualquier método que se utilice serán:

- El método debe ser comprensible en el sentido de contener todos los atributos que son importantes en la seguridad contra incendios.
- El método también debería proveer un ranking numérico para poder comparar distintas alternativas de diseño y su calidad.

Para (Larsson 2000), según expone en su trabajo "Developing the Structure of a Fire Risk Index Method for Timber-frame Multistorey Apartment Buildings" los métodos para analizar el riesgo de incendio pueden clasificarse en tres categorías:

- Regulaciones y checklist: La forma más sencilla de lograr un nivel satisfactorio de seguridad contra incendios en un edificio es seguir las normas de construcción existentes. Esto tiene muy poco que ver con seguir un método de valoración del riesgo, pero hay que mencionarlo para ilustrar la forma más sencilla de resolver los problemas de seguridad contra incendios. Un ingeniero simplemente tiene que seguir un número de reglas detalladas y de este modo no es necesario realizar análisis de riesgo alguno.
- Métodos basados en rankings: También se les conoce como métodos semicuantitativos, se usan hoy día en gran variedad de aplicaciones. Habitualmente el ranking de riesgo de incendio se define como un proceso de modelización y puntuación de parámetros de peligro y exposición, para producir una rápida y simple estimación del riesgo relativo. Estos métodos obedecen a modelos heurísticos basados en el conocimiento profesional y la experiencia pasada para asignar valores a las variables seleccionadas. Estos métodos ranking son a menudo desarrollados con el propósito de simplificar el proceso de evaluación de riesgos para un tipo concreto de edificios, procesos, etc. A menudo los métodos cuantitativos son demasiado caros o largos, lo que ha conducido a desarrollar métodos más sencillos para un tipo concreto de edificio o uso.
- Métodos cuantitativos: En un gran número de países la situación de los ingenieros y arquitectos que construyen ha dado un giro radical. Desde la introducción de normativas basadas en prestaciones y no en prescripciones, el diseño se rige en la comprobación de que sus niveles de comprobación son iguales o superiores a los indicados en los códigos de construcción. De este modo el ingeniero debe poseer mayores conocimientos, dada la responsabilidad que supone tener libertad en la elección de las herramientas necesarias para lograr los niveles de seguridad adecuados. En la mayoría de casos los ingenieros estudian sólo algunos de los escenarios que pueden darse. Los modelos informáticos han devenido en una herramienta muy valiosa para realizar simulaciones de fuego y humo, evacuación, etc. Cuando se calcula el riesgo de incendio en situaciones más complejas, el árbol de eventos es a menudo la mejor herramienta; a estos métodos se les conoce frecuentemente como “métodos deterministas”. En la figura puede verse un árbol de eventos a título ilustrativo:

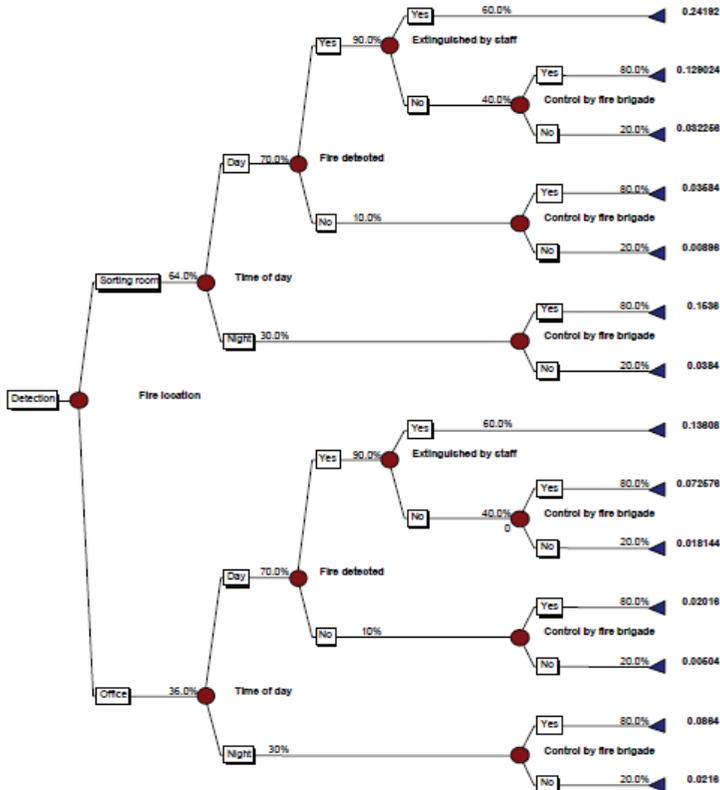


Figura 7 - 1 – Árbol de eventos para fuego en oficina postal. Detectores de humo.

7.2.2. Método Gretener.

Este método de análisis del riesgo se conoce como el método Suizo de Gretener, y fue desarrollado por la asociación de aseguradoras suizas.

Se trata de un método basado en rankings o índices.

Este método establece un riesgo admisible de incendio como función del uso del edificio, el nivel de compartimentación y el nivel de personas que alberga. El valor del riesgo admisible de incendio, R_u , debe ser mayor que el riesgo real de incendio R .

También se le conoce como “SIA 81” y es el método suizo de evaluación de riesgos, desarrollado por Max Gretener, y se ha revisado en numerosas ocasiones. La base consiste en determinar el riesgo de incendio por métodos estadísticos, basándose en algunas experiencias complementadas como un alternativa rápida. Este método es amplia-

mente aceptado en Suiza como en otros países. Ha sido recomendado por numerosos autores como un método para una rápida evaluación del riesgo de incendio en grandes edificios. El método es uno de los más importantes métodos de análisis del riesgo por que su aceptación para la valoración de primas de seguro y su presencia en los códigos normativos.

El método Gretener se usa para evaluar y comprar el nivel del riesgo de incendio de distintas soluciones alternativas, graduando los elementos de una construcción y su eficacia. Los factores de graduación se basan en paneles de expertos, grandes históricos estadísticos y testado en numerosas aplicaciones prácticas. El riesgo calculado se compara con el riesgo admisible, donde el último es una función de la movilidad del personal involucrado, la localización de los sectores de incendio contenidos en el edificio. La aproximación comienza con el concepto explícito de riesgo como la expectativa de pérdidas acaecidas por el producto de la probabilidad de los peligros y su severidad.

En este método se basa el método simplificado que utiliza la normativa española, que es la que se utiliza en este trabajo.

7.2.3. Expresión del valor del riesgo.

La expresión numérica del valor del riesgo en una escala numérica es una convención. En el método Gretener se utiliza una escala que localiza el valor del riesgo en un rango entorno a 1.

La razón más elemental es que originalmente, el método Gretener buscaba desarrollar un sistema técnico para obtener las primas de seguro, y éstas tienen un valor aproximado del 1% del valor del riesgo asegurado.

Este valor del riesgo también se usa en el método FRAME ("Fire Assessment Method for Engineering").

7.3. Normativa Española de protección contra incendios.

7.3.1. Introducción.

Se exponen a continuación las directrices básicas que indica la normativa española de incendios en establecimientos industriales (RD 2267/2004) a fin de conocer todas aquellas prescripciones que afectan a la sectorización de incendios que se desarrolla en este trabajo. Dichas normativas que afectan son las que se relatan a continuación:

- **CTE DB SI** – Seguridad contra incendios (NBE - CPI / 96 (91, 82) -> Derogadas)

Este documento establece las condiciones que deben reunir los edificios (de uso edificación) para proteger a sus ocupantes frente a los riesgos originados por un incendio una vez originado éste (no intencionalmente).

No se contempla el uso industrial.

- **RD 2267/2004** – Reglamento de seguridad contra incendios en establecimientos industriales (RSIEI) (Anon.c)

Este Real Decreto establece las condiciones que deben cumplir los establecimientos industriales con el fin de garantizar la seguridad de sus ocupantes frente a los riesgos originados por un incendio, de forma similar al CTE DB SI.

Otras referencias:

- RD 786/2001 – Reglamento de seguridad contra incendios en establecimientos industriales (derogada).
- Ordenanzas municipales de prevención de incendios.
- Guía técnica de aplicación del RD 2267/2004 (publicada en noviembre de 2007)

En todas estas normativas se establecen tres puntos:

- Condicionantes elementos constructivos y estabilidad estructural
- Condicionantes geométricos: se establecen las condiciones que se deben satisfacer en el diseño general del edificio al objeto de garantizar,
 - El confinamiento y el control del incendio (compartimentación)
 - La evacuación de los ocupantes (evacuación y señalización)
- Condicionantes para la dotación de instalaciones de protección

7.3.2. Objetivos.

7.3.2.1. CTE DB SI.

El objetivo del requisito básico “Seguridad en caso de incendio” consiste en reducir a límites aceptables el riesgo de que los usuarios de un edificio sufran daños derivados de

un incendio de origen accidental, como consecuencia de las características de su proyecto, construcción, uso y mantenimiento.

El Documento Básico DB-SI especifica parámetros objetivos y procedimientos cuyo cumplimiento asegura la satisfacción de las exigencias básicas y la superación de los niveles mínimos de calidad propios del requisito básico de seguridad en caso de incendio, excepto en el caso de los edificios, establecimientos y zonas de uso industrial a los que les sea de aplicación el “Reglamento de seguridad contra incendios en los establecimientos industriales”, en los cuales las exigencias básicas se cumplen mediante dicha aplicación.

7.3.2.2. RD 2267/2004, “Seguridad contra incendios en establecimientos industriales”.

La presencia del riesgo de incendio en los establecimientos industriales determina la probabilidad de que se desencadenen incendios, generadores de daños y pérdidas para las personas y los patrimonios, que afectan tanto a ellos como a su entorno.

Con el fin de completar la regulación de las condiciones de protección contra incendios en los establecimientos industriales de aplicación en cualquier sector de la actividad industrial, aparece el RD 2267/2004, al objeto de conseguir un grado suficiente, de la seguridad contra incendios en los citados establecimientos industriales.

7.3.2.2.1. Aplicación.

Las prescripciones del Reglamento son de aplicación, a partir de su entrada en vigor:

- A los nuevos establecimientos industriales que se construyan o implanten.
- A los ya existentes que cambien o modifiquen su actividad, se trasladen, se amplíen o reformen, en la parte afectada por la ampliación o reforma.

Se entiende por establecimiento, todo edificio o zona del mismo destinada a ser utilizada bajo una titularidad diferenciada y cuyo proyecto de obras de construcción o reforma, así como el inicio de la actividad prevista, sean objeto de control administrativo.

Como se ha indicado anteriormente, el ámbito de aplicación de este Reglamento son los establecimientos industriales, entendiéndose como tales los siguientes:

- Las industrias. (artículo 3.1 de la Ley 21/1992, de 16 de julio, de Industria.)
- Los almacenamientos industriales.

- Los talleres de reparación y los estacionamientos de vehículos destinados al transporte de personas y al transporte de mercancías.
- Los servicios auxiliares o complementarios de las actividades comprendidas en los puntos anteriores.

Se aplica además a los almacenamientos de cualquier tipo de establecimiento cuando su carga de fuego total, ponderada y corregida, calculada según el apéndice 1 de este Reglamento, sea superior o igual a 3.000.000 Megajulios (MJ).

También se aplica a las industrias existentes antes de su entrada en vigor, cuando su nivel de riesgo intrínseco, situación o características impliquen un riesgo grave para las personas, los bienes o el entorno, y así se determine por la Administración Autonómica competente. Aunque esto se ha hecho en escasas ocasiones.

Quedan excluidas de la aplicación de este reglamento las actividades industriales y talleres artesanales y similares cuya densidad de carga de fuego, calculada de acuerdo con el anexo I, no supere 10 Mcal/m² (42 MJ/m²), siempre que su superficie útil sea inferior o igual a 60 m², excepto en lo recogido en los apartados 8 (extintores) y 16 (alumbrado de emergencia) del anexo III.

Cuando en un mismo edificio coexistan con la actividad industrial otros usos con distinta titularidad, para los que sea de aplicación EL CTE DB SI, los requisitos que deben satisfacer los espacios de uso no industrial serán los exigidos por dicho CTE.

Las zonas en las que por su superficie sean de aplicación las prescripciones del CTE DB SI deberán constituir un sector de incendios independiente.

7.3.2.2.2. Sectorización por usos.

Cuando en un establecimiento industrial coexistan con la actividad industrial otros usos con la misma titularidad, para los que sea de aplicación la «Norma Básica de la Edificación: Condiciones de Protección contra incendios» (CTE DB SI), los requisitos que deben satisfacer los espacios de uso no industrial serán los exigidos por dicha Norma Básica (DB SI) cuando los mismos superen los límites indicados a continuación:

- Zona comercial: Superficie superior a 250 m².
- Zona de administración: Superficie superior a 250 m².
- Salas de reuniones, conferencias, proyecciones: Capacidad superior a 100 personas sentadas.
- Archivos: Superficie superior a 250 m² o volumen superior a 750 m³.

- Bar, cafetería, comedor de personal y cocina: Superficie superior a 150 m² o capacidad para servir a más de 100 comensales simultáneamente.
- Biblioteca: Superficie superior a 250 m².
- Zonas de alojamiento de personal: Capacidad superior a 15 camas.

En esta primera versión de la aplicación, no se incluyen estas actividades (lo que viene siendo llamado tradicionalmente “Sectorización por usos”), sin pérdida de generalidad en las soluciones obtenidas.

Otra de las prescripciones incluidas en este reglamento (así como en el anterior) es la obligatoriedad de la comunicación de siniestros de incendio por parte de los propietarios del edificio a la administración y en caso de tratarse de un incendio de carácter grave, o que haya producido daños humanos, este RD obliga a realizar una investigación detallada para determinar las causas del mismo, trasladando los resultados al órgano competente en materia de seguridad industrial del Ministerio de Ciencia y Tecnología.

7.4. Clasificación de las edificaciones.

Las normativas de protección contra incendios distinguen varios tipos de edificios, a efectos de la rigidez de los criterios normativos a aplicar en ellos.

Tanto el CTE DB SI como el RD 2267/2004 se basan en dos criterios para establecer esta clasificación:

- Su configuración y ubicación con relación a su entorno,
- Su nivel de riesgo intrínseco

7.4.1. Configuraciones en el CTE DB SI:

Esta norma distingue, a efectos de los condicionantes que establece, varios tipos de edificios, según el uso al que estos estén destinados; dichos usos son los siguientes (condicionantes generales y particulares):

- Uso Residencial Vivienda
- Uso Residencial público
- Uso Hospitalario
- Uso Administrativo
- Uso Docente
- Uso Comercial

- Uso Aparcamiento
- Pública concurrencia

La norma indica que los edificios, establecimientos o zonas cuyo uso previsto no se encuentre entre los definidos deberán cumplir, salvo indicación en otro sentido, las condiciones particulares del uso al que mejor puedan asimilarse.

Además del uso específico, la norma establece otra calificación en los locales 'de riesgo especial', como de riesgo bajo, medio o alto respectivamente, bien en función de la superficie o volumen construidos, de la potencia instalada o de la carga de fuego media, medida en MJ/m² o Mcal/m² (unitaria), existente en el local.

→ Configuración final del establecimiento: conjunto de sectores, locales de riesgo especial y zonas de circulación.

En el caso de este trabajo, al tratarse de un FLP bidimensional lo que se pretende resolver, se ciñe al caso de tener sólo sectores de incendios (no se considerarán ni ascensores ni sectores de riesgo mínimo ni zonas exentas). Tampoco se contemplará en esta primera versión la sectorización por usos (se deja su aplicación para desarrollos futuros).

Debe tenerse en cuenta que también se consideran zonas de uso industrial:

- Los almacenamientos integrados en establecimientos de cualquier uso no industrial, cuando la carga de fuego total, ponderada y corregida de dichos almacenamientos, calculada según el Anexo 1 de dicho Reglamento, exceda de 3×10^6 megajulios (MJ). No obstante, cuando esté prevista la presencia del público en ellos se les deberá aplicar además las condiciones que el CTE establece para el uso correspondiente.
- Los garajes para vehículos destinados al transporte de personas o de mercancías.

7.4.2. Configuraciones en el RD 2264/2004.

Las muy diversas configuraciones y ubicaciones que pueden tener los establecimientos industriales se consideran reducidas a:

Establecimientos industriales ubicados en el interior de un edificio o edificios:

- Tipo A: El establecimiento industrial ocupa parcialmente un edificio que tiene, además, otros establecimientos, ya sean éstos de uso industrial o bien de otros usos.
- Tipo B: El establecimiento industrial ocupa totalmente un edificio que está adosado a otro/s edificio/s, ya sean éstos de uso industrial o bien de otros usos.
- Tipo C: El establecimiento industrial ocupa totalmente un edificio, o varios, en su caso, que está a una distancia mayor de 3 m del edificio más próximo de otros establecimientos.

Establecimientos industriales que desarrollan su actividad en espacios abiertos que no constituyen un edificio (o edificios abiertos):

- Tipo D: El establecimiento industrial ocupa un espacio abierto, que puede tener cubierta más del 50 por 100 de la superficie ocupada, y alguna de cuyas fachadas carece totalmente de cerramiento lateral.
- Tipo E: El establecimiento industrial ocupa un espacio abierto que puede tener cubierta hasta el 50 por 100 de la superficie ocupada.

Para establecimientos industriales que ocupen una nave adosada con estructura compartida con las contiguas, que en todo caso deberán tener cubierta independiente, se admitirá el cumplimiento de las exigencias correspondientes al tipo B, siempre que se justifique técnicamente que el posible colapso de la estructura no afecte a las naves colindantes.

7.5. Niveles de riesgo y sectorización.

Como ya se indicó, en cualquier estudio de gestión del riesgo, se utilizan parámetros basados en estadística, involucrando costes, beneficios y calidad de las instalaciones y la ingeniería. La incertidumbre es una característica de todos estos parámetros. En general el equilibrio entre todas ellas implica la aplicación de alguna teoría para la toma de decisión. En el caso de la normal española se utiliza el método del nivel del riesgo intrínseco, el cual se obtiene a partir de la carga de fuego ponderada y corregida, cuyo cálculo se expondrá en el apartado siguiente.

Además, los establecimientos industriales se clasifican, según su grado de riesgo intrínseco, atendiendo a los criterios simplificados y según los procedimientos que se indicarán a continuación.

Los establecimientos industriales, en general, estarán constituidos por una o varias configuraciones de los tipos A, B, C, D y E. Cada una de estas configuraciones constituirá una o varias zonas (sectores o áreas de incendio), del establecimiento industrial.

Para los tipos A, B y C se considera «sector de incendio» el espacio del edificio cerrado por elementos resistentes al fuego durante el tiempo que se establezca en cada caso.

Para los tipos D y E se considera que la superficie que ocupan constituye una «área de incendio» abierta, definida solamente por su perímetro.

Se aportan varias definiciones de “sector de incendio”:

- Un sector de incendio es espacio de un edificio separado de otras zonas del mismo por elementos constructivos delimitadores resistentes al fuego durante un período de tiempo determinado, en el interior del cual se puede confinar (o excluir) el incendio para que no se pueda propagar a (o desde) otra parte del edificio.
- Un sector de incendio es un recinto o conjunto de recintos cuyos elementos delimitadores (suelos, paredes y techos) poseen el comportamiento ante el fuego que se establece y cuya superficie queda dentro de los límites determinados para cada caso, de manera que el incendio no se propague a otros sectores ni provoque su colapso estructural.
- Sector de riesgo mínimo: La densidad de carga de fuego no excede de 40 MJ/m² en el conjunto del sector, ni de 50 MJ/m² en cualquiera de los recintos contenidos en el sector, considerando la carga de fuego aportada, tanto por los elementos constructivos, como por el contenido propio de la actividad.

7.6. Tipos de cálculo de los niveles de riesgo.

Carga de Fuego es la Suma de las energías caloríficas que se liberan en la combustión de todos los materiales combustibles existentes en un espacio (contenidos del edificio y elementos constructivos) (UNE-EN 1991-1-2:2004). (MJ o Mcal).

Densidad de la carga de fuego es la carga de fuego por unidad de superficie considerada para determinar las acciones térmicas en el cálculo en situación de incendio. Su valor tiene en cuenta las incertidumbres. (UNE-EN 1991-1-2:2004) (MJ/m² o Mcal/m²).

Como ya se ha indicado al principio del capítulo, los métodos utilizados tradicionalmente en la normativa nacional española para su evaluación han sido éstos:

- Método de los factores α y del coeficiente K (Barcelona y Madrid)
- Método Gretener (Zaragoza) (NTP-37 del INSHT)
- Método MESERI, (MAPFRE), simplificación del Gretener
- Método de Gustav Purt (NTP-100 del INSHT)
- Método del índice de incendio y explosión (Dow Chemical Comp.)
- Eurocódigo ENV 1991-2-2
- Método del riesgo intrínseco (Carga de fuego ponderada) →RD 2267/2004
- Anejo B DB SI

En este trabajo se utilizará la norma española y el método del riesgo intrínseco, con la carga de fuego ponderada y corregida, basado en el método Gretener, quedando pendiente para desarrollos futuros el análisis de la normativa internacional así como la equivalencia de algunos parámetros de dichas normativas con los existentes en la norma española o en el método Gretener general.

7.6.1. Método del riesgo intrínseco (GENERAL).

El nivel de riesgo intrínseco de cada sector de incendio se evaluará a partir de la carga de fuego ponderada y corregida Q_s , para una industria o almacenamiento se calculará considerando todos los materiales combustibles que formen parte de la construcción, así como aquellos que se prevean como normalmente utilizables en los procesos de fabricación y todos las materias combustibles que puedan ser almacenadas. El cálculo de la carga de fuego ponderada Q_s se establecerá calculando la siguiente expresión, que determina la densidad de carga de fuego, ponderada y corregida, de dicho sector de incendio:

$$Q_s = \frac{\sum_i G_i \cdot q_i \cdot C_i}{A} \cdot R_a \quad (MJ/m^2 \text{ o } Mcal/m^2) \quad (7-1)$$

dónde:

Q_s = Densidad de carga de fuego, ponderada y corregida, del sector de incendio, en MJ/m² o Mcal/ m².

G_i = Masa, en Kg, de cada uno de los combustibles (i) que existen en el sector de incendio (incluidos los materiales constructivos combustibles).

q_i = Poder calorífico, en MJ/Kg o Mcal/Kg, de cada uno de los combustibles (i) que existen en el sector de incendio.

C_i = Coeficiente adimensional que pondera el grado de peligrosidad (por la combustibilidad) de cada uno de los combustibles (i) que existen en el sector de incendio.

R_a = Coeficiente adimensional que corrige el grado de peligrosidad (por la activación) inherente a la actividad industrial que se desarrolla en el sector de incendio, producción, montaje, transformación, reparación, almacenamiento, etc.

Cuando existen varias actividades en el mismo sector, se tomará como factor de riesgo de activación el inherente a la actividad de mayor riesgo de activación, siempre que dicha actividad ocupe al menos el 10 por 100 de la superficie del sector.

A = Superficie construida del sector de incendio, en m^2 .

Los valores del coeficiente de peligrosidad por combustibilidad C_i de cada combustible, pueden deducirse de la tabla 1.1.

Tabla 7 - 1 – Grado de peligrosidad de los combustibles.

TABLA 1.1
GRADO DE PELIGROSIDAD DE LOS COMBUSTIBLES

VALORES DEL COEFICIENTE DE PELIGROSIDAD POR COMBUSTIBILIDAD, C_i		
ALTA	MEDIA	BAJA
<ul style="list-style-type: none"> - Líquidos clasificados como clase A en la ITC MIE-APQ1 - Líquidos clasificados como subclase B₁, en la ITC MIE-APQ1. - Sólidos capaces de iniciar su combustión a una temperatura inferior a 100 °C. - Productos que pueden formar mezclas explosivas con el aire a temperatura ambiente. - Productos que pueden iniciar combustión espontánea en el aire a temperatura ambiente. 	<ul style="list-style-type: none"> - Líquidos clasificados como subclase B₂ en la ITC MIE-APQ1. - Líquidos clasificados como clase C en la ITC MIE-APQ1. - Sólidos que comienzan su ignición a una temperatura comprendida entre 100 °C y 200 °C. - Sólidos que emiten gases inflamables. 	<ul style="list-style-type: none"> - Líquidos clasificados como clase D en la ITC MIE-APQ1. - Sólidos que comienzan su ignición a una temperatura superior a 200 °C.
$C_i = 1,60$	$C_i = 1,30$	$C_i = 1,00$

C_i = Coeficiente adimensional que pondera el grado de peligrosidad (por la combustibilidad) de cada uno de los combustibles (i) que existen en el sector de incendio.

Nota: ITC MIE-APQ001 del Reglamento de almacenamiento de productos químicos, aprobado por Real Decreto 379/2001, de 6 de abril.

También podrá obtenerse el valor de C_i de acuerdo con la clasificación del Comité Europeo de Aseguradores (CEA) con valores que en general son ligeramente más bajos que los proporcionados por la normativa. Estos valores del coeficiente de peligrosidad por combustibilidad, C_i , de cada combustible pueden deducirse de la tabla 1.1, del Catálogo CEA de productos y mercancías, o de tablas similares de reconocido prestigio cuyo uso debe justificarse.

El catálogo CEA realiza una clasificación de materias y mercancías según su riesgo de incendio. El coeficiente GG del listado de productos de dicho catálogo es el que se asimila al coeficiente de peligrosidad por combustibilidad, C_i , del RD 2264/2007. Así, los valores 1 y 2 del coeficiente GG equivalen a $C_i=1.60$, los valores 3 y 4 equivalen a $C_i=1.30$ y los valores 5 y 6 equivalen a $C_i=1.00$.

Los valores del coeficiente de peligrosidad por activación R_a , pueden deducirse de la tabla 1.2, de acuerdo con la siguiente valoración:

Tabla 7 - 2 – Riesgo de activación.

Alto	Medio	Bajo
Ra=3,0 Ra=2,0	Ra= 1,5	Ra= 1,0

R_a = Coeficiente adimensional que corrige el grado de peligrosidad (por la activación) inherente a la actividad industrial que se desarrolla en el sector de incendio, producción, montaje, transformación, reparación, almacenamiento, etc.

Cuando existen varias actividades en el mismo sector, se tomará como factor de riesgo de activación el inherente a la actividad de mayor riesgo de activación, siempre que dicha actividad ocupe al menos el 10 por 100 de la superficie del sector.

Los valores del poder calorífico q , de cada combustible, pueden deducirse de la tabla 1.4.

Tabla 7 - 3 - Poder calorífico de algunos materiales (RD 2267/2004)

TABLA 1.4

PODER CALORÍFICO (q) DE DIVERSAS SUSTANCIAS								
PRODUCTO	MJ/kg	Mcal/kg	PRODUCTO	MJ/kg	Mcal/kg	PRODUCTO	MJ/kg	Mcal/kg
Aceite de algodón	37,2	9	Carbón	31,4	7,5	Leche en polvo	16,7	4
Aceite de creosota	37,2	9	Carbono	33,5	8	Lino	16,7	4
Aceite de lino	37,2	9	Cartón	16,7	4	Linoleum	2,1	05
Aceite mineral	42	10	Cartón asfáltico	21	5	Madera	16,7	4
Aceite de oliva	42	10	Celuloide	16,7	4	Magnesio	25,1	6
Aceite de parafina	42	10	Celulosa	16,7	4	Malta	16,7	4
Acetaldehído	25,1	6	Cereales	16,7	4	Mantequilla	37,2	9
Acetamida	21	5	Chocolate	25,1	6	Metano	50,2	12
Acetato de amilo	33,5	8	Cicloheptano	46	11	Monóxido de carbono	8,4	2
Acetato de polivinilo	21	5	Ciclohexano	46	11	Nitrito de acetona	29,3	7
Acetona	29,3	7	Ciclopentano	46	11	Nitrocelulosa	8,4	2
Acetileno	50,2	12	Ciclopropano	50,2	12	Octano	46	11
Acetileno disuelto	16,7	4	Cloruro de polivinilo	21	5	Papel	16,7	4
Acido acético	16,7	4	Cola celulósica	37,2	9	Parafina	46	11

Existen otras fuentes con las que determinar el parámetro “poder calorífico”, en MJ/kg o Mcal/kg de cada uno de los combustibles, además de la proporcionada por la normativa. En la bibliografía, el poder calorífico, también se puede encontrar con la denominación de potencia calorífica, calor de combustión (“heat of combustión”) y entalpía de combustión. Además de la tabla 1.4 del RD 2267/2004 ya citada, existen diversos documentos que proporcionan el poder calorífico de materias y productos muy diversos. Entre los más conocidos:

- Método Gretener. Evaluación del riesgo potencial de incendio. Edición 1973. Incluye una lista de productos comerciales usuales con su poder calorífico en Mcal/kg y en algunos da la densidad en kg/m³.
- Índice de incendio y explosión DOW. Incluye una lista de sustancias químicas con parámetros de inflamabilidad.
- Handbook of Chemistry and Physics.
- NFPA. Manual de Protección contra Incendios.
- Perry's Chemical Engineers Handbook.
- Hütte. Manual del ingeniero.
- Weiss G., Hazardous Chemicals Data Book. Manual con fichas de datos de seguridad de productos.

La propia guía técnica de aplicación de la norma indica que: “Este método de cálculo de la densidad de carga de fuego “producto a producto”, resulta muy tedioso y, sobre todo, peligrosamente impreciso al aplicarlo a Almacenes con productos muy diversos, agravándose por el hecho de la posibilidad de cambios frecuentes, tanto en cantidad como en tipos de productos”. De ahí que la propia norma proponga la utilización de otro método simplificado, que se explica a continuación.

7.6.2. Método del riesgo intrínseco simplificado RD 2267/2004.

7.6.2.1. Simplificación para producción.

Como la norma propone, como alternativa a la fórmula anterior se puede evaluar la densidad de carga de fuego, ponderada y corregida, Q_s , del sector de incendio aplicando las siguientes expresiones.

Para actividades de producción, transformación, reparación o cualquier otra distinta al almacenamiento; en los que se incluyen los acopios de materiales y productos cuyo consumo o producción es diario:

$$Q_s = \frac{\sum_i q_{si} \cdot S_i \cdot C_i}{A} \cdot R_a \quad (MJ/m^2 \text{ o } Mcal/m^2) \quad (7-2)$$

dónde:

Q_s , C_i , R_a y A tienen la misma significación que en el apartado anterior, y

q_{si} = Densidad de carga de fuego de cada zona con proceso diferente según los distintos procesos que se realizan en el sector de incendio (i), en MJ/m^2 o $Mcal/m^2$.

S_i = Superficie de cada zona con proceso diferente y densidad de carga de fuego, q_{si} , diferente, en m^2 .

Los valores de la densidad de carga de fuego media, q_{si} pueden obtenerse de la Tabla 1.2. del RD 2267/2004.

En caso de que exista más de un material en la actividad, se puede aplicar el correspondiente C_i del producto de mayor riesgo de combustibilidad, siempre que dicho material supere al menos el 10% en peso de todos los materiales implicados en dicha actividad.

Con este método, a efectos del cálculo, no se contabilizan los acopios o depósitos de materiales o productos reunidos para la manutención de los procesos productivos de montaje, transformación o de reparación, o resultantes de los mismos, cuyo consumo o producción es diario y constituyen el llamado "almacén de día". Estos materiales o pro-

ductos se considerarán incorporados al proceso productivo de montaje, transformación, reparación, etc., al que deban ser aplicados o del que procedan.

7.6.2.2. Simplificación para almacenamiento.

Para actividades de almacenamiento:

$$Q_s = \frac{\sum_1^i q_{vi} \cdot C_i \cdot h_i \cdot s_i}{A} \cdot R_a \quad (MJ / m^2 \text{ o } Mcal / m^2) \quad (7-3)$$

dónde:

Q_s , C_i , R_a y A tienen la misma significación que en el apartado anterior, y

q_{vi} = Carga de fuego, aportada por cada m^3 de cada zona con diferente tipo de almacenamiento (i existente en el sector de incendio, en MJ/m^3 o $Mcal/m^3$).

h_i = Altura del almacenamiento de cada uno de los combustibles (i), en m.

s_i = Superficie ocupada en planta por cada zona con diferente tipo de almacenamiento (i) existente en el sector de incendio en m^2 .

Los valores de la carga de fuego, por metro cúbico q_{vi} , aportada por cada uno de los combustibles, pueden obtenerse de la Tabla 1.2. del RD 2267/2004.

Consideraciones fundamentales sobre el almacenamiento en altura:

- Una mercancía, correspondiente a un producto de la Tabla 1.2 del RD 2264/2007, puede estar compuesta por diferentes materiales de embalaje y transporte, tales como plásticos protectores encapsulados, cartón, Paletas de madera o plástico. En estos casos, se puede calcular el % en volumen de cada uno y aplicar el correspondiente q_{vi} y C_i , con el R_a del producto principal.
- La altura de almacenaje h_i , se refiere a la altura neta de producto considerado, y no tiene por qué corresponderse con la real necesaria por las estanterías que lo contienen.
- La misma consideración, puesto que se trata de obtener un resultado de un Volumen (m^3), se puede hacer con la superficie ocupada en planta s_i , puesto que, generalmente, las mercancías están separadas entre sí

7.6.2.3. Aplicación general del método simplificado.

Nada impide mezclar zonas de producción con zonas de almacenamiento, pues las unidades son homogéneas y conducirían finalmente a una carga de fuego ponderada y corregida igualmente. Según indica la propia guía técnica de aplicación: "En un mismo sector pueden coexistir zonas de almacenamiento con zonas de producción, en ese caso, para calcular la densidad de carga de fuego, ponderada y corregida, Q_s , del sector de incendio, se puede aplicar la fórmula dada en el apartado 3.2.1 (la general) o bien se puede aplicar una combinación de las fórmulas presentadas en el apartado 3.2.2. (las de producción y almacenamiento)"

En general el procedimiento se iniciará distinguiendo distintas zonas atendiendo a procesos (actividades) distintos (Layout de bloques), lo cual será directo al definir en la aplicación las distintas zonas que requieren superficie para la resolución del FLP que se plantea en este trabajo Doctoral:

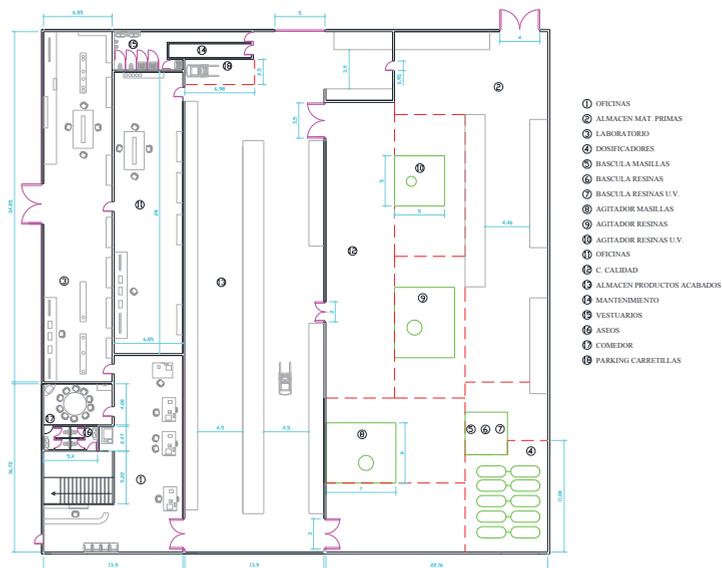


Figura 7 - 2 - Distribución en planta dividida en secciones I (bloques = actividades)

Es típico el aprovisionamiento de componentes en las cadenas de montaje de equipos, motores, vehículos, electrodomésticos, etc. Generalmente, un proceso productivo suele ocupar un solo sector, o área, o nave y, consecuentemente, una sola superficie $S_1=A$. Es muy importante delimitar actividades diferentes que pudieran estar mezcladas, o colindantes, en una superficie común A, de tal manera que, si interesa separarlas en dos Sectores de incendio, por existir una notable diferencia de Nivel de Riesgo intrínseco, se pudiera realizar sin dificultades. Esto suele ocurrir con almacenamientos en altura próximos, y en el mismo espacio, a un proceso producido.

El nivel de riesgo intrínseco de un establecimiento industrial, cuando desarrolla su actividad en más de un edificio, ubicados en un mismo recinto, se evaluará calculando la siguiente expresión, que determina la carga de fuego, ponderada y corregida, de dicho establecimiento industrial:

$$Q_E = \frac{\sum_1^i Q_{ei} \cdot A_{ei}}{\sum_1^i A_{ei}} \quad (MJ / m^2 \text{ o } Mcal / m^2) \quad (7-4)$$

dónde:

Q_E = Densidad de carga de fuego, ponderada y corregida, del establecimiento industrial, en MJ/m² o Mcal/m².

Q_{ei} = Densidad de carga de fuego, ponderada y corregida, de cada uno de los edificios industriales (i), que componen el establecimiento industrial, en MJ/m² o Mcal/m².

A_{ei} = Superficie construida de cada uno de los edificios industriales, (i), que componen el establecimiento industrial, en m².

El nivel de riesgo intrínseco de un edificio o un conjunto de sectores de incendio de un establecimiento industrial, a los efectos de aplicación del RD 2267/2004, se evaluará calculando la siguiente expresión, que determina la densidad de carga de fuego, ponderada y corregida Q_e , de dicho edificio industrial.

$$Q_e = \frac{\sum_1^i Q_{si} \cdot A_i}{\sum_1^i A_i} \quad (MJ / m^2 \text{ o } Mcal / m^2) \quad (7-5)$$

dónde:

Q_e = Densidad de carga de fuego, ponderada y corregida, del edificio industrial, en MJ/m² o Mcal/m².

Q_{si} = Densidad de carga de fuego, ponderada y corregida, de cada uno de los sectores de incendio (i), que componen el edificio industrial, en MJ/m² o Mcal/m².

A_i = Superficie construida de cada uno de los sectores de incendio, (i), que componen el edificio industrial, en m².

Además, la normal también indica que para la evaluación del riesgo intrínseco se puede recurrir igualmente al uso de métodos de evaluación de reconocido prestigio; en tal caso, deberá justificarse en el proyecto el método empleado.

7.6.2.4. Consideraciones sobre el método simplificado.

La base de este método simplificado puede encontrarse en el método Gretener, tal y como indica la NTP-766 de INSHT (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo 2007). En 1960 M. Gretener, Ingeniero Diplomado suizo, emprendió un estudio sobre las posibilidades de evaluar matemáticamente el riesgo de incendio de las construcciones industriales y de los grandes edificios. Su método, presentado en 1965, estaba originalmente dirigido a satisfacer las necesidades de los aseguradores contra incendio, los cuales le acogieron con gran interés. El procedimiento de cálculo descrito, recomendado por la Asociación de establecimientos cantonales de seguro contra el incendio (AEAI) y el Servicio de Prevención de Incendio para la Industria y la Artesanía (SPI), se ha basado en estos trabajos (KAISER 1980).

Como indica (KAISER 1980) es su publicación "Experiences of the Gretener Method", la idea que subyace en este método Gretener es que las razones por las que el fuego puede iniciarse, así como su dimensión o severidad, realmente no son desconocidas, y podrían estimarse antes de comenzar éste. Desde que comenzó la prevención de incendios, estos parámetros han sido utilizados consciente o inconscientemente para formarse una opinión acerca del riesgo de incendio. Durante mucho tiempo, la intuición jugó un importante papel, y en ocasiones todavía hoy en día influye en conjunción con la experiencia adquirida. Pero la intuición para estimar un riesgo de incendio puede fallar, pues no todos los expertos tienen la misma experiencia, conocimientos y sensaciones. Lo ideal sería poder calcular el riesgo de incendio a partir de planteamientos completa-

mente científicos y de las leyes físicas. Esto sería posible en teoría, pero la realidad es que a día de hoy, todas las leyes que lo rigen no son completamente conocidas y desde luego, aunque muchas lo son, no es factible aplicarlas simultáneamente a un diseño y lograr resultados en un tiempo computacional razonable. De ahí que la mejor aproximación consista en la que hace el método de Gretener, consistente en parametrizar el riesgo de incendio a través de elementos fácilmente identificables que permita sistematizar el análisis del riesgo obteniendo valores numéricos que permitan realizar los cálculos en un tiempo mínimo.

El Método ha sido totalmente revisado y corregido, adaptándolo a los conocimientos adquiridos en Suiza y en otros países. Algunas simplificaciones permiten facilitar su aplicación práctica. Es este el caso del método Mapfre comentado anteriormente, que consiste en una simplificación del Gretener.

El método expuesto, propuesto por la norma española, también se basa en los preceptos de Gretener (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo 2007), y a partir de ahí pueden interpretarse el sentido de algunos de los parámetros que se manejan y analizar el origen de los datos apriorísticos que la norma proporciona, a fin de ser lo más rigurosos posible en su correcta aplicación a los distintos casos a analizar.

Dicha justificación puede encontrarse en la referencia (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo 1983a), donde se indica: “De entre los métodos de evaluación del riesgo de incendio europeos, el método de Max Gretener es el más utilizado, especialmente por los técnicos de compañías aseguradoras. El citado método incluye en sus anexos tablas pormenorizadas para la valoración de los parámetros que influyen sobre la carga térmica ponderada. Las citadas tablas pueden encontrarse traducidas al castellano en la Ordenanza Municipal contra Incendios de Zaragoza. El sistema de valoración de la peligrosidad de los combustibles utilizado en el método de Max Gretener es el recomendado por la C.E.A. (Comité Europeen des Assurances), en una de cuyas publicaciones, traducida al castellano por Cepreven, puede encontrarse un amplio listado de productos y la valoración de su peligrosidad. Del análisis detallado del contenido del Apéndice IV de la NBE-CPI-82 y las publicaciones citadas, se deduce que el contenido de la primera es un extracto de las segundas y por tanto los datos de estas publicaciones pueden ser utilizados en la valoración de la carga térmica ponderada con algunas adaptaciones.”

7.6.3. Nivel de riesgo intrínseco.

La norma (Anon.c) continúa, una vez evaluada la densidad de carga de fuego, ponderada y corregida, de un sector de incendio (Q_s), de un edificio industrial (Q_e) o de un establecimiento industrial (Q_E), según cualquiera de los procedimientos expuestos en los apartados anteriores, respectivamente, definiendo el nivel de riesgo intrínseco del sector

de incendio, del edificio industrial, o del establecimiento industrial, se deduce de la Tabla 1.3. del RD 2267/2004.

Tabla 7 - 4 - Niveles de riesgo intrínseco (RD 2267/2004)

TABLA 1.3

Nivel de riesgo intrínseco		Densidad de carga de fuego ponderada y corregida	
		Mcal/m ²	MJ/m ²
BAJO	1	$Q_s \leq 100$	$Q_s \leq 425$
	2	$100 < Q_s \leq 200$	$425 < Q_s \leq 850$
MEDIO	3	$200 < Q_s \leq 300$	$850 < Q_s \leq 1275$
	4	$300 < Q_s \leq 400$	$1275 < Q_s \leq 1700$
	5	$400 < Q_s \leq 800$	$1700 < Q_s \leq 3400$
ALTO	6	$800 < Q_s \leq 1600$	$3400 < Q_s \leq 6800$
	7	$1600 < Q_s \leq 3200$	$6800 < Q_s \leq 13600$
	8	$3200 < Q_s$	$13600 < Q_s$

Cabría preguntarse de dónde sale este concepto, para poder aproximarlos a los existentes a otras normativas internacionales en futuros desarrollos. La respuesta está en (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo 1983a); esta nota técnica de prevención explica cómo calcular el nivel de riesgo intrínseco, concepto este que aparece por primera vez en la normativa española en la ya derogada NBE-CPI 82. En este documento se indica que la presente NTP se complementa con las tablas contenidas en la NTP-37.83 (Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo 1983b).

Así mismo, también realiza una explicación sobre el objeto de la valoración, indicando que el citado método del riesgo intrínseco fue ideado para ser utilizado, en el aspecto de incendios, para la Regulación del Uso industrial. Se pretendía obtener un parámetro que permitiera establecer las condiciones de coexistencia de los riesgos de forma que se limitara la posibilidad de un incendio en una actividad, salvara los lindes de la propiedad y provocara consecuencias económicas o humanas a sus vecinos. La NBE-CPI-82 regula parcialmente dichos aspectos en los puntos que se transcriben a continuación: La siguiente tabla establece la distancia que deberán guardar los edificios a los cuales es de aplicación la presente NBE, respecto de pequeñas industrias que, por su naturaleza y tamaño, puedan ser ubicadas en el interior de cascos urbanos y según sea el riesgo

intrínseco de éstas. Dicho riesgo intrínseco se establecería conforme a los criterios contenidos en el Apéndice IV de la NBE CPI 82.

7.7. Condicionantes en la configuración de la planta. Compartimentación en sectores de incendio.

La superficie de un sector delimita la máxima dimensión y severidad que puede alcanzar un incendio plenamente desarrollado, sin que se propague a otros sectores y sin provocar el colapso de la estructura.

Puede abarcar una o varias plantas.

A continuación se exponen las consideraciones que realizan al respecto de la compartimentación en sectores de incendio en los edificios contemplando tanto el CTE DB SI como el RD 2267/2004.

Se contemplan limitaciones tanto en la superficie máxima admisible por sector, como en las características de resistencia al fuego que deben tener los elementos constructivos que separan cada sector de los colindantes.

7.7.1. Sectorización en el CTE DB SI.

Todo ESTABLECIMIENTO contenido en un edificio debe constituir sector de incendio diferenciado respecto del resto del edificio con las excepciones que se contemplan en el apartado de compatibilidades.

Cada USO contenido en un edificio o establecimiento debe constituir un sector de incendio diferenciado con las excepciones que se contemplan en el apartado de compatibilidades (ver CTE DB SI).

Los recintos diáfanos pueden constituir un solo sector, sea cual sea su superficie, sii:

- al menos el 90% de la superficie construida sea en una sola planta
- sus salidas comunican directamente al espacio libre exterior
- al menos el 75% de su perímetro es fachada
- no existe zona habitable sobre el recinto

Puede definirse recinto como “espacio cuyos elementos delimitadores horizontales y verticales impiden la propagación del humo hacia o desde otros espacios inmediatos”.

7.7.2. Sectorización en el RD 2267/2004.

Todo establecimiento industrial constituirá al menos un sector de incendio cuando adopte las configuraciones tipo A, tipo B o tipo C, o constituirá un área de incendio cuando adopte las configuraciones tipo D o tipo E.

La máxima superficie construida admisible de cada sector de incendio será la que se indica en la tabla 2.1. del RD 2267/2004.

Tabla 7 - 5 - Superficies máximas admisibles en función del tipo de edificio y nivel de riesgo

Tabla 2.1
MÁXIMA SUPERFICIE CONSTRUIDA ADMISIBLE DE CADA SECTOR DE INCENDIO

Riesgo intrínseco del sector de incendio	Configuración del establecimiento		
	TIPO A (m ²)	TIPO B (m ²)	TIPO C (m ²)
BAJO	(1)-(2)-(3)	(2) (3) (5)	(3) (4)
1	2000	6000	SIN LÍMITE
2	1000	4000	6000
MEDIO	(2)-(3)	(2) (3)	(3) (4)
3	500	3500	5000
4	400	3000	4000
5	300	2500	3500
ALTO	NO ADMITIDO	(3)	(3)(4)
6		2000	3000
7		1500	2500
8		NO ADMITIDO	2000

Notas a la tabla 2.1

(1) Si el sector de incendio está situado en primer nivel bajo rasante de calle, la máxima superficie construida admisible es de 400 m², que puede incrementarse por aplicación de las notas (2) y (3).

(2) Si el perímetro accesible del edificio es superior al 50 por 100 del perímetro del mismo, las máximas superficies construidas admisibles, indicadas en la tabla 2.1, pueden multiplicarse por 1,25.

(3) Cuando se instalen sistemas de rociadores automáticos de agua que no sean exigidos preceptivamente (apéndice 3) por este Reglamento, las máximas superficies construidas admisibles, indicadas en la tabla 2.1 del RD 2267/2004, pueden multiplicarse por 2.

[Las notas (2) y (3) pueden aplicarse simultáneamente].

(4) En configuraciones tipo C y para actividades de Riesgo Intrínseco Bajo o Medio, el sector de incendios, puede tener cualquier superficie si así lo requieren las cadenas de fabricación, siempre que cuenten con una instalación fija de extinción y la distancia a edificios de otras parcelas edif. de establecimientos industriales sea superior a 10 m.

(5) Para establecimientos industriales de tipo B, de riesgo intrínseco BAJO 1, cuya única actividad sea el almacenamiento de materiales de clase A y en el que los materiales de construcción empleados, incluidos los revestimientos, sean de clase A en su totalidad, se podrá aumentar la superficie máxima permitida del sector de incendio hasta 10.000 m².

7.7.2.1. Ubicaciones no permitidas de sectores de incendio con actividad industrial:

No se permite la ubicación de sectores de incendio con actividad industrial:

- De riesgo intrínseco alto, en configuraciones tipo A.
- De riesgo intrínseco medio, en planta bajo rasante, en configuraciones tipo A.
- De riesgo intrínseco medio, en configuraciones tipo A, cuando su fachada accesible sea inferior a 5 m.
- De riesgo intrínseco medio o bajo en planta sobre rasante cuya altura de evacuación sea superior a 15 m, en configuraciones tipo A.
- De riesgo intrínseco alto, cuando la altura de evacuación del edificio en sentido descendente sea superior a 15 m, en configuración tipo B.
- De riesgo intrínseco alto o medio en configuración tipo B, cuando el perímetro accesible del edificio sea inferior al 25 por 100 del perímetro del mismo (786/2001), ahora 5 m (en el RD 2267/2004).
- De cualquier riesgo, en segunda planta bajo rasante, en configuraciones tipo A, B o C, según apéndice 1 del RD 2267/2004.
- De riesgo intrínseco alto A-8, en configuraciones tipo B, según apéndice 1.

7.8. Comentarios sobre los conceptos de protección contra incendios de la normativa española y su origen.

Se comentan a continuación, a fin de no perder generalidad en los algoritmos implementados, la información existente al respecto de dónde derivan algunos de los conceptos que se han expuesto en los apartados anteriores, presentes en la normativa nacional. Básicamente estos conceptos y/o parámetros son:

- Carga de fuego ponderada y corregida.
- Peligrosidad por combustibilidad.
- Nivel de riesgo intrínseco.
- Riesgo de activación.

Sobre la carga de fuego ponderada y corregida, cabe indicar que es un método que se basa en el método de Gretener, que es uno de los más reconocidos internacionalmente y muy utilizado en casos reales desde hace años, con resultados satisfactorios, por lo que se considera adecuado utilizar el método de la norma española que se basa en el Método de Gretener.

Sobre la peligrosidad por combustibilidad, actualmente este parámetro está definido por una Euronorma, con lo que puede considerarse su aplicación como internacional, y su utilización aunque sea en el ámbito de la normativa española no hace perder generalidad en el enfoque por lo anteriormente expuesto.

7.9. Tablas de datos de partida necesarias en la aplicación para la modelización de la sectorización de incendios.

A la vista de la normativa analizada, se puede extraer un listado de información necesaria para el funcionamiento de una rutina que permita la sectorización automática de incendios como otro objetivo a tener en cuenta en la obtención de soluciones eficientes de Pareto, o en la aplicación de la técnica multicriterio expuesta. Esta información podría resumirse es:

- Superficies y formas de cada actividad (información ya disponible en los datos de partida del resto de objetivos clásicos contemplados en el problema de la distribución en planta).

- Cargas de fuego de cada actividad (por unidad de superficie o totales, incluyendo el grado de combustibilidad C_i y el riesgo de activación R_a).
- Tabla con graduación y número de los niveles de riesgo intrínseco a contemplar para cada sector a partir de la carga de fuego ponderada y corregida (función de la normativa aplicada).
- Tabla con los niveles de riesgo intrínseco (las cargas máximas de fuego ponderadas y corregidas por sector) permitidos en función del tipo de establecimiento (A, B, C, D, E).
- Tabla con los tamaños máximos de sector permitidos en función del tipo de establecimiento (A, B, C, D, E) y los niveles de riesgo.

Toda esta información se recoge en los siguientes cuadros de diálogo de la aplicación desarrollada:

	Nombre	Área	Ratio	Orientación libre	Perimetral
1	ACT. 1	3500	1	Verdadero	Falso
2	ACT. 2	1500	1	Verdadero	Falso
3	ACT. 3	3000	1	Verdadero	Falso
4	ACT. 4	40	1	Verdadero	Falso
5	ACT. 5	2000	1	Verdadero	Falso
6	ACT. 6	10	1	Verdadero	Falso
7	ACT. 7	20	1	Verdadero	Falso
8	ACT. 8	30	1	Verdadero	Falso
9	ACT. 9	500	1	Verdadero	Falso
10	ACT. 10	500	1	Verdadero	Falso
11	ACT. 11	10	1	Verdadero	Falso
12	ACT. 12	10	1	Verdadero	Falso
13	ACT. 13	10	1	Verdadero	Falso

Figura 7 - 3 - Introducción de datos geométricos para actividades

En el siguiente cuadro de diálogo puede verse la información mencionada sobre Tabla con los niveles de riesgo intrínseco (las cargas máximas de fuego ponderadas y corregidas por sector) permitidos en función del tipo de establecimiento, así como los tamaños máximos de sector permitidos en función del tipo de establecimiento y los niveles de riesgo:

The screenshot shows a window titled "Datos para la sectorización" with two columns of input fields. The first column is labeled "Carga de fuego p y c (MJ/m2)" and the second is "Superficies admisibles (Tipo C)". There are eight rows corresponding to risk levels from "Bajo (1)" to "Alto (8)". At the bottom, there is a checkbox for "Calcular distancias como intersectoriales (pasando por las puertas)" and two buttons: "Aceptar" and "Cancelar".

Riesgo	Carga de fuego p y c (MJ/m2)	Superficies admisibles (Tipo C)
Bajo (1)	425	50000
Bajo (2)	850	6000
Medio (3)	1275	5000
Medio (4)	1700	4000
Medio (5)	3400	3500
Alto (6)	6800	3000
Alto (7)	13600	2500
Alto (8)	50000	2000

Calcular distancias como intersectoriales (pasando por las puertas)

Aceptar Cancelar

Figura 7 - 4 - Introducción de datos para la definición de niveles de riesgo-superficies

Por simplicidad, se ha supuesto que todos los establecimientos que comprobaremos en esta aplicación experimental son tipo C según la normativa española, es decir, en parcela privativa con retranqueos superiores a 3 metros, de ahí que únicamente sea necesario implementar una tabla de datos, la que se muestra en el cuadro.

El listado con las cargas de fuego de cada actividad (por unidad de superficie o totales, incluyendo el grado de combustibilidad C_i y el riesgo de activación R_a), se introduce a partir del cuadro mostrado a continuación:

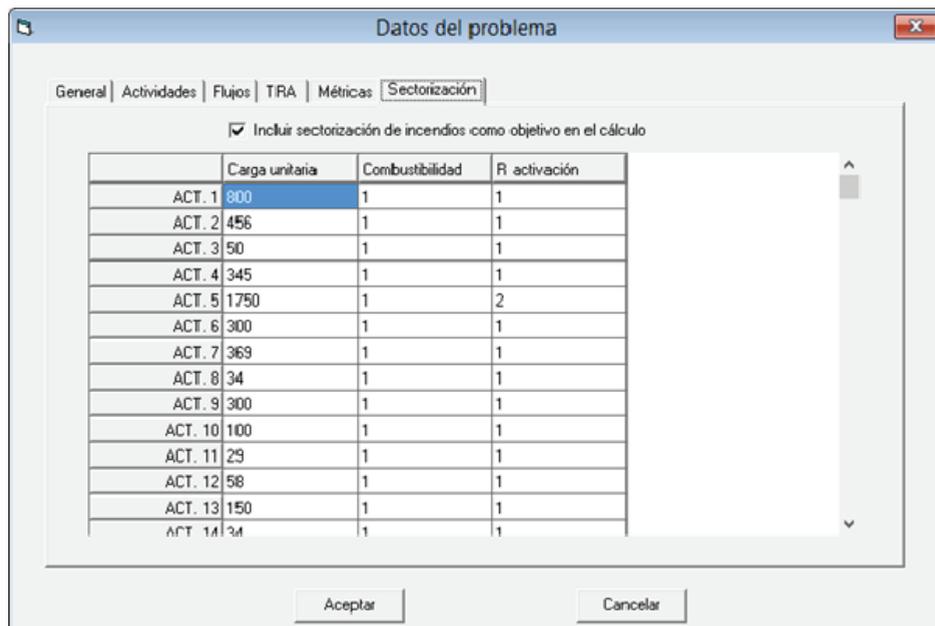


Figura 7 - 5 - Introducción de datos de cargas de fuego para cada actividad.

Nótese que se ha implementado una opción para dejar inhábil la comprobación de sectorización, a fin de economizar tiempo computacional en los planes experimentales de testeo del algoritmo con el resto de criterios implementados.

7.10. Propuesta de algoritmo de sectorización: Antecedentes.

Existe una gran tradición en la clásica Unidad Docente de Construcción y Arquitectura Industrial (actualmente U.D de Construcciones Industriales), así como una línea de investigación al respecto, sobre la resolución del problema de distribución en planta. Desde los años 90, el autor de esta tesis ha implementado aplicación informáticas de varios tipos para la resolución del problema de distribución en planta, basados, a modo de ejemplo, en algoritmos genéticos o en lógica borrosa. En cualquier caso, dichas aplicaciones, a menudo utilizadas en otras investigaciones o incluso con fines docentes, han proporcionado resultados satisfactorios tanto en el plano investigador como en el académico. Hasta el año 2001 aproximadamente, cuando apareció la normativa nacional de protección contra incendios en el ámbito industrial, los trabajos y proyectos que implicaban la ordenación de un establecimiento industrial, se realizan utilizando tanto técnicas clásicas manuales como la teoría de grafos, como las mencionadas aplicaciones informáticas de elaboración propia; dicho proceso constaba fundamentalmente de tres fases, a saber:

- Primera fase: Elaboración de la distribución en planta
- Segunda fase: Estudio de la normativa de protección contra incendios existente (NBE CPI en sus distintas versiones y ordenanzas municipales existentes) y aplicación a las zonas de edificación (fundamentalmente las oficinas) de la distribución en planta obtenida con anterioridad, y con carácter subsidiario en las zonas industriales, dada la no obligatoriedad. Salvo en casos excepcionales, la aplicación de dicha normativa no suponía modificación alguna de la solución óptima obtenida en el punto anterior para la zona industrial.
- Tercera fase: Dotar del adecuado ambiente térmico, higroscópico, acústico y lumínico a la solución obtenida.

A partir del año 2001, cuando aparece el RD 786/2001, precursor del vigente actualmente RD 2267/2004, el planteamiento cambia ligeramente, teniendo en consideración que, al tratarse a partir de entonces de una normativa de obligado cumplimiento en la gran mayoría de actividades de nueva planta, el planteamiento que se siguió fue:

- Primera fase: Elaboración de la distribución en planta
- Segunda fase: Aplicación de la normativa de protección contra incendios a la distribución en planta obtenida con anterioridad, con carácter obligatorio tanto en el ámbito industrial, como en los usos subsidiarios no industriales diferentes del principal. Cualquier distribución en planta que no cumpla los criterios normativos en todas las zonas, sean éstas industriales o no, carece de validez legal y por tanto no es viable.

- Tercera fase: Dotar del adecuado ambiente térmico, higroscópico, acústico y lumínico a la solución obtenida.

Este planteamiento secuencial se realiza en parte por las necesidades de plantear una secuencia lógica de diseño, prestando atención a los criterios de diseño de alguna manera en el orden de importancia que inicialmente se les atribuía desde el punto de vista legal, pero también por la imposibilidad de utilizar herramientas que consideren todos los criterios de diseño simultáneamente. Con este planteamiento expuesto, era más que frecuente en el desarrollo de los trabajos, que el proyectista encontrase numerosas dificultades en aplicar la normativa de incendios a la solución obtenida en el primer apartado, planteando con demasiada frecuencia modificaciones necesarias (e incluso convenientes) respecto del punto de vista de la seguridad contra incendios, alterando de este modo los parámetros de la solución obtenida en el apartado anterior.

Frente a esta realidad, cada vez más plausible a partir de la entrada en vigor del Código Técnico de la edificación, que impulsa el diseño basado en prestaciones y no en prescripciones, de la no conveniencia de desligar las fases de diseño, se ha comenzado por incluir el criterio de la sectorización en el diseño como un objetivo más medible en la calidad de la solución final adoptada, y por lo tanto optimizable como cualquier otro.

En el momento en que surge la idea de implementar la sectorización de incendios como un objetivo más del problema de distribución en planta, por su importancia y dada la obligatoriedad de su cumplimiento, se comienza a recopilar información y a investigar en el ámbito de la sectorización de incendios, buscando en la Web Of Science con los términos clave ("sectoring", "Compartmentalization", "Fire clustering", u otros similares) obteniendo escasas referencias, apenas un par de artículos sobre aplicaciones concretas al diseño de unos grandes almacenes (Song Wenhua et al. 2006) y algunas más antiguas hablando de sectorización, entre las que figuran éstas (Drury 1978, [Anonymous] 1995, Valiulis 2006):

- En (Drury 1978), el artículo lleva por título "CONCEPT SELECTION - FIRE COMPARTMENTATION. TECHNICAL STUDY", es el más antiguo y se hacen consideraciones generales sobre cómo influye la compartimentación en la arquitectura.
- En ([Anonymous] 1995), que lleva por título "Does fire resisting construction really provide effective compartmentation?", publicado en Health estate journal : journal of the Institute of Hospital Engineering, habla de la sectorización en el caso particular de los hospitales.
- En (Valiulis 2006), que lleva por título "Sealed up tight. New considerations for fire and smoke compartmentation.", también publicado en "Health facilities management", una publicación médica.

Por otra parte, se estudia también la diversa normativa de incendios, en busca de algoritmos o estrategias para la obtención de una sectorización óptima, no encontrándose nada al respecto. Tampoco se dispone de información sobre valoración objetiva de la calidad de la sectorización final obtenida en un establecimiento industrial, parámetros todos ellos necesarios para la elaboración de un algoritmo como el que se pretende elaborar.

Por ello en este trabajo se han propuesto tanto un algoritmo de sectorización, que funciona a partir de la información y criterios que las normativas de incendios utilizan, una función objetivo y una serie de parámetros que permiten considerar como influye esta sectorización en el trasiego de materiales (fundamentalmente flujos) a través de las distintas actividades, como se expondrá a continuación.

Es éste un primer paso, en el desarrollo total que se prevé realizar, como se comentará en el apartado final de desarrollos futuros de esta tesis doctoral, habiéndose pensado el desarrollo futuro de la evacuación (donde sí que existe más información disponible en la WOS y otras fuentes) y de las instalaciones de protección contra incendios, así como la integración con modelos de zona utilizando aplicaciones como CFAST que permiten obtener de forma ágil modelos que incluyen tanto estudio de temperaturas como de humos a fin de optimizar todos los parámetros del diseño de la seguridad contra incendios.

7.11. Criterios para la implementación del algoritmo de sectorización.

Como se ha indicado en el punto anterior, la información básica a introducir para el funcionamiento del algoritmo es:

- Carga de fuego de cada actividad, incluyendo C_i y R_a .
- Tabla con la clasificación de los niveles de riesgo intrínseco para cada sector a partir de la carga de fuego ponderada y corregida.
- Tabla con los niveles de riesgo intrínseco (las cargas máximas de fuego ponderadas y corregidas por sector) permitidos en función del tipo de establecimiento (A, B, C, D, E).
- Tabla con los tamaños máximo de sector permitidos en función del tipo de establecimiento (A, B, C, D, E) y los niveles de riesgo.

Aunque a priori no es trivial la definición de una información heurística a partir de los datos de riesgo y superficies indicadas, sí sería posible realizar una prospección previa al inicio del algoritmo evolutivo para establecer ciertos agrupamientos de actividades en

función de su riesgo de superficie que sirvan como información previa para iniciar el proceso. Ésta se ha plasmado en la aplicación con una función llamada "PRESECTORIZA", que se encarga de detectar actividades con niveles de superficie/riesgo no admisibles, dando un aviso para su corrección, así como de comprobar la agrupación de sectores a priori, para indicar en su caso, si fuera posible, que todas las actividades pueden ser agrupadas en un único sector, con lo que no sería necesario hacer perder tiempo de computación al algoritmo comprobando dicha sectorización.

No obstante a lo indicado, tras diversas pruebas realizadas se ha llegado a la conclusión de que la mejor información heurística de la que se puede partir es la propia información existente en la tabla de flujos y en la tabla relacional de actividades, teniendo en consideración que la sectorización debería siempre, en cualquier caso, favorecer el adecuado desarrollo de la actividad industrial sin trabas, por lo que será deseable que el agrupamiento de actividades se realice, además de obedeciendo a criterios de seguridad, a los propios requerimientos de la actividad industrial, siempre que esto sea viable.

Planteamiento de la presectorización:

- Se obtiene una matriz heurística, con la información (heurística, valga la redundancia) existente para el resto de criterios (flujos y TRA).
- Inicialmente se comprueban todas las actividades, considerando las cargas de fuego de cada una de ellas y su superficie, de modo que no haya ninguna actividad que haga inviable la sectorización por los niveles de riesgo obtenidos y las superficies resultantes en el estudio preliminar de las mismas.
- Se valora la posibilidad de agrupar todo en un sector si por un tanteo previo, esto es viable.
- Si esto no fuera posible, se realiza un tanteo sobre el número máximo de sectores de se podría obtener en la solución final, como valor de referencia.
- Se inicial el algoritmo a partir de esta información, se implementan las soluciones sobre una planta real bidimensional y se valora la calidad de la sectorización obtenida, como un objetivo más a tener en cuenta en la elección de la solución, atendiendo a los criterios que se indican: mínimo número de sectores y mínima longitud de cerramiento de partición entre pares de sectores.

Criterios seguidos en la valoración; la calidad final se mide en función de la mínima sectorización necesaria, atendiendo a:

- Mínimo número de sectores (y por tanto mayor superficie diáfana).
- Menor riesgo logrado en los sectores.
- Mínimo número y longitud (superficie en 3D) de cerramientos de sectorización.

Para realizar las valoraciones se definirán en apartados posteriores de este capítulo funciones objetivo adecuadas que midan y normalicen estos parámetros.

El algoritmo ACO utilizará en tanto la información previa (heurística) obtenida a partir del resto de criterios computados inicialmente, como la información proporcionada por la memoria colectiva (matrices de trazas) para el objetivo de minimizar la sectorización, de forma similar al resto de criterios ya expuestos en capítulos anteriores.

7.12. Algoritmo de presectorización: función Presectoriza().

Inicialmente, antes de arrancar el proceso iterativo, se realizan una serie de comprobaciones básicas para hacer más eficiente computacionalmente el proceso. En primer lugar se reinician todas las variables y se redimensionan las matrices de datos.

Como se expuso en el capítulo anterior, las normativas de sectorización tienen, en función del tipo de edificio y del nivel de riesgo, unas superficies máximas admisibles por sector, de modo que superficies mayores a las admisibles en función de sus niveles de riesgo no están permitidas. Es por ello que en primer lugar, lo que el algoritmo comprueba es que no se haya definido ninguna actividad cuya sectorización sea inviable debido a su superficie y/o su nivel de riesgo intrínseco. El programa saca un aviso para que modifiquemos los datos de partida.

Básicamente es posible operar de dos formas para hacer viable la sectorización:

- Dividir la actividad: si se supera la máxima superficie admisible, puede dividirse la actividad en dos zonas de modo que cada una de ellas pueda constituir un sector,
- Bajar la carga de fuego: en caso de almacenes por ejemplo, reduciendo la altura de almacenamiento.

A continuación, este algoritmo comprueba que el establecimiento realmente ofrezca ciertas dificultades al establecer la sectorización óptima, y prueba a incluirlo todo en un sector. Si esto es posible, desactiva este objetivo en la optimización para lograr mayor poder computacionalmente, y avisa de que no es necesario sectorizar, ofreciendo un precálculo con la información del sector de incendios único que resulta del mismo.

Si no es posible incluir todas las actividades en el mismo sector, realiza una estimación del número máximo de sectores que podrían resultar del cálculo y lo almacena como referencia.

La variable que contiene todos los datos de la sectorización es DatosSectores().

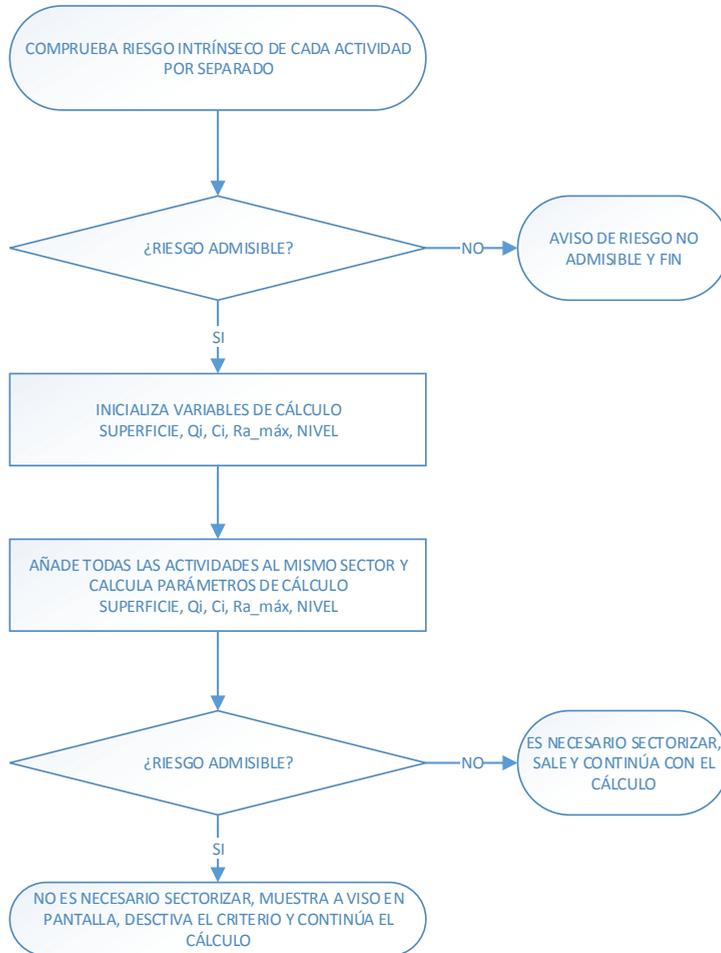


Figura 7 - 6 – Diagrama de flujo del procedimiento Presectoriza()

7.13. Algoritmo de sectorización: función ConstruyeSectores().

Una vez corroborado que es necesario sectorizar, el algoritmo opera durante la construcción de cada una de las soluciones. Existe una función de construcción de la solución llamada PróximaActividad(). Dicha función proporciona, atendiendo a los criterios heurísticos y memorísticos mencionados en el capítulo correspondiente, la siguiente actividad a ubicar en la secuencia de construcción de la solución.

En este momento, se llama a la función `ConstruyeSectores()` pasándole como información el índice de dicha actividad. Simultáneamente a la construcción de la solución se construye el sector. La construcción funciona tal y como puede verse en la siguiente figura, que muestra su diagrama de flujo:

Básicamente, en esquema, el funcionamiento es el siguiente:

- Con la primera actividad proporcionada, crea un nuevo sector y se comprueba que es válido, así como sus características (metros², carga de fuego, nivel de riesgo); recuérdese que este sector con una única actividad siempre será viable, pues esta comprobación ya se realizó con la función `Presectoriza()`.
- Cuando se vuelve a llamar a la función, con una 2ª actividad, opera del siguiente modo:
 - o Guarda todos los parámetros del sector actual, paso previo a añadir esta nueva actividad al sector actualmente en construcción.
 - o Añade la nueva actividad al sector en construcción, calculando todos los parámetros del nuevo sector que resultaría y almacenándolos e variables temporales.
 - o Comprueba que dicho sector sea viable; si lo es, añade la actividad definitivamente al sector y repite el proceso con una nueva actividad.
 - o Si no es viable, deja el sector como está, restituye las variables iniciales y crea un nuevo sector que comienza con dicha actividad, calculando sus parámetros de superficie, carga de fuego, etc.
- Con la última actividad, el proceso finaliza.

Cabe indicar que en la primera iteración el proceso se alimenta únicamente con la información heurística disponible sobre la necesidad de agrupamiento de las actividades por sus relaciones y flujos. Una vez finalizada dicha iteración, ya se dispondrá de sendas matrices de trazas con información de proceso iterativo anterior y los resultados obtenidos, con lo que el proceso de selección de las actividades en la función indicada "`ProximaActividad()`" estará condicionada por la memoria colectiva del objetivo de sectorización que se expone en este capítulo.

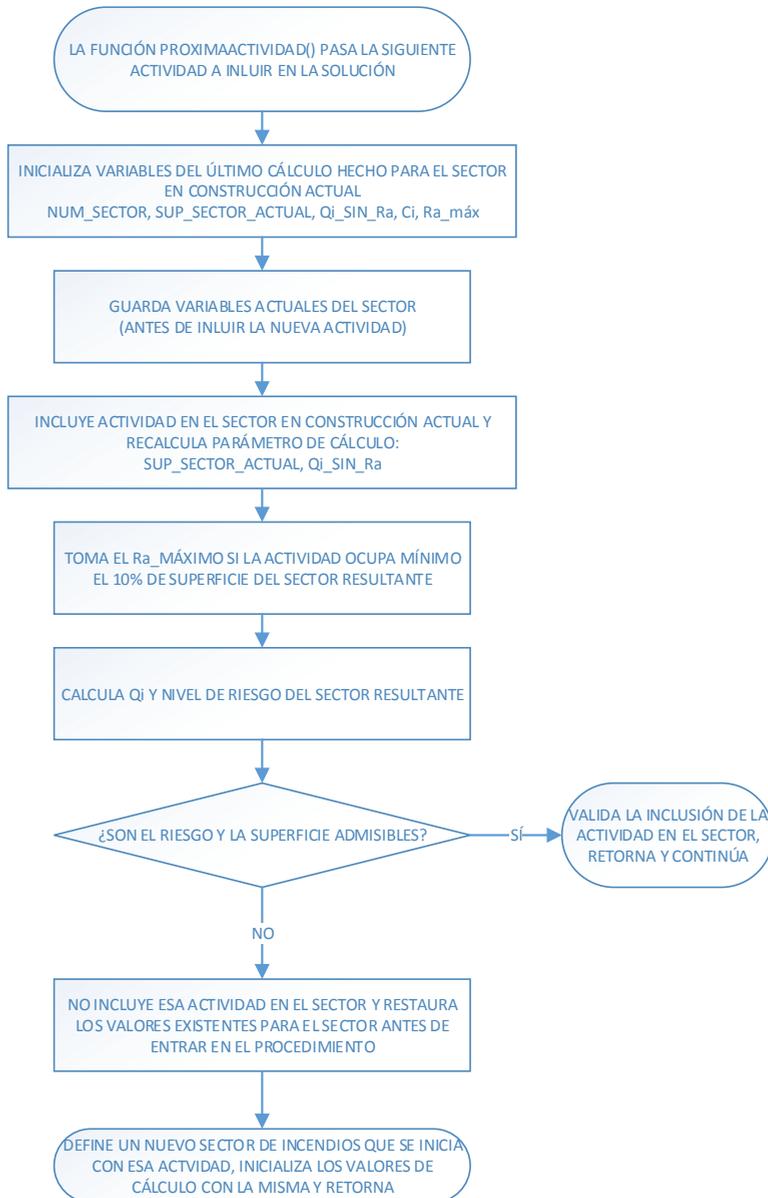


Figura 7 - 7 – Diagrama de flujo del procedimiento ConstruyeSector(es).

7.14. Definición de particiones: Cerramientos entre sectores.

Una vez completamente definido el layout, con su forma final y la secuencia de actividades asignadas a la matriz de casillas que definen la configuración espacial real, y determinados los sectores de incendios que agrupan cada una de las actividades, se propone un algoritmo que reconoce las fronteras que separan los sectores, definiéndolos como cerramientos.

Se hace necesario precisar que únicamente se incluyen como cerramientos de sectorización, los que se están definiendo en este problema, aquellos que separan sectores de incendio, y no los del perímetro exterior del establecimiento. Éstos, aunque pudieran igualmente ser reconocidos por el algoritmo que se propone, no son objeto de la sectorización y por tanto no se incluyen.

Inicialmente se resetean las variables, se inicializa el contador de cerramientos a 0 y se redimensionan las matrices y objetos de datos. Comienza el algoritmo repasando la relación de todas las casillas del layout con las adyacentes. El algoritmo identifica los pares de actividades que corresponden a cada casilla. Si el par de casillas corresponde a actividades diferentes, comprueba que a su vez pertenezcan a sectores diferentes. Si son actividades distintas, adyacentes y que pertenecen a sectores diferentes, identifica este contacto como un tramo de cerramiento. El algoritmo comprueba cada casilla por todos sus lados, arriba, abajo, izquierda y derecha. Reconoce si el tramo es nuevo, y si es así define un nuevo cerramiento. Si corresponde a un cerramiento que ya existe en la lista de cerramientos existente, añade el nuevo tramo detectado e incrementa su contador de tramos.

Se repasan con esta operativa todas las casillas, de modo que finalmente se detectan una serie de cerramientos, cada uno de ellos con un número de tramos. Un problema que existe en el reconocimiento es que se detectan adyacencias por ambas partes (desde i a j y de j a i) de modo que, aunque reconoce que es el mismo cerramiento, define el tramo dos veces, es decir, existen duplicados en la lista.

Este problema se elimina con otra función, llamada OrdenaTramos(), encargada de ordenar los tramos geoméricamente para definir el cerramiento de inicio a fin (no es más que una función creada con la filosofía de ordenación y tratamiento de listas de datos), y simultáneamente detectar y eliminar duplicados. El tramo almacena tanto la información (coordenadas) de la casilla comprobada como de su adyacente (en cada caso la que corresponda, en función de la comprobación).

7.15. Puntos de paso: Definición de puertas entre sectores.

Como se ha indicado en el punto anterior, se definen objetos cerramiento, que se almacenan en una lista de cerramientos, con la información del número de tramos y coordenadas de cada tramo detectado. Habitualmente, cada uno de estos objetos definidos como cerramiento, se corresponde con una frontera de contacto entre un par de sectores. Es evidente que, al existir ahora estas barreras que impiden el libre trasiego de materiales y elementos de manutención a través de las actividades de la planta (por ser la voluntad del legislador limitar la máxima dimensión y severidad que pueda alcanzar un incendio), máxime cuando éstas pertenecen a sectores diferentes, será necesario definir unos puntos de paso entre sectores a fin de que los elementos de manutención puedan realizar el trasiego de los materiales entre sectores.

En este caso no es necesario exponer la función que define las puertas, pues es de una gran sencillez: por simplicidad en los cálculos, y evitar la intervención del proyectista a mitad del proceso de optimización, se opta por definir una única puerta por cerramiento entre par de sectores, y posicionada en el centro del mismo.

La posición de dichas puertas se dibuja en la solución final como puntos gruesos, como puede verse en la imagen siguiente:

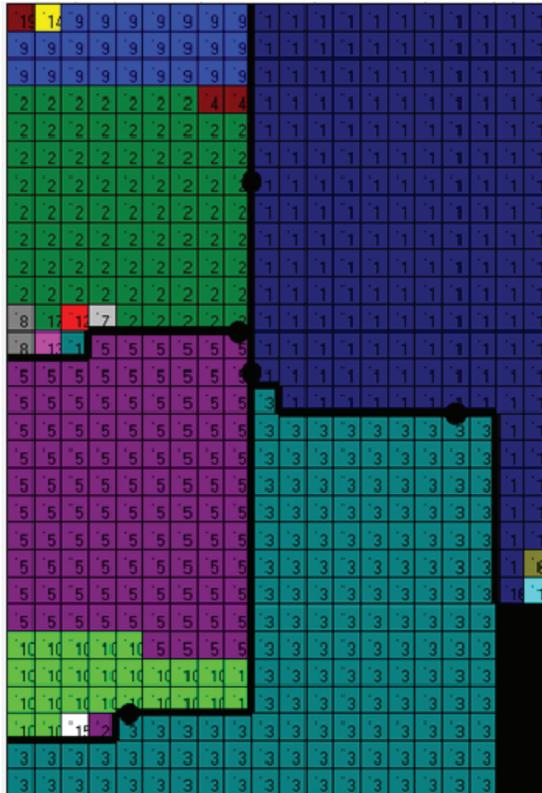


Figura 7 - 8 - Representación de sectores de incendio y puntos de paso (puertas).

7.16. Consideraciones sobre el cálculo de distancias en la sectorización.

Es obvio que el hecho de considerar que existen particiones en la planta industrial, hace necesario modificar los itinerarios para alcanzar las distintas zonas de la planta.

Como ya se indicó en el capítulo de métricas de distancia, se contemplan varias métricas en el cálculo, pudiendo configurarse éstas incluso de forma distinta para cada par de actividades, a saber:

- Manhattan
- Euclídea
- Tchebychef
- EDIST

Se recuerda el cuadro de diálogo donde pueden modificarse estos parámetros:

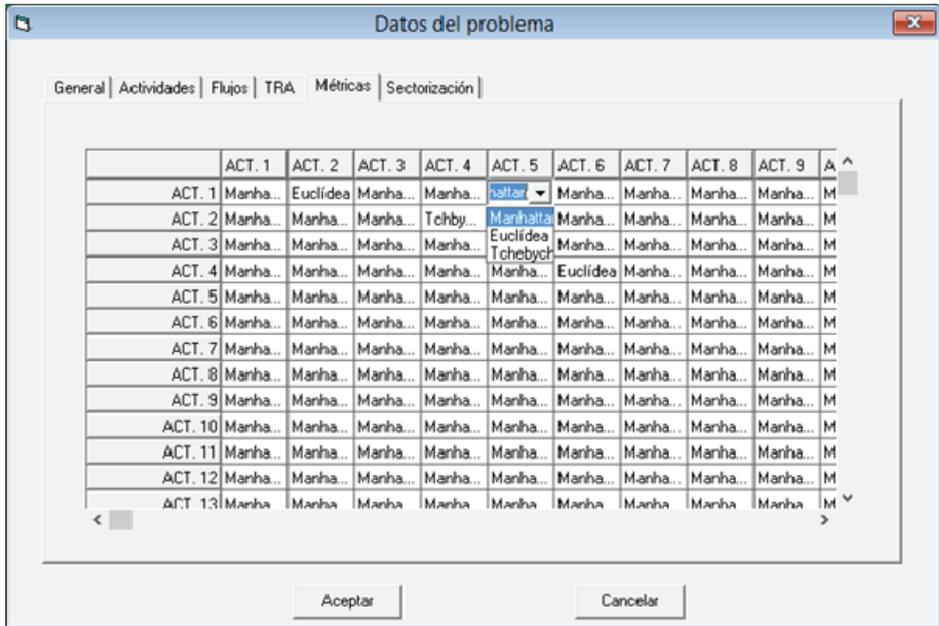


Figura 7 - 9 - Tablas de introducción de datos - métricas de distancia.

Cuando dos actividades pertenecen a un mismo sector, no existen mayores problemas para seguir haciendo el cálculo 'tradicional' utilizando la métrica de distancia seleccionada.

Este tipo de cálculo deja de ser válido cuando dichas actividades pertenecen a diferentes sectores, pues existe como mínimo un cerramiento de partición que impide el paso, salvo por puntos de paso obligado, esto es, las puertas que existan en el mismo. Como ya se indicó, existe por defecto una única puerta en cada cerramiento, que será el punto de paso obligado para el trasiego de materiales entre actividades que pertenecen a sectores distintos. Existen dos posibilidades:

- Los sectores son adyacentes: La distancia entre centros de gravedad de actividades se computan con la métrica que se haya definido. Simplemente consta de 2 términos: el primero es el camino de la primera actividad a la puerta, y el segundo es el camino desde la puerta a la 2ª actividad.

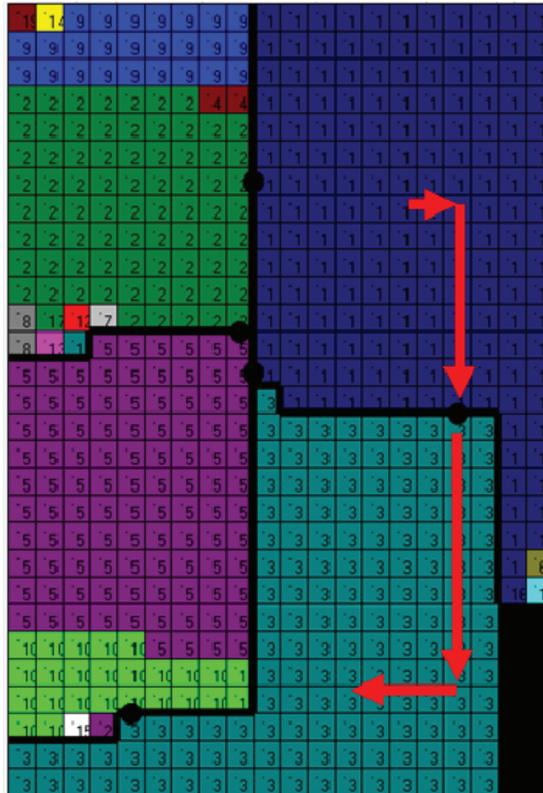


Figura 7 - 10 - Distancia intersectorial – caso I – Sectores con frontera común.

- Los sectores no son adyacentes, y hay que pasar por medio de otros para alcanzar desde la actividad i, la actividad j. En este caso la estrategia debe ser ligeramente diferente, y se computan 3 términos: el primero es el tramo desde la primera actividad a la puerta de salida de su sector; el segundo es el tramo desde dicha puerta de salida hasta la puerta de entrada al sector correspondiente a la segunda actividad. Como puede darse la circunstancia de que en un sector existan varias puertas, la estrategia escogida es la de considerar las puertas más próximas entre sí, de entre todas las posibles combinaciones existentes para llegar de un sector a otro, pasando por todos los demás que pudieran existir en la solución.

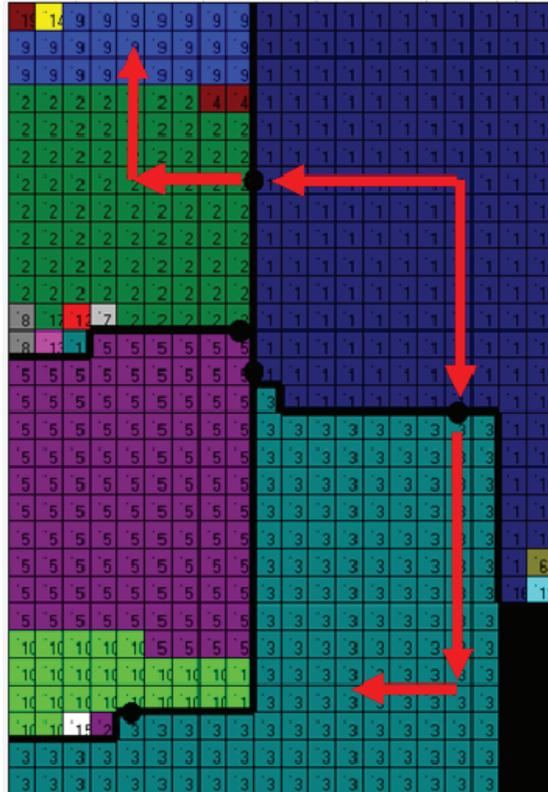


Figura 7 - 11 - Distancia intersectorial – caso II – Sectores no adyacentes sin frontera común.

Se ha denominado a esta distancia DISTANCIA INTERSECTORIAL, y se ha definido del modo indicado, y se trata de una de las aportaciones de este trabajo.

Es obvio que, esta forma de considerar las distancias, como no puede ser de otro modo para que éstas sean realistas, conduce a valores mayores de distancia que los métodos tradicionalmente considerados. Es por ello que se incluye la opción de considerar el cálculo con las distancias tradicionales (obviando los pasos entre sectores) a fin de poder comparar las soluciones obtenidas con las de la bibliografía tradicional, o cuando no se desea incluir en el cálculo la sectorización de incendios. Existe una casilla opcional en la matriz de métricas que indica “Considerar distancia intersectorial” dispuesta a este fin.

Se muestra un diagrama de flujo de la función, con su funcionamiento bajo las premisas anteriormente expuestas:

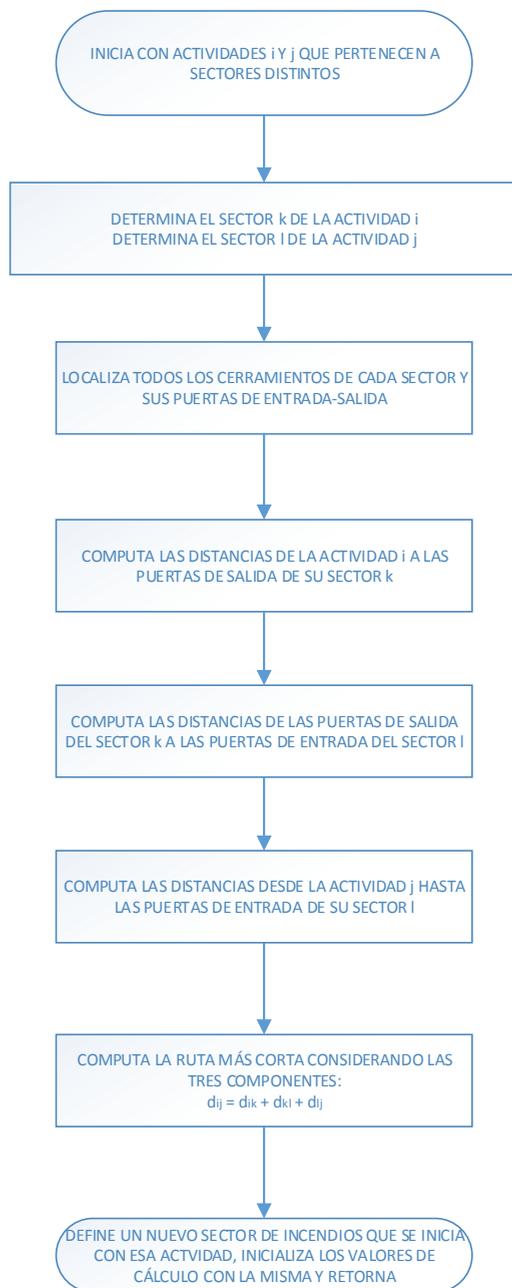


Figura 7 - 12 – Diagrama de flujo de la función BuscaRutaIntersectorial().

7.17. Valoración de la calidad de la sectorización.

Tampoco se han encontrado criterios objetivos en la bibliografía que permitan considerar una valoración biunívoca de las distintas soluciones de sectorización obtenidas. Teniendo esto en cuenta, se ha optado por definir una función que tenga en cuenta criterios de economía, siguiendo los siguientes criterios, todos ellos basados en la economía de la solución:

- Minimizar el número de sectores: La solución será tanto mejor cuanto menos sectorizada se encuentre. Es éste un criterio de economía en fase de explotación, pues reduce las distancias recorridas en la planta (al no tener que pasar por las puertas entre sectores). A partir de varias pruebas realizadas considerando la distancia intersectorial o la ordinaria (con cualquiera de sus métricas), se ha estimado que el ahorro asociado al trasiego de materiales puede ser superior al 25% en el caso de no considerar sectores.
- Minimizar la superficie de cerramientos a construir entre sectores: La solución será tanto mejor cuanto menos metros cuadrados de cerramiento implique, lo cual en el caso bidimensional se traduce en una menor longitud de cerramientos en la solución. Dicho criterio de valoración implicaría un ahorro directo en fase de ejecución, pues implica un menor coste de ejecución material en las partidas de cerramientos, las cuales pueden llegar a tener un coste elevado, si se considera que no se trata, en general, de cerramientos ordinarios, sino de cerramientos de sectorización que deben cumplir ciertas condiciones de estanqueidad, resistencia y aislamiento, con el agravante de que en naves industriales, suele ser necesaria una altura superior a los 5 metros.

Se opta por una penalización factorial para plasmar el primer criterio, y una penalización lineal para el segundo criterio, cuyas expresiones se exponen en el siguiente apartado.

7.18. Definición de la función objetivo de la sectorización.

Como se acaba de exponer, es necesario definir una función objetivo que permita valorar de forma ágil las distintas soluciones de sectorización obtenidas durante el funcionamiento del algoritmo.

Para el primer criterio se opta por una penalización factorial, muy sencilla, en función del número de sectores de la solución final, de modo que:

$$\text{Penalización por } n^{\circ} \text{ sectores} = S! \quad \text{donde } S = n^{\circ} \text{ de sectores} \quad (7-6)$$

De modo que para un único sector, la penalización es 1 (no penaliza), para 2 es el doble que con 1, para 3 es 6, el triple que para 2, y a partir de 4 se dispara. Estos serían penalizaciones en los costes relativos, de modo que si es posible lograr una sectorización con menor número de sectores ésta sea ampliamente favorecida por las implicaciones mencionadas sobre la distancia intersectorial y su importante aumento de los costes.

Esta penalización opera multiplicando a la función de coste, de modo que la importancia es relativa al resto de soluciones, de modo que si sólo es posible obtener soluciones con un mínimo de 4 sectores, aunque todas estén multiplicadas por 4! (24) el coste final relativo, a igualdad de cerramientos, será el mismo.

Para el segundo criterio una penalización lineal, cuya expresión, con el afán de simplificar al máximo se supone lineal, será directamente el cómputo de la cantidad total (longitud) de los cerramientos de separación de sectores en la planta:

$$\text{Min } C_{\text{sectorización}} = S! \cdot \sum_{i=1}^{n^{\circ} \text{cerra}} \sum_{j=1}^{n^{\circ} \text{mientos tramos}} 1 \quad (3-18)$$

Se suma una unidad (1) por tramo dado que en el planteamiento discreto tipo ALDEP que se ha realizado en este trabajo todos los tramos (cada tramo se corresponde con el lado de una casilla) son iguales en longitud y únicamente cambia su orientación.

Como ya comenté en el capítulo 3, no es necesario incluir en estas expresiones los cerramientos de fachada, pues estos siempre existen y al tratarse en la mayoría de ocasiones en proyectos de nueva planta de edificios alejados de otros establecimientos industriales como mínimo una distancia igual a los retranqueos (normalmente mínimo 3 metros) no necesitarán cumplir condición alguna de resistencia al fuego (REI) más allá de las franjas de encuentro entre sectores (en la normativa española 1 metro).

Capítulo 08

Aplicación informática implementada

8.1. Presentación de la aplicación.

Como se ha comentado ya en la introducción de este trabajo, se presenta en esta Tesis Doctoral una aplicación informática en la que se desarrolla un algoritmo híbrido basado en colonias de hormigas, conjunto de técnicas éstas que se conocen en la bibliografía existente como ACO (Ant Colony Optimization), con hasta 4 variantes del mismo implementadas.

Como también se comentó ya en el trabajo, se trata de la última aplicación implementada en la Unidad Docente, inicialmente con propósitos académicos que, con estudios más rigurosos y desarrollos posteriores, han finalizado en este trabajo Doctoral. Como ya se ha expuesto con anterioridad, se basa en algoritmos ACO ("Ant Colony Optimization"), cuyas variantes ya se han explicado en el capítulo 6 de este trabajo. En cualquier caso, dichas aplicaciones, a menudo utilizadas en otras investigaciones o incluso con fines docentes, han proporcionado resultados satisfactorios tanto en el plano investigador como en el académico. Hasta el año 2001 aproximadamente, el planteamiento en los trabajos y proyectos donde se desarrollaba íntegramente la ordenación de un establecimiento industrial, utilizando tanto técnicas clásicas manuales como la teoría de grafos, como con aplicaciones informáticas de elaboración propia, era secuencial, prestando especial atención a la distribución en planta como criterio de economía en el diseño.

En general, en cualquier proyecto debería poderse conseguir una buena distribución en planta, junto con la protección contra incendios y la seguridad e higiene en el trabajo industrial. El enfoque tradicional se realiza de forma secuencial según los contenidos

teóricos indicados. Este planteamiento secuencial se realiza en parte por las necesidades del paulatino proceso de diseño por etapas, pero también por la imposibilidad de utilizar herramientas que consideren todos los criterios de diseño simultáneamente. Con este planteamiento expuesto, era más que frecuente en el desarrollo de los trabajos, que el proyectista encontrase numerosas dificultades en aplicar la normativa de incendios a la solución obtenida en el primer apartado (mediante aplicaciones del estilo comentado), planteando con demasiada frecuencia modificaciones necesarias (e incluso convenientes) respecto del punto de vista de la seguridad contra incendios, alterando de este modo los parámetros de la solución obtenida en el apartado anterior.

Es por esto que al verse en la necesidad de tener que aplicar prácticamente en todos los casos la normativa de Protección Contra Incendios en Establecimientos Industriales, el planteamiento cambió ligeramente, teniendo en consideración que, al tratarse a partir de entonces de una normativa de obligado cumplimiento en la gran mayoría de actividades de nueva planta, y el planteamiento que se siguió fue en una primera fase la elaboración de la distribución en planta, mientras que en una segunda fase se exigía la aplicación de la normativa de protección contra incendios a la distribución en planta obtenida con anterioridad, con carácter obligatorio tanto en el ámbito industrial, como en los usos subsidiarios no industriales diferentes del principal. Cualquier distribución en planta que no cumpla los criterios normativos en todas las zonas, sean éstas industriales o no, carece de validez legal y por tanto no es viable. En una tercera fase se dota del adecuado ambiente térmico, higroscópico, acústico y lumínico a la solución obtenida.

Frente a esta realidad, cada vez más plausible a partir de la entrada en vigor del Código Técnico de la edificación, que impulsa el diseño basado en prestaciones y no en prescripciones, de la no conveniencia de desligar las fases de diseño, se ha comenzado por incluir el criterio de la sectorización en el diseño como un objetivo más medible en la calidad de la solución final adoptada, y por lo tanto optimizable como cualquier otro. Y es con este fin con el que se implementa esta aplicación, con la idea de ir enlazando progresivamente las fases del diseño de la actividad industrial de modo que se contemplen la mayoría de los objetivos de diseño en un establecimiento de forma simultánea, al menos en aquellos aspectos que afectan al diseño, en configuración espacial, diseño o materiales, de la construcción.

Como ya se comentó en apartados anteriores, es éste un primer paso encaminado a ligar más fases del diseño de la actividad industrial; en este trabajo se ha comenzado realizando una propuesta de algoritmo de sectorización, que funciona a partir de la información y criterios que las normativas de incendios utilizan, y se ha definido también una propuesta de función objetivo, así como una serie de parámetros que permiten considerar como influye esta sectorización en el trasiego de materiales (fundamentalmente flujos) a través de las distintas actividades.

8.2. Manual del usuario de la aplicación.

Al arrancar la aplicación, se abre una pantalla de presentación que indica la versión del programa, la autoría, el Departamento, etc. como ésta:



Figura 8 - 1 - Pantalla de presentación de la aplicación

Y a continuación se muestra la pantalla en blanco con los elementos de menú disponibles:

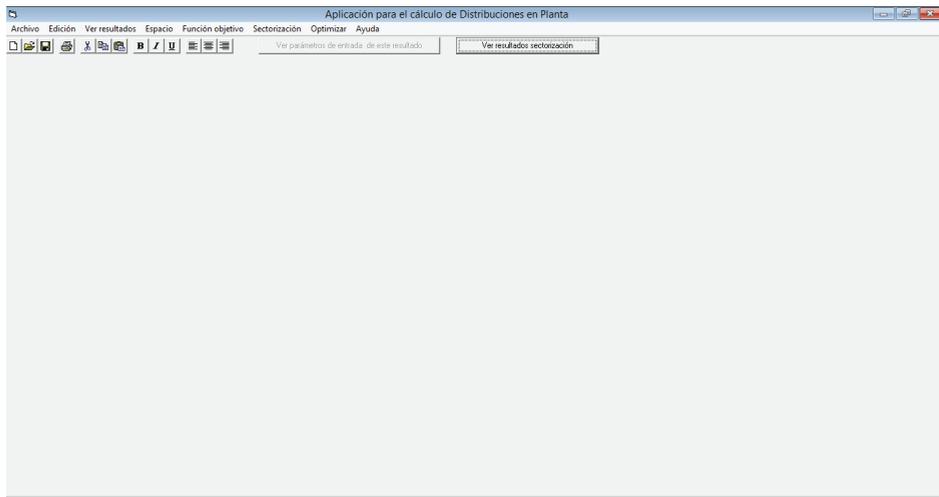


Figura 8 - 2 - Pantalla principal de la aplicación

Para definir un nuevo caso, basta con ir al menú archivo, donde existe una opción que indica "Nuevo":

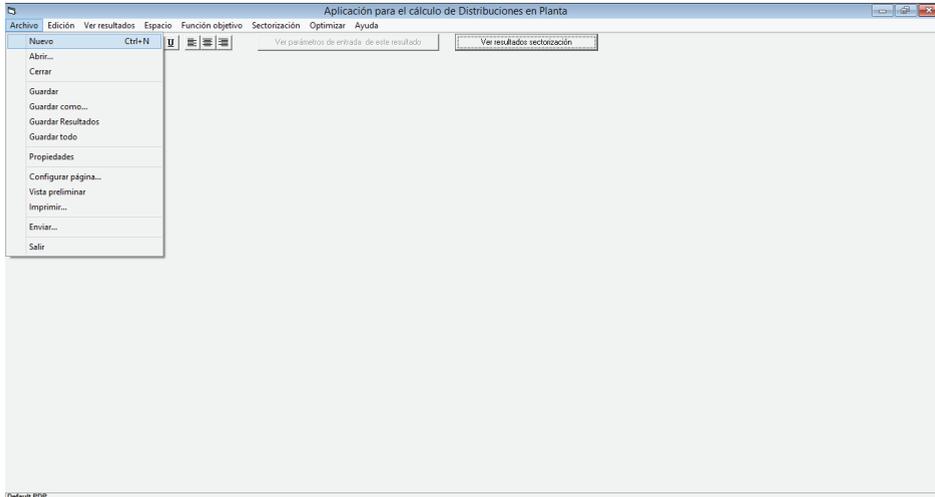


Figura 8 - 3 – Definir archivo nuevo.

Aparece un cuadro de diálogo donde hay un total de seis pestañas, en las que definir casi complementa la información de partida del problema. En la pestaña "General" debe indicarse el número de actividades (espacios) a ubicar en el problema.

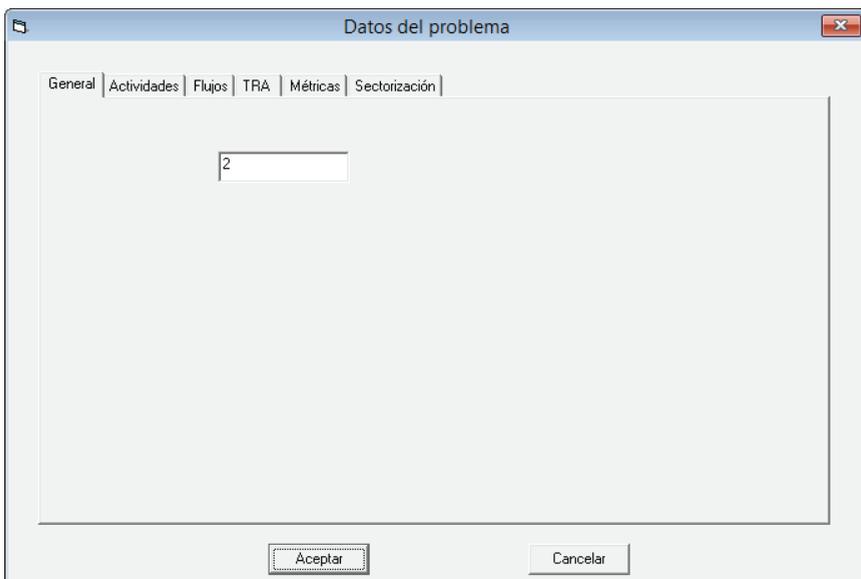


Figura 8 - 4 – Pestaña General – Define número de actividades del problema

A continuación en la pestaña “Actividades” puede introducirse la información sobre el nombre, superficie, y aspecto geométrico deseados para cada actividad:

	Nombre	Área	Ratio	Orientación libre	Perimetral
1	ACT. 1	10	1	Verdadero	Falso
2	ACT. 2	25	1	Verdadero	Falso
3	ACT. 3	10	1	Verdadero	Falso
4	ACT. 4	22	1	Verdadero	Falso
5	ACT. 5	10	1	Verdadero	Falso
6	ACT. 6	10	1	Verdadero	Falso
7	ACT. 7	67	1	Verdadero	Falso
8	ACT. 8	10	1	Verdadero	Falso

Figura 8 - 5 – Definición de datos de las actividades.

Pulsando en “Flujos” aparece una matriz, no simétrica, donde se pueden introducir los trasiegos de materiales entre pares de actividades (en unidades MAG, de coste, o como se desee):

	ACT. 1	ACT. 2	ACT. 3	ACT. 4	ACT. 5	ACT. 6	ACT. 7	ACT. 8
ACT. 1	0	23	0	0	0	0	0	0
ACT. 2	0	0	32	0	8	0	0	0
ACT. 3	0	0	0	22	0	0	0	33
ACT. 4	0	0	0	0	0	0	0	0
ACT. 5	0	0	0	0	0	0	0	0
ACT. 6	0	17	0	0	0	0	0	0
ACT. 7	0	0	0	0	0	0	0	0
ACT. 8	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 8 - 6 – Definición de matriz de flujos.

Y de forma casi idéntica para la TRA, con la consideración de que, como ya se comentó en los primeros capítulos, esta matriz es simétrica:

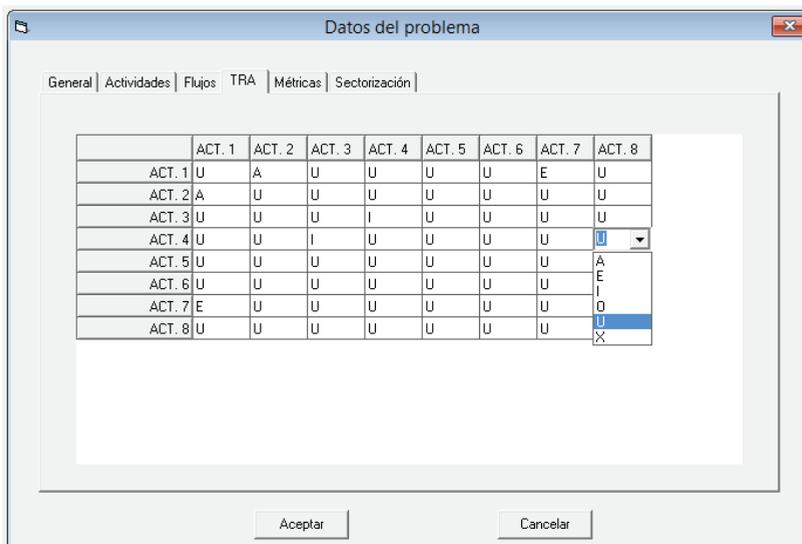


Figura 8 - 7 – Definición de la TRA.

También puede modificarse la matriz de métricas, de modo que puede usarse una combinación de las que se comentaron en el capítulo 5 de este trabajo sobre tratamiento del espacio (euclídea, Manhattan, Tchebycheff o EDIST):

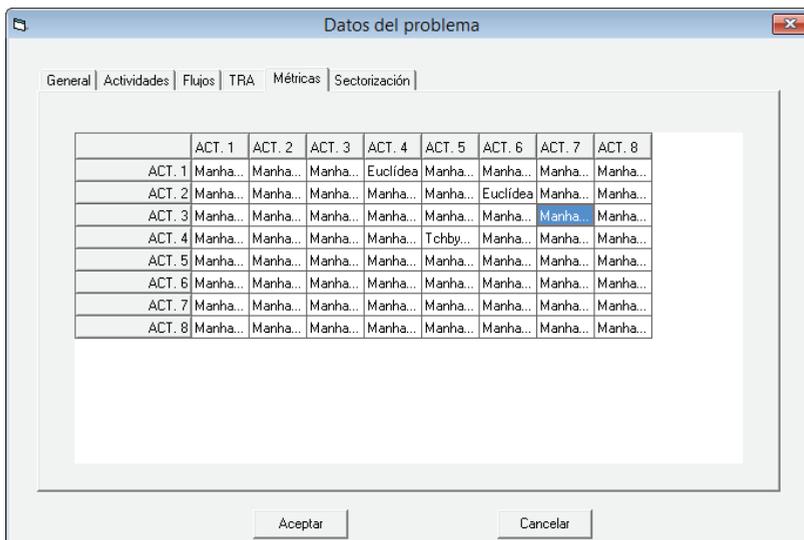


Figura 8 - 8 – Definición de métricas de distancia.

Por último, para acabar de definir el problema, se debe introducir la información correspondiente a la sectorización de incendios en la pestaña “Sectorización”. Dado que no siempre es necesaria la sectorización por razón de riesgo o superficie, se permite desactivar este criterio a fin de agilizar el cálculo y evitar los pasos que supone el cálculo de la misma:

Datos del problema

General | Actividades | Flujos | TRA | Métricas | Sectorización

Incluir sectorización de incendios como objetivo en el cálculo

	Carga unitaria	Combustibilidad	R activación
ACT. 1	350	1,6	1,5
ACT. 2	120	1	1
ACT. 3	500	1	2
ACT. 4	100	1	1
ACT. 5	50	1	1,5
ACT. 6	50	1,3	1
ACT. 7	80	1	1
ACT. 8	110	1,3	1

Aceptar Cancelar

Figura 8 - 9 – Definición de datos de la sectorización.

Una vez introducidos estos datos, se pulsa ACEPTAR y se guardan en un archivo, por defecto nombre “Default”, que tendrá extensión *.PDP, o bien se le cambia el nombre a voluntad con la opción “Guardar como...”.

Si se quiere modificar esta información, puede accederse a ella en cualquier momento a través de la opción “Modificar Datos” del menú “Editar”:

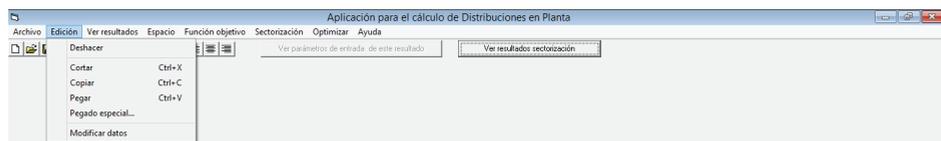


Figura 8 - 10 – Modificar datos.

Lo siguiente será definir los parámetros del espacio discreto que definen el espacio de soluciones, a partir de este cuadro de diálogo:

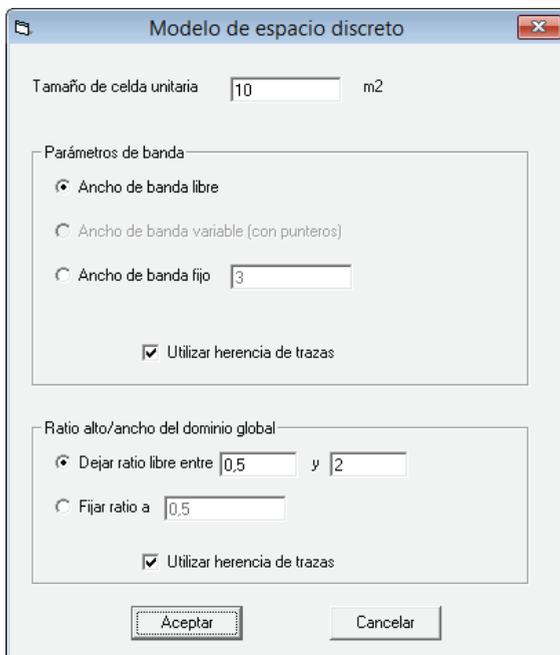


Figura 8 - 11 – Definición del espacio discreto.

En el que es posible indicar la forma en que se quiere que el programa trate el espacio. En primer lugar puede definirse el tamaño de celda en que queremos discretizar el problema. Si este es muy bajo, aumenta el tiempo de computación, así que se opta por un valor de compromiso entre el tiempo de computación y el control geométrico deseado en la solución, por ejemplo, 10 m², aunque esto depende de la dimensión de las superficies de cada problema.

Con el cuadro parámetros de banda puede controlarse el ancho de banda que se comentó anteriormente. Este puede dejarse fijo, libre, o marcando la opción variable con punteros se dispone de tener bandas variables en cada tramo para un mismo individuo, de manera que cada solución tenga un ancho de banda aleatorio o totalmente predefinido. La opción HERENCIA DE TRAZAS hace que en el caso de ancho de banda aleatorio el programa elija probabilísticamente aquellos que dan lugar a mejores resultados, utilizando el concepto de la feromona característico de los algoritmos ACO visto en capítulos anteriores.

Finalmente, el cuadro ratio ancho/alto de dominio global permite fijar una relación de aspecto alto ancho de la planta (fijo o dentro de unos límites) o permite que estos se tomen de manera aleatoria para cada solución. La HERENCIA DE TRAZAS tiene el mismo efecto que el comentado para el caso anterior.

También pueden modificarse todas las métricas con un solo “click” a la vez, para realizar pruebas, con este cuadro de diálogo:

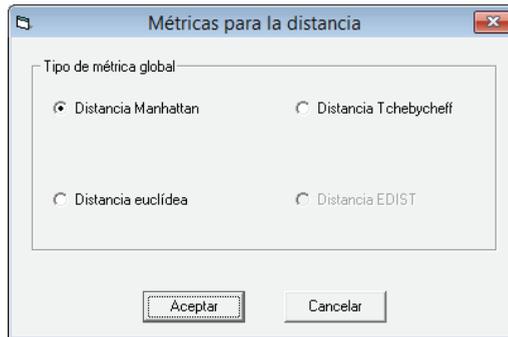


Figura 8 - 12 – Definición de métricas de distancia generales en un paso.

Con la opción de menú FUNCIÓN OBJETIVO puede indicarse qué criterios de entre los disponibles se desea incluir en la resolución. Además pueden modificarse los valores necesarios para definir la formulación aditiva multicriterio del problema (en las variantes en la que estos valores se usan), dando más o menos importancia relativa a la tabla de flujos, la TRA, la geometría o la sectorización. La suma de todos estos coeficientes de ponderación debe ser la unidad. Téngase en cuenta que, de los 4 métodos implementados, algunos de ellos consideran pesos iguales en algún caso o aleatorios en otro, con lo que en estos casos lo que se indique aquí no tendrá relevancia y no afectará a la solución final. También se pueden indicar los valores asociados a la escala cualitativa de la TRA:

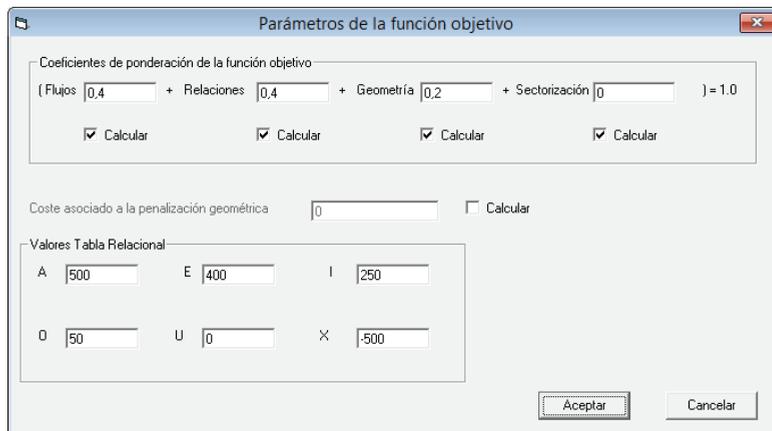


Figura 8 - 13 – Definición de los parámetros de la función objetivo.

Pulsando sobre la opción “Sectorización” se pueden introducir los datos que rigen la sectorización; por defecto están indicados los que aparecen en la normativa Española (RD 2267/2004), pero pueden modificarse a voluntad. También aparece la opción de calcular la distancias como intersectoriales (métrica ésta que se expuso en el capítulo 5 de tratamiento del espacio, así como en el anterior capítulo 7 sobre normativa de incendios), es decir, pasando por las puertas de salida/entrada de cada sector, para efectuar una medida más realista:

	Carga de fuego p y c (MJ/m2)	Superficies admisibles (Tipo C)
Bajo (1)	425	50000
Bajo (2)	850	6000
Medio (3)	1275	5000
Medio (4)	1700	4000
Medio (5)	3400	3500
Alto (6)	6800	3000
Alto (7)	13600	2500
Alto (8)	50000	2000

Calcular distancias como intersectoriales (pasando por las puertas)

Aceptar Cancelar

Figura 8 - 14 – Definición de datos normativos para la sectorización.

Pulsando sobre la opción OPTIMIZAR se efectúa la resolución del problema, habiendo de elegir antes entre alguna de las opciones disponibles:

Aplicación para el cálculo de Distribuciones en Planta

Archivo Edición Ver resultados Espacio Función objetivo Sectorización Optimizar Ayuda

- Optimizar Metodo Propio (antiguo)
- Optimizar P-ACO random weigh
- Optimizar m-ACO4 random path
- Optimizar Metodo Propio 2015
- Ejecuta Plan Experimental Propio (antiguo)
- Ejecuta Plan Experimental P-ACO
- Ejecuta Plan Experimental mACO4
- Ejecuta Plan Experimental Propio 2015

Figura 8 - 15 – Cuadro de opciones de optimización.

Las opciones existentes son, o bien resolver un caso concreto una única vez con cualquiera de los 4 métodos implementados (dos de entre los más eficientes de los existen-

tes en la bibliografía y otros dos meméticos de elaboración propia), o bien realizar un plan experimental.

En el caso de realizar una resolución simple, aparece un cuadro de diálogo como este:

Figura 8 - 16 – Resolución genérica simple.

Al pulsar “Optimizar”, un indicador de progreso aparece en el mismo diálogo y se efectúa el cálculo (el cuadro de diálogo es idéntico para los métodos “Propio Antiguo”, P-ACO, u mACO4. Aquí pueden definirse los parámetros de evaporación ρ , y los que gobiernan la búsqueda local y global α y β . En el caso de la resolución con el método propio nuevo, estos parámetros varían internamente en el algoritmo y no es necesario definirlos:

Figura 8 - 17 – Resolución con método propio.

Con las 4 opciones que existen más abajo, también es posible realizar planes experimentales, de modo que sea el propio algoritmo el que vaya realizando cálculos con los parámetros que le indiquemos, y a su vez tantas repeticiones como deseemos, a fin de evitar en lo posible la excesiva intervención del usuario:

	Min.	Máx.	Paso
Número de individuos	10	20	10
Número de iteraciones	10	20	10
Criterio de parada	50		
Evaporación	0,4	0,8	0,4
$\alpha - \beta$	0,4	0,8	0,4
Nº de repeticiones	10		

Comenzar cálculos Cancelar

Figura 8 - 18 – Definición de plan experimental.

Se generarán archivos en el directorio que tendrán por nombre el que se haya indicado, más una cadena final que indicará los parámetros de cálculo (Ej:NOMBRE-1º-iteraciones-individuos- evaporación-alfa, en un caso concreto podría ser NOMBRE-1º-50-20-0.3-0.5). En cada resolución se genera un archivo con resultados en formato texto y otro con los costes. Si el cálculo es multicriterio también se generan archivos con una cadena adicional "Pareto-W-R", "Pareto-W-G", "Pareto-R-G", "Pareto-W-S", etc. En estos archivos W representa el flujo, R las relaciones de la TRA, G la geometría y S la sectorización. En función del número de criterios, con todos los puntos que definen las proyecciones de las fronteras de Pareto en cada plano bicriterio. Todos estos archivos tendrán extensión .TXT. En caso de guardar el archivo una vez resuelto, o directamente marcar la opción "Guardar Resultados", se genera un archivo binario con extensión ".RES" que no puede leerse salvo con la aplicación, que el programa detecta automáticamente al abrir el archivo de nuevo y que contiene la información de todas las plantas significativas generadas en todas las resoluciones que se hayan hecho, de modo que pueden volver a verse representadas gráficamente en la interfaz cuando se desee.

Al lanzar la resolución, si no es necesario realizar sectorización de incendios, el programa saca un mensaje de aviso y desactiva ese criterio, caso de estar éste activo, a fin de hacer el cálculo computacionalmente más eficiente:

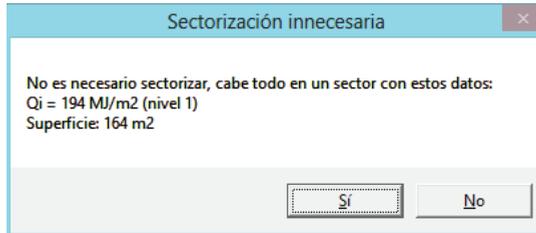


Figura 8 - 19 – Aviso de sectorización innecesaria.

Mientras se realiza el cálculo se muestra un indicador de progreso. Al finalizar el mismo se generan los archivos comentados con anterioridad y se muestra la solución más eficiente de entre las computadas en esa resolución en pantalla, con una serie de información al respecto de los parámetros de la misma:

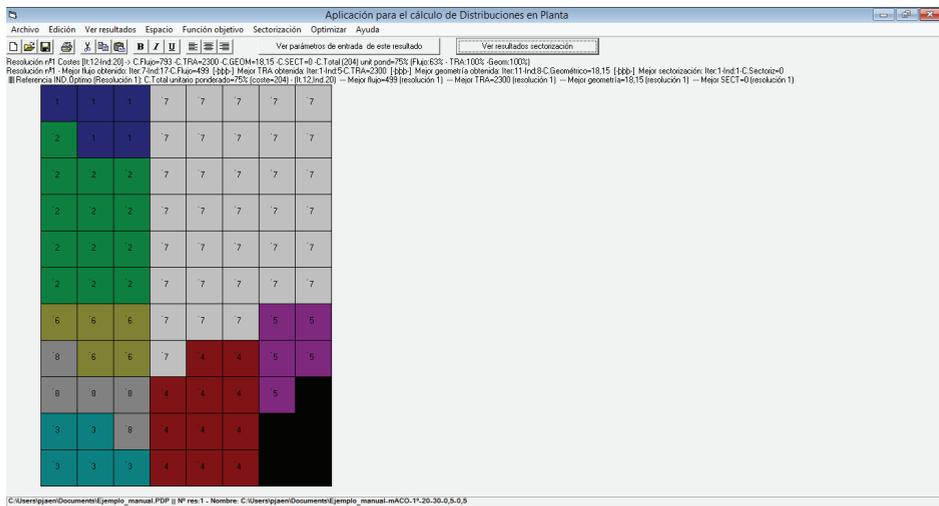


Figura 8 - 20 – Ejemplo de resolución presentada en pantalla.

Pulsando sobre el botón “Ver parámetros de entrada de este resultado” se nos muestran los datos utilizados en el cálculo de esa distribución. Evidentemente, en cada resolución podemos cambiar los parámetros, por lo que para identificar aquellos utilizados no tenemos más que pulsar para identificarlos. También aparecen en texto sobre la imagen de la distribución los valores de referencia respecto de las mejores soluciones obtenidas para cada criterio:

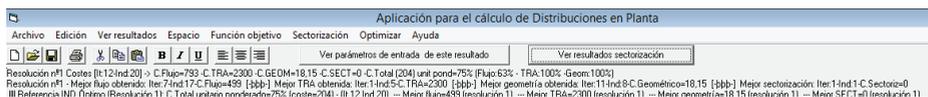


Figura 8 - 21 – Parámetros visibles de las resoluciones.

Hay que tener en consideración que estos parámetros con comparables a nivel global, únicamente si no utilizamos un método que realice la toma de decisión mediante suma ponderada de las funciones objetivos y hemos cambiado los pesos de cada criterio en resoluciones diferentes, es decir, que es conveniente, en el caso de usar uno de estos métodos (como por ejemplo el “Propio Antiguo”) el fijar en un primer estadio las ponderaciones, para comenzar después el plan experimental variando otros parámetros.

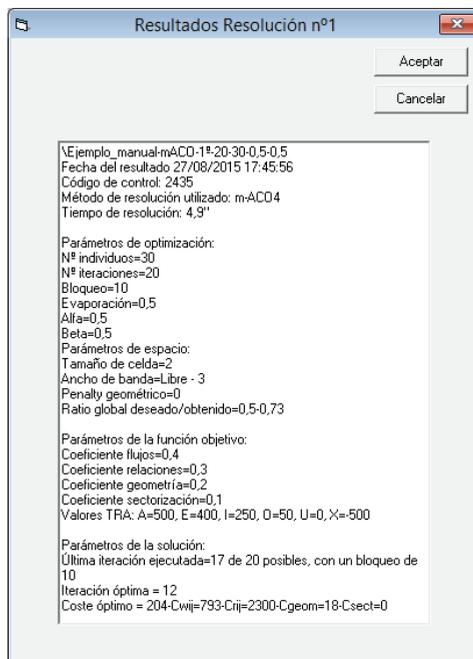


Figura 8 - 22 – Ver parámetros de la resolución visualizada.

Y si se quiere ir cambiando la resolución, o los distintos individuos (plantas) a visualizar en cada resolución, se dispone de la opción “Ver resultados” → “Ver distribución”:

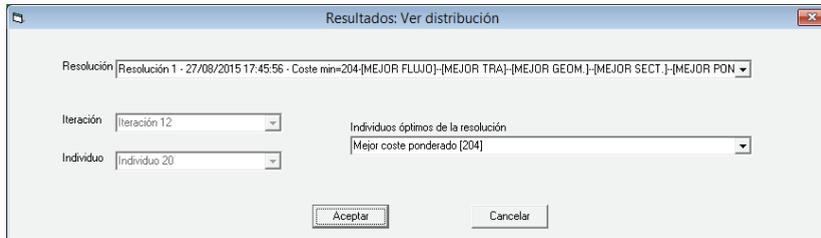


Figura 8 - 23 – Ver resolución.

Por último, indicar que de entre los archivos comentados que genera el programa, existen dos archivos de texto con todos los resultados intermedios de las soluciones analizadas y los costes de las mismas. El archivo de costes puede ser importado en una hora de cálculo para representar gráficos con la evolución del coste con distintos parámetros introducidos:

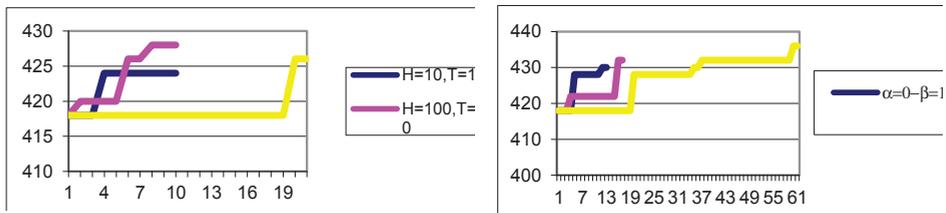


Figura 8 - 24 – Gráficos de evolución de coste obtenidos a partir de los resultados TXT.

8.3. Variantes de algoritmos ACO implementadas.

En el caso de este trabajo, se han implementado cuatro variantes, dos de ellas prácticamente literales de entre las analizadas en la bibliografía, siguiendo el criterio de tomar aquellas que mejor funcionamiento ofrecen en problemas multiobjetivo, a partir de los análisis existentes en la bibliografía, ya comentados en el capítulo anterior: una basada en el método expuesto P-ACO y otra basada en mACO4.

Además, se han implementado otras dos variantes: una implementada anteriormente a la elaboración de este documento, por lo que ya se disponía inicialmente de ella, que funciona con parámetros simples pero ofrece buen rendimiento, y otra memética que combina las mejores características de todos los métodos implementados, a fin de lograr unas fronteras de Pareto multicriterio lo más uniformes posible.

A continuación se exponen las características fundamentales de cada uno de estos cuatro métodos, y los matices que se han considerado en su implementación sobre la idea original.

8.3.1. P-ACO.

Como ya se explicó, recibe el nombre de P-ACO (Pareto Ant Colony Optimization), y fue propuesto por (Doerner et al. 2004). Se caracteriza por la utilización de varias matrices de feromona, una para cada objetivo, que se agregan por medio de suma ponderada, frente al producto ponderado que se usa en BA; se prefiere utilizar la suma ponderada, dado que es computacionalmente más eficiente que el producto ponderado. Cada hormiga k usa un conjunto de pesos distinto para agregar las matrices de feromona. Cada matriz se actualiza con la mejor solución y la segunda mejor para el objetivo correspondiente a cada una de ellas. Se utiliza un depósito constante de feromona $\Delta\tau=1$ para la mejor solución y $\Delta\tau=0.5$ para la segunda mejor.

Para evitar convergencias prematuras, se asigna un valor mínimo de feromona a cada casilla τ de 0.01 y se acota también superiormente a 10.

En la propuesta original se considera una única matriz heurística, dado que es complicado en ocasiones definir esta información heurística de forma apriorística para todos los objetivos. Como ya se indicó, aunque suele ser más ventajosa la configuración del algoritmo utilizando varias matrices heurísticas, en este trabajo se implementará sólo una agregada dada la dificultad de definir esta información para algunos de los objetivos del problema del FLP a resolver, en concreto la matriz heurística para el control geométrica (sin conocer todavía la configuración concreta de las actividades) y la matriz heurística para la sectorización, pues tampoco se conoce la posición y forma concreta de cada agrupamiento (sector) de forma apriorística.

Bajo este planteamiento, una matriz prototípica de trazas tras 50 iteraciones corriendo el problema de Armour y Buffa de 20 actividades (Armour, Buffa 1963) con búsqueda únicamente de coste mínimo asociando a flujos puede ser similar a ésta (se recuerda que en este caso existe una matriz de trazas con pesos variables para cada criterio, distinta en cada individuo, se muestra una aleatoria correspondiente a un individuo):

Tabla 8 - 1 – Ejemplo de matriz de trazas método P-ACO

0.01	6.38	4.2	0.01	0.26	0.26	0.99	0.51	1.26	5.89	6	2.26	1.09	2.01	0.01	0.01	0.01	1.51	0.01	0.01
2.01	0.01	0.99	10	0.51	0.01	10	0.01	1.51	0.51	0.76	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	2.51	3.19	0.26
2.98	0.51	0.01	0.01	0.01	2.75	0.01	0.01	5.47	2.1	0.01	0.01	0.01	8.06	0.01	0.01	1.01	0.51	8.93	3.26
1.01	10	1.01	0.01	3.01	1.26	1.26	0.01	1.75	3.01	0.01	0.76	0.01	0.01	1.76	0.01	0.01	1.57	4.68	0.26
0.01	0.73	0.01	1.68	0.01	0.25	3.38	2.01	4.2	2.88	0.01	0.01	4.5	0.01	2.76	0.26	0.01	2.5	0.01	4.71
0.01	0.01	8.62	4.65	4.38	0.01	3.2	1.26	0.5	0.01	2.49	1.26	0.51	0.01	2.26	0.01	0.01	4.23	0.01	0.01
0.01	7.72	0.01	1.51	2.26	4.26	0.01	10	0.01	1.01	0.51	0.76	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.76	0.01	0.51
1.76	0.01	0.01	0.01	2.98	0.01	8.97	0.01	0.01	0.51	0.26	0.01	1.99	0.26	0.01	0.01	0.01	0.76	0.51	10
6.96	0.95	3.01	1.88	0.51	1.74	0.26	0.01	0.01	2.01	0.26	0.01	0.76	4.25	0.01	0.01	2.57	2.47	4.75	0.01
0.51	0.01	0.76	0.01	2.24	0.01	2.26	0.51	4.26	0.01	3.76	9.93	0.01	5.3	4.74	0.01	0.01	0.01	0.76	0.01
2.45	0.01	0.01	0.01	0.51	0.26	0.01	0.01	0.01	0.5	0.01	0.26	0.01	3.68	0.2	10	0.51	4.76	0.01	0.51
1.13	0.01	0.01	0.26	0.01	4.19	0.01	0.01	0.01	6.74	2.01	0.01	0.01	0.01	3.44	0.01	10	0.51	5.36	0.01
7.79	0.26	0.01	4.01	0.76	0.01	0.01	0.76	1.26	0.01	0.01	0.01	0.01	3.25	6.21	5.41	0.01	1.25	1.01	0.26
0.24	0.01	6.68	0.01	1.51	0.01	0.76	0.01	7.44	4.75	0.01	0.01	7.99	0.01	4.95	0.01	0.01	0.01	0.01	1.76
2.01	0.01	0.76	0.01	8.2	0.26	0.01	0.01	0.01	0.51	0.51	1.38	7.22	7.76	0.01	0.26	2.75	2.62	0.01	1.01
1.26	0.01	0.26	0.01	1.01	0.01	0.01	0.51	0.01	0.01	10	0.01	5.26	0.01	0.01	0.01	9.56	3.01	0.76	0.01
0.01	2.75	0.01	0.26	0.7	0.01	0.01	0.01	5.24	0.01	0.01	10	0.01	0.01	7.26	4.47	0.01	0.26	1.76	0.01
3.01	0.01	0.01	1.01	3.63	6.68	1.25	0.01	1.71	0.51	0.01	0.01	2.51	0.01	0.51	0.95	4.26	0.01	1.88	2.98
0.01	1.51	9.05	8.25	1.01	0.01	0.01	4.76	0.01	0.2	0.01	4.73	1.01	0.01	0.26	0.63	2.5	2.19	0.01	0.01
1.76	0.01	0.01	0.01	1.94	10	1.97	7.97	0.01	3.26	0.01	0.01	0.7	1.24	0.01	1.01	0.01	0.24	1.26	0.01

Los pesos se eligen de forma aleatoria. Se recuerda que en el capítulo 4 correspondiente a las técnicas multicriterio se expuso el planteamiento que hace (Malakooti 1987), que acuña el término configuración *localmente eficiente*, que es aquella solución que es eficiente respecto a todas sus configuraciones adyacentes (una configuración X_{n+1} es adyacente a una configuración X_n , si se obtiene intercambiando dos actividades, o como comentamos en el presente trabajo $n+1$ está en la vecindad de n).

Este autor propone una heurística que está muy cerca del planteamiento de frontera de Pareto, pues aplica su metodología al problema de 9 actividades (monocasilla) enunciado en (Malakooti 1987), de la siguiente forma: genera todas las soluciones del problema ($9!=362880$), de ellas extrae todas las soluciones eficientes frente a los 3 objetivos (MHC, tiempo de flujo de materiales y flexibilidad), que resultan ser 111 configuraciones “realmente eficientes”. A continuación genera cinco combinaciones de pesos de cada uno de los tres objetivos que estudia, y genera soluciones aleatorias con cada uno de ellos, para después plantear el problema en términos de eficiencia local. Genera las soluciones de la vecindad y va agregando soluciones al conjunto de soluciones eficientes. De esta manera procede con las cinco combinaciones de pesos y obtiene un conjunto de soluciones “localmente eficientes” de 102 configuraciones, de las que únicamente una de ellas es dominada por soluciones “realmente eficientes”. El planteamiento de Malakooti es afrontar el problema por una búsqueda por entornos, y la aleatoriedad de

los pesos permite explorar una amplia zona del espacio de soluciones, lo que es muy similar a lo que plantea esta técnica P-ACO.

Aunque lo que realmente proporciona el resultado son los archivos que contienen todas las soluciones no dominadas de Pareto, con un frente tal que el presentado en el capítulo 4. Este método logra unas soluciones de Pareto bastante bien distribuidas, el único problema es que los pesos aleatorios que tiene cada hormiga desde el inicio condicionan las zonas de búsqueda durante toda la resolución, dado que estos no cambian. Esto puede paliarse de algún modo utilizando un mayor número de individuos que en otros métodos.

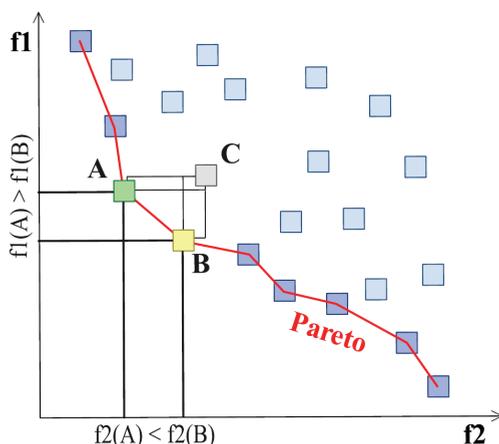


Figura 8 - 25 - Ejemplo de frente de Pareto (Ripon et al. 2011).

8.3.2. mACO4.

De entre todas las variantes presentadas por (Alaya et al. 2007), ésta es la variante que resulta más eficiente de todas las propuestas, de ahí que se haya elegido.

Como ya se expuso, sólo se utiliza una colonia de hormigas, aunque tantas estructuras de feromona como objetivos. La definición de feromona se realiza escoge aleatoriamente un objetivo a optimizar en cada paso de la construcción de la solución. El factor de feromona a considerar en cada paso para cada hormiga es el del objetivo seleccionado.

La información heurística utilizada por la única colonia se corresponde con la suma ponderada de la información heurística correspondiente a todos los objetivos, condensados en una única matriz heurística.

Una vez finalizada cada iteración, se almacena el rastro sólo de la mejor solución obtenida para cada objetivo en su matriz de trazas correspondiente (se recuerda que hay tantas matrices de trazas como objetivos a optimizar). La cantidad de feromona a colocar depende de la calidad de la solución mono objetivo y de la calidad de la mejor solución global obtenida. En este caso como los valores de las funciones objetivo son tan dispares, se ha optado por utilizar un incremento de traza constante $\Delta\tau=1$. Se acota el valor de la traza, al igual que en el método anterior, τ a un mínimo de 0.01 y un máximo de 10.

Una matriz de trazas típica podría ser ésta, tras 50 iteraciones para la optimización del flujo:

Tabla 8 - 2 – Ejemplo de matriz de trazas método m-ACO4

0.01	4.51	1.51	0.01	0.01	3.01	0.01	0.01	2.01	6	1.01	0.01	1.51	2.01	0.51	0.01	0.01	0.51	0.01	0.01	
1.01	0.01	1.01	6	2.51	0.01	8.51	0.01	1.01	0.51	0.01	0.01	0.51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3.01	0.51
8.5	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	6.51	3.01	0.01	0.01	0.01	3.51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3.51	0.01
0.01	4.51	0.01	0.01	0.51	7.01	3.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1.51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	8	0.01
3.51	0.51	0.01	2.51	0.01	0.01	2.51	4.01	0.01	2.51	1.51	0.01	2	0.01	2.51	0.01	0.01	0.51	0.01	0.01	0.01
0.01	0.01	1.51	4.51	0.51	0.01	5.01	0.01	8	0.01	0.01	0.51	0.01	0.01	0.01	0.51	0.01	3.01	0.01	0.01	0.01
0.01	2.5	0.01	3.51	1.01	3.51	0.01	10	0.01	0.51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.01	0.51	0.01	0.01	0.51	0.01	2.51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	1.51	10
1.01	8.01	1.51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3.01	0.01	1.01	4.51	1.51	0.01	2.51	0.01
1.51	0.01	4.51	0.01	1.51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	4.01	0.01	4.51	9	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
2.01	0.01	0.51	0.01	0.01	1.51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	9.51	0.01	2	1.01	6.51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.51	0.01	0.01	0.51	0.01	0.51	0.01	0.51	0.01	4.01	3.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	10	0.01	4.01	1.01	0.01
0.51	0.01	0.01	0.01	0.51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	6.01	0.01	7.01	0.01	7.5	0.01	1.01	0.01
1.51	0.01	8.5	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	3.51	4.51	0.01	0.01	3.51	0.01	3.51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
0.01	0.01	0.01	0.01	2.5	0.01	0.01	0.01	0.01	2.01	3.01	0.01	10	3.01	0.01	0.01	1.01	0.51	0.01	0.01	0.01
0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	10	0.01	3.01	0.01	0.01	0.01	5.51	0.51	0.01	0.51	0.01
0.01	0.01	0.01	0.01	0.51	0.01	0.01	0.51	1.51	0.01	0.01	5.51	0.01	0.01	7.51	6.5	0.01	0.01	2.01	0.01	0.01
2.01	0.01	0.01	0.01	6.51	8	2.01	0.01	0.51	0.01	0.01	0.01	0.01	0.51	0.01	0.01	0.01	0.01	1.51	1.01	0.01
0.01	3.51	3.51	7.01	0.01	0.01	0.01	1.51	0.01	1.51	0.01	3	0.01	0.01	0.01	0.01	1.51	3.01	0.01	0.01	0.01
1.51	1.01	2.01	0.01	7.51	0.01	1	3.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	5.51	0.01	0.01	0.01

Aunque lo que realmente proporciona el resultado son los archivos que contienen todas las soluciones no dominadas de Pareto, con un frente tal que el presentado en el capítulo 4. Este método logra unas soluciones de Pareto muy poco condicionadas, pues va variando el criterio a optimizar en cada paso de la construcción de la solución.

8.3.3. Método propio anterior:

Como ya se explicó, este método se implementó con anterioridad a la elaboración de este documento, y por lo tanto de la realización de un estudio exhaustivo de las alterativas existentes en el estado del arte; en la función objetivo, se prefirió utilizar una metodología agregada basada en la suma ponderada por simplicidad, y considerando también que es computacionalmente más eficiente que el producto ponderado. Cada hormiga k usa el mismo conjunto de pesos para agregar la matriz heurística y la F.O., que se corresponden con los pesos que se introduzcan en el cuadro de diálogo que permite definir los parámetros de la función objetivo, y son constantes en todo el proceso y todos los individuos. Aunque se definen fronteras de Pareto, el algoritmo no trabaja en explorar que éstas sean extensas ni las utiliza en modo alguno.

La matriz única de trazas se actualiza con la mejor solución global para cada criterio, y la mejor solución global ponderada en forma agregada. Se utiliza un depósito de feromona igual para todas las soluciones [$\Delta\tau = \text{coste_min} / \Sigma \text{coste_ponderado_del_individuo}$] para todas las soluciones (de este modo el mejor ponderado deja $\Delta\tau=1$). Las trazas se normalizan tras cada iteración para que no disparen su valor y evitar convergencias prematuras. Tampoco se acota el valor de feromona en ningún límite, ni inferior ni superior.

El criterio de selección de la mejor distribución se hace a partir del procedimiento expuesto en el capítulo 4 sobre técnicas multicriterio, de forma muy similar a la publicación de (Singh, Singh 2009); como ya se expuso en ella los autores realizan una aproximación al problema con una formulación QAP teniendo en cuenta cuatro objetivos, dos cualitativos (índice de cercanía y movimientos peligrosos) y dos cuantitativos (MHC y MHT). Se emplea una función objetivo aditiva ponderada, con los valores de los objetivos normalizados y con pesos para cada uno de ellos (con los pesos indicados en el diálogo “Función Objetivo”), en concreto, para el caso de 4 objetivos, la función sería la siguiente:

$$m_{ijkl} = w_1 \cdot f_{ij} \cdot d_{kl} - w_2 \cdot cr_{ij} + w_3 \cdot mht_{ij} + w_4 \cdot hm_{ij} \quad (8-1)$$

donde w_u son los pesos de cada uno de los objetivos.

Aunque se muestra una distribución en planta al final como solución al problema planteado con los pesos indicados, utilizando la función aditiva comentada, también se proporciona un archivo con el conjunto de soluciones no dominadas, por si se quiere realizar la selección a partir de los datos disponibles utilizando otro tipo de indicador de selección.

Este método es adecuado si se conoce exactamente la importancia que tiene cada criterio de diseño en la solución final, pues explota con bastante acierto esa dirección, pero no es adecuado para ofrecer un conjunto de soluciones eficientes, dado que el resto de direcciones de Pareto con distintas ponderaciones de los objetivos no se consideran en la optimización en ningún momento.

8.3.4. Método Propio nuevo 2015:

A raíz de los experimentos realizados con los otros 3 métodos, se ha decidido implementar una nueva variante memética que reúna las bondades de los 3 anteriormente citados, quedando configurado como sigue:

- Se utilizará una única matriz heurística, pero distinta para cada individuo, ponderada con los pesos aleatorios asignados aleatoriamente al inicio a cada individuo (similar a P-ACO, pero en vez de utilizar pesos iguales para ambos criterios los asigna aleatoriamente para cada individuo, a fin de explorar más la frontera de Pareto y rellenarla homogéneamente).
- Se tendrá una matriz de trazas distinta para cada criterio a optimizar, y la hormiga elegirá aleatoriamente cuál optimizar en cada paso, como en mACO4.
- Para cada individuo, se elegirán aleatoriamente valores distintos de alfa y beta. Para cada iteración, un valor aleatorio de evaporación (que siempre se fija como máximo al 90% para no perder completamente el proceso de guía en la búsqueda). Esto evitará la convergencia prematura y el bloqueo en óptimos locales, realizando en cada secuencia mayor explotación o exploración del espacio de soluciones.
- La cantidad de feromona a depositar será la de los dos mejores individuos para cada criterio de cada iteración, como en mACO4. Será $\Delta\tau=1$ para el mejor, y $\Delta\tau=0.5$ para el segundo mejor.

La selección se basa en el método expuesto en el capítulo 4

Aunque lo que realmente proporciona el resultado son los archivos que contienen todas las soluciones no dominadas de Pareto, con un frente tal que el presentado en el capítulo 4.

Este método logra unas fronteras de Pareto muy bien distribuidas, pues va variando todos los parámetros; ahora bien, dado el mayor carácter aleatorio de la búsqueda, normalmente requiere mayores tiempos de computación que los demás métodos.

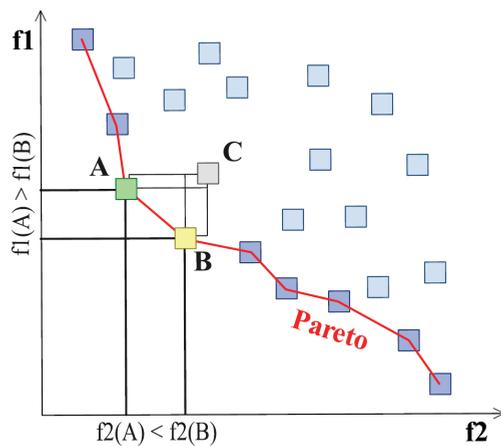


Figura 8 - 26 - Ejemplo de frente de Pareto (Ripon et al. 2011).

Capítulo 09

Plan experimental.

9.1. Introducción.

Se trata en este capítulo de corroborar que todo lo expuesto funciona de forma eficiente, para lo que se realizarán una serie de experimentos encaminados a lograr soluciones de calidad en problemas de distribución en planta; se utilizarán dos tipos de problemas: un primer grupo consistente en problemas conocidos de la bibliografía existente, a fin demostrar lo que otros autores ya propugnan sobre los algoritmos basados en ACO en numerosas publicaciones, algunas de las cuales ya se han citado en el capítulo correspondiente, para el caso de un único objetivo en la gran mayoría de casos conocidos, o para problemas bicriterio en algunos casos. El segundo grupo consistirá en problemas de elaboración propia, pues dado que se implementa un aspecto completamente novedoso en el ámbito de la optimización del FLP, no existen referencias conocidas en la bibliografía. Además, se da el caso de que los problemas existentes en la bibliografía, en la mayoría de ocasiones, no poseen suficiente superficie para entrañar problema alguno en la resolución de su sectorización, siendo suficiente implementar la solución final en único sector de incendios. Como para comprobar la validez del algoritmo de sectorización implementado es necesario que la sectorización no sea trivial, se han adoptado dos soluciones: utilizar algunos problemas de los anteriormente mencionados, aplicándoles un factor de escala en superficie y añadiéndoles la información necesaria sobre procesos y cargas de fuego para poder sectorizar, y una segunda vía consistente en elaborar problemas propios que contrasten la validez del algoritmo en algunas situaciones particulares a las que merece prestarles atención.

El plan consistirá, en una primera instancia, en comprobar la validez del algoritmo enfrentándolo a algunos de los más conocidos problemas de la bibliografía para el caso de guiar la búsqueda del óptimo con un objetivo único, comparándolo con los existentes en

la bibliografía. Se presentarán en primer lugar una serie de experiencias previas realizados los pasados años, donde se detectaron algunos problemas de funcionamiento asociados a la formulación del algoritmo y su corrección, así como el aspecto de las matrices de trazas que han hecho que la formulación actual sea tal y como la que se ha planteado.

En segundo lugar, se realizarán una serie de pruebas encaminadas a decidir qué parámetros de funcionamiento del algoritmo son más influyentes en la búsqueda de la solución, así como en la velocidad de convergencia y el evitar el estancamiento en óptimos locales. También se analizarán las fronteras de Pareto obtenidas bajo los distintos parámetros y se observará en qué casos se obtienen fronteras de más calidad.

En una tercera etapa se analizará cómo se comporta el algoritmo con problemas en los que se persigue más de un objetivo en la solución final.

Por último, se abordará el funcionamiento del algoritmo en problemas donde se persiguen todos los objetivos en la búsqueda, incluyendo la sectorización contra incendios. También se analizará la influencia de la nueva métrica de distancia definida, la distancia intersectorial, en el coste final de la solución.

El plan experimental que se aborda en las secciones que continúan es el siguiente:

- Resolución de problemas de la bibliografía con un objetivo único.
- Pruebas para el análisis de parámetros del algoritmo para su funcionamiento óptimo y obtención de fronteras de Pareto.
- Resolución de problemas de la bibliografía con varios objetivos.
- Funcionamiento del algoritmo de sectorización de incendios.

En los resultados se mostrará tanto las soluciones finales obtenidas, así como la calidad de las mismas (costes asociados a cada parámetro en estudio), y los parámetros de entrada con los que la misma se ha logrado. En ocasiones también se mostrará la evolución de los costes, o las fronteras de Pareto logradas en la resolución, asociadas a cada par de criterios de diseño. Un dato que en ocasiones es importante y por lo tanto también se proporcionará, es el coste computacional, cuyo parámetro característico será el tiempo de resolución empleado, en segundos.

9.2. Pruebas del algoritmo con problemas con un único objetivo.

Como se ha comentado, en esta primera instancia se va a comprobar la validez del algoritmo enfrentándolo a algunos de los más conocidos problemas de la bibliografía para el caso de guiar la búsqueda del óptimo con un objetivo único, comparándolo con los existentes en la bibliografía.

Se presentarán en primer lugar una serie de experiencias previas realizados los pasados años, donde se detectaron algunos problemas de funcionamiento asociados a la formulación del algoritmo y su corrección, así como el aspecto de las matrices de trazas que han hecho que la formulación actual sea tal y como la que se ha planteado.

Se procederá en esta sección a realizar la validación del algoritmo a través de la prueba con varios problemas de referencia de los existentes en la bibliografía, para cada uno de los objetivos perseguidos, de forma independiente.

9.2.1. Funcionamiento del algoritmo. Experiencias previas monocriterio.

Inicialmente, en la aplicación implementada se utilizó únicamente uno de los métodos de resolución de entre los que existen actualmente, el llamado “método propio antiguo”. Se realizaron una serie de ensayos que condujeron a la estimación de los parámetros que mejor gobernaban el algoritmo de búsqueda. Se exponen los resultados a continuación, para el caso de un problema clásico monocriterio.

Para analizar la influencia de sus parámetros sobre la estrategia de búsqueda del algoritmo se procede a resolver un problema clásico de la bibliografía. Se trata del problema de distribución de 7 actividades planteado por Francis y White en (Francis, White 1974).

Los parámetros de control del algoritmo son $(T, C, H, \rho, \alpha, \beta)$ siendo T el máximo número de iteraciones permitidas, C el número de iteraciones sin mejora que se establece como limitante para criterio de parada, H el número de hormigas, ρ la tasa de evaporación y α y β los pesos de la función de probabilidad. El objetivo planteado en todos los casos es maximizar $V(s)$, tal y como se expuso en el capítulo correspondiente a la definición de objetivos.

A la vez que se resuelve el problema se hará una breve discusión sobre el ajuste de los parámetros de gobierno del algoritmo a la vista de los resultados de este problema mo-

nocriterio, aunque posteriormente se analizará el comportamiento de los algoritmos en el caso multicriterio, que varían ligeramente.

Se plantea una doble experiencia con el objetivo de comprobar sobre el resultado final:

- La influencia del tamaño de la población H (número de hormigas), así como el número de iteraciones,
- Y la influencia de los parámetros α y β .

Tabla 9 - 1 - Planteamiento de la doble experiencia. Valores de los parámetros.

Experimento 1°:		Experimento 2°:
H y T variable		α y β variables
1-a	1-b	2
T = 10, 100	T = 10,1000	T = 100
H = 10, 100	H = 10,1000	H = 100
$\rho = 0\%$	$\rho = 0\%$	$\rho = 25\%$
$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0,5$	$\alpha = 0$ y $\beta = 1,0$
$\beta = 0,5$	$\beta = 0,5$	$\alpha = 1,0$ y $\beta = 0,0$
C = 25	C = 100	$\alpha = 0,5$ y $\beta = 0,5$
		C = 25

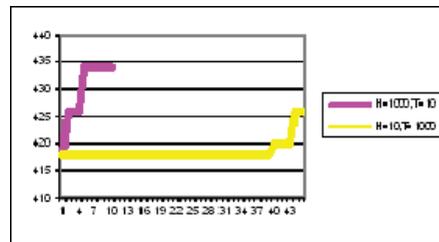
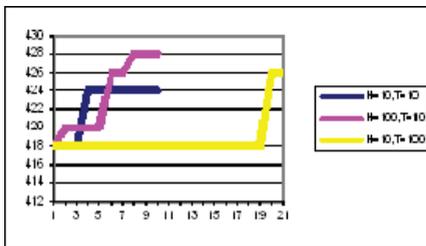


Figura 9 - 1 - Resultado experimento 1-a y 1-b. Variación de coste relacional $V(s)$ con el número de iteraciones en función del tamaño de la población.

La solución obtenida para tamaños de 10 hormigas fue muy similar, independientemente del número de iteraciones. Éste mejoró en el caso de $H=100$ hormigas, y con $H=1000$, incluso para un número reducido de iteraciones.

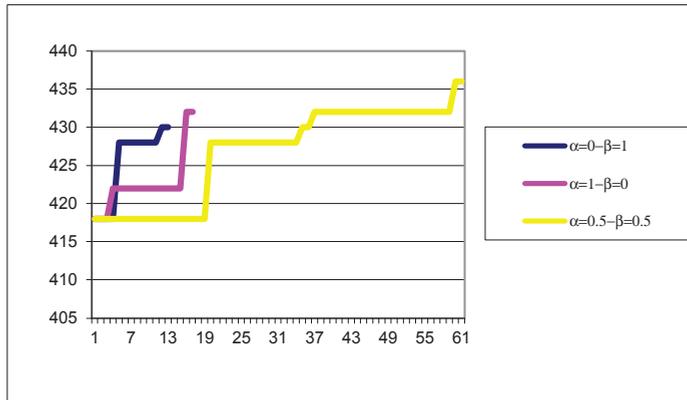


Figura 9 - 2 - Variación de $V(s)$ con el número de iteraciones en función de la combinación de estrategias definidas por α y β .

Con un número elevado de iteraciones, $T=1000$, se aprecia una lenta evolución de $V(s)$, si H es reducido, así como un bloqueo rápido de la solución. La convergencia, en todos los casos de H elevado, fue muy rápida.

De nuevo se observa el bloqueo y la rápida convergencia del algoritmo, máxime en los casos del guiado de la técnica de optimización mediante exclusivamente uno de los criterios. Los resultados mejoran ostensiblemente en el caso de considerar una guía híbrida del algoritmo.

El valor del coste máximo se produce en la iteración 59ª, con una tasa de evaporación del 25%. Como se puede observar esta solución apareció siguiendo la estrategia de guía basada en la memoria colectiva ($\alpha=0.5$). En el caso de estrategia de búsqueda local, sin memoria colectiva, el algoritmo convergió hacia un óptimo local.

El ejemplo presentado en (Francis, White 1974) fue resuelto con el algoritmo ALDEP y el valor de $V(s)$, obtenido por estos autores, fue de 422 unidades. En este problema el valor del supremo es de 458 unidades. En todos los casos las soluciones obtenidas fueron mejores que la presentada por (Francis, White 1974).

Tabla 9 - 2 - Comparación final de los resultados obtenidos, en términos de V(s). Valor del supremo: 458 udes.

Solución Francis & White	Mejor solución encontrada en el Experimento 1	Mejor solución encontrada en el Experimento 2
V(s)=422 udes.	V(s)=434 udes.	V(s)=436 udes.
92,14% del supremo	94,76 % del supremo	95,20 % del supremo

A la vista de los resultados se concluye que el procedimiento propuesto es robusto, al obtener rápidamente mejores soluciones que la obtenida en Francis & White (Francis, White 1974) para el caso de un único criterio. El método permite obtener soluciones en las que no se producen disgregaciones de actividades, que es uno de los grandes problemas que presentan los métodos de optimización de FLP que asumen una formulación del tipo QAP. Por otra parte, permite combinar la exploración y explotación del espacio de soluciones al permitir diseñar estrategias que combinan la memoria colectiva con la búsqueda local. La obtención de mejores soluciones con tasas de evaporación bajas y α elevadas parece reflejar la necesidad de implementar estrategias elitistas para evitar las pérdidas de orientación durante los procesos de optimización, es decir, se necesita conservar la memoria colectiva para evitar la caída en óptimos (máximos) locales.

No obstante, llama poderosamente la atención que tenga menor peso en la búsqueda el número de iteraciones (lo que supone el guiado del proceso de búsqueda), que el número de individuos (lo que supone una mayor exploración).

En este algoritmo inicial no se utilizó ninguna estrategia elitista en la actualización de la matriz de feromona; tampoco se fijaron límites mínimos ni máximos a los valores de la traza, de modo que el riesgo de caída en óptimos locales era elevado. Además, se corre el peligro en este caso de que la propia matriz de trazas se degenera, siendo poco dispersa, al no tener prevista estrategia elitista alguna y permitiendo que todos los individuos generados dejen rastro en la misma.

A la vista de estos resultados se examinaron las matrices de trazas con la feromona, encontrándose que en algunos casos éstas convergían prematuramente conteniendo muy pocos valores en determinadas posiciones, mientras que en otros casos la falta de elitismo conducía a tener, con el número de iteraciones, valores muy dispersos y muy altos; parece ser que esto dependía directamente de la dificultad del problema, y por lo tanto de la presencia de un mayor número de soluciones viables.

Todas estas observaciones inicialmente realizadas han conducido a modificar los algoritmos, de modo que han quedado como se expuso en el capítulo dedicado a las técnicas ACO, y en el capítulo anterior dedicado al funcionamiento de la aplicación. Se han impuesto límites inferiores y superiores a la feromona, así como una estrategia elitista que varía en cada modelo de algoritmo (las comentadas entre mejor global, mejor ponderado, mejor por objetivo, dos mejores por objetivo, etc.). También se han normalizado los valores de la misma en alguno de los casos.

9.2.2. Objetivo: relaciones TRA. Problema Tompkins&White de 7 actividades.

El problema se encuentra en el libro (Tompkins, White 1984).

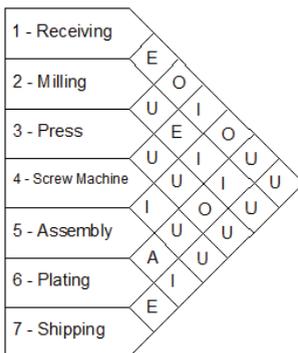
Se trata de un problema discreto cualitativo, de 7 actividades, que a continuación se describe:

Listado de departamentos (ACTIVIDADES) y superficie de las mismas:

Tabla 9 - 3 – Definición de actividades.

	Nombre	Área (discreta)
1	Receiving	30 ud.
2	Milling	20 ud.
3	Press	15 ud.
4	Screw Machine	30 ud.
5	Assembly	20 ud.
6	Plating	30 ud.
7	Shipping	30 ud.

Definición de la Tabla Relacional de Actividades (TRA):



A	64
E	16
I	4
O	1
U	0
X	-1024

Figura 9 - 3 – Definición de TRA.

Mejor solución obtenida por el autor:

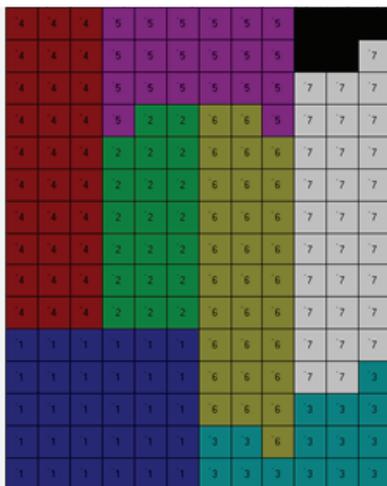
4	4	2	2	2	2	1	1	6	6	5	5	5	5	7	7	3	3
4	4	2	2	2	2	1	1	6	6	5	5	5	5	7	7	3	3
4	4	2	2	2	2	1	1	6	6	5	5	5	5	7	7	3	3
4	4	2	2	2	2	1	1	6	6	5	5	5	5	7	7	3	3
4	4	2	2	2	2	1	1	6	6	5	5	5	5	7	7	3	3
4	4	4	4	1	1	1	1	6	6	6	6	7	7	7	7	3	3
4	4	4	4	1	1	1	1	6	6	6	6	7	7	7	7	3	3
4	4	4	4	1	1	1	1	6	6	6	6	7	7	7	7	3	
4	4	4	4	1	1	1	1	6	6	6	6	7	7	7	7		
4	4	4	4	1	1	1	1	6	6	6	6	7	7	7	7		

Figura 9 - 4 – Solución obtenida por (Tompkins, White 1984).

Coste relacional del sistema: 240 ud (88.89%)

Valor Óptimo: 270 ud.

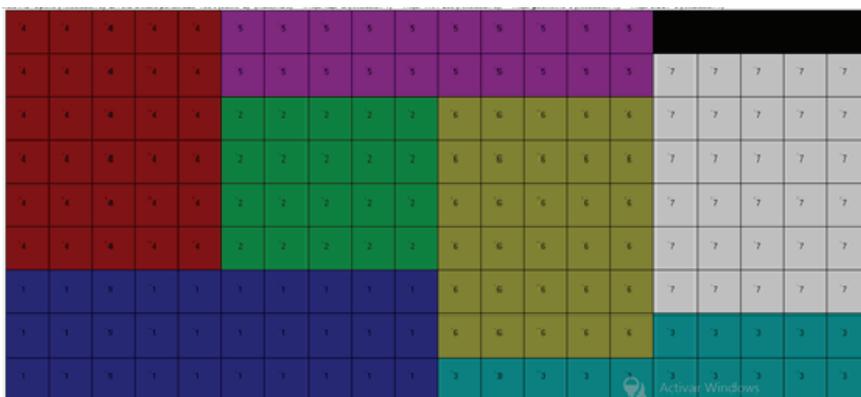
La mejora de la solución original proporcionada por el autor en esta Tesis es casi inmediata, con un coste computacional bajísimo, y con cualquiera de las variantes del algoritmo implementadas. Se muestran dos de las mejores soluciones obtenidas de entre las diversas pruebas realizadas:



Solución obtenida con estos parámetros:
 Iteración óptima: 28 – Coste: 268-Tiempo 4"
 Método de resolución utilizado: P-ACO
 Parámetros de optimización:
 N° individuos=50 N° iteraciones=50 Bloqueo=50
 Evaporación=0,5 Alfa=0,5 Beta=0,5
 Parámetros de espacio:
 Tamaño de celda=1 Ancho de banda=Libre - 3

Figura 9 - 5 – Solución eficiente 1 problema (Tompkins, White 1984) de 7 actividades.

Es decir, que se alcanza una solución con un coste de 268 unidades frente al máximo conseguible de 270, una calidad del 99,26% respecto del óptimo.



Coste: 268 – Iteración: 20 - Tiempo 4.6"

Método de resolución utilizado: Propio

Parámetros de optimización:

Nº individuos=50 Nº iteraciones=50 Bloqueo=50

Evaporación=0,5 Alfa=0,5 Beta=0,5

Parámetros de la función objetivo:

Coefficiente flujos=0 Coeficiente relaciones=1 Coeficiente geometría=0 Coeficiente sectorización=0

Valores TRA: A=64, E=16, I=4, O=1, U=0, X=-1024

Figura 9 - 6 – Solución eficiente 2 problema (Tompkins, White 1984) de 7 actividades.

Ambas soluciones que se presentan son similares, e ilustran que no se ha logrado únicamente una solución con esta calidad relacional, sino un número elevado de ellas, de las que se muestran dos para ilustrar las pruebas realizadas.

9.2.3. Objetivo: análisis de flujos. Problema (Armour, Buffa 1963) de 20 actividades.

En primer lugar se resolverá un problema muy conocido en la bibliografía existente consistente en minimizar el flujo de materiales. El problema que se resuelve a continuación es el que aparece en (Armour, Buffa 1963). Se trata de un problema de 20 actividades, cuyo objetivo único (como ya se ha indicado el objetivo que se persigue es el coste asociado a los flujos de materiales). Aunque la matriz de flujos no es bidireccional, al contrario que la TRA, en este caso concreto la matriz es simétrica, lo que supone asumir que los trasiegos de materiales pueden ir en sentido bidireccional; aunque esto pueda parecer contradictorio, podría ser el caso, por ejemplo, de una industria clásica del tipo que se comentó en el segundo capítulo, por secciones, donde las operaciones pueden cambiar de orden y la secuencia de fabricación por tanto, también puede hacerlo.

Tabla 9 - 4 – Actividades problema (Armour, Buffa 1963) 20 actividades.

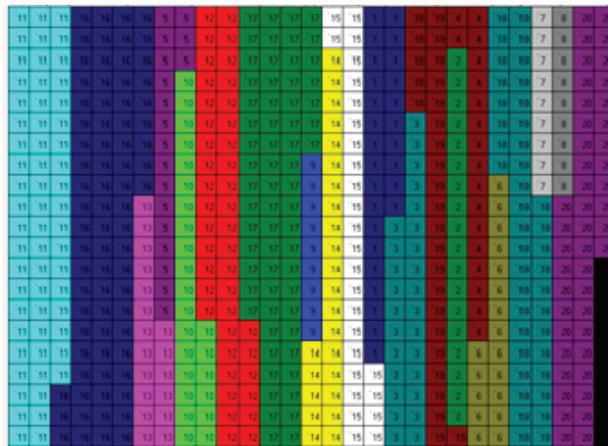
Nº Actividad	Área (100-pies ²)	Nº Actividad	Área (100-pies ²)
1	27	11	60
2	18	12	42
3	27	13	18
4	18	14	24
5	18	15	27
6	18	16	75
7	9	17	64
8	9	18	41
9	9	19	27
10	24	20	45

Y los flujos de materiales entre actividades pueden verse en la siguiente matriz:

Tabla 9 - 5 – Matriz de flujos (Armour, Buffa 1963).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	1,8	1,2	0	0	0	0	0	0	1,04	1,12	0	0	1,2	0	0	0	0	0	0
2	1,8	0	0,96	24,5	0,78	0	14	0	1,2	1,35	0	0	0	0	0	0	0	0	6,9	0
3	1,2	0,96	0	0	0	2,21	0	0	3,15	3,9	0	0	0	13,1	0	0	0	0	13,65	0
4	0	24,5	0	0	1,08	5,7	7,5	0	2,34	0	0	1,4	0	0	0	0	0	1,5	15,75	0
5	0	0,78	0	1,08	0	0	2,25	1,35	0	1,56	0	0	0	0	1,35	0	0	0	0	0
6	0	0	2,21	5,7	0	0	6,15	0	0	0	0	0,45	0	0	0	0	0	1,05	0	0
7	0	14	0	7,5	2,25	6,15	0	24	0	1,87	0	0	0	0,96	0	0	0	1,65	0	3,75
8	0	0	0	0	1,35	0	24	0	0	0	0	0	0,6	0	0	0	0	0	7,5	33,45
9	0	1,2	3,15	2,34	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7,5	0	0	7,5	0	0	0
10	1,04	1,35	3,9	0	1,56	0	1,87	0	0	0	0,36	12	0	18,6	1,92	0	0	0	5,25	0
11	2,25	0	0	0	0	0	0	0	0	0,36	0	2,25	0	3	0,96	22,5	0	0	0	0
12	0	0	0	1,4	0	0,45	0	0	0	12	2,25	0	0	0	1,65	0	15	0	8,4	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0,6	0	0	0	0	0	8	1,04	6	0	0	0	0
14	1,2	0	13,1	0	0	0	0,96	0	7,5	18,6	3	0	8	0	9,75	0	0	0,9	0	0
15	0	0	0	0	1,35	0	0	0	0	1,92	0,96	1,65	1,04	9,75	0	0	5,25	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	22,5	0	6	0	0	0	12	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	7,5	0	0	15	0	0	5,25	12	0	0	7,5	0
18	0	0	0	1,5	0	1,05	1,65	0	0	0	0	0	0	0,9	0	0	0	0	4,65	0
19	0	6,9	13,7	15,8	0	0	0	7,5	0	5,25	0	8,4	0	0	0	0	7,5	4,65	0	0
20	0	0	0	0	0	0	3,75	33,5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Los resultados obtenidos varían en función de la calidad geométrica deseada y de otros parámetros como las métricas de distancia utilizadas. Al ser un problema de gran pre-



Coste: 4720 Métrica de distancia: Manhattan

Método de resolución utilizado: Propio - Tiempo de resolución: 10,1"

Parámetros de optimización:

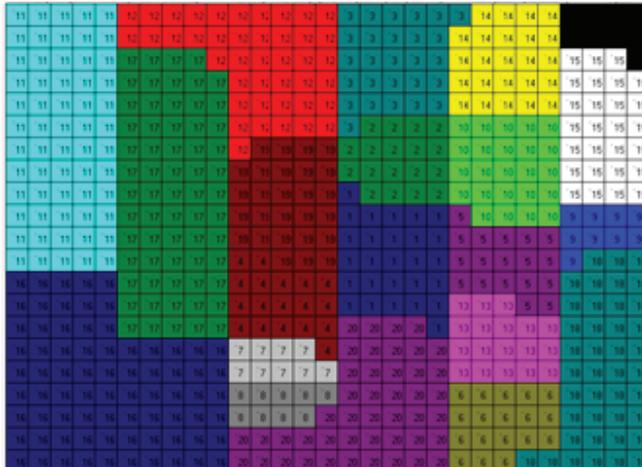
Nº individuos=50 - Nº iteraciones=50 - Bloqueo=50

Evaporación=0,1-Alfa=0,9-Beta=0,1

Figura 9 - 9 - Solución monocriterio flujos problema 20 actividades.

9.2.3.3. Objetivo: análisis de flujos con control geométrico.

En esta ocasión se ha resuelto el mismo problema añadiendo como parámetro el control geométrico de la solución. Aunque en sentido estricto se trata de un problema multiobjetivo, se introduce el caso para ilustrar los problemas que se presentan en las secciones siguientes de este plan de experimentos. Como puede apreciarse, al ser éstos objetivos contrapuestos aumenta el coste de flujo de materiales a costa de tener una forma más flexible para las actividades:



Método de resolución utilizado: m-ACO4 - Tiempo de resolución: 9,6"
 Parámetros de optimización:
 N° individuos=50 - N° iteraciones=50 - Bloqueo=50
 Evaporación=0,5- Alfa=0,1- Beta=0,9
 Parámetros de espacio: Tamaño de celda=1 - Ancho de banda=Libre – 5
 Coste ponderado óptimo = 2478 - Cw_{ij}=7109 - Crij=0 - Cgeom=45 - Csect=0

Figura 9 - 10 - Solución flujos problema 20 actividades (con ejemplo de control geométrico).

El procedimiento utilizado para el cálculo, cuando se tiene más de un criterio, como se ilustrará en apartados posteriores, proporciona como solución una frontera de Pareto donde existen un conjunto de puntos que son eficientes, dependiendo de la importancia que se asigne a cada criterio. Quiere esto decir que elegir la “mejor” distribución se entiende como la mejor solución de compromiso en función de dicha importancia asignada a cada criterio. La solución que se muestra, es un solución elegida de entre las existentes en esta frontera, adoptando un criterio de selección. En este caso, para elegir ésta, e insistiendo en que se trata de una solución de compromiso de entre las existentes en la frontera de Pareto, ha sido elegida en base al procedimiento de distancia mínima existente desde la utopía de Pareto normalizada respecto de todos los criterios, como ya se expuso en el capítulo 4 correspondiente al capítulo de toma de decisiones multicriterio.

En general, como se verá más adelante en los análisis realizados para el estudio de problemas con varios objetivos, éste será el planteamiento más utilizado cuando se trate de problemas multiobjetivo: elegir alguna de las soluciones existentes en la frontera de Pareto que cumpla con todos los criterios de diseño deseadas para todos los objetivos:

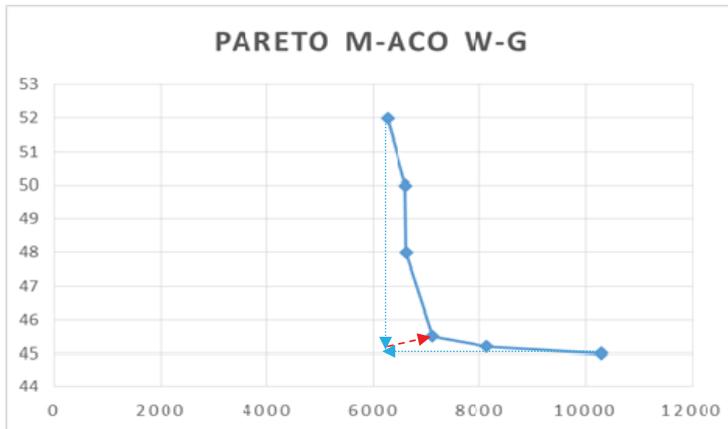


Figura 9 - 11 – Selección de solución eficiente de Pareto con métrica normalizada.

9.3. Pruebas del algoritmo en modo bicriterio con distintos parámetros de funcionamiento.

Tras trabajar con un único objetivo en el apartado anterior, en este apartado se comienzan a plantear problemas en los que existe más de un objetivo en la búsqueda de la solución. Dado que, como ya se ha comentado, el planteamiento multicriterio puede hacerse bajo varios enfoques, se van a plantear algunas pruebas para intentar determinar la bondad cada método, así como sus parámetros de funcionamiento más adecuados, para el caso del enfoque multiobjetivo del problema; para ello se analizarán fundamentalmente dos tipos de gráficos:

- Las fronteras de Pareto obtenidas para distintos pares de objetivos, así como la cantidad de soluciones eficientes que definen las mismas.
- Los costes relacionales obtenidos en función del número de individuos totales estudiados.

Se analizará cómo resulta la evolución de dichas fronteras de Pareto en función del número de iteraciones y del tamaño de la población para los distintos métodos implementados.

Posteriormente también se analizará el comportamiento del algoritmo en función de la guía de la búsqueda con información heurística o memorística, así como el funcionamiento de la memoria colectiva también para el control del aspecto geométrico.

9.3.1. Evolución de las fronteras de Pareto.

Analicemos a continuación las fronteras de Pareto obtenidas en la resolución de un caso de 20 actividades en los que se procede simultáneamente con los 4 criterios de diseño, es decir, W, R, G y S. En este caso puede observarse como claramente, las proyecciones del frente de Pareto en cada plano bicriterio son considerablemente mejores en el caso de 200-200 que en el 20-20, como era de esperar. El método utilizado ha sido m-ACO4. Se muestra en primer lugar el caso W-R:

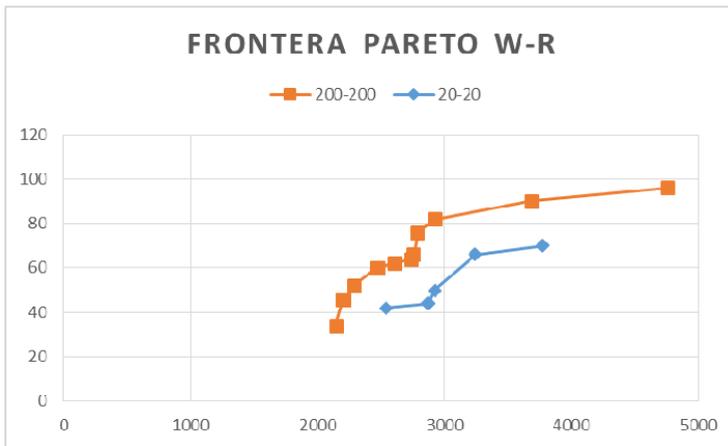


Figura 9 - 12 – Frontera de Pareto W-R en función de computación (mACO4).

Los valores empleados para evaporación han sido 0.5, al igual que para alfa y beta. Los tiempos de resolución empleados en ambos casos han sido, para el caso de 20 iteraciones con 20 individuos de 3.7", mientras que para el caso de 200 iteraciones con 200 individuos ha sido considerablemente superior, 12514.9".

Con continuación se expone el caso R-G, que se comporta de forma idéntica:

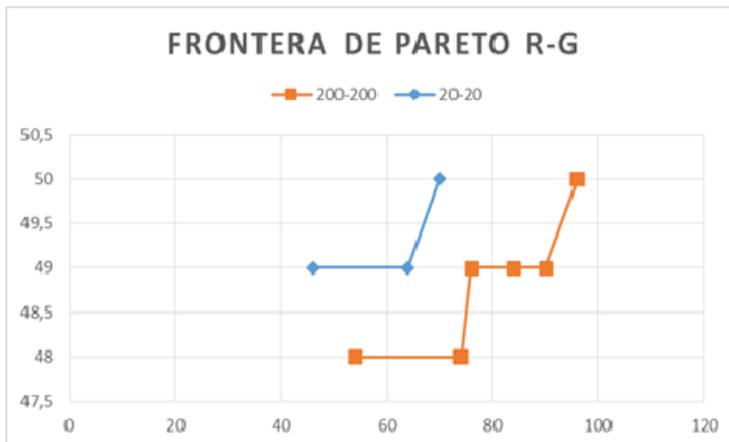


Figura 9 - 13 - Frontera de Pareto R-G en función de computación (mACO4).

Análogamente podrían representarse todos los pares de criterios con sus respectivas fronteras.

Se realiza el mismo experimento empleando el método P-ACO, obteniéndose los siguientes gráficos:

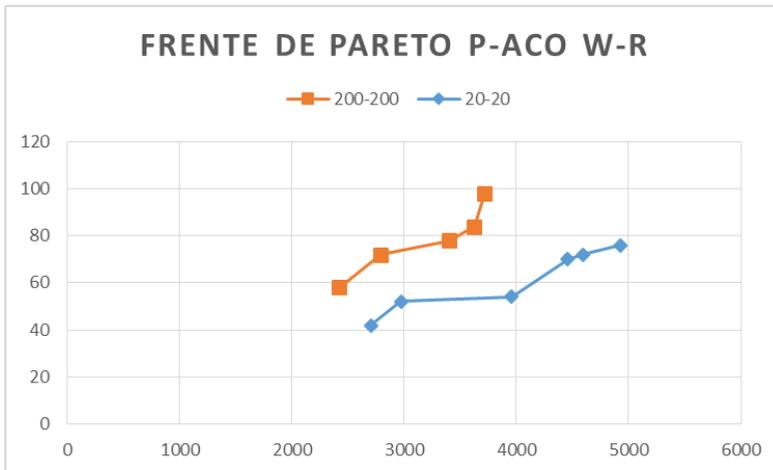


Figura 9 - 14 – Frontera de Pareto W-R en función de computación (P-ACO).

En este caso el tiempo empleado en la resolución baja ostensiblemente, siendo de 6571,8" para el caso 200-200. En parte el menor tiempo de resolución se debe a la menor cantidad de puntos de Pareto detectados por el algoritmo, lo cual aumenta la capacidad de cómputo de ciclos, dado que el algoritmo para detectar elementos dominados es el más lento del proceso y se repite cada ciclo. A modo comparativo, se muestra un gráfico donde aparecen enfrentadas las soluciones obtenidas para el par W-R en ambos métodos:

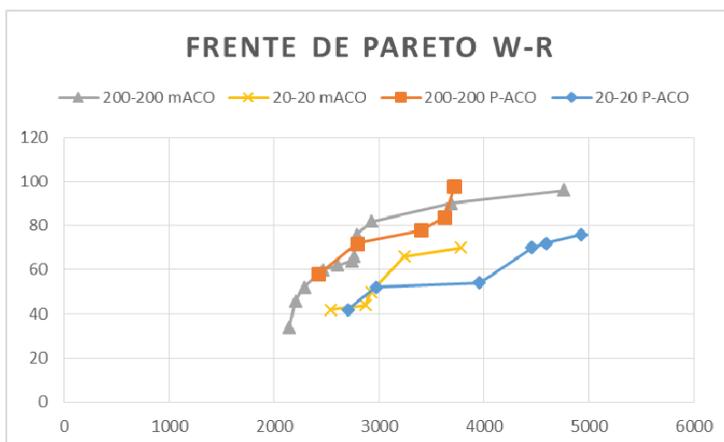


Figura 9 - 15 – Fronteras W-R para mACO4 y P-ACO con distinta computación.

A la vista de estos resultados, puede interpretarse que el método mACO es capaz de obtener una mayor cantidad de puntos de Pareto que el método P-ACO con el tiempo de computación suficiente, mientras que para resoluciones rápidas el método P-ACO es adecuado para obtener una cantidad mayor de puntos de Pareto con un tiempo computacional muy bajo, de pocos segundos. Esto es porque el método mACO4 condiciona muy poco la solución pero necesita mayor tiempo de computación para obtener buenos resultados.

9.3.2. Evolución de costes con los distintos métodos de resolución. Búsqueda guiada sólo con trazas.

Otro de los experimentos realizados ha consistido en lanzar los distintos métodos de resolución configurados para tener una evaporación del 0%, y unos valores de $\alpha=1$ y $\beta=0$, es decir, que no utilicen la visibilidad, sólo la memoria colectiva. De este modo podrá identificarse si el guiado a través de la traza es el correcto en los distintos algoritmos. En todos los casos han sido de 100 iteraciones con 100 individuos. En las gráficas siguientes se muestran los resultados obtenidos:

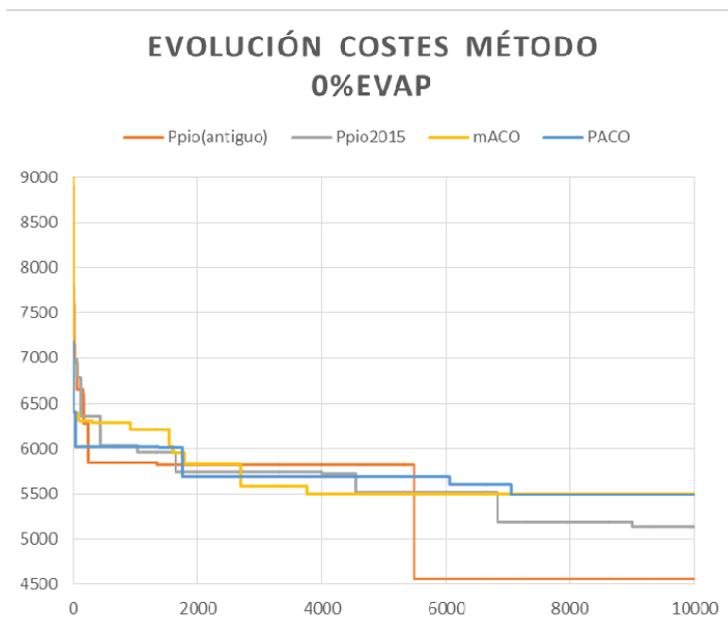


Figura 9 - 16 – Evolución de costes sin evaporación (proceso guiado completamente por la memoria colectiva).

9.3.3. Evolución de las fronteras de Pareto con los distintos métodos de resolución.

Se ha resuelto el mismo caso utilizando 50 individuos y 50 iteraciones con los 3 métodos de resolución implementados, logrando las fronteras de Pareto que se muestran en la figura:

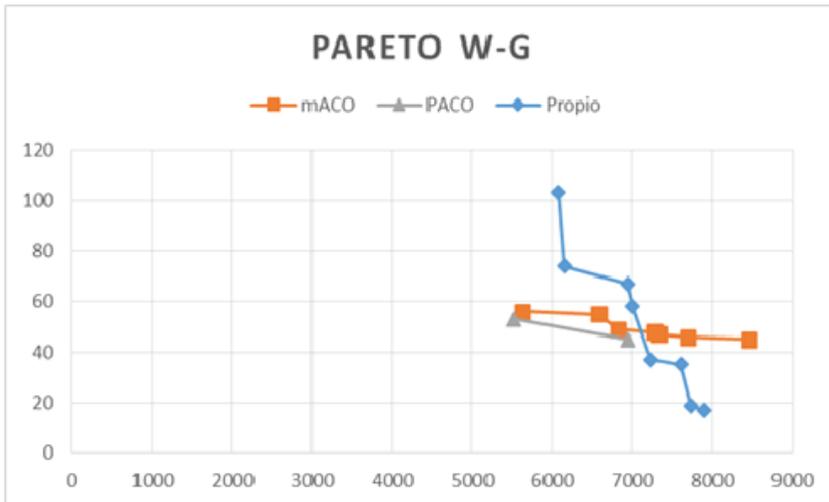


Figura 9 - 17 - Fronteras de Pareto W-G con 3 métodos de resolución.

Puede observarse que los métodos PACO y mACO4 obtienen mejores valores extremos, al estar guiados únicamente por los mejores individuos. El criterio de actualización de feromonas no elitista del algoritmo propio hace que se obtengan valores más dispersos, sobre todo en geometría, donde la variación es mayor. El hecho de obtener una línea recta con una pendiente aproximada de 45° se debe al hecho de haber utilizado pesos de 0.5-0.5 para ambos criterios en la suma ponderada de la función objetivo, mientras que en los otros métodos estos pesos son aleatorios.

Se presenta también unas fronteras W-R para un problema resuelto para 4 criterios con idéntico poder de computación:

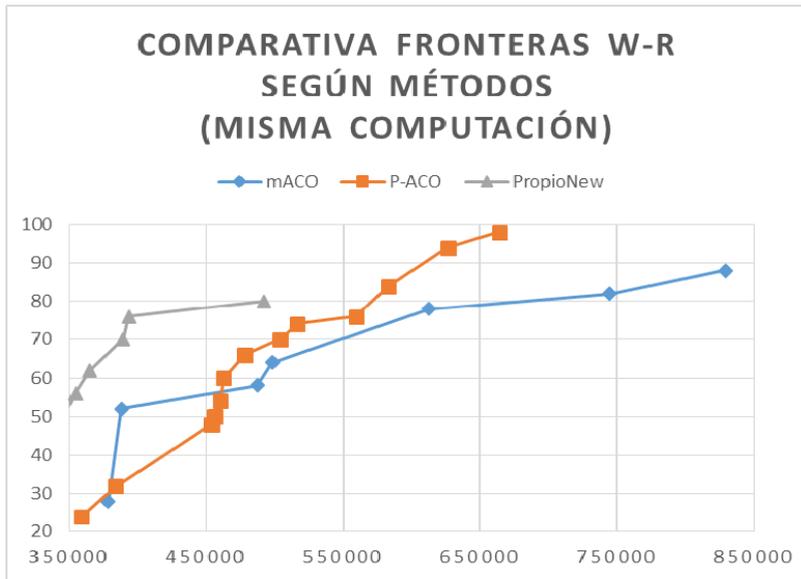


Figura 9 - 18 – Comparativa métodos de resolución.

9.3.4. Utilización de la herencia (trazas) en anchos de banda.

Se han realizado ensayos dejando el ancho de banda aleatorio puro y dejando que sea aleatorio pero condicionado a los resultados de las iteraciones anteriores, con herencia, marcando la casilla que se indica en la figura:

Modelo de espacio discreto

Tamaño de celda unitaria: m2

Parámetros de banda:

- Ancho de banda libre
- Ancho de banda variable (con punteros)
- Ancho de banda fijo

Utilizar herencia de trazas

Ratio alto/ancho del dominio global:

- Dejar ratio libre entre y
- Fijar ratio a

Utilizar herencia de trazas

Aceptar Cancelar

Figura 9 - 19 - Cuadro de diálogo de definición de los parámetros del espacio discreto.

En este caso se ha utilizado el mismo problema, con los mismos parámetros de funcionamiento del algoritmo, con 10 resoluciones de 50 iteraciones y 50 individuos en cada caso, habiéndose obtenido los siguientes resultados. Para el caso de dejar el ancho de banda aleatorio, la mejor solución es ésta:



Figura 9 - 20 – Solución sin herencia de ancho de banda.

Y para el caso de utilizar la herencia del ancho de banda, la mejor solución es ésta:

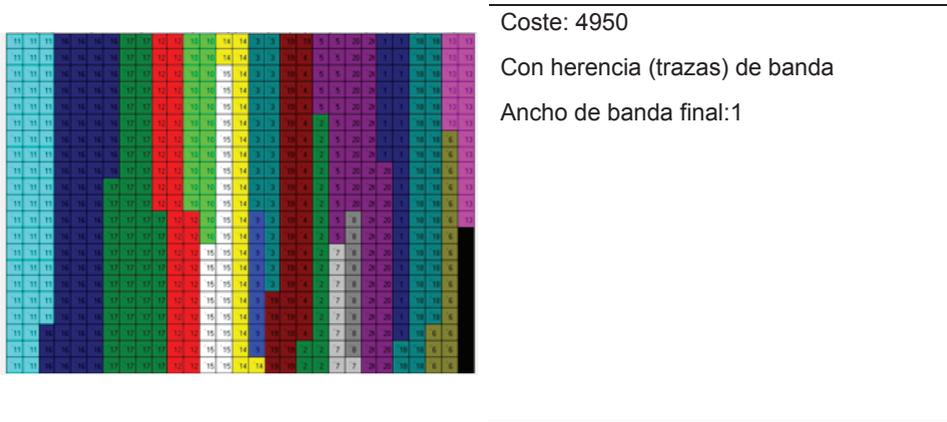


Figura 9 - 21 – Solución con herencia en el ancho de banda.

En este último caso, en la última iteración, el 80% de los individuos utilizaba un ancho de banda igual a 1 (el otro 20% utilizaba un ancho de banda igual a 15). Puede observarse en el gráfico la evolución coste-iteraciones de ambas soluciones:

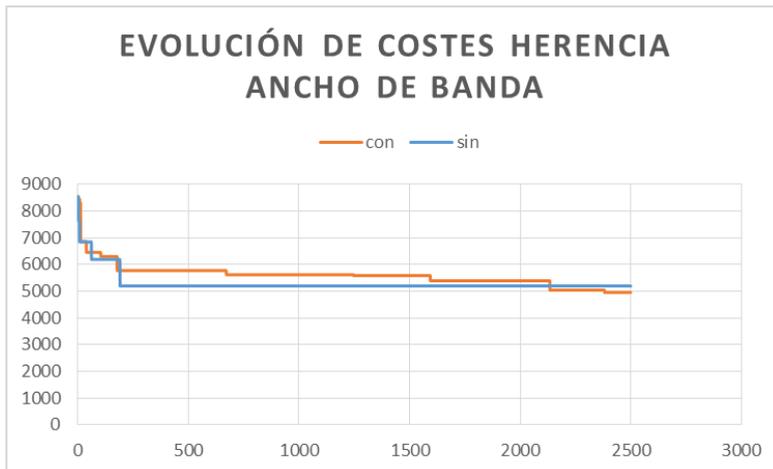
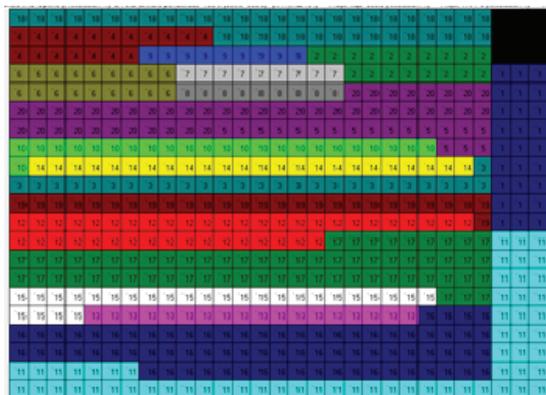


Figura 9 - 22 – Evolución de costes con herencia del ancho de banda.

En general, los valores de coste obtenidos en las distintas resoluciones son mayores y más dispersos en el caso de no utilizar herencia.

Por lo tanto, a partir de las pruebas realizadas, puede indicarse que parece más adecuado el uso de la herencia de trazas en el ancho de banda para obtener un mejor guiado del proceso de búsqueda y de forma más escalonada, mejores resultados.

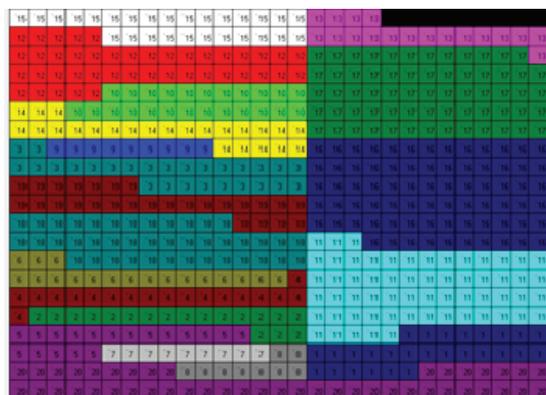
Se ha probado también con 200 iteraciones y 200 individuos, con unos tiempos de resolución de entre 5500 y 6000", habiéndose obtenido los siguientes resultados. Para el caso de dejar el ancho de banda aleatorio, la mejor solución es ésta:



Coste: 5095
 Sin herencia (trazas) de banda
 Ancho de banda final:26

Figura 9 - 23 – Solución con 200 iteraciones y 200 individuos sin herencia trazas.

Y para el caso de utilizar la herencia del ancho de banda, la mejor solución ésta:



Coste: 4952
 Con herencia (trazas) de banda
 Ancho de banda final: 16

Figura 9 - 24 - - Solución con 200 iteraciones y 200 individuos con herencia trazas.

9.3.5. Eficiencia de computación del número de individuos en tamaño de población o en iteraciones.

Se ha utilizado el mismo problema, con los mismos parámetros de funcionamiento del algoritmo (evaporación del 50%, $\alpha=\beta=0.5$), con 5 resoluciones de 100 iteraciones y 1000 individuos en cada caso (de este modo se computan un total de 100000 individuos por ejecución), habiéndose obtenido los siguientes resultados:

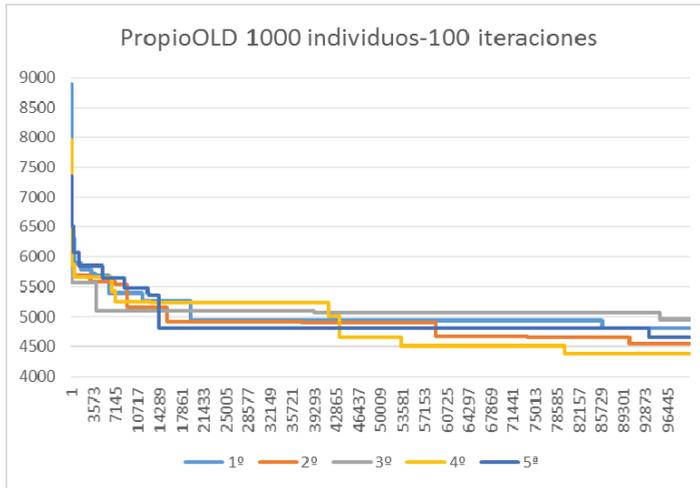


Figura 9 - 25 – Evolución de costes 100 iteraciones – 1000 individuos.

A continuación se han computado las mismas 5 resoluciones pero con 100 individuos y 1000 iteraciones, siendo los resultados los siguientes:

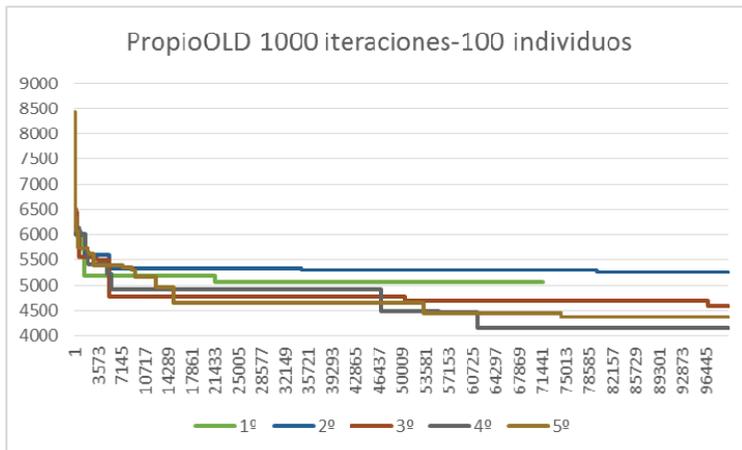


Figura 9 - 26 – Evolución de costes 1000 iteraciones – 100 individuos.

Se representan las mejores 3 resoluciones obtenidas en cada caso, obteniéndose resultados muy similares, siendo significativamente mejores y logrando mayor velocidad de convergencia las resoluciones con mayor número de iteraciones y menos individuos. Esto parece ser así cuando existe más de 1 criterio a optimizar:

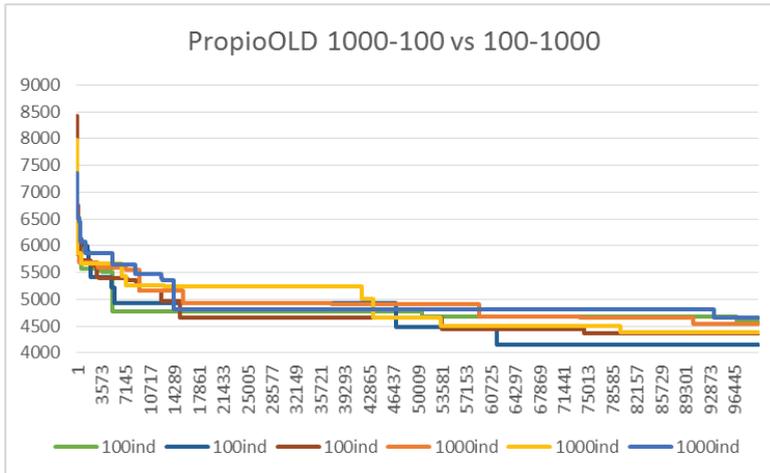
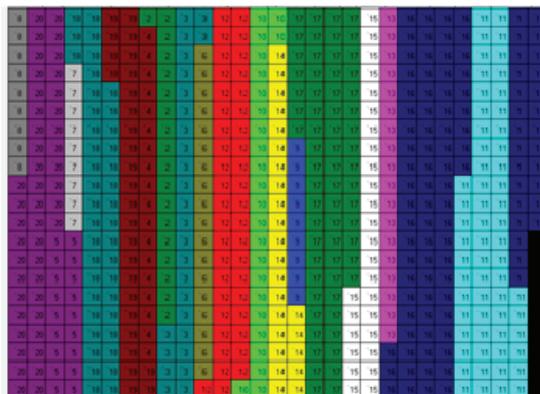


Figura 9 - 27 – Comparativa costes 100 individuos-1000 individuos.

El mejor resultado se obtuvo con 100 individuos y 1000 iteraciones, con un tiempo de cálculo de 38692,9", siendo el valor de coste obtenido de 4154:



Método de resolución utilizado: Propio(antiguo)
 Tiempo de resolución: 38692,9"
 Parámetros de optimización:
 N° individuos=100-N° iteraciones=1000
 Bloqueo=500
 Evaporación=0,5-Alfa=0,5-Beta=0,5
 Parámetros de espacio:
 Tamaño de celda=1
 Ancho de banda=Libre - 1

Figura 9 - 28 – Mejor solución 1000 iteraciones – 100 individuos.

9.4. Pruebas del algoritmo con problemas con varios objetivos.

Se procederá en esta sección a realizar la validación del algoritmo a través de los ensayos multiobjetivo existentes en la bibliografía. En la mayoría de casos los problemas planteados únicamente se ocupan de minimizar el coste asociado al transporte de materiales, siendo los multicriterio que existen en la mayoría de ocasiones consistentes en realizar el control geométrico de la solución. También existen otras baterías de problemas en los que se controla la adyacencia, a través del cumplimiento de la tabla relaciones de actividades (TRA).

9.4.1. Problema biobjetivo de Armour&Buffa con control geométrico propuesto por Wang.

En este problema, presentado en 2005 por (Wang et al. 2005), y planteado también como banco de pruebas en el trabajo Doctoral realizado por (Montalvá Subirats et al. 2011), se pretende resolver el conocido problema de Armour&Buffa de 20 actividades, pero realizando un control geométrico a través de los indicadores SRF_{whole} y ASF_{whole} propuestos por Wang.

Las soluciones alcanzadas por Wang son las que aparecen a continuación:

17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	18	18	18	18	18	18	18	18	18	18	
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	12	12	12	12	12	12	12	12	12	12	18	18	18	18	18	18	18	18	5	18	
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	10	10	10	10	10	10	19	19	19	19	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	5	5	5	5		
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	10	10	10	10	10	10	19	19	19	19	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	5	5	5	5		
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	10	10	10	10	10	10	19	19	19	19	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	5	5	5	5		
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	10	10	10	10	10	10	19	19	19	19	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	5	5	5	5		
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	10	10	10	10	10	10	19	19	19	19	4	4	4	4	4	4	2	2	2	2	2	5	5	5	5		
16	16	16	16	16	13	13	13	13	9	9	14	14	14	14	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	8	8	20	20		
16	16	16	16	16	13	13	13	13	9	9	14	14	14	14	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	8	8	20	20		
16	16	16	16	16	13	13	13	13	9	9	14	14	14	14	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	8	8	20	20		
16	16	16	16	16	13	13	13	13	9	14	14	14	14	14	3	3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	6	6	6	7	7	8	8	20	20		
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	15	15	15	15	15	1	1	1	1	1	1	1	1	20	20	20	20	20	20	20		
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	15	15	15	15	15	1	1	1	1	1	1	1	1	20	20	20	20	20	20	20	20	
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	15	15	15	15	15	1	1	1	1	1	1	1	1	20	20	20	20	20	20	20	20	
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	15	15	15	15	15	1	1	1	1	1	1	1	1	20	20	20	20	20	20	20	20	
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	15	15	15	15	15	1	1	1	1	1	1	1	1	20	20	20	20	20	20	20	20	

Fig. 11. Case 3 ($n = 20$), site size 30×20 , $MFFC = 5926.60$, $SRF_{whole} = 1.144$, $AUF_{whole} = 1$, $TLC = 6781.5$.

Figura 9 - 30 – Solución propuesta por (Wang et al. 2005) con $R=1.5$.

15	15	15	15	15	10	10	10	10	10	10	14	14	14	14	3	3	3	3	3	1	1	1	1	
15	15	15	15	15	10	10	10	10	10	14	14	14	14	14	3	3	3	3	3	1	1	1	1	
15	15	15	15	15	10	10	10	10	10	14	14	14	14	14	3	3	3	3	3	1	1	1	1	
15	15	15	15	15	10	10	10	10	10	14	14	14	14	14	3	3	3	3	3	1	1	1	1	
17	17	12	12	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	9	9	19	19	19	19	5	5	5	5	
17	17	12	12	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	9	9	19	19	19	19	5	5	5	5	
17	12	12	12	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	9	9	19	19	19	19	5	5	5	5	
17	12	12	12	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	9	9	19	19	19	19	5	5	5	5	
17	12	12	12	12	12	12	12	12	12	13	13	13	13	9	9	19	19	19	19	5	5	5	5	
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	2	2	2	2	2	4	4	4	4	7	7	8	8	20	20
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	2	2	2	2	2	4	4	4	4	7	7	8	8	20	20
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	2	2	2	2	2	4	4	4	4	7	7	8	8	20	20
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	2	2	2	2	2	4	4	4	4	7	7	8	8	20	20
17	17	17	17	17	17	17	17	17	17	2	2	2	2	2	4	4	4	4	7	7	8	8	20	20
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	6	6	6	6	20	20	20	20	20	20
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	6	6	6	6	6	20	20	20	20	20
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	6	6	6	6	6	20	20	20	20	20
16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	6	6	6	6	6	20	20	20	20	20
11	11	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	16	6	6	6	6	6	20	20	20	20	20
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	18	18	18	18	18	18	18	18	18
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	18	18	18	18	18	18	18	18	18
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	18	18	18	18	18	18	18	18	18
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	18	18	18	18	18	18	18	18	18
11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	11	18	18	18	18	18	18	18	18	18

Fig. 13. Case 3 ($n=20$), the optimal layout site size 25×24 , $TLC = 6777.4$, $SRF_{whole} = 1.177$, $AUF_{whole} = 1$, $MFFC = 5759.3$.

Figura 9 - 31 – Segunda solución propuesta por (Wang et al. 2005).

En la Tesis Doctoral realizada por (Montalvá Subirats et al. 2011), muestra un gráfico con las soluciones que obtiene, aunque no llega a dominar en el concepto de Pareto a las dos soluciones de Wang:

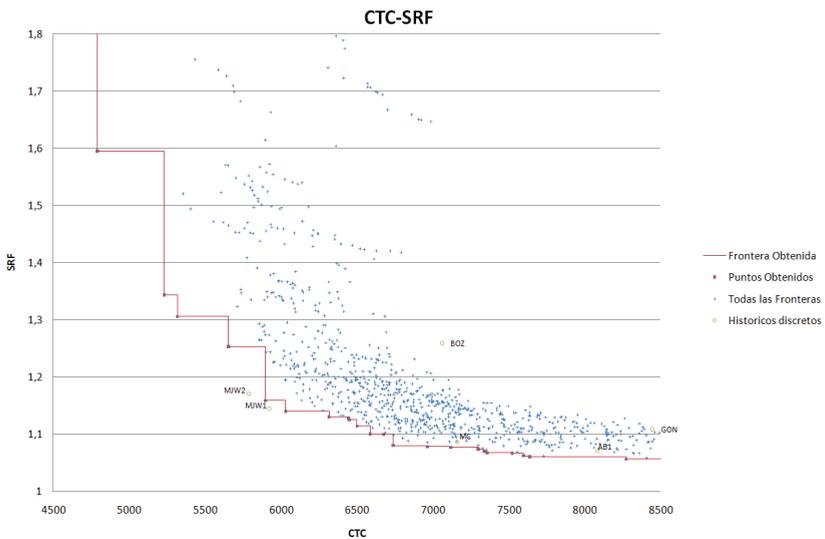


Figura 9 - 33 – Soluciones propuestas por (Montalvá Subirats et al. 2011).

Cabe indicar que se han detectado algunos errores tipográficos en la primera de las soluciones presentadas por (Wang et al. 2005), de modo que no pueden calcularse los parámetros *SRF* para cada actividad que tiene el área mal representada (actividades 10, 16 y 19); a continuación se presentan los valores corregidos para poder realizar la comparación con las soluciones obtenidas en este trabajo:

Tabla 9 - 6 – Detalle del cálculo de SRF_{whole} solución 1 de (Wang et al. 2005)

Act	P	A	Wang	SRF
1	22	27	27	1,058
2	18	18	18	1,061
3	22	27	27	1,058
4	20	18	18	1,179
5	20	18	18	1,179
6	18	18	18	1,061
7	16	9	9	1,333
8	16	9	9	1,333
9	14	9	9	1,167
10	22	24	30	1,004
11	34	60	60	1,097
12	30	42	42	1,1573
13	18	18	18	1,061
14	22	24	24	1,123
15	22	27	27	1,058
16	38	75	72	1,120
17	36	64	64	1,125
18	28	41	41	1,093
19	20	27	24	1,021
20	36	45	45	1,342

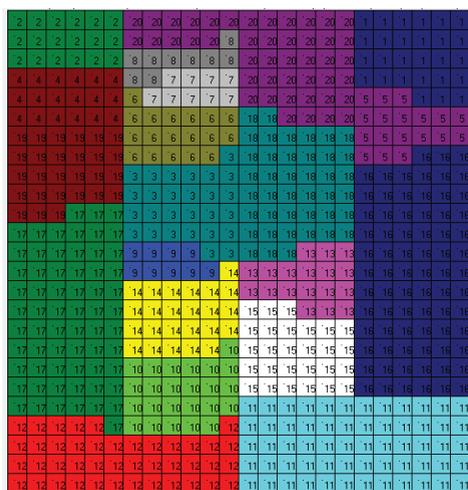
Se han marcado en amarillo-rojo los valores de representación de superficie erróneos que existen en la solución presentada. Como se ha indicado, lo más probable es que se trate simplemente de un error tipográfico de representación de la misma, dado que dichos errores no existen en la 2ª solución presentada:

Tabla 9 - 7 – Detalle del cálculo de SRF_{whole} solución 2 de (Wang et al. 2005)

Act	P	A	Wang	SRF_{ind}
1	28	27	27	1,347
2	18	18	18	1,061
3	22	27	27	1,058
4	18	18	18	1,061
5	20	18	18	1,179

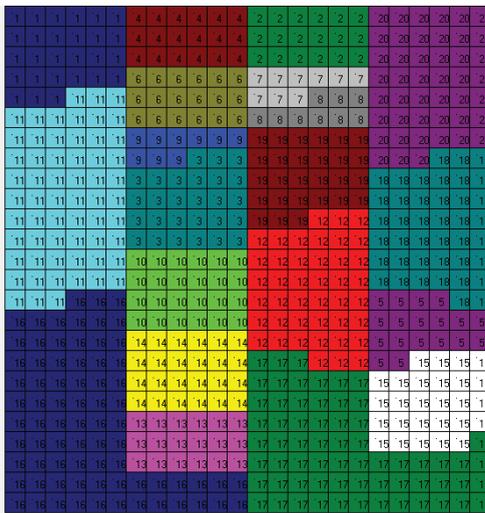
P	14	24	24	1,225
R	15	26	27	1,251
S	16	50	75	1,443
T	17	36	64	1,125
U	18	36	41	1,406
V	19	28	27	1,347
W	20	30	45	1,118
				1,212 =SRF _{whole}

Se ha resuelto este mismo problema planteado por Wang y Montalvá, habiendo hallado soluciones que suponen nuevos puntos en las fronteras de Pareto junto con las presentadas por ambos autores. Dichas soluciones encontradas por el algoritmo ACO implementado, en algunas de sus variantes, en forma codificada son las siguientes:



Método de resolución utilizado: P-ACO
 Tiempo de resolución: 86,4"
 Nº individuos=50-Nº iteraciones=100
 Evaporación=0,3-Alfa=0,3-Beta=0,7
 Parámetros de espacio:
 Tamaño de celda=1-Ancho de banda=6-Ratio=0,96
 Cw_{ij}=5919-Cgeom=1.148
 (Similar a la de Wang1)
 HORMIGA 9: RATIO=0,96: BANDA=6
 RECORRIDO: 2-4-19-17-12-10-14-9-3-6-7-8-20-18-13-15-11-16-5-1 - coste: 1184,668782627

Figura 9 - 37 – Solución eficiente 1 problema (Wang et al. 2005).



Método de resolución utilizado: P-ACO-Tiempo de resolución: 86"

Nº individuos=50-Nº iteraciones=100

Evaporación=0,5-Alfa=0,3-Beta=0,7

Parámetros de espacio:

Tamaño de celda=1-Ancho de banda=6-Ratio=0,96

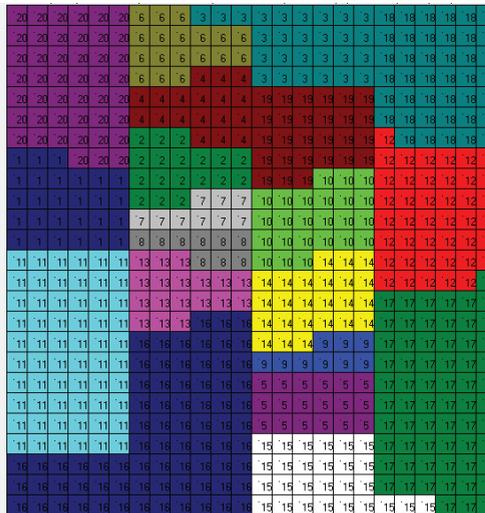
Cw_{ij}=5979- Cgeom=1.124

ITERACIÓN: 63 HORMIGA 2: RATIO=1: BANDA=6

RECORRIDO: 1-11-16-13-14-10-3-9-6-4-2-7-8-19-12-17-15-5-18-20 - coste: 1196,8393092501

(similar a la de Wang1)

Figura 9 - 38 – Solución eficiente 2 problema (Wang et al. 2005).



Método de resolución utilizado: Propio(antiguo)

Tiempo de resolución: 66,8"

Nº individuos=50-Nº iteraciones=100

Evaporación=0,8-Alfa=0,8

Parámetros de espacio:

Tamaño de celda=1-Ancho de banda=6-Ratio=0,96

Coste óptimo = 2911-Cw_{ij}=5821-Cgeom=1.132

(Domina a Wang1)

Figura 9 - 39 – Solución eficiente 3 problema (Wang et al. 2005).

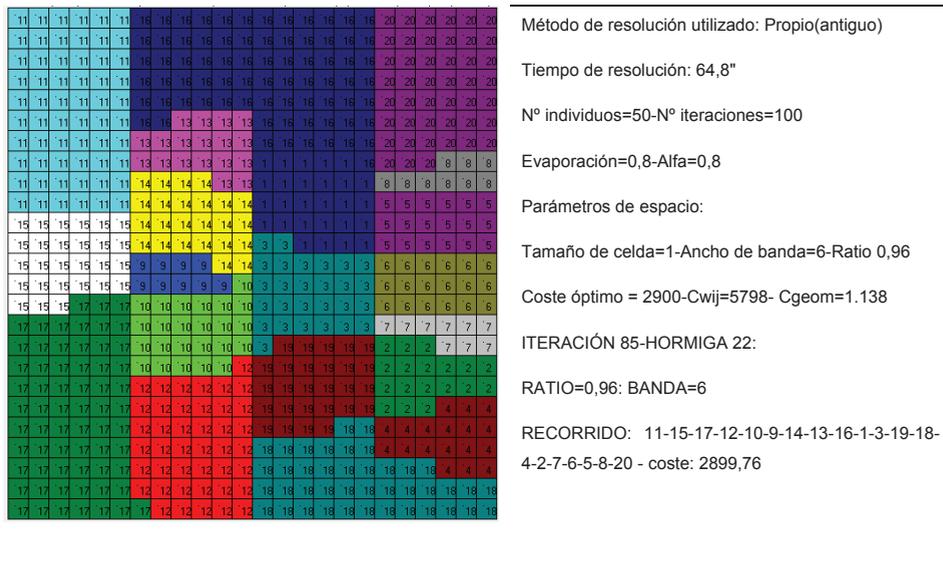


Figura 9 - 40 – Solución eficiente 4 problema (Wang et al. 2005).

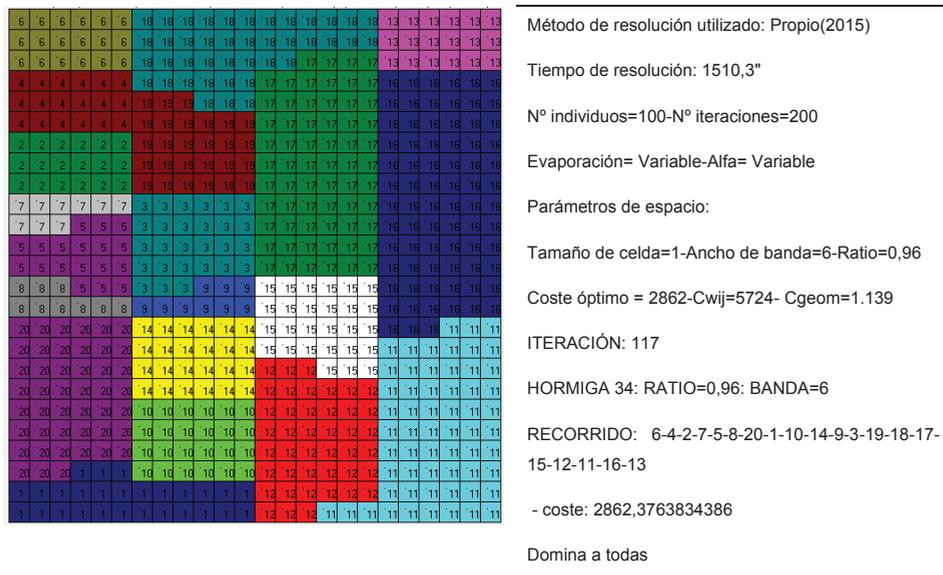


Figura 9 - 41 – Solución eficiente 5 problema (Wang et al. 2005).

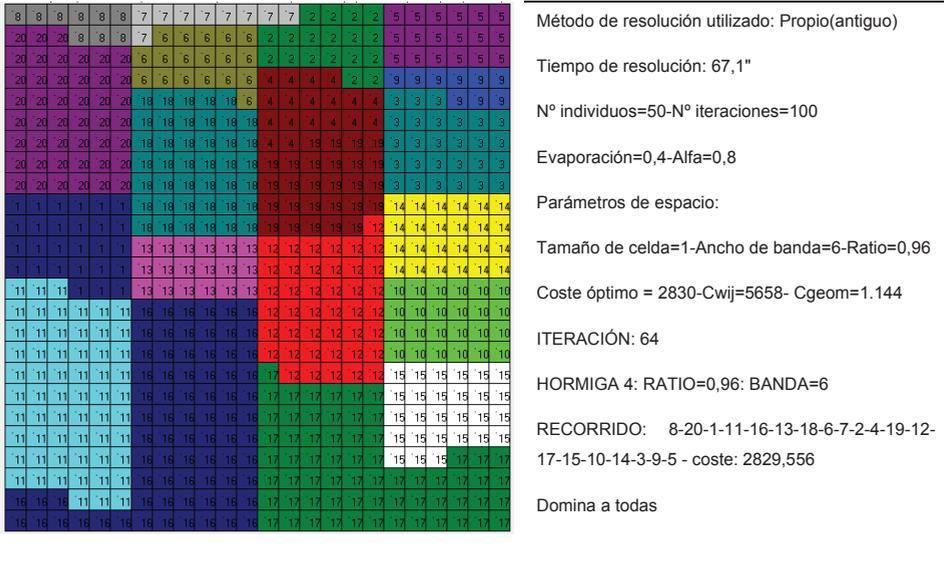


Figura 9 - 42 – Solución eficiente 6 problema (Wang et al. 2005).

Y los gráficos con las fronteras de Pareto se muestran a continuación, donde se representan las fronteras obtenidas y los puntos que dominan a las soluciones de Wang y a las demás existentes en la bibliografía (dado que las de Wang dominan a las demás publicadas):

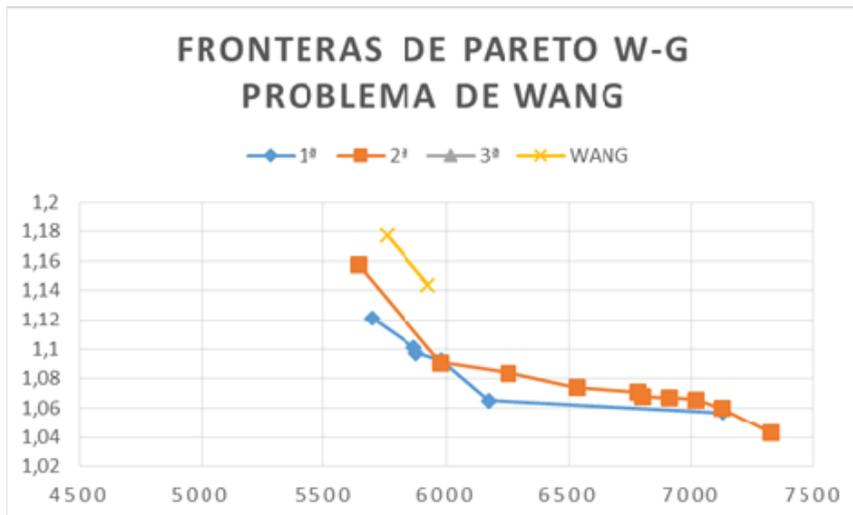


Figura 9 - 43 – Fronteras de Pareto problema de (Wang et al. 2005).

9.4.2. Problema triobjetivo de planta quirúrgica propuesto por (Santamarina 1995).

En este problema, se controlan tanto los flujos, como las relaciones de la TRA y la geometría. Se tomará como problema test para 3 criterios. El problema fue propuesto por (Santamarina 1995) en su Tesis Doctoral. No existen referencias en la bibliografía al respecto de la resolución de este problema, salvo la de la autora, no obstante, y dada la escasez de problemas con 3-4 criterios en la bibliografía se toma como buena referencia para el contraste del algoritmo. Se trata de resolver un problema de distribución de una planta dedicada a la fabricación de material quirúrgico, perteneciente a una empresa anónima situada en la Comunidad Valenciana. La empresa se dedica a la fabricación de prótesis quirúrgicas (de rodilla y cadera) y de diverso material para traumatología (clavos intramedulares, placas, clavos, etc.) e instrumental médico variado.

Las actividades y dimensiones de las mismas a ordenar son:

Tabla 9 - 10 – Problema de 18 actividades de (Santamarina 1995)

	(m ²)		(m ²)
1 Almacén de Materias Primas	400	10 Pulidoras	440
2 Tornos Control Numérico	198	11 Baños	140
3 Centros Control Numérico	198	12 Grabado	120
4 Fresadoras	160	13 Departamento esterilización	280
5 Roscadoras	180	14 Inspección Final	108
6 Tornos	200	15 Inspección en Proceso	108
7 prensas	140	16 Inspección Recepción	140
8 Área de Montaje	150	17 Oficinas	600
9 Arenadora	120	18 Sala de Máquinas	100

La tabla de flujos del problema aparece a continuación:

Tabla 9 - 11 – Tabla de flujos del problema de (Santamarina 1995)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	*	1312	2330			2860												
2		*	5920	440	4880	1840		4540		3040								
3		6120	*			960		250							3760			
4		440		*														
5					*	1880												
6			960	4880		*	6780	1840		2860								
7						6780	*											
8								*	2710	1840	1900	1810		690	2200			
9									*			6490			1900			
10								5520		*	8770				3760			
11								1900			*			13270	4160			
12									960		6760	*			3620			
13													*		18240			
14													17370	*				
15									3720	3620	1900	960	7810	2200	*			
16			1880							1810		2080	19240	3040		*		
17																	*	
18																		*

Y la tabla relaciones de actividades. En primer lugar los valores numéricos de la TRA a considerar son:

Tabla 9 - 12 – Valores numéricos de la TRA.

Valor Relacional	Valor numérico
A	640
E	160
I	40
O	2
U	0
X	-1024

Tabla 9 - 13 – Tabla Relacional de Actividades (Santamarina 1995).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
1	*	E	E	E	E	E	U	U	U	U	U	U	U	U	A	U	U	
2		*	A	A	A	A	A	E	U	U	U	U	U	U	A	U	X	U
3			*	A	A	A	A	E	U	U	U	U	U	U	A	U	X	U
4				*	A	A	A	A	U	U	U	U	U	U	A	U	X	U
5					*	A	A	A	U	U	U	U	U	U	A	U	X	U
6						*	A	A	U	U	U	U	U	U	A	U	X	U
7							*	A	U	U	U	U	U	U	A	U	X	U
8								*	U	U	U	U	U	U	E	U	U	U
9									*	U	U	U	U	U	U	U	X	U
10										*	U	U	U	U	U	U	X	U
11											*	E	E	E	U	U	X	U
12												*	U	U	U	U	E	U
13													*	A	U	U	A	U
14														*	U	U	A	U
15															*	U	U	U
16																*	U	U
17																	*	U
18																		*

En las soluciones propuestas por (Santamarina 1995) la función objetivo para calcular el coste relacional de las distribuciones es la siguiente:

$$S(D,D) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} \cdot \left[\sum_{u=1}^k \alpha_u \cdot f_{u,ij} + \sum_{v=1}^{k'} \beta_v \cdot t_{v,ij} \right] + \mu \sum_{i=1}^n f(I_i) \tag{9-1}$$

siendo:

$f_{1,ij}$ = flujo de materiales entre actividades (en MAGs).

$t_{1,ij}$ = valor en la Tabla Relacional de Actividades, entre las actividades i y j.

$f(I_i) = (1+I_i)^5$, penalización del incumplimiento.

d_{ij} = distancia rectilínea entre los centros de gravedad de las actividades i y j.

$k = k' = 1$.

Donde los valores de la TRA dependen a la distancia. Dado que en el algoritmo propuesto, los valores de la TRA sólo tienen en cuenta la adyacencia o no de las actividades, se han calculado los valores de este coste relacional en las distribuciones propues-

tas por (Santamarina 1995) con la función de esta investigación, y se han situado como puntos en las fronteras de Pareto para comprar la calidad con las obtenidas en este trabajo. Sobre la función de coste geométrico, tampoco es la misma por lo que no se comparará la calidad comparando los costes, dado que en este trabajo se utiliza el indicador propuesto por (Bozer et al. 1994, Wang et al. 2005, Montalvá Subirats et al. 2011), mientras (Santamarina 1995) utiliza el propuesto en (Contero Gonzalez 1995).

Las dos mejores soluciones propuestas por (Santamarina 1995) son las siguientes:

Solución 1:

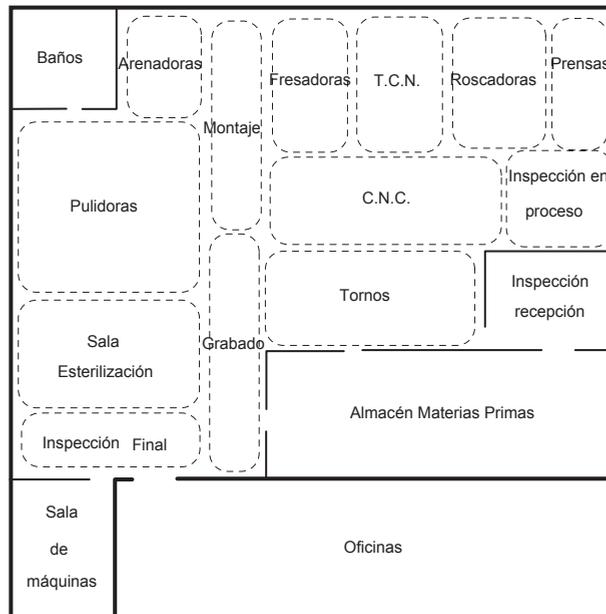


Figura 9 - 44 – Solución 1 propuesta por (Santamarina 1995).

Coste Relacional 7802259 udes. $(8178129 + 10*(-61237) + 100*2365)$

Coste flujo de materiales 8178129 unidades.

Coste relacional TRA -61237 unidades.

(TRA con la medida de este trabajo 21440)

Coste formal 2365 unidades.

Coefficiente Formal 0.10

Ratio alto/ancho 1.0

Solución 2:

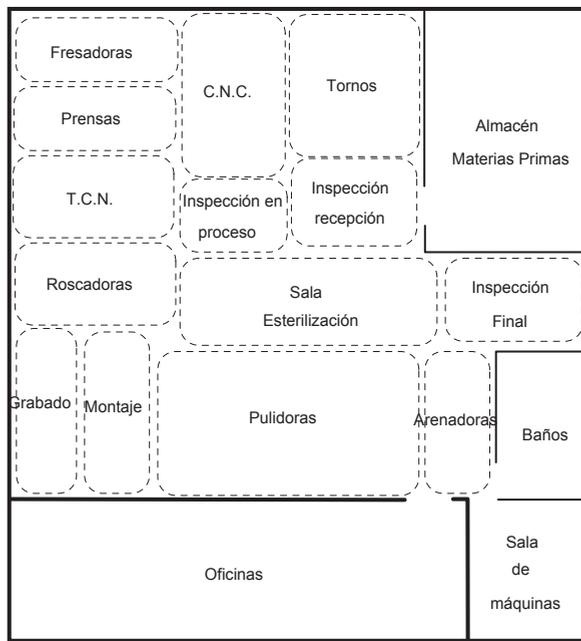


Figura 9 - 45 – Solución 2ª propuesta por (Santamarina 1995).

Coste Relacional 7893121 udes. (5828851 + 10*193587 + 100*1284)

Coste flujo de materiales 5828851 unidades.

Coste relacional TRA 193587 unidades.

(TRA con la medida de este trabajo 13504)

Coste formal 1284 unidades.

Coefficiente Formal 0.09

Ratio alto/ancho 1.1

9.4.2.1. Fronteras de Pareto biobjetivo W-R del problema triobjetivo de una planta quirúrgica propuesto por (Santamarina 1995).

A continuación se exponen los resultados obtenidos para un plan experimental donde se han realizado 10 resoluciones del problema con el método Propio New, con 50 individuos y 500 iteraciones, con un tiempo aproximado por resolución de unos 36 minutos, habiendo obtenido fronteras de Pareto para cada par de criterios. A continuación se representa el par W-R para las 7 mejores resoluciones obtenidas, haciendo hincapié en que, como puede observarse, todas ellas dominan a las soluciones presentadas por Santamarina en su trabajo doctoral (sus soluciones son representadas en color marrón):

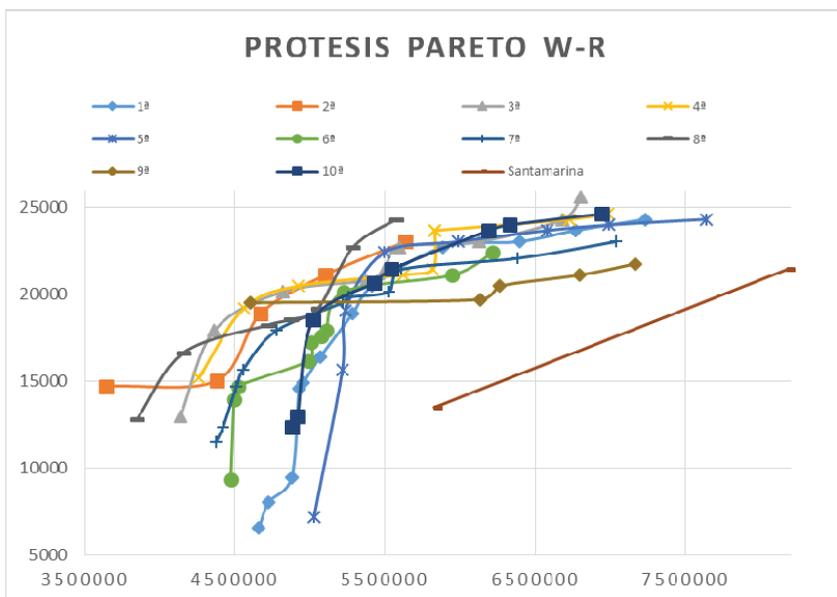


Figura 9 - 46 - Frontera de Pareto con 50 individuos y 500 iteraciones.

Además, también se ha realizado otro conjunto de experimentos con más tiempo de resolución. Cabe indicar que en este caso se ha utilizado una función objetivo distinta para la evaluación de la TRA, de ahí que se obtengan valores mayores que en el caso anterior. Únicamente se muestra a modo ilustrativo, para demostrar que con el método memético implementado y con el tiempo de resolución suficiente, se obtienen unas fronteras de Pareto refinadas y bien distribuidas. Se presentan las fronteras de Pareto (biobjetivo, para W y R) obtenidas resolviendo el caso con 400 individuos y 400 iteraciones

un total de 10 repeticiones. El tiempo de computación de cada una de ellas fue de aproximadamente 25 horas. Se ha utilizado el método propio nuevo, de ahí la buena distribución de los puntos en la frontera de Pareto.

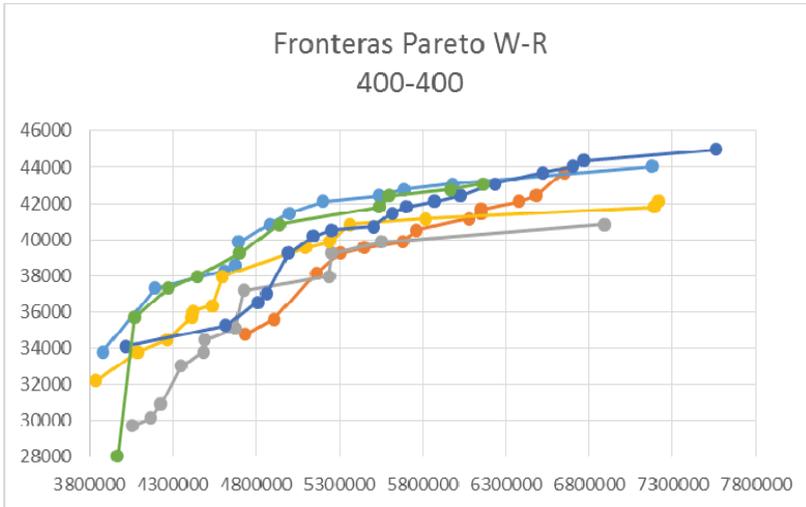


Figura 9 - 47 - Frontera de Pareto con 400 individuos y 400 iteraciones

Se muestran a continuación dos de las soluciones obtenidas por la aplicación, que mejoran a las presentadas:

ión n°3 Costes [lt.2Ind.41] -> C.Flujos=6300210 - C.TRA=12362 - C.GEOM=1.03 - C.SECT=0 - C.Total [1374249] unit.pondi=68% (Fluj
 ón n°5 - Mejor flujo obtenido: Iter:51-Ind:37-C.Fluj=4115233 [bbb] Mejor TRA obtenida: Iter:265-Ind:5-C.TRA=25600 [bbb] M
 encia IND.Óptimo (Resolución 2): C.Total unitario ponderado=67% (coste=1218768) - [lt.2Ind.16] --- Mejor flujo=3648564 (resoluc

10	10	10	10	10	8	8	8	8	9	9	9	9	9	9	18	18	18	18	18
10	10	10	10	10	8	8	8	8	8	9	9	9	9	9	18	18	18	18	18
10	10	10	10	10	8	8	8	8	8	9	12	12	12	12	5	5	5	5	18
10	10	10	10	10	8	4	4	4	4	12	12	12	12	12	5	5	5	5	5
10	10	10	10	10	4	4	4	4	4	12	12	12	11	11	5	5	5	5	5
10	10	10	10	10	4	4	4	4	4	11	11	11	11	11	5	5	5	5	15
10	10	10	10	10	1	1	1	1	4	4	11	11	11	11	15	15	15	15	15
10	10	10	10	10	1	1	1	1	1	13	13	13	11	11	15	15	15	15	15
10	10	10	10	7	1	1	1	1	1	13	13	13	13	13	14	14	14	14	14
7	7	7	7	7	1	1	1	1	1	13	13	13	13	13	14	14	14	14	14
7	7	7	7	7	1	1	1	1	1	13	13	13	13	13	17	17	17	17	14
2	2	7	7	7	1	1	1	1	1	13	13	13	13	13	17	17	17	17	17
2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	13	13	13	13	13	17	17	17	17	17
2	2	2	2	2	1	1	1	1	1	16	16	16	16	16	17	17	17	17	17
2	2	2	2	2	6	6	6	1	1	16	16	16	16	16	17	17	17	17	17
3	3	2	2	2	6	6	6	6	6	17	16	16	16	16	17	17	17	17	17
3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
3	3	3	3	3	6	6	6	6	6	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
3	3	3	3	3	3	3	3	6	6	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17

Figura 9 - 48 – Solución al problema de (Santamarina 1995).

Y otra solución más de entre las eficientes de Pareto:

ión nº2 Costes [(I.2.Ind.16) -> C.Flujo=7265439 -C.TRA=12544 -C.GEOM=1,04 -C.SECT=0 -C.Total (1218768) unit pond=65% (Flujo
 ón nº2 - Mejor flujo obtenido: Iter:499Ind:33-C.Flujo=3648564 [bbb-] Mejor TRA obtenida: Iter:240Ind:25-C.TRA=24000 [bbb-]
 encia IND Óptimo (Resolución 2): C.Total unitario ponderado=67% (coste=1218768) - (I.2.Ind.16) --- Mejor flujo=3648564 (resoluc

17	17	17	17	17	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	18	18	18	18	18
17	17	17	17	17	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	18	18	18	18	18
17	17	17	17	17	5	5	5	5	5	3	3	3	3	3	12	12	12	12	18
17	17	17	17	17	5	5	5	8	8	3	3	3	3	3	12	12	12	12	12
17	17	17	17	17	8	8	8	8	8	6	6	6	6	6	7	7	12	12	12
17	17	17	17	17	8	8	8	8	8	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7
17	17	17	17	17	10	10	8	8	8	6	6	6	6	6	7	7	7	7	7
17	17	17	17	17	10	10	10	10	10	6	6	6	6	6	7	7	4	4	4
17	17	17	17	17	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15	4	4	4	4	4
17	17	17	17	17	10	10	10	10	10	15	15	15	15	15	4	4	4	4	4
17	17	17	17	17	10	10	10	10	10	15	9	9	9	9	2	2	4	4	4
17	17	17	17	17	10	10	10	10	10	9	9	9	9	9	2	2	2	2	2
13	13	13	13	13	10	10	10	10	10	9	9	9	16	16	2	2	2	2	2
13	13	13	13	13	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	2	2	2	2	2
13	13	13	13	13	10	10	10	10	10	16	16	16	16	16	1	1	2	2	2
13	13	13	13	13	10	10	11	11	11	1	1	1	16	16	1	1	1	1	1
13	13	13	13	13	11	11	11	11	11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	14	14	14	14	13	13	13	13	13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
14	14	14	14	14	14	14	14	14	11	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Figura 9 - 49 – Otra solución eficiente al problema de (Santamarina 1995).

9.4.3. Problema de (Tate, Smith 1995) de 20 actividades.

Se trata de un problema triobjetivo propuesto por (Tate, Smith 1995) por primera vez, cuya última resolución que consta en la bibliografía es la de (Ghaseminejad et al. 2011), donde aparece completamente definido y con los últimos resultados proporcionados. Este problema se inspira en el de (Armour, Buffa 1963), añadiéndole más criterios, como la tabla relacional de actividades.

Las tablas con las superficies, los flujos y la TRA se muestran a continuación:

Tabla 9 - 14 – Superficies problema (Tate, Smith 1995)

Actividad	Área (m ²)	Actividad	Área (m ²)
1	32	11	27
2	40	12	37
3	38	13	44
4	42	14	41
5	31	15	28
6	29	16	34
7	36	17	42
8	36	18	32
9	35	19	28
10	39	20	29

Tabla 9 - 15 – Matriz de flujos problema (Tate, Smith 1995)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1			5	29	16	11	23	5	0	2	12	19	13	23	7	17	21	15	29	15	17
2	12			17	30	15	10	22	18	17	12	28	10	28	6	15	27	11	21	14	6
3	13	11			10	26	28	12	24	21	9	23	18	28	9	27	8	3	5	16	25
4	4	1	6			8	19	17	2	24	4	29	12	20	21	12	16	21	12	10	3
5	19	29	29	2			0	17	26	6	20	27	25	27	1	2	12	22	16	0	23
6	12	12	7	14	19			27	27	1	6	21	17	4	18	12	9	12	17	29	18
7	8	1	6	26	11	16			8	10	27	9	14	23	7	19	15	19	5	5	8
8	19	20	7	7	17	7	8			13	3	20	19	29	5	19	5	23	6	2	21
9	0	7	10	14	10	2	26	22			18	30	18	24	21	9	28	15	16	25	3
10	5	25	11	14	14	18	23	10	2			4	19	15	9	3	13	15	16	4	16
11	22	4	5	24	13	9	3	17	2	1			9	15	3	15	19	11	22	8	0
12	14	6	9	6	12	23	1	6	10	19	29			3	19	0	16	26	13	13	24
13	27	9	28	30	25	11	16	5	3	6	25	29			14	21	2	23	15	17	15
14	1	1	4	4	6	9	11	15	24	21	5	9	20			5	4	0	6	27	13
15	13	9	1	30	7	13	18	28	23	6	23	11	7	19			14	12	19	28	2
16	0	1	7	12	8	4	27	24	25	15	12	2	22	19	11			16	22	21	11
17	2	17	16	25	29	23	4	13	16	10	4	29	15	13	10	26			12	21	8
18	16	27	4	10	4	12	11	1	27	2	10	27	10	24	20	11	21			0	5
19	22	18	29	3	8	2	24	4	19	28	24	6	12	24	21	8	27	2			4
20	20	6	6	7	20	19	13	6	10	6	23	13	22	28	21	24	1	15	7		

Tabla 9 - 16 – Tabla relacional de actividades problema (Tate, Smith 1995)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1		U	I	U	U	U	I	U	U	U	U	U	U	U	A	U	E	U	U	A
2			A	O	O	E	U	U	X	A	U	U	U	A	U	U	U	U	U	I
3				U	U	A	U	U	X	U	U	I	U	U	E	X	U	A	U	U
4					A	U	U	E	X	U	U	U	U	U	U	X	U	U	U	U
5						U	U	U	U	A	U	U	U	U	U	U	U	U	X	X
6							U	I	U	U	U	I	U	U	A	U	U	U	U	X
7								U	I	U	O	U	A	U	U	U	E	U	U	X
8									U	U	U	U	U	U	U	U	U	O	U	U
9										E	U	E	U	X	U	U	X	U	X	U
10											U	U	U	X	U	U	X	E	X	A
11												U	U	I	U	A	U	O	U	U
12													U	U	U	U	U	O	U	U
13														U	U	E	U	U	U	U
14						S									U	I	U	A	U	I
15																U	U	U	U	U
16																	U	U	X	U
17																		E	U	E
18																			U	U
19																				U
20																				

Se muestra la frontera W-G obtenida para distinto número de iteraciones-individuos, no apreciando mejoras significativas en las fronteras de Pareto aun aumentando la computación realizada:

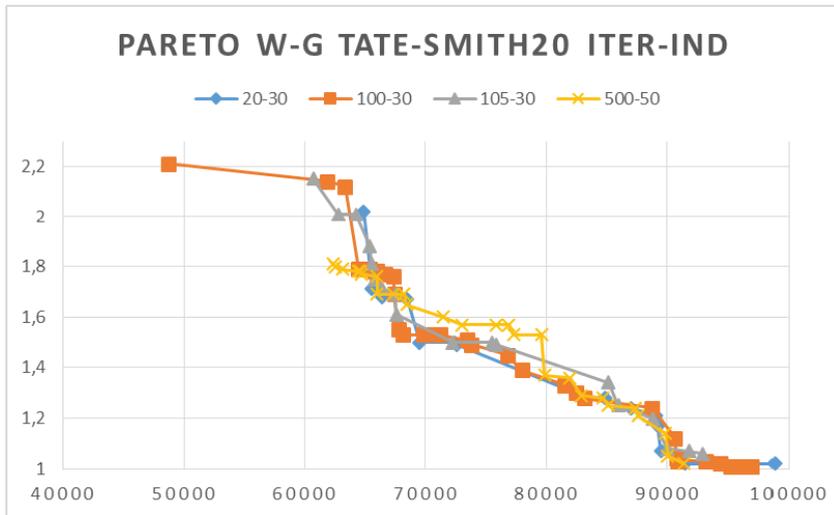


Figura 9 - 50 – Fronteras de Pareto W-G problema (Tate, Smith 1995)-

Para el caso de las fronteras W-R sí se aprecia una mejora significativa en el caso de utilizar mayor tiempo de computación, apreciándose fundamentalmente un mayor número de soluciones no dominadas en la resolución con mayor computación:

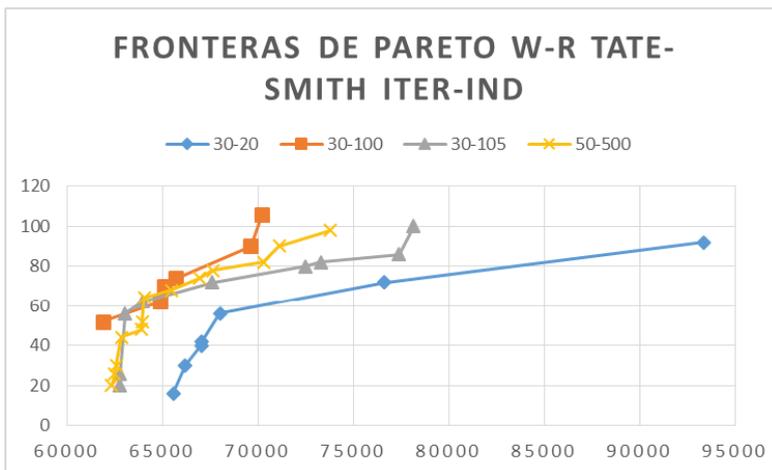
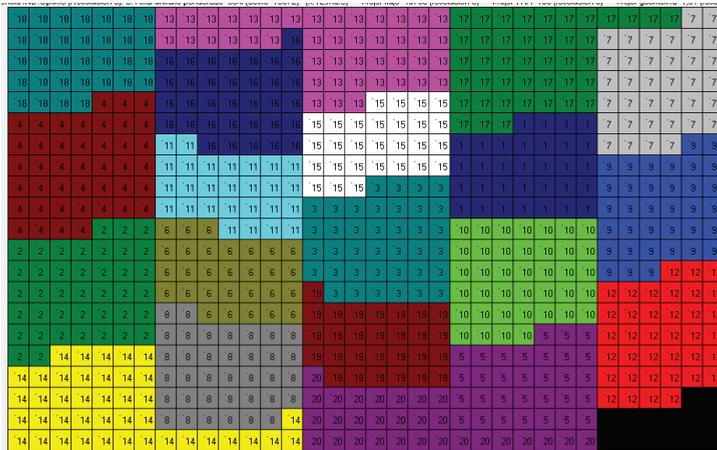


Figura 9 - 51 - - Fronteras de Pareto W-R problema (Tate, Smith 1995).

Se muestran dos de las soluciones, una con buena calidad geométrica y otra con buen coste de flujo y mala calidad geométrica:



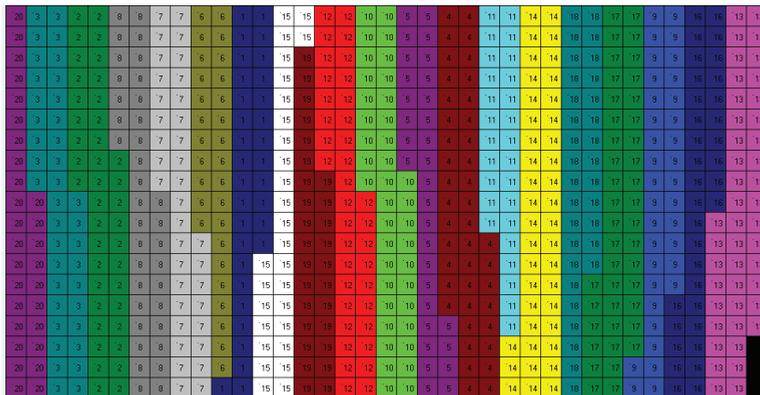
Método de resolución utilizado: Propio(2015) - Tiempo de resolución: 36,4"

Nº individuos=30 - Nº iteraciones=100 - Evaporación= Variable - Alfa= Variable - Beta= Variable

Parámetros de espacio: Tamaño de celda=1 - Ancho de banda=Libre - 7

Coste óptimo = 19572-Cwij=94820-Crij=76-Cgeom=1-Csect=0

Figura 9 - 52 – Solución eficiente 1 problema tricriterio.



Método de resolución utilizado: Propio(2015) - Tiempo de resolución: 39,5"

Nº individuos=30 - Nº iteraciones=500 - Evaporación= Variable - Alfa= Variable - Beta= Variable

Parámetros de espacio: Tamaño de celda=1 - Ancho de banda=Libre - 1

Coste óptimo = 24370-Cwij=73901-Crij=50-Cgeom=2-Csect=0

Figura 9 - 53 - Solución eficiente 2 problema tricriterio.

9.5. Pruebas del algoritmo con problemas con 4 objetivos incluyendo la sectorización.

Dado que se trata de un nuevo criterio de diseño en el ámbito del FLP, no existiendo en ninguna referencia bibliográfica anterior ningún problema similar, se propone aquí un problema de referencia inspirado en problemas existentes de entre los resueltos en apartados anteriores de este capítulo.

Se proponen 2 ejemplos:

- Uno inspirado en el problema de (Tate, Smith 1995) de 20 actividades, aplicando un factor de escala (20:1), de modo que resulten varios sectores de incendio y sea un problema su optimización, expresado en m^2 , y definiendo parámetros de carga de fuego aleatorios.
- Otro completamente definido al azar durante la implementación del algoritmo para realizar pruebas y comprobaciones de las rutinas.

A continuación se expone su definición y resolución.

9.5.1. Problema inspirado en (Tate, Smith 1995).

Se adjunta el listado de actividades y superficies, aplicando un factor de escala $\times 20$ y cambiando las unidades a metros cuadrados, lo que conduce a una planta de gran superficie, que conjugado con los niveles de riesgo puede conducir a soluciones con varios sectores:

Tabla 9 - 17 – Actividades y superficies, problema de sectorización inspirado en (Tate, Smith 1995).

Actividad	Área (m ²)	Actividad	Área (m ²)
1	640	11	540
2	800	12	740
3	760	13	880
4	840	14	820
5	620	15	560
6	580	16	680
7	720	17	840
8	720	18	640
9	700	19	560
10	780	20	580

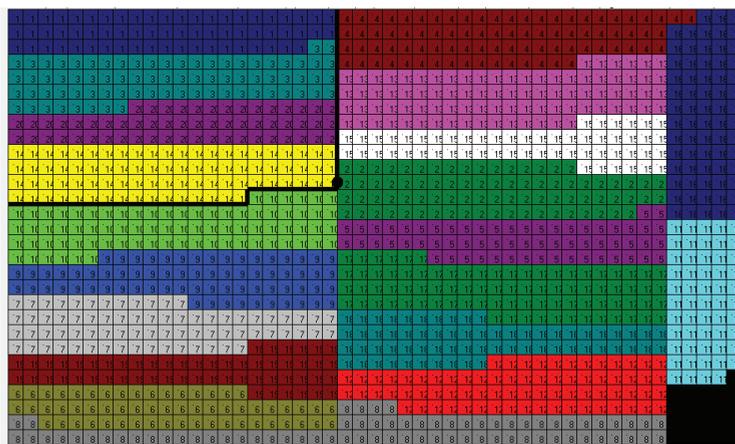
La tabla de flujos y la TRA se dejará igual que la que ya se expuso en puntos anteriores.

La tabla con los riesgos de incendio aparece a continuación:

Tabla 9 - 18 – Parámetros sectorización de incendios problema inspirado en (Tate, Smith 1995)

Nº Actividad	q _i (MJ/m ²)	C _i	R _a	Nº Actividad	q _i (MJ/m ²)	C _i	R _a
1	500	1	2	11	1200	1	1.5
2	50	1	1	12	90	1	1
3	1500	1	1	13	450	1.6	1
4	700	1	2	14	950	1	1
5	650	1	1	15	1300	1.3	2
6	50	1	1	16	500	1	1
7	50	1.6	1	17	300	1	1
8	20	1	1	18	250	1	1
9	350	1	1	19	250	1	2
10	45	1	1	20	1150	1.3	1

Se va a probar con 2 configuraciones distintas: en primer lugar se obtendrán resoluciones utilizando un tamaño de celda de 10 ud. de área, y posteriormente se utilizarán 20 ud. de área como tamaño de celda para mejorar el poder computacional en la obtención de soluciones y fronteras de Pareto. A continuación se muestran algunos de los mejores resultados obtenidos para 10 ud. de tamaño de celda. En primer lugar uno ponderado:



Método de resolución utilizado: Propio(2015) - Tiempo de resolución: 6828,4"

Nº individuos=50 - Nº iteraciones=800 - Evaporación= Variable - Alfa= Variable

Parámetros de espacio: Tamaño de celda=10 - Ancho de banda=Libre - 22

Coste óptimo = 81136-Cwij=461705-Crij=60-Cgeom=2-Csect=70

Sectorización planta: Número de sectores: 2

Número de sector: 1

Actividades: 1 - 3 - 20 - 14 - Área: 2800

Carga de fuego: 3106100 Nivel de riesgo: 4

Número de sector: 2

Actividades: 10 - 9 - 7 - 19 - 6 - 8 - 12 - 18 - 17 - 5 - 2 - 15 - 13 - 4 - 16 - 11 - Área: 11200

Carga de fuego: 4598700 Nivel de riesgo: 0

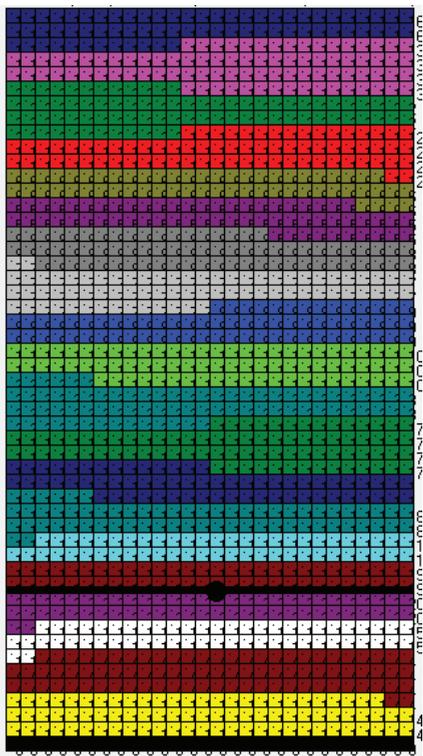
Número de cerramientos: 1

Número de cerramiento: 1

Número de tramos: 35

Figura 9 - 54 – Solución 1 problema incendios inspirado en (Tate, Smith 1995) celda 10 ud.

Se muestra una de las mejores soluciones respecto de la sectorización:



Método de resolución utilizado: Propio(2015) - Tiempo de resolución: 84260,7"

Nº individuos=50 - Nº iteraciones=800 - Evaporación= Variable - Alfa= Variable

Parámetros de espacio: Tamaño de celda=10 - Ancho de banda=Libre - 31

Coste óptimo = 101912-Cwij=684345-Crij=20-Cgeom=2-Csect=56

Sectorización planta: Número de sectores: 2

Número de sector: 1

Actividades: 16 - 13 - 2 - 12 - 6 - 5 - 8 - 7 - 9 - 10 - 3 - 17 - 1 - 18 - 11 - 19 - Área: 11200

Carga de fuego: 4524300 Nivel de riesgo: 0

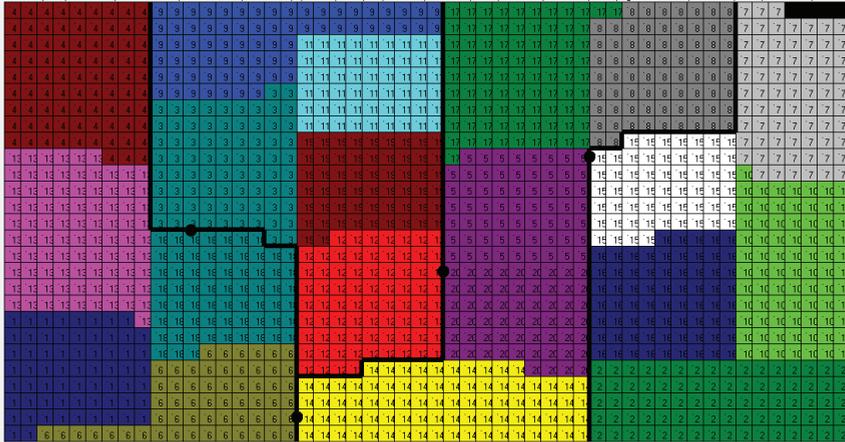
Número de sector: 2

Actividades: 20 - 15 - 4 - 14 - Área: 2800

Carga de fuego: 3180500 Nivel de riesgo: 4

Figura 9 - 55 – Solución 2 problema incendios inspirado en (Tate, Smith 1995) celda 10 ud.

Y otra respecto de la geometría:



Método de resolución utilizado: Propio(2015) - Tiempo de resolución: 3038"

Nº individuos=50 - Nº iteraciones=800 - Evaporación= Variable - Alfa= Variable

Parámetros de espacio: Tamaño de celda=10 - Ancho de banda=Libre - 9

Coste óptimo = 85526-Cwij=916086-Crij=32-Cgeom=1.13-Csect=2496

Sectorización planta: Número de sectores: 4

Número de sector: 1

Actividades: 4 - 13 - 1 - 6 - 18 - Área: 3580

Carga de fuego: 1730600 Nivel de riesgo: 2

Número de sector: 2

Actividades: 3 - 9 - 11 - 19 - 12 - Área: 3300

Carga de fuego: 2239600 Nivel de riesgo: 3

Número de sector: 3

Actividades: 14 - 20 - 5 - 17 - 8 - Área: 3580

Carga de fuego: 2315500 Nivel de riesgo: 1

Número de sector: 4

Actividades: 15 - 16 - 2 - 10 - 7 - Área: 3540

Carga de fuego: 1419100 Nivel de riesgo: 1

Figura 9 - 56 – Solución 3 problema incendios inspirado en (Tate, Smith 1995), celda 10 ud.

Y una de las mejores fronteras de Pareto obtenidas para W-R en este problema:

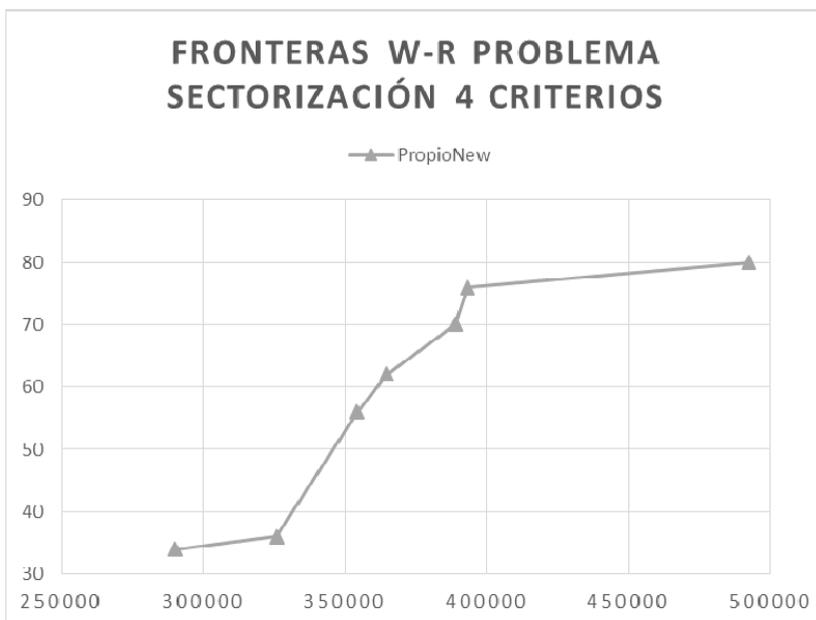
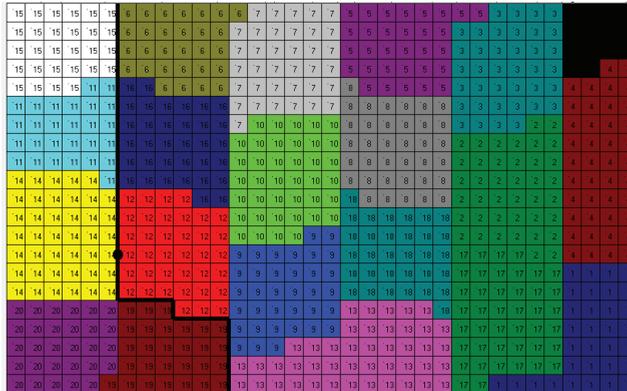


Figura 9 - 57 – Frontera W-R problema sectorización.

Se resuelve este mismo caso ampliando el tamaño de celda, pasando éste de 10 a 20, para aumentar así el poder de computación, no afectando apenas más que quizás a la calidad geométrica ligeramente, aunque el número de celdas que poseen las actividades hacen que ésta todavía sea versátil. Se muestran algunas de las soluciones obtenidas en el frente de Pareto para este caso con tamaño de celda 20 ud. de área:



Método de resolución utilizado: Propio(2015) - Tiempo de resolución: 1013,1"

Nº individuos=50 - Nº iteraciones=1000

Evaporación= Variable - Alfa= Variable

Parámetros de espacio:

Tamaño de celda=20 - Ancho de banda=Libre - 6

Coste óptimo = 130363-Cwij=517029-Crij=56-Cgeom=1.15-Csect=54

Sectorización planta: Número de sectores: 2

Número de sector: 1

Actividades: 15 - 11 - 14 - 20 - 19 - Área: 3060

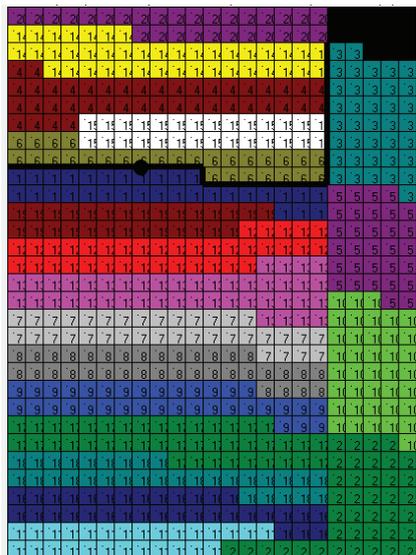
Carga de fuego: 3380500 Nivel de riesgo: 4

Número de sector: 2

Actividades: 12 - 16 - 6 - 7 - 10 - 9 - 13 - 18 - 8 - 5 - 3 - 2 - 17 - 1 - 4 - Área: 10940

Carga de fuego: 4324300 Nivel de riesgo: 0

Figura 9 - 58 – Solución 1 problema sectorización tamaño de celda 20 ud.



Método de resolución utilizado: Propio(2015)

Tiempo de resolución: 4807,4"

Nº individuos=50 - Nº iteraciones=1000

Evaporación= Variable - Alfa= Variable

Parámetros de espacio:

Tamaño de celda=20 - Ancho de banda=Libre - 18

Coste óptimo = 108937-Cwjj=371486-Crij=72-Cgeom=2-Csect=54

Sectorización planta: Número de sectores: 2

Número de sector: 1

Actividades: 20 - 14 - 4 - 15 - 6 - Área: 3380

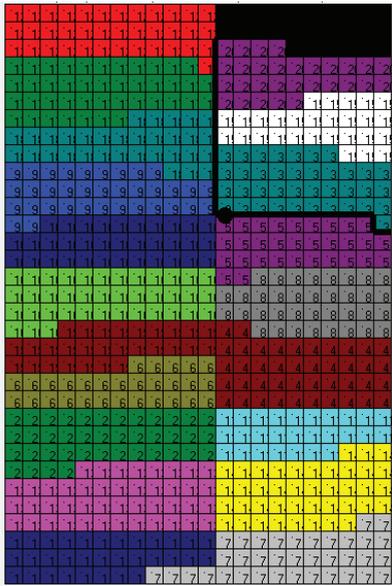
Carga de fuego: 3209500 Nivel de riesgo: 4

Número de sector: 2

Actividades: 1 - 19 - 12 - 13 - 7 - 8 - 9 - 17 - 18 - 16 - 11 - 2 - 10 - 5 - 3 - Área: 10620

Carga de fuego: 4495300 Nivel de riesgo: 0

Figura 9 - 59 – Solución 2 sectorización tamaño de celda 20 ud.



Método de resolución utilizado: Propio(2015)

Tiempo de resolución: 4893,9"

Nº individuos=50 - Nº iteraciones=1000

Evaporación= Variable - Alfa= Variable

Parámetros de espacio:

Tamaño de celda=20 -Ancho de banda=Libre - 12

Coste óptimo = 109852-Cw_{ij}=446912-Crij=46-Cgeom=1-Csect=42

Sectorización planta: Número de sectores: 2

Número de sector: 1

Actividades: 12 - 17 - 18 - 9 - 16 - 10 - 19 - 6 - 2 - 13 - 1 - 7 - 14 - 11 - 4 - 8 - 5 - Área: 12100

Carga de fuego: 4751300 Nivel de riesgo: 0

Número de sector: 2

Actividades: 3 - 15 - 20 - Área: 1900

Carga de fuego: 2953500 Nivel de riesgo: 4

Figura 9 - 60 – Solución 3 sectorización con tamaño de celda 20 ud.

A título ilustrativo, se ha calculado el mismo problema considerando la sectorización de incendios (con la distancia intersectorial como métrica de distancia) y sin considerar dicho objetivo. Se ha elaborado un gráfico mostrando los costes asociados al trasiego de materiales de las mejores resoluciones para ambos casos, que se expone a continuación:

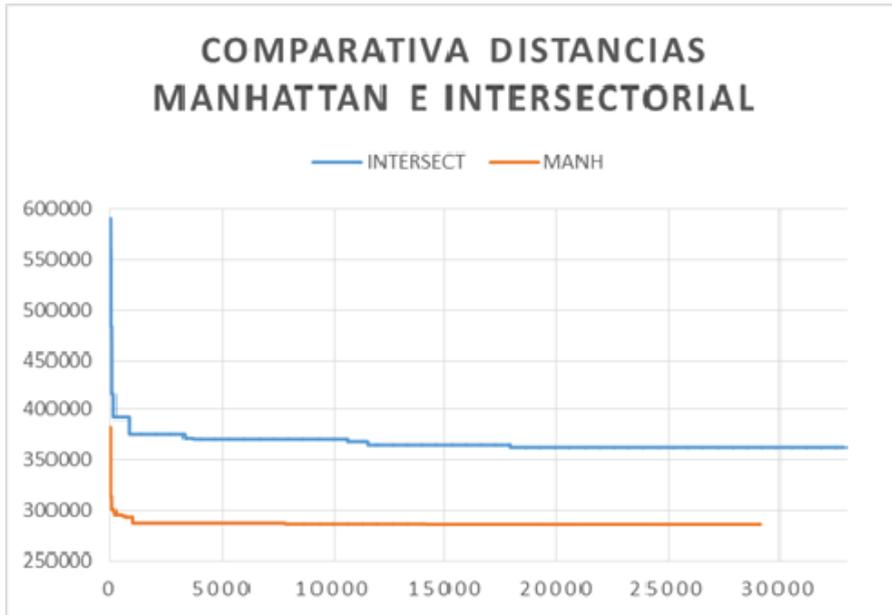


Figura 9 - 61 - Comparativa coste de flujos considerando sectores o sin ellos.

Puede observarse que en este problema, comparando las mejores soluciones obtenidas en el caso de considerar la sectorización y la distancia intersectorial asociada y en el caso convencional, el coste asociado al trasiego de materiales aumenta hasta casi el 30%. Cabe indicar que éste es un problema donde la dificultad de resolución radica especialmente en la cantidad de trasiegos de materiales existentes en el matriz de flujos, por lo que el incremento de costes es más acusado que en casos donde el flujo de materiales sea menos importante. No obstante, esta es una posibilidad que puede darse en numerosos casos reales que se analicen.

El coste de los sectores, en este caso, más que suponer un coste importante en fase de construcción, supone realmente una gran penalización en fase de explotación, pues supone un promedio de incremento del coste asociado al trasiego de materiales de aproximadamente entre un 20 y un 30 % en la mayoría de casos estudiados y ensayos realizados.

9.5.2. Problema definido al azar.

Se prueba el algoritmo ahora con un problema definido en fase de implementación, con el único objetivo de comprobar el correcto funcionamiento del algoritmo de sectorización implementado. Se definen los cuatro criterios, pero simplificando considerablemente tanto la matriz de flujos y la TRA respecto del problema anterior de (Tate, Smith 1995). Se han incluido algunas actividades al límite de las relaciones niveles de riesgo/superficies permitidas por la norma, de modo que siempre resultará un número de sectores mayor que uno.

Se adjunta el listado de actividades y superficies:

Tabla 9 - 19 – Superficies problema de 20 actividades diseñado para sectorización.

Actividad	Área (m ²)	Actividad	Área (m ²)
1	3500	11	10
2	1500	12	10
3	3000	13	10
4	40	14	10
5	2000	15	10
6	10	16	10
7	20	17	10
8	30	18	10
9	500	19	10
10	500	20	10

La tabla de flujos:

Tabla 9 - 20 – Matriz de flujos problema definido para sectorización.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1		1	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0
2	0		2	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0		3	0	0	0	3	0	0	0	24	0	9	0	0	0	0	12	0
4	0	0	0		4	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0		5	0	0	0	5	0	0	43	0	0	0	0	3	0	0
6	0	0	0	0	0		6	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0		7	0	0	0	7	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	9	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	10	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	11	0	0	0	13
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	12	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	13	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	8		0	0	0	0	14	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0	0	15
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0		0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Y la TRA, la siguiente:

Tabla 9 - 21 – TRA problema definido para sectorización.

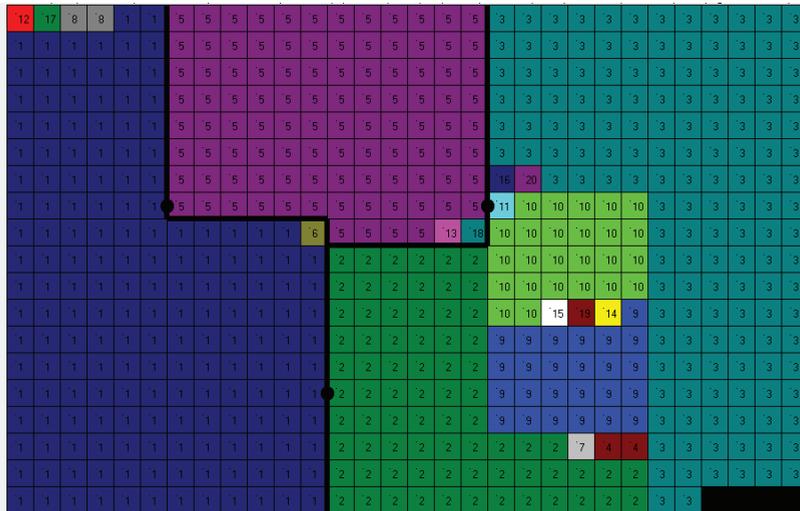
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
1		U	A	U	U	E	U	I	A	U	U	U	U	U	A	U	E	U	U	A	
2			U	A	U	U	E	U	U	U	U	U	U	U	U	U	E	A	U	U	
3				U	A	U	U	U	U	U	E	U	E	U	U	U	U	U	U	A	
4					U	A	U	U	U	U	E	U	U	U	U	E	U	U	U	A	
5						U	U	U	U	U	E	U	U	U	U	U	U	E	U	U	
6							U	U	U	U	U	U	U	E	U	U	U	U	U	U	
7								U	U	U	I	U	U	U	U	U	U	U	U	E	
8									U	U	U	U	U	U	U	U	A	U	U	U	
9										U	U	I	U	U	U	U	U	U	U	U	
10											U	U	U	U	U	U	U	O	U	U	
11												U	U	U	U	U	U	O	U	U	
12													U	U	A	A	U	U	U	U	
13														U	U	U	E	U	U	U	
14						S									U	U	U	A	U	U	
15																U	U	U	E	U	
16																	U	U	U	A	
17																		U	A	U	
18																			U	U	
19																				U	
20																					

La tabla con los riesgos de incendio aparece a continuación:

Tabla 9 - 22 – Parámetros de la sectorización, problema diseñado ‘ad hoc’.

Nº Actividad	q_i (MJ/m ²)	Ci	Ra	Nº Actividad	q_i (MJ/m ²)	Ci	Ra
1	800	1	1	11	29	1	1
2	456	1	1	12	58	1	1
3	50	1	1	13	150	1	1
4	345	1	1	14	34	1	1
5	1750	1	2	15	45	1	1
6	300	1	1	16	58	1	2
7	369	1	1	17	35	1	1
8	34	1	1	18	37	1	1
9	300	1	1	19	300	1	1
10	100	1	1	20	300	1	2

Y a continuación se muestran algunas de las soluciones obtenidas en la resolución. Hay que tener en consideración que en esta primera resolución se han calculado las distancias de forma ficticia, como si los sectores no existieran, es decir, que los flujos de materiales siguen la distancia Manhattan y que no es necesario pasar por las puertas del sector. La 2ª tanda de resoluciones se realizará utilizando la distancia intersectorial, y se verá cómo esto penaliza el coste de flujos y se tiende a tener las mejores soluciones con la mínima sectorización posible. Aunque pueda parecer poco realista el hecho de no considerar necesario pasar por la puerta de los sectores, esto puede ser bastante real en el caso de tener sistemas automáticos de transporte por cintas transportadoras o conveyors. Se expone como primera solución una con un bajo coste de flujo:



Método de resolución utilizado: Propio(2015) - Tiempo de resolución: 499,8"

Parámetros de optimización:

Nº individuos=50 - Nº iteraciones=200 - Evaporación= Variable - Alfa= Variable - Beta= Variable

Parámetros de espacio:

Tamaño de celda=20 - Ancho de banda=Libre - 6

Coste óptimo = 1531-Cwjj=12751-Crij=90-Cgeom=1-Csect=240

Sectorización planta:

Número de sectores: 3

Número de sector: 1

Actividades: 12 - 17 - 8 - 1 - 6 - Área: 3560

Carga de fuego: 2804950 Nivel de riesgo: 1

Número de sector: 2

Actividades: 5 - 13 - 18 - Área: 2020

Carga de fuego: 3501870 Nivel de riesgo: 5

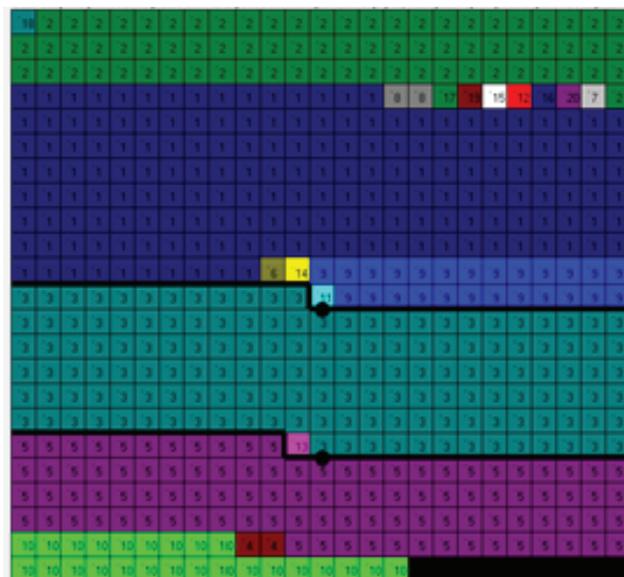
Número de sector: 3

Actividades: 2 - 7 - 4 - 9 - 14 - 19 - 15 - 10 - 11 - 16 - 20 - 3 - Área: 5620

Carga de fuego: 1063840 Nivel de riesgo: 0

Figura 9 - 62 – Solución 1 considerando sectorización (sin distancia intersectorial).

Aquí otra con un buen cumplimiento de la TRA:



Método de resolución utilizado: Propio(2015) - Tiempo de resolución: 502,6"

Nº individuos=50 - Nº iteraciones=200 - Evaporación= Variable - Alfa= Variable - Beta= Variable

Parámetros de espacio:

Tamaño de celda=20 Ancho de banda=Libre – 0

Coste óptimo = 1663-Cwjj=13937-Crij=152-Cgeom=1-Csect=312

Sectorización planta: Número de sectores: 3

Número de sector: 1

Actividades: 18 - 2 - 7 - 20 - 16 - 12 - 15 - 19 - 17 - 8 - 1 - 6 - 14 - 9 - 11 - Área: 5650

Carga de fuego: 3655360 Nivel de riesgo: 1

Número de sector: 2

Actividades: 3 - 13 - Área: 3010

Carga de fuego: 151500 Nivel de riesgo: 0

Número de sector: 3

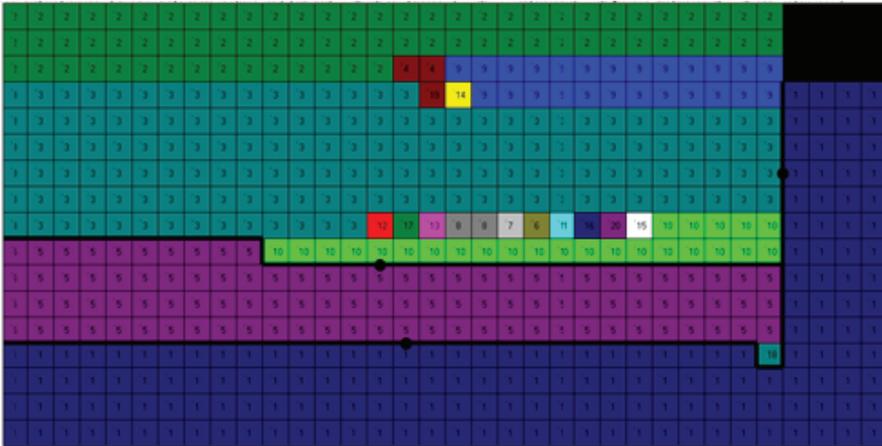
Actividades: 5 - 4 - 10 - Área: 2540

Carga de fuego: 3563800 Nivel de riesgo: 4

Número de cerramientos: 2

Figura 9 - 63 – Solución 2 considerando sectorización (sin distancia intersectorial).

Ahora una de las mejores soluciones en coste de flujos:



Método de resolución utilizado: Propio(2015) - Tiempo de resolución: 499,7"

Nº individuos=50 - Nº iteraciones=200

Evaporación= Variable - Alfa= Variable - Beta= Variable

Parámetros de espacio:

Tamaño de celda=20 - Ancho de banda=Libre - 30

Coste óptimo = 1583-Cwjj=5734-Crij=72-Cgeom=1-Csect=438

Sectorización planta: Número de sectores: 3

Número de sector: 1

Actividades: 2 - 4 - 9 - 14 - 19 - 3 - 12 - 17 - 13 - 8 - 7 - 6 - 11 - 16 - 20 - 15 - 10 - Área: 5690

Carga de fuego: 1070290 Nivel de riesgo: 0

Número de sector: 2

Actividades: 5 - 18 - Área: 2010

Carga de fuego: 3500370 Nivel de riesgo: 5

Número de sector: 3

Actividades: 1 - Área: 3500

Carga de fuego: 2800000 Nivel de riesgo: 1

Figura 9 - 64– Solución 3 considerando sectorización (sin distancia intersectorial).

Y las fronteras de Pareto obtenidas para el caso de 50 individuos y 200 iteraciones, se representan a continuación. Recuérdese que se trata del caso en el que no se considera la distancia intersectorial:

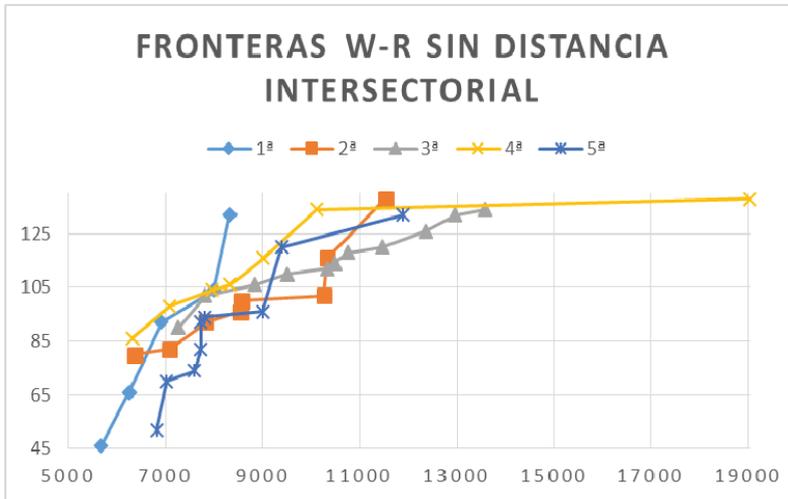


Figura 9 - 65 – Fronteras de Pareto W-R sin distancia intersectorial.

A continuación se realiza idéntica resolución utilizando como métrica de distancia la intersectorial, que hace pasar por las puertas de la ruta entre sectores los flujos de materiales cuando las actividades pertenecen a sectores distintos. Esto se hace con el siguiente cuadro de diálogo:

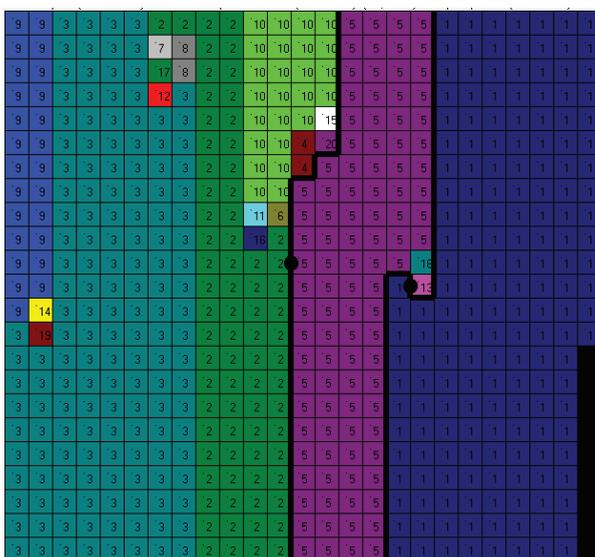
	Carga de fuego p y c (MJ/m2)	Superficies admisibles (Tipo C)
Bajo (1)	425	50000
Bajo (2)	650	6000
Medio (3)	1275	5000
Medio (4)	1700	4000
Medio (5)	3400	3500
Alto (6)	6900	3000
Alto (7)	13600	2500
Alto (8)	50000	2000

Calcular distancias como intersectoriales (pasando por las puertas)

Aceptar Cancelar

Figura 9 - 66 – Calcular con distancia intersectorial

Y a continuación se presentan algunas de las mejores soluciones obtenidas para el caso con distancia intersectorial. En primer lugar una de las que mejor flujo presentan:



Método de resolución utilizado: Propio(2015) - Tiempo de resolución: 493,9"

Nº individuos=50 - Nº iteraciones=200

Evaporación= Variable - Alfa= Variable - Beta= Variable

Parámetros de espacio:

Tamaño de celda=20 - Ancho de banda=Libre - 2

Coste óptimo = 1790-Cwjj=6645-Crij=28-Cgeom=1-Csect=312

Sectorización planta: Número de sectores: 3

Número de sector: 1

Actividades: 9 - 14 - 19 - 3 - 12 - 17 - 8 - 7 - 2 - 16 - 11 - 6 - 10 - 15 - 20 - 4 - Área: 5680

Carga de fuego: 1068790 Nivel de riesgo: 0

Número de sector: 2

Actividades: 5 - 18 - 13 - Área: 2020

Carga de fuego: 3501870

Nivel de riesgo: 5

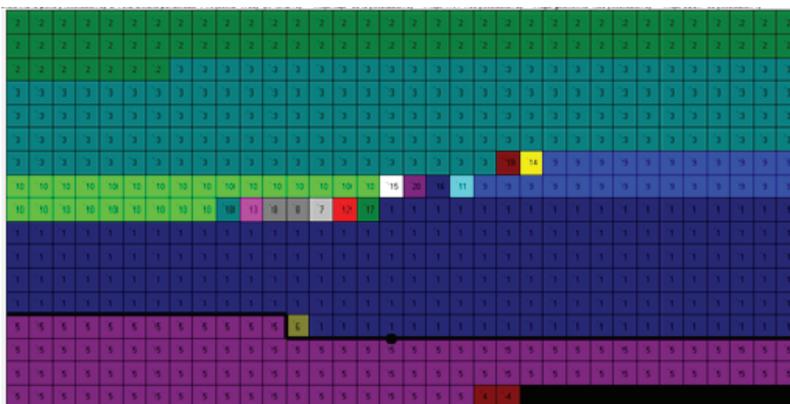
Número de sector: 3

Actividades: 1 - Área: 3500

Carga de fuego: 2800000 Nivel de riesgo: 1

Figura 9 - 67 – Solución 1 problema diseñado considerando distancia intersectorial.

Otra solución con un coste de flujo bajo:



Método de resolución utilizado: Propio(2015) - Tiempo de resolución: 514,1"

Nº individuos=50 - Nº iteraciones=200

Evaporación= Variable - Alfa= Variable - Beta= Variable

Parámetros de espacio:

Tamaño de celda=20 - Ancho de banda=Libre - 0

Coste óptimo = 1985-Cwjj=7707-Crij=68-Cgeom=1-Csect=70

Sectorización planta:

Número de sectores: 2

Número de sector: 1

Actividades: 2 - 3 - 19 - 14 - 9 - 11 - 16 - 20 - 15 - 10 - 18 - 13 - 8 - 7 - 12 - 17 - 1 - 6 - Área: 9160

Carga de fuego: 3856860 Nivel de riesgo: 0

Número de sector: 2

Actividades: 5 - 4 - Área: 2040

Carga de fuego: 3513800 Nivel de riesgo: 5

Figura 9 - 68 – Solución 2 problema diseñado considerando distancia intersectorial.

Fronteras de Pareto W-R considerando la distancia intersectorial:

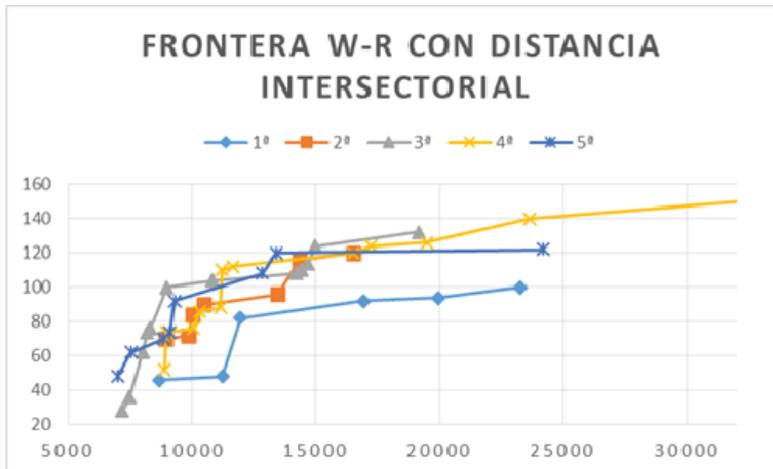


Figura 9 - 69 – Fronteras de Pareto W-R con distancia intersectorial.

Además, a título ilustrativo se representan las mejores fronteras de Pareto obtenidas sin considerar la distancia intersectorial, frente a las mejores conseguidas con distancia intersectorial. Como puede observarse, el coste asociado a flujos es mayor en el caso de considerar la distancia intersectorial, dominando claramente las soluciones que no consideran la distancia real a recorrer pasando por las puertas de los sectores:

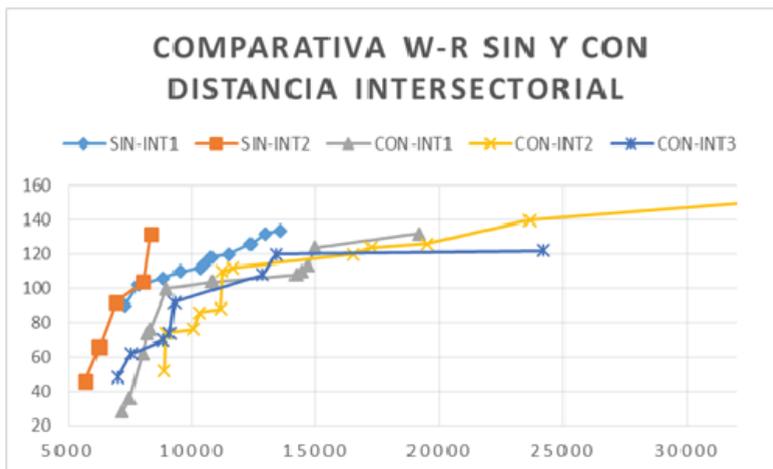


Figura 9 - 70 – Comparativa fronteras W-R con y sin distancia intersectorial.

Como puede observarse en el gráfico, de nuevo el coste de los sectores supone un coste importante en fase de explotación, pues supone un incremento del coste asociado al trasiego de materiales y por lo tanto a la explotación de la actividad industrial. Incluso en este caso donde se ha definido una matriz de flujos fácil de cumplir (con muy pocos elementos no nulos).

De nuevo se ha elaborado un gráfico comparando las distancias recorridas en las mejores soluciones considerando la distancia como intersectorial y considerando la distancia como Manhattan convencional sin tener en cuenta la sectorización:

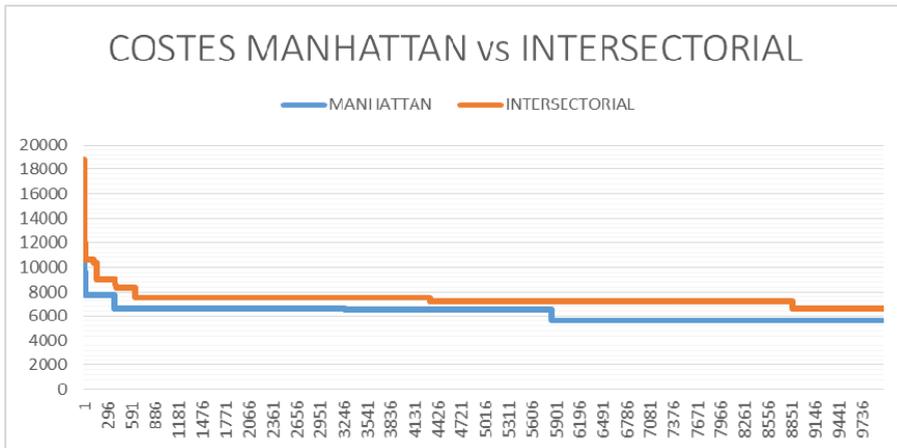


Figura 9 - 71 - Comparativa costes considerando distancia convencional o intersectorial.

Incluso en este caso en el que el trasiego de materiales es poco importante, el incremento del coste asociado al transporte interno de materiales en la planta es de aproximadamente el 15 % (comparando en ambos casos las mejores soluciones obtenidas en las distintas resoluciones realizadas en este plan experimental).

Por lo tanto, se ha obtenido como conclusión fundamental de los resultados obtenidos en los problemas de sectorización, que en los casos en los que los flujos sean poco importantes, el incremento asociado al coste de explotación debido a la implementación de la sectorización será de aproximadamente un 15%, pudiendo llegar éste hasta el 30% en aquellas situaciones en las que la intensidad relacional debida a flujos en la planta sea elevada. Estos valores son lo suficientemente importantes como para considerar que, prácticamente en todos los casos, el verdadero coste asociado a la sectorización no será tanto el que supone la instalación de los cerramientos, puertas y compartimentación REI que sea necesaria, sino el incremento de distancias derivado de la posición de las actividades en distintos sectores, hecho éste que hace fundamental la optimiza-

ción de estas ubicaciones en fase de diseño considerando como criterio real de ubicación la aplicación de la normativa de sectorización de incendios.

Por todo esto, es posible afirmar que en términos generales, es incorrecto realizar el diseño del modo tradicional, donde la distribución en planta se optimiza en un primer estadio sin considerar este criterio de sectorización, para posteriormente aplicar la normativa sobre una distribución concreta obtenida por métodos tradicionales de minimización de flujos y/o TRA, realizado posteriores reajustes sobre ella para cumplir la normativa de sectorización; como se ha visto, esto puede conducir a sobrecostos importantes en fase de explotación, al incrementarse notablemente las distancias a recorrer por los medios de manutención, por lo que en general la coincidencia de las soluciones obtenidas por esta vía con las que podrían obtenerse en una frontera de Pareto siguiendo una metodología como la propuesta serían mera coincidencia.

Capítulo 10

Conclusiones y desarrollos futuros.

10.1. Conclusiones

10.1.1. Conclusiones sobre la elaboración.

Como conclusiones generales sobre el desarrollo de esta Tesis Doctoral puede afirmarse que:

- Se ha implementado una aplicación informática con una interfaz gráfica amigable, lo que permite su utilización directa tanto profesional como académicamente por parte de los alumnos para su aplicación directa en casos reales a resolver para incluir en los Proyectos de Actividad (actualmente Licencia Ambiental o Actuación Ambiental Integrada), o en los trabajos académicos que se les demandan a los alumnos tanto en nuestras asignaturas como en las de Proyectos de Ingeniería.
- Se han implementado las más eficientes técnicas ACO, así como desarrollado nuevas variantes meméticas con éxito, logrando muy buenas aproximaciones, y en otros casos mejores resultados sobre ejemplos de referencia existentes en la bibliografía estudiada.
- Se han continuado la línea de investigación iniciada con los trabajos realizados por los compañeros del Departamento en (Santamarina 1995, Contero Gonzalez 1995, Gonzalez 2005, Montalvá Subirats et al. 2011).

10.1.2. Conclusiones sobre los resultados.

Como conclusiones generales sobre los resultados obtenidos en esta Tesis Doctoral puede afirmarse que:

- Las técnicas que se han implementado ofrecen ventajas sobre otras existentes, como pueden ser la velocidad de convergencia, lo cual redundaría en la bondad de los resultados con bajo tiempo de computación.
- El gobierno del algoritmo puede realizarse de forma sencilla, con apenas la definición de 3 parámetros que guían la búsqueda, frente a otras técnicas más complejas donde la curva de aprendizaje es más ardua.
- Se mejoran la mayoría de soluciones eficientes recopiladas en la bibliografía en problemas de referencia.
- Se aporta una nueva métrica de distancia, la distancia intersectorial, que es la que se recorre entre actividades que pertenecen a sectores de incendios distintos, cuya formulación se hizo en el capítulo 5.
- Se define un algoritmo de sectorización de incendios, así como una función objetivo que evalúa el coste asociado a la sectorización.
- Se permite evaluar el coste real de la implementación de la sectorización contra incendios, frente a la versión de la planta industrial "tradicional" sin sectorizar, al considerar la aplicación del trasiego real de materiales en las dos situaciones, con y sin sectorizar, y pudiendo de este modo, ofrecer una aproximación realista del coste que supone en funcionamiento, más allá del propio coste de ejecución de los cerramientos de compartimentación, al aumentar el trasiego de materiales y por tanto hacer menos eficiente el coste de transporte.

10.2. Desarrollos futuros.

Como aspectos en los que seguir trabajando y desarrollando esta línea de investigación, es posible distinguir varias líneas, con algunos asuntos que han quedado pendientes por

límites temporales, aunque ya podrían haber sido incluidos sin mayores obstáculos, y otros que han quedado como ideas futuras en las que seguir investigando:

10.2.1. En el ámbito del FLP.

- Podría añadirse más criterios de diseño, como la integración del ambiente industrial, además del ya implementado de la seguridad, como por ejemplo la altura del edificio, el coste de la edificación, los sistemas de iluminación natural, la ventilación natural, etc. como más criterios a valorar en la solución final.
- Pueden ofrecerse más alternativas al tratamiento del espacio, realizando una exportación CAD refinando el espacio discreto y transformándolo de forma ponderada en soluciones en el continuo más factibles y realistas para su aplicación al layout de detalle.

10.2.2. En el ámbito de las técnicas ACO.

- Pueden implementarse algoritmos de trabajo en paralelo, de forma similar a los que se exponen en el capítulo correspondiente en COMPETants, en los que cada PC trabaje con una colonia de hormigas distinta dedicada a un objetivo, y en cada iteración se integren los frentes de Pareto y se comuniquen las soluciones para cada criterio a fin de intentar explorar de forma más eficiente las fronteras de Pareto.
- También puede añadirse la posibilidad de implementar búsqueda local (“local search”) con un método como “2opt” o similar, a fin de hacer más eficiente el algoritmo y reducir el tiempo de computación.
- Siguiendo las últimas tendencias de las publicaciones en el ámbito ACO, fundamentalmente por parte de los autores (Bezerra et al. 2013, Eppe et al. 2011, Lopez-Ibanez 2010, Caceres et al. 2014, Caceres et al. 2015, Lopez-Ibanez, Stutzle 2010b, Bezerra et al. 2012, Khodja et al. 2014, Lopez-Ibanez et al. 2010, Twomey et al. 2010, Dubois-Lacoste et al. 2015, Mascia et al. 2014, Panigrahi et al. 2010, Stützle, SpringerLink 2009, Moritz et al. 2013, Adrian et al. 2015), podría diseñarse un módulo conteniendo un sencillo sistema experto que fuese almacenando información sobre los distintos problemas resueltos, y fuera decidiendo el ajuste de los parámetros de optimización que gobiernan en el algoritmo, de modo que un usuario desconocedor de la técnica pudiese hacer uso de la aplicación sin necesidad de tomar decisiones al respecto del número de individuos, iteraciones, evaporación, etc. siendo la aplicación la que decidiera éstos de forma automática.

10.2.3. En el ámbito de la toma de decisión multicriterio.

- Podrían implementarse otros métodos de decisión, combinándolos con los que ya están implementados, de modo que el usuario pudiera elegir la configuración del par técnica-criterio de selección a su voluntad, eligiendo entre un frente de Pareto con el que tener un grupo de soluciones eficientes, o una solución que sea la más eficiente respecto de algún criterio de selección, de entre los explicados en el capítulo correspondiente (suma ponderada, producto ponderado, métricas normalizada de Pareto, etc.).

10.2.4. En el ámbito de la protección contra incendios.

- Podrían incluirse más tipos de establecimientos en la aplicación, para considerar el caso de tener establecimientos industriales con medianeras comunes con otros establecimientos e incluso en plantas de edificios que comparten otros usos. Simplemente sería necesario implementar el árbol de decisión en el algoritmo e introducir las tablas con los límites de superficie y riesgos correspondientes.
- Se contemplarán más normativas de ámbito internacional, como por ejemplo las normas NFPA, intentando generalizar el uso de la aplicación para su uso internacional, a fin de no restringir el uso a la norma española y poder obtener rendimiento de la misma mediante publicaciones internacionales resolviendo casos reales con criterios normativos globales en revistas de impacto.
- En esta primera etapa se ha implementado únicamente la sectorización. Podría igualmente añadirse la comprobación de la evacuación, así como del diseño básico (a nivel dotacional y posicional) de las instalaciones, integrando su optimización con una función de coste análoga a la de los cerramientos para cada instalación.
- En este ámbito, otro aspecto a contemplar sería integrar el cálculo de la resistencia al fuego requerida de la estructura y sus sectores de incendio. El planteamiento inicialmente previsto contemplaría la comprobación de aquellas soluciones más eficientes (que podrían ser las presentes en el frente de Pareto, por ejemplo) mediante algún modelo de zonas de rápida aplicación, como pueda ser CFAST o similar a fin de evaluar parámetros tales como las temperaturas alcanzadas en cada sector de incendios o los niveles de humos.
- Puede mejorarse el algoritmo de sectorización implementado, permitiéndose la sectorización por usos (correspondientes a usos subsidiarios diferentes del prin-

cial industrial que contempla la normativa), como suele ser el caso de zonas de administración, zonas de exposición, venta al público, etc.

- En principio, al tratarse de un FLP bidimensional lo que se pretende resolver, se refiere al caso de tener sólo sectores de incendios (no se han considerado ni ascensores, ni escaleras, ni sectores de riesgo mínimo ni zonas exentas). En un futuro podrían contemplarse huecos de comunicación vertical con altillos y zonas de oficinas.

Capítulo 11

Bibliografía.

Diccionario Escolar De La Real Academia Española. . ISBN 84-239-9411-2.

Evaluación Del Riesgo De Incendio : Método De Cálculo. . Centro Nacional de Prevención de Daños y Pérdidas (España) ed., Madrid: Madrid : Cepreven, D.L. 1988.

Fluid Bulkhead for Rooms with Flow Level Apertures - Includes cut=off Plate Covering at Least Part of each Wall Apertures with Seal Parallel to Floor. .

RSCIEI : Reglamento De Seguridad Contra Incendios En Los Establecimientos Industriales : Y Guía Técnica De Aplicación (Octubre 2007) : Real Decreto 2267/2004, De 3 De Diciembre. . España Ministerio de Industria, Turismo y Comercio ed., Madrid: Madrid : Ibergarceta, cop. 2009.

Seguridad Contra Incendios En Los Establecimientos Industriales Recurso Electrónico-CD-ROM]. . Asociación Española de Normalización y Certificación ed., Madrid: Madrid : AENOR, 2008.

Sistemas De Control De Temperatura y Evacuación De Humos : Guía Práctica Para El Diseño, Instalación y Mantenimiento. Madrid: Madrid : Cepreven, D.L. 2014.

[Anonymous]. Does Fire Resisting Construction really Provide Effective Compartmentation?. *Health Estate Journal : Journal of the Institute of Hospital Engineering*, 1995-Mar, 1995, vol. 49, no. 2, pp. 11-11. ISSN 0957-7742.

ABDINNOUR-HELM, S.; and HADLEY, S. W. Tabu Search Based Heuristics for Multi-Floor Facility Layout. *International Journal of Production Research*, 2000, vol. 38, no. 2, pp. 365-383.

ABDINNOUR-HELM, S.; and HADLEY, S. W. An Iterative Layout Heuristic for Multifloor Facilities. *Decision Science Institute Proceedings*, 1995.

ADAM, E. E.; and EBERT, R. J. *Production and Operations Management, Concepts, Models and Behavior*. Prentice Hall college div., 1991.

ADENSO-DÍAZ, B., et al. *Optimización Heurística y Redes Neuronales En Dirección De Operaciones e Ingeniería*. Madrid: Paraninfo, 1996.

ADRIAN, Angelia Melani; UTAMIMA, Amaliaand WANG, Kung-Jeng. A Comparative Study of GA, PSO and ACO for Solving Construction Site Layout Optimization. *Ksce Journal of Civil Engineering*, MAR 2015, 2015, vol. 19, no. 3, pp. 520-527. ISSN 1226-7988.

AFENTAKIS, P. *A Model for Layout Design in FMS*. New York: Dep. of industrial engineering and operations research. University, Syracuse, 1985.

AFRAZEH, A.; KEIVANI, A.and NAJAFABADI FARAHANI, L. A New Model for Dynamic Multi Floor Facility Layout Problem. *Advanced Modeling and Optimization*, 2010, vol. 12, no. 2, pp. 249-256.

AFSHAR, M. H. Application of a Max-Min Ant System to Joint Layout and Size Optimization of Pipe Networks. *Engineering Optimization*, APR 2006, 2006, vol. 38, no. 3, pp. 299-317. ISSN 0305-215X.

AIELLO, G.; ENEA, M.and GALANTE, G. A Multi-Objective Approach to Facility Layout Problem by Genetic Search Algorithm and Electre Method. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2006, vol. 22, pp. 447-455.

ALAYA, Ines; SOLNON, Christineand GHEDIRA, Khaled. Ant Colony Optimization for Multi-Objective Optimization Problems. *19th Ieee International Conference on Tools with Artificial Intelligence, Vol 1, Proceedings*, 2007, 2007, pp. 450-457. ISSN 1082-3409; 978-0-7695-3015-4.

AN, Aijun, et al. *Foundations of Intelligent Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 9783540681236.

ANGULO IÑIGUEZ, Diego. *Historia Del Arte*. Madrid: Madrid : Imp. Raycar, D.L. 1984.

ANJOS, M. F.; and VANELLI, A. A New Mathematical-Programming Framework for Facility-Layout Design. *Inform Journal on Computing*, 2006, vol. 18, pp. 111-118.

ANJOS, M. F.; and VANELLI, A. An Attractor-Repeller Approach to Floorplanning. *Mathematical Methods of Operations Research*, 2002, vol. 56, pp. 3-27.

APPLE, J. M. *Plant Layout and Material Handling*. Krieger Pub Co, 1968. ISBN 0894645455.

APPLE, J. M.; and DEISENROTH, M. P. A Computerized Plant Layout Analysis and Evaluation Technique (PLANET). *A.I.I.E. Technical Papers, 23rd Conference*, 1972, pp. 121-127.

ARMOUR, G. C.; and BUFFA, E. A Heuristic Algorithm and Simulation Approach to the Relative Location of Facilities. *Management Science*, 1963, vol. 9, no. 2, pp. 194-308.

ARON, S., et al. *Self-Organizing Spatial Patterns in the Argentine Ant Iridomyrmex-Humilis (Mayr)*. . VANDERMEER, RK JAFFE, K CEDENO,A. ed., , 1990, 1990. ISBN 0-8133-7785-4.

ARTHUR, Cote; and PERCY, Bugbee. *Principles of Fire Protection*. , 1988.

BADIRU, A. B.; and ARIF, A. FLEXPART: Facility Layout EXPert System using Fuzzy Linguistic Relationship Codes. *IIE Transactions*, 1996, vol. 28, pp. 295-308.

BAILEY, Victor. *Fighting Fires: Creating the British Fire Service, 1800-1978.(Book Review)*. , , Vol.53(2), p.353(3), 2011. ISBN 0042-5222.

BALAKRISHNAN, J.; CHENG, C. H.and WONG, K. F. FACOPT: A User Friendly FACility Layout OPTimization System. *Computers & Operations Research*, SEP 2003, 2003, vol. 30, no. 11, pp. 1625-1641. ISSN 0305-0548.

BALAPRAKASH, Prasanna, et al. Incremental Local Search in Ant Colony Optimization: Why it Fails for the Quadratic Assignment Problem. *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, Proceedings*, 2006, 2006, vol. 4150, pp. 156-166. ISSN 0302-9743; 3-540-38482-0.

- BANDYOPADHYAY, S., et al. A Simulated Annealing-Based Multiobjective Optimization Algorithm (AMO-SA). *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2008, vol. 12, no. 3, pp. 269-283.
- BANERJEE, P., et al. A Modelling of Interactive Facilities Layout Designer Reasoning using Qualitative Patterns. *International Journal of Production Research*, 1992, vol. 30, no. 2, pp. 433-453.
- BARBOSA-PÓVOA, A. P.; MATEUS, R. and NOVAIS, A. Q. Optimal 3D Layout of Industrial Facilities. *International Journal of Production Research*, 2002, vol. 40, no. 7, pp. 1669-1698.
- BARBOSA-PÓVOA, A. P.; MATEUS, R. and NOVAIS, A. Q. Optimal 2D Layout Design of Industrial Facilities. *International Journal of Production Research*, 2001, vol. 39, no. 12, pp. 2567-2593.
- BARTHOLDI III, J. J.; and PLATZMAN, L. K. An $O(N \log N)$ Planar Travelling Salesman Heuristic Based on Spacefilling Curves. *Operations Research Letters*, 1982, vol. 1, no. 4, pp. 121-124.
- BAZARAA, M. S. Computerised Layout Design: A Branch and Bound Approach. *IIE Transactions*, 1975, vol. 7, no. 4, pp. 432-438.
- BEAUSOLEIL, R. P. "MOSS" Multiobjective Scatter Search Applied to Non-Linear Multiple Criteria Optimization. *European Journal of Operational Research*, 2006, vol. 169, no. 2, pp. 426-449.
- BECKERS, R., et al. Collective Decision-Making through Food Recruitment. *Insectes Sociaux*, 1990, 1990, vol. 37, no. 3, pp. 258-267. ISSN 0020-1812.
- BENSON, B.; and FOOTE, B. L. DoorFAST: A Constructive Procedure to Optimally Layout a Facility Including Aisles and Door Locations Based Don an Aisle Flow Distance Metric. *International Journal of Production Research*, 1997, vol. 35, no. 7, pp. 1825-1842.
- Bertalanffy. *Teoría General De Los Sistemas : Fundamentos, Desarrollo, Aplicaciones*. . ISBN 968-16-0627-2.
- BEZERRA, Leonardo C. T.; LOPEZ-IBANEZ, Manuel and STUTZLE, Thomas. An Analysis of Local Search for the Bi-Objective Bidimensional Knapsack Problem. *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization (Evocop 2013)*, 2013, 2013, vol. 7832, pp. 85-96. ISSN 0302-9743; 978-3-642-37198-1.
- BEZERRA, Leonardo C. T.; LOPEZ-IBANEZ, Manuel and STUTZLE, Thomas. Automatic Generation of Multi-Objective ACO Algorithms for the Bi-Objective Knapsack. *Swarm Intelligence (Ants 2012)*, 2012, 2012, vol. 7461, pp. 37-48. ISSN 0302-9743; 978-3-642-32650-9.
- BIRATTARI, Mauro; PELLEGRINI, Paola and DORIGO, Marco. On the Invariance of Ant Colony Optimization. *Ieee Transactions on Evolutionary Computation*, DEC 2007, 2007, vol. 11, no. 6, pp. 732-742. ISSN 1089-778X.
- BIRATTARI, Mauro; PELLEGRINI, Paola and DORIGO, Marco. On the Invariance of Ant System. *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, Proceedings*, 2006, 2006, vol. 4150, pp. 215-223. ISSN 0302-9743; 3-540-38482-0.
- BLOCK, T. E. On the Complexity of Facilities Layout Problems. *Management Science*, 1979, vol. 25, no. 3, pp. 280-285.
- BLUM, C.; and DORIGO, M. Search Bias in Ant Colony Optimization: On the Role of Competition-Balanced Systems. *Ieee Transactions on Evolutionary Computation*, APR 2005, 2005, vol. 9, no. 2, pp. 159-174. ISSN 1089-778X.
- BLUM, C.; and DORIGO, M. The Hyper-Cube Framework for Ant Colony Optimization. *Ieee Transactions on Systems Man and Cybernetics Part B-Cybernetics*, APR 2004, 2004, vol. 34, no. 2, pp. 1161-1172. ISSN 1083-4419.

BLUM, C.; and ROLI, A. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Design. *ACM Computing Surveys*, 2003, vol. 3, pp. 268-308.

BLUM, Christian, et al. *Hybrid Metaheuristics*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 9783540782957.

BLUM, Christian; BATTITI, Roberto and SpringerLink. *Learning and Intelligent Optimization*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 9783642138003.

BOSWELL, S. G. TESSA-A New Greedy Heuristic for Facilities Layout Planning. *International Journal of Production Research*, 1992, vol. 30, no. 8, pp. 1957-1968.

BOZER, Y. A.; and MELLER, R. D. A Reexamination of the Distance Based Facility Layout Problem. *IIE Transactions*, 1997, vol. 29, pp. 549-560.

BOZER, Y. A.; MELLER, R. D. and ERLEBACHER, S. J. An Improvement-Type Layout Algorithm for Single and Multiple-Floor Facilities. *Management Science*, 1994, vol. 40, no. 7, pp. 918-932.

BRANKE, J.; and GUNTSCHE, M. New Ideas for Applying Ant Colony Optimization to the Probabilistic TSP. *Applications of Evolutionary Computing*, 2003, 2003, vol. 2611, pp. 165-175. ISSN 0302-9743; 3-540-00976-0.

BUFFA, E. S. Sequence Analysis for Functional Layouts. *The Journal of Industrial Engineering*, 1955, vol. VI, no. 2, pp. 12-25.

BULLNHEIMER, Bernd; HARTL, Richard F. and STRAUß, Christine. *A New Rank Based Version of the Ant System. A Computational Study*. SFB Adaptive Information Systems and Modelling in Economics and Management Science, WU Vienna University of Economics and Business, 1997.

BULLNHEIMER, B.; HARTL, R. F. and STRAUSS, C. An Improved Ant System Algorithm for the Vehicle Routing Problem. *Annals of Operations Research*, 1999, 1999, vol. 89, pp. 319-328. ISSN 0254-5330.

CACERES, Leslie Perez; LOPEZ-IBANEZ, Manuel and STUETZLE, Thomas. Ant Colony Optimization on a Limited Budget of Evaluations. *Swarm Intelligence*, SEP 2015, 2015, vol. 9, no. 2-3, pp. 103-124. ISSN 1935-3812.

CACERES, Leslie Perez; LOPEZ-IBANEZ, Manuel and STUTZLE, Thomas. Ant Colony Optimization on a Budget of 1000. *Swarm Intelligence, Ants 2014*, 2014, 2014, vol. 8667, pp. 50-61. ISSN 0302-9743; 978-3-319-09952-1; 978-3-319-09951-4.

CAI, Zhihua, et al. *Computational Intelligence and Intelligent Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 9783642049620.

CAMBRON, K. E.; and EVANS, G. W. Layout Design using the Analytic Hierarchy Process. *Computers & Industrial Engineering*, 1991, vol. 20, no. 2, pp. 211-229.

CAMERON, D. C. Travel Charts. *Modern Material Handling*, 1952, pp. 37-40.

CAMPO, Alexandre, et al. Artificial Pheromone for Path Selection by a Foraging Swarm of Robots. *Biological Cybernetics*, NOV 2010, 2010, vol. 103, no. 5, pp. 339-352. ISSN 0340-1200.

Cano Hurtado. *La Planta Industrial y El Sistema Productivo*.

CAPOTE, J. , 2009. *La Seguridad Contra Incendios En La Concepción y El Diseño De Los Edificios Civiles e Industriales. Introducción*.

CARRIE, A. S., et al. Graph Theory and Computer Aided Facilities Design. *Omega*, 1978, vol. 6, no. 8, pp. 353-361.

- CHANG, C.; LIN, J. and LIN, H. Multiple-Floor Facility Layout Design with Aisle Construction. *Iems*, 2006, vol. 5, no. 1, pp. 1-10.
- CHARNES, A.; and COOPER, W. W. *Management Models and Industrial Applications of Linear Programming Vol.1*. New York: John Wiley and Sons, 1961.
- CHATERJEE, A., et al. *Manufacturing Flexibility: Models and Measurements*. Ann Arbor ed. , 1984.
- CHEN, C. W.; and SHA, D. Y. Heuristic Approach for Solving the Multi-Objective Facility Layout Problem. *International Journal of Production Research*, 2005, vol. 21, no. 1, pp. 4493-4507.
- CHEN, C. W.; and SHA, D. Y. A Design Approach to the Multi-Objective Facility Layout Problem. *International Journal of Production Research*, 1999, vol. 37, no. 5, pp. 1175-1196.
- CHEN, Chun-Lung; TZENG, Yeu-Ruey and CHEN, Chuen-Lung. A New Heuristic Based on Local Best Solution for Permutation Flow Shop Scheduling. *Applied Soft Computing*, APR 2015, 2015, vol. 29, pp. 75-81. ISSN 1568-4946.
- CHEN, Y. K.; LIN, S. W. and CHOU, S. Y. An Efficient Two-Stage Approach for Generating Block Layouts. *Computers and Operations Research*, 2002, vol. 29, pp. 489-504.
- COELHO, G. P.; and VON ZUBEN, F. *Omni-aiNet: An Immune-Inspired Approach for Omni Optimization*. . CARNEIRO, Hughes Bersini and Jorge ed., Oeiras, Portugal ed. , 2006.
- COELLO COELLO, C. A. Evolutionary Multi-Objective Optimization: Some Current Research Trends and Topics that Remain to be Explored. *Frontiers of Computer Science in China*, 2009, vol. 3, no. 1, pp. 18-30.
- COELLO COELLO, C. A. Evolutionary Multiobjective Optimization: A Historical View of the Field. *IEEE Computational Intelligence Magazine*, 2006, vol. 1, no. 1, pp. 28-36.
- COELLO COELLO, C. A. A Comprehensive Survey of Evolutionary-Based Multiobjective Optimization Techniques. *Knowledge and Information Systems*, 1999, vol. 1, pp. 269-308.
- COELLO COELLO, C. A. *Optimización Evolutiva Con Objetivos Múltiples: Estado Del Arte y Tendencias Futuras*. . CANTÚ ORTIZ, Francisco; and DE ALBORNOZ BUENO, Alvaro eds., México D.F. ed. Centro de Investigación en Computación, 1998.
- COELLO COELLO, C. A.; and CRUZ CORTÉS, N. Solving Multiobjective Optimization Problems using an Artificial Immune System. *Genetic Programming and Evolvable Machine*, 2005, vol. 6, no. 2, pp. 163-290.
- COELLO COELLO, C. A.; and TOSCANO, G. *A Micro-Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization*. . Eckart Zitzler, Kalyanmoy Deb, Lothar Thiele, Carlos A. Coello Coello and David Corne ed., Springer-Verlag, 2001.
- COELLO, Carlos A. C., et al. *Swarm Intelligence for Multi-Objective Problems in Data Mining*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 9783642036255.
- COLORNI, A.; DORIGO, M. and MANIEZZO, V. Proceedings of the First European Conference on Artificial Life. P. BOURGINE, F. Varela and ed., Elsevier Publishing, 1992. *Distributed Optimization by Ant Colonies*, pp. 509-520.
- CONTERO GONZALEZ, M. *Aportación a La Optimización Del Diseño Geométrico De Plantas Industriales. Distribución En Planta*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 1995.
- CORDÓN GARCÍA, Oscar; and Herrera Triguero. A Review on the Ant Colony Optimization Metaheuristic: Basis, Models and New Trends. *Mathware & Soft Computing*, 175, vol. 9, no. 3, pp. 141-175. ISSN 1134-5632.

CORNE, D. W.; JERRAM, N. R. and KNOWLES, J. D. *PESA-II: Region-Based Selection in Evolutionary Multiobjective Optimization*. San Francisco, California ed. Morgan Kaufmann Publishers, 2001.

CORNE, D. W.; KNOWLES, J. D. and OATES, M. J. *The Pareto Envelope-Based Selection Algorithm for Multiobjective Optimization*. Springer, 2000.

COTTA, Carlos; COWLING, Peter and SpringerLink. *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 9783642010095.

CZYZAK, P.; and JASZKIEWICZ, A. Pareto Simulated Annealing-a Metaheuristic Technique for Multiple-Objective Combinatorial Optimization. *Journal of Multi-Criteria Decision Analysis*, 1998, vol. 7, pp. 34-47.

CZYZAK, P.; and JASZKIEWICZ, A. *The Multiobjective Metaheuristic Approach for Optimization of Complex Manufacturing Systems*. GAL, G. Fandel and T. ed., Hagen, Germany ed. Springer-Verlag, 1997.

CZYZAK, P.; and JASZKIEWICZ, A. *Pareto Simulated Annealing*. GAL, G. Fandel and T. ed., Hagen, Germany ed. Springer-Verlag, 1997.

CZYZAK, P.; and JASZKIEWICZ, A. A Multiobjective Metaheuristic Approach to the Localization of a Chain of Petrol Stations by the Capital Budgeting Model. *Control and Cybernetics*, 1996, vol. 25, no. 1, pp. 177-187.

DAS, S. K. A Facility Layout Method for Flexible Manufacturing Systems. *International Journal of Production Research*, 1993, vol. 31, no. 2, pp. 279-297.

DATE, Ketan; MAKKED, Suryaanshand NAGI, Rakesh. Dominance Rules for the Optimal Placement of a Finite-Size Facility in an Existing Layout. *Computers & Operations Research*, NOV 2014, 2014, vol. 51, pp. 182-189. ISSN 0305-0548.

DAWKINS, R. *El Gen Egoista: Las Bases Biológicas De Nuestra Conducta*. Barcelona: Salvat, 1986.

DEB, K., et al. *A Fast Elitist Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm for Multi-Objective Optimization: NSGA-II*. Kanpur, India: , 2000.

DEB, S. K.; and BHATTACHARYYA, B. Facilities Layout Planning Based on Fuzzy Multiple Criteria Decision-Making Methodology. *International Journal of Production Research*, 2003, vol. 18, no. 4487-4504, pp. 41.

DENEUBOURG, J. L., et al. The Self-Organizing Exploratory Pattern of the Argentine Ant. *Journal of Insect Behavior*, MAR 1990, 1990, vol. 3, no. 2, pp. 159-168. ISSN 0892-7553.

DIEGO-MÁS, J. A. *Optimización De La Distribución En Planta De Instalaciones Industriales Mediante Algoritmos Genéticos. Aportación Al Control De La Geometría De Las Actividades*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 2006.

DIEGO-MAS, J. A., et al. Solving Facility Layout Problems with Strict Geometric Constraints using a Two-Phase Genetic Algorithm. *International Journal of Production Research*, 2009, vol. 47, no. 6, pp. 1679-1693.

DOERNER, K., et al. Pareto Ant Colony Optimization: A Metaheuristic Approach to Multiobjective Portfolio Selection. *Annals of Operations Research*, OCT 2004, 2004, vol. 131, no. 1-4, pp. 79-99. ISSN 0254-5330.

DOERNER, K., et al. Investment Decisions with Multiple Objectives and Artificial Ants. *Operations Research Proceedings 2001, 2002, 2002*, pp. 355-362. ISSN 0721-5924; 3-540-43344-9.

DOERNER, K. F., et al. Pareto Ant Colony Optimization with ILP Preprocessing in Multiobjective Project Portfolio Selection. *European Journal of Operational Research*, JUN 16 2006, 2006, vol. 171, no. 3, pp. 830-841. ISSN 0377-2217.

- DONAGHEY, C. E.; and PIRE, V. F. *Solving the Facility Layout Problem with BLOCPLAN*. Houston, TX: , 1990.
- DONG, Qing; YOU, Feiand HU, Shi-qiang. Investigation of Fire Protection Status for Nanjing Representative Historical Buildings and Future Management Measures. *2013 International Conference on Performance-Based Fire and Fire Protection Engineering (Icuffpe 2013)*, 2014, 2014, vol. 71, pp. 377-384. ISSN 1877-7058; *****.
- DORIGO, M. *Ottimizzazione, Apprendimento Automatico, Ed Algoritmi Basati Su Metafora Naturale*. Tesis doctoral. Politecnico di Milano., 1992.
- DORIGO, M.; and BLUM, C. Ant Colony Optimization Theory: A Survey. *Theoretical Computer Science*, NOV 17 2005, 2005, vol. 344, no. 2-3, pp. 243-278. ISSN 0304-3975.
- DORIGO, M.; BONABEAU, E.and THERAULAZ, G. Ant Algorithms and Stigmergy. *Future Generation Computer Systems-the International Journal of Grid Computing and Escience*, JUN 2000, 2000, vol. 16, no. 8, pp. 851-871. ISSN 0167-739X.
- DORIGO, M.; DI CARO, G.and GAMBARDELLA, L. M. Ant Algorithms for Discrete Optimization. *Artificial Life*, 1999, 1999, vol. 5, no. 2, pp. 137-172. ISSN 1064-5462.
- DORIGO, M.; DI CARO, G.and STUTZLE, T. Ant Algorithms. *Future Generation Computer Systems*, JUN 2000, 2000, vol. 16, no. 8, pp. V-VII. ISSN 0167-739X.
- DORIGO, M.; and GAMBARDELLA, L. M. Ant Colonies for the Travelling Salesman Problem. *Biosystems*, 1997, 1997, vol. 43, no. 2, pp. 73-81. ISSN 0303-2647.
- DORIGO, M., et al. Special Section on Ant Colony Optimization. *Ieee Transactions on Evolutionary Computation*, AUG 2002, 2002, vol. 6, no. 4, pp. 317-320. ISSN 1089-778X.
- DORIGO, M.; MANIEZZO, V.and COLORNI, A. Ant System: Optimization by a Colony of Cooperating Agents. *Ieee Transactions on Systems Man and Cybernetics Part B-Cybernetics*, FEB 1996, 1996, vol. 26, no. 1, pp. 29-41. ISSN 1083-4419.
- DORIGO, M.; and STUTZLE, T. The Ant Colony Optimization Metaheuristic: Algorithms, Applications, and Advances. *Handbook of Metaheuristics*, 2003, 2003, vol. 57, pp. 251-285. ISSN 0884-8289.
- DORIGO, Marco. Ant Algorithms Solve Difficult Optimization Problems. *Advances in Artificial Life*, 2001, 2001, vol. 2159, pp. 11-22. ISSN 0302-9743; 978-3-540-42567-0.
- DORIGO, Marco, et al. *Swarm Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg : Imprint: Springer, 2012. ISBN 9783642326509.
- DORIGO, Marco, et al. ANTS 2012 Special Issue. *Swarm Intelligence*, SEP 2013, 2013, vol. 7, no. 2-3, pp. 79-81. ISSN 1935-3812.
- DORIGO, Marco, et al. *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 9783540875277.
- DORIGO, Marco, et al. *Swarm Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 9783642154614.
- DORIGO, Marco, et al. ANTS 2010 Special Issue. *Swarm Intelligence*, DEC 2011, 2011, vol. 5, no. 3-4, pp. 143-147. ISSN 1935-3812.
- DORIGO, Marco; BIRATTARI, Mauroand STUETZLE, Thomas. Ant Colony Optimization - Artificial Ants as a Computational Intelligence Technique. *Ieee Computational Intelligence Magazine*, NOV 2006, 2006, vol. 1, no. 4, pp. 28-39. ISSN 1556-603X.

DORIGO, Marco; and STÜTZLE, Thomas. *Ant Colony Optimization*. Cambridge: MIT Press, 2004. ISBN 0262042193.

DOWLATSHAHI, S. A Modelling Approach to Design of Integrated Facilities. *International Journal of Production Research*, 1994, vol. 32, no. 6, pp. 1313-1330.

DOWSLAND, K. A.; and ADENSO DIAZ, B. Heuristic Design and Fundamentals of the Simulated Annealing. *Inteligencia Artificial, Revista Iberoamericana De Inteligencia Artificial*, 2003, no. 19, pp. 93-102.

DREZNER, Z. DISCON: A New Method for the Layout Problem. *Operations Research*, 1980, vol. 28, no. 6, pp. 1375-1394.

DREZNER, Z.; and BARAK, A. An Asynchronous Algorithm for Scattering Information between the Active Nodes of a Multicomputer System. *Journal of Parallel and Distributed Computing*, SEP 1986, 1986, vol. 3, no. 3, pp. 344-351. ISSN 0743-7315.

DRIRA, A.; PIERREVAL, H. and HAJRI-GABOUJ, S. Facility Layout Problems: A Survey. *Annual Reviews in Control*, 2007, vol. 31, pp. 255-267.

DRURY, J. Concept Selection - Fire Compartmentation .5. Technical-Study-18. *Architects Journal*, 1978, 1978, vol. 168, no. 48, pp. 1061-1061. ISSN 0003-8466.

DUARTE, N. M., et al. *Accelerating Multi-Objective Control System Design using a Neuro-Genetic Approach*. Piscataway, New Jersey ed. IEEE Service Center, 2000.

DUBOIS-LACOSTE, Jeremie; LOPEZ-IBANEZ, Manuel and STUTZLE, Thomas. Anytime Pareto Local Search. *European Journal of Operational Research*, JUN 1 2015, 2015, vol. 243, no. 2, pp. 369-385. ISSN 0377-2217.

DUBOIS-LACOSTE, Jeremie; LOPEZ-IBANEZ, Manuel and STUTZLE, Thomas. A Hybrid TP Plus PLS Algorithm for Bi-Objective Flow-Shop Scheduling Problems. *Computers & Operations Research*, AUG 2011, 2011, vol. 38, no. 8, pp. 1219-1236. ISSN 0305-0548.

DUCHEYNE, E. I.; DE WULF, R. and DE BAETS, B. Bi-Objective Genetic Algorithm for Forest Management: A Comparative Study. *Proceedings of the 2001 Genetic and Evolutionary Computation Conference. Late-Breaking Papers*, 2001, pp. 63-66.

DUTTA, K. N.; and SAHU, S. Comments on "A Note on Multigoal Heuristic for Facilities Design Problems: MUGHAL". *International Journal of Production Research*, 1983, vol. 21, no. 3, pp. 441-42.

DUTTA, K. N.; and SAHU, S. A Multigoal Heuristic for Facilities Design Problems: MUGHAL. *International Journal of Production Research*, 1982, vol. 20, no. 2, pp. 147-154.

DWEIRI, F.; and MEIER, FA. Application of Fuzzy Decision Making in Facilities Layout Planning. *International Journal of Production Research*, 1996, no. 34, pp. 3207-3226.

EHRGOTT, Matthias, et al. *Evolutionary Multi-Criterion Optimization*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 9783642010200.

ENGRAND, P. *A Multi-Objective Optimization Approach Based on Simulated Annealing and its Application to Nuclear Fuel Management*. Nice, France ed. American Society of Mechanical Engineering, 1997.

EPPE, Stefan, et al. An Experimental Study of Preference Model Integration into Multi-Objective Optimization Heuristics. *2011 IEEE Congress on Evolutionary Computation (Cec)*, 2011, 2011, pp. 2751-2758. ISSN 978-1-4244-7835-4.

- ERICKSON, M.; MAYER, A. and HORN, J. Multi-Objective Optimal Design of Groundwater Remediation Systems: Application of the Niche Pareto Genetic Algorithm (NPGA). *Advances in Water Resources*, 2002, vol. 25, no. 1, pp. 51-65.
- European study into the Fire Risk to European Cultural Heritage. *WG6 Fire Risk Assessment Methods Draft Final Report*, 2003.
- EVANS, G. W.; WILHELM, M. R. and KARWOWSKI, W. A Layout Design Heuristic Employing the Theory of Fuzzy-Sets. *International Journal of Production Research*, OCT 1987, 1987, vol. 25, no. 10, pp. 1431-1450. ISSN 0020-7543.
- FATHIAN, Mohammad; SHIRAN, Gholam Reza and JAFARIAN-MOGHADDAM, Ahmad Reza. Two New Clustering Algorithms for Vehicular Ad-Hoc Network Based on Ant Colony System. *Wireless Personal Communications*, JUL 2015, 2015, vol. 83, no. 1, pp. 473-491. ISSN 0929-6212.
- FONSECA, C. M.; and FLEMING, P. J. An Overview of Evolutionary Algorithms in Multiobjective Optimization. *Evolutionary Computation*, 1995, vol. 3, no. 1, pp. 1-16.
- FONSECA, C. M.; and FLEMING, P. J. Genetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Formulation, Discussion and Generalization. *Proceedings of Fifth International Conference on Genetic Algorithms*, 1993, pp. 416-423.
- FORESTI, Sara, et al. *Computer Security – ESORICS 2012*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg : Imprint: Springer, 2012. ISBN 9783642331671.
- FORTENBERRY, J. C.; and COX, J. F. Multiple Criteria Approach to the Facilities Layout Problem. *International Journal of Production Research*, 1985, vol. 23, no. 4, pp. 773-782.
- FOULDS, L. R.; and ROBINSON, D. F. Graph Theoretic Heuristic for the Plant Layout Problem. *International Journal of Production Research*, 1978, vol. 16, no. 1, pp. 27-37.
- FOULDS, L. R.; and ROBINSON, D. F. A Strategy for Solving the Plant Layout Problem. *Operational Research Quarterly*, 1976, vol. 27, no. 4, pp. 845-855.
- FRANCIS, R. L.; and WHITE, J. A. *Facility Layout and Location, an Analytical Approach*. Prentice-Hall, 1974. ISBN 0132991497.
- FRESCHI, F.; and COELLO COELLO, C. A. *Handbook of Research on Artificial Immune Systems and Natural Computing: Applying Complex Adaptive Technologies*. Hershey, New York: Medical Information Science Reference, 2009. *Multiobjective Optimization and Artificial Immune Systems: A Review*, pp. 1-21.
- Fundación MAPFRE. **Seguridad y Medio Ambiente**. MAPFRE, 1997.
- GAMBARDELLA, L. M.; and DORIGO, M. An Ant Colony System Hybridized with a New Local Search for the Sequential Ordering Problem. *Inform Journal on Computing*, SUM 2000, 2000, vol. 12, no. 3, pp. 237-255. ISSN 1091-9856.
- GAMBARDELLA, L. M.; and DORIGO, M. *Solving Symmetric and Asymmetric TSPs by Ant Colonies*. , 1996, 1996. ISBN 0-7803-2903-1.
- GAMBARDELLA, L. M.; TAILLARD, E. D. and DORIGO, M. Ant Colonies for the Quadratic Assignment Problem. *Journal of the Operational Research Society*, FEB 1999, 1999, vol. 50, no. 2, pp. 167-176. ISSN 0160-5682.
- GARCIA HERNANDEZ, Laura; SALAS MORERA, Lorenzo and ARAUZO AZOFRA, Antonio. An Interactive Genetic Algorithm for the Unequal Area Facility Layout Problem. *Soft Computing Models in Industrial and Environmental Applications, 6th International Conference Soco 2011*, 2011, 2011, vol. 87, pp. 253-262. ISSN 1867-5662; 978-3-642-19643-0.

GARCIA-HERNANDEZ, L., et al. Handling Qualitative Aspects in Unequal Area Facility Layout Problem: An Interactive Genetic Algorithm. *Applied Soft Computing*, APR 2013, 2013, vol. 13, no. 4, pp. 1718-1727. ISSN 1568-4946.

GARCIA-HERNANDEZ, Laura; SALAS-MORERA, Lorenzo and ARAUZO-AZOFRA, Antonio. An Interactive Genetic Algorithm Applied to the Design of Recycling Plants. *2012 World Automation Congress (Wac)*, 2012, 2012. ISSN 978-1-4673-4497-5.

GARCIA-MARTINEZ, C.; CORDON, O. and HERRERA, F. A Taxonomy and an Empirical Analysis of Multiple Objective Ant Colony Optimization Algorithms for the Bi-Criteria TSP. *European Journal of Operational Research*, JUL 1 2007, 2007, vol. 180, no. 1, pp. 116-148. ISSN 0377-2217.

GARCIA-MARTINEZ, C.; CORDON, O. and HERRERA, F. An Empirical Analysis of Multiple Objective Ant Colony Optimization Algorithms for the Bi-Criteria TSP. *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, Proceedings*, 2004, 2004, vol. 3172, pp. 61-72. ISSN 0302-9743; 3-540-22672-9.

GARCIA-MARTINEZ, C.; CORDÓN, O. and HERRERA, F. *A Taxonomy and a Empirical Analysis of Multiple Objective Ant Colony Optimization Algorithms for the Bi-Criteria TSP*. Granada, Spain: , 2004.

GARCIA-MARTINEZ, Carlos; and LOZANO, Manuel. Evaluating a Local Genetic Algorithm as Context-Independent Local Search Operator for Metaheuristics. *Soft Computing*, AUG 2010, 2010, vol. 14, no. 10, pp. 1117-1139. ISSN 1432-7643.

GEORGIADIS, M. C., et al. A General Mathematical Programming Approach for Process Plant Layout. *Computers and Chemical Engineering*, 1999, vol. 23, pp. 823-840.

GHEZAIL, Feieza; PIERREVAL, Henri and HAJRI-GABOUJ, Sonia. *Multi Objective Optimization using Ant Colonies*. . Nketsa, A Paludetto, M Bertelle, C. ed., , 2006, 2006. ISBN 978-90-77381-30-4.

GILMORE, P. C. Optimal and Suboptimal Algorithms for the Quadratic Assignment Problem. *J.Soc. Appl. Math.*, 1962, vol. 10, no. 2, pp. 305-362.

GLOVER, F. Artificial-Intelligence, Heuristic Frameworks and Tabu Search. *Managerial and Decision Economics*, DEC 1990, 1990, vol. 11, no. 5, pp. 365-375. ISSN 0143-6570.

GLOVER, F. Tabu Search - a Tutorial. *Interfaces*, JUL-AUG 1990, 1990, vol. 20, no. 4, pp. 74-94. ISSN 0092-2102.

GLOVER, F. Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. *Computers and Operations Research*, 1986, vol. 5, pp. 533-549.

GOLDBERG, D. E. *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Reading, Massachusetts: Addison-Wesley Publishing Company, 1989.

GOMORY, R. E. Outline of an Algorithm for Integer Solutions to Linear Programming. *Bulletin of the American Mathematical Programming*, 1958, pp. 275-278.

GONCALVES, Jose Fernando; and RESENDE, Mauricio G. C. A Biased Random-Key Genetic Algorithm for the Unequal Area Facility Layout Problem. *European Journal of Operational Research*, OCT 1 2015, 2015, vol. 246, no. 1, pp. 86-107. ISSN 0377-2217.

González Cruz. *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 : Estructuración De Las Técnicas Necesarias*.

GONZALEZ, J. L. *Aportación a La Optimización Multiobjetivo Del Diseño De Plantas Industriales*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia, 2005.

- GOSS, S., et al. *How Trail Laying and Trail Following can Solve Foraging Problems for Ant Colonies*. . HUGHES, RN ed., , 1990. ISBN 3-540-51762-6.
- GOSS, S., et al. A Model of Noncooperative Foraging in Social Insects. *American Naturalist*, AUG 1989, 1989, vol. 134, no. 2, pp. 273-287. ISSN 0003-0147.
- GRASSE, P. P. [Effect of the Group on Man & Animal]. *Journal De Psychologie Normale Et Pathologique*, 1958, 1958, vol. 55, no. 2, pp. 129-150. ISSN 0021-7956.
- GRAVEL, M.; PRICE, W. L. and GAGNE, C. Scheduling Continuous Casting of Aluminum using a Multiple Objective Ant Colony Optimization Metaheuristic. *European Journal of Operational Research*, NOV 16 2002, 2002, vol. 143, no. 1, pp. 218-229. ISSN 0377-2217.
- GREEN, R. H.; and AL-HAKIM, L. A Heuristic for Facilities Layout Planning. *Omega*, 1985, vol. 13, no. 5, pp. 469-475.
- GROBELNY, J. The Fuzzy Approach to Facilities Layout Problems. *Fuzzy Sets and Systems*, AUG 1987, 1987, vol. 23, no. 2, pp. 175-190. ISSN 0165-0114.
- GUNTSCH, M.; and MIDDENDORF, M. *Solving Multi-Criteria Optimization Problems with Population-Based ACO*. . Carlos M. Fonseca, Peter J. Fleming, Eckart Zitzler, Kalyanmoy Deb and Lothar Thiele ed., Faro, Portugal ed. Springer. Lecture Notes in Computer Science, 2003.
- GUNTSCH, M.; and MIDDENDORF, M. A Population Based Approach for ACO. *Applications of Evolutionary Computing, Proceedings*, 2002, 2002, vol. 2279, pp. 72-81. ISSN 0302-9743; 3-540-43432-1.
- GUNTSCH, M., et al. *Population Based Ant Colony Optimization on FPGA*. , 2002, 2002. ISBN 0-7803-7574-2.
- HAIDINE, A.; and LEHNERT, R. Multi-Case Multi-Objective Simulated Annealing (MC-MOSA): New Approach to Adapt Simulated Annealing to Multiobjective Optimization. *International Journal of Information Technology*, 2008, vol. 4, no. 3, pp. 197-205.
- HALE, Trevor S.; HUQ, Faizuland HIPKIN, Ian. An Improved Facility Layout Construction Method. *International Journal of Production Research*, 2012, vol. 50, no. 15, pp. 4271-4278. ISSN 0020-7543.
- HAMILTON, Chris H.; and RAU-CHAPLIN, Andrew. Compact Hilbert Indices: Space-Filling Curves for Domains with Unequal Side Lengths. *Information Processing Letters*, FEB 29 2008, 2008, vol. 105, no. 5, pp. 155-163. ISSN 0020-0190.
- HARMONOSKY, C. M.; and TOTHERO, G. K. A Multi-Factor Plant Layout Methodology. *International Journal of Production Research*, 1992, vol. 30, no. 8, pp. 1773-1789.
- HASSAN, M. M. D.; and HOGG, G. L. On Constructing a Block Layout by Graph Theory. *International Journal of Production Research*, 1991, vol. 29, no. 6, pp. 1263-1278.
- HASSAN, M. M. D.; and HOGG, G. L. On Converting a Dual Graph into a Block Layout. *International Journal of Production Research*, 1989, vol. 27, no. 7, pp. 1149-1160.
- HEMERT, Jano; COTTA, Carlos and SpringerLink. *Evolutionary Computation in Combinatorial Optimization*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 9783540786047.
- HERAGU, S. S. *Facilities Design*. International Thomson Publishing Company, 1997.
- HERAGU, S. S.; and KUSIAK, A. Recent Models and Techniques for Solving the Layout Problem. *European Journal of Operational Research*, 1992, vol. 57, no. 2, pp. 136-144.

- HERAGU, S. S.; and KUSIAK, A. Efficient Models for the Facility Layout Problem. *European Journal of Operational Research*, 1991, vol. 53, no. 1, pp. 1-13.
- HERNÁNDEZ-DÍAZ, A. G., et al. *A New Proposal for Multi-Objective Optimization using Differential Evolution and Rough Sets Theory*. . AL., Maarten Keijzer et ed., Seattle, Washington ed. ACM Press, 2006.
- HILLIER, F. S. Quantitative Tools for Plant Layout Analysis. *The Journal of Industrial Engineering*, 1963, vol. 14, no. 1, pp. 33-40.
- HILLIER, F. S.; and CONNORS, M. M. Quadratic Assignment Problem Algorithms and the Location of Indivisible Facilities. *Management Science*, 1966, vol. 13, no. 1, pp. 42-57.
- HIOSPITALER-PÉREZ, A.,. *Apuntes Curso Doctorado Layouts México*. , 2005.
- HONGTRAKUL, V.; SLABAUGH, M. B. and KNAPP, S. J. DFLP, SSCP, and SSR Markers for Delta 9-Stearoyl-Acyl Carrier Protein Desaturases Strongly Expressed in Developing Seeds of Sunflower: Intron Lengths are Polymorphic among Elite Inbred Lines. *Molecular Breeding*, 1998, 1998, vol. 4, no. 3, pp. 195-203. ISSN 1380-3743.
- HOOS, Holger H.; and STÜTZLE, Thomas. *Stochastic Local Search: Foundations and Applications*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 2005. ISBN 1558608729.
- HORN, J.; NAFPLIOTIS, N. and GOLDBERG, D. E. A Niched Pareto Genetic Algorithm for Multiobjective Optimization. *Proceedings of the First IEEE Conference on Evolutionary Computation, IEEE World Congress on Computational Intelligence*, 1994, vol. 1, pp. 82-87.
- HOSPITALER, A.; and GRAU, S. *Métodos Analíticos De Generacion De Layouts*. Valencia: Servicio de publicaciones UPV, 1988.
- HOUSHYAR, A. Computer Aided Facility Layout: An Interactive Multi-Goal Approach. *Computers & Industrial Engineering*, 1991, vol. 20, no. 2, pp. 177-186.
- HU, Jian, et al. Multi-Objective Ant Colony Algorithm in EPC Risk Control. *2012 International Workshop on Information and Electronics Engineering*, 2012, 2012, vol. 29, pp. 1767-1773. ISSN 1877-7058; *****
- HWANG, CL; and YOON, KP. *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*. New York: Springer, 1981.
- IMMER, J. R. *Layout Planning Techniques*. New York: McGraw Hill, 1950.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. *Nota Técnica De Prevención 766. Carga De Fuego Ponderada: Parámetros De Cálculo*. . INSHT ed., , 2007.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. *NTP 36: Riesgo Intrínseco De Incendio (I)*. , 1983.
- Instituto Nacional de Seguridad e Higiene en el Trabajo. *NTP 37: Riesgo Intrínseco De Incendio (II)*. , 1983.
- IORIO, A. W.; and LI, X. Solving Rotated Multi-Objective Optimization Problems using Differential Evolution. *AI 2004: Advances in Artificial Intelligence, Proceedings*, 2004, vol. 3339, pp. 861-872.
- IREDI, S.; MERKLE, D. and MIDDENDORF, M. Bi-Criterion Optimization with Multi Colony Ant Algorithms. *Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Proceedings*, 2001, 2001, vol. 1993, pp. 359-372. ISSN 0302-9743; 3-540-41745-1.
- ISHIBUCHI, H.; and MURATA, T. Multi-Objective Genetic Local Search Algorithm. *Proceedings of the 1996 International Conference on Evolutionary Computation*, 1996, pp. 119-124.

- ISLIER, A. A. A Genetic Algorithm for Multiple Criteria Facility Layout Design. *International Journal of Production Research*, 1998, vol. 36, no. 6, pp. 1549-1569.
- JABBARPOUR, Mohammad Reza, et al. Ant Colony Optimisation for Vehicle Traffic Systems: Applications and Challenges. *International Journal of Bio-Inspired Computation*, 2014, 2014, vol. 6, no. 1, pp. 32-56. ISSN 1758-0366.
- JASZKIEWICZ, A. Genetic Local Search for Multiple Objective Combinatorial Optimization. *Technical Report RA-014/98. Institute of Computing Science, Poznan University of Technology*, 1998.
- JIANG, S.; and NEE, A. Y. C. A Novel Facility Layout Planning and Optimization Methodology. *Cirp Annals-Manufacturing Technology*, 2013, 2013, vol. 62, no. 1, pp. 483-486. ISSN 0007-8506.
- JOHNSON, R. V. SPACECRAFT for Multi-Floor Layout Planning. *Management Science*, 1982, vol. 28, no. 4, pp. 407-417.
- KAHRAMAN, Cengiz; and SpringerLink. *Computational Intelligence Systems in Industrial Engineering*. Paris: Atlantis Press : Imprint: Atlantis Press, 2012. ISBN 9789491216770.
- KAISER, J. Experiences of the Greiner Method. *Fire Safety Journal*, 1980, vol. 2, no. 3, pp. 213-222. ISSN 0379-7112.
- KAKU, B. K.; THOMSON, G. L. and BAYBARS, I. A Heuristic Method for the Multi-Storey Layout Problem. *European Journal of Operational Research*, 1988, vol. 37, pp. 384-397.
- KE, Bwo-Ren; CHEN, Meng-Chiehand LIN, Chun-Liang. Block-Layout Design using MAX-MIN Ant System for Saving Energy on Mass Rapid Transit Systems. *Ieee Transactions on Intelligent Transportation Systems*, JUN 2009, 2009, vol. 10, no. 2, pp. 226-235. ISSN 1524-9050.
- KELLER, Birgit; and BUSCHER, Udo. Single Row Layout Models. *European Journal of Operational Research*, SEP 16 2015, 2015, vol. 245, no. 3, pp. 629-644. ISSN 0377-2217.
- KENNEDY, J.; and EBERHART, R. S. Particle Swarm Optimization. *Proceedings of the 1995th IEEE International Conference on Neural Networks*, 1995, pp. 1942-1948.
- KHALIL, T. M. Facilities Relative Allocation Technique (FRAT). *International Journal of Production Research*, 1973, vol. 11, no. 2, pp. 183-194.
- KHARE, V. K.; KHARE, M. K. and NEEMA, M. L. Combined Computer-Aided Approach for the Facilities Design Problem and Estimation of the Distribution Parameter in the Case of Multigoal Optimization. *Computers and Industrial Engineering*, 1988, vol. 14, no. 4, pp. 465-476.
- KHILWANI, N.; SHANKAR, R. and TIWARI, M. K. Facility Layout Problem: An Approach Based on a Group Decision-Making System and Pchoclonal Algorithm. *International Journal of Production Research*, Febrero, 2008, vol. 46, no. 4, pp. 895-927.
- KHODJA, F., et al. A New Approach ACO for Solving the Compromise Economic and Emission with the Wind Energy. *Technologies and Materials for Renewable Energy, Environment and Sustainability (Tmrees14 - Eumisd)*, 2014, 2014, vol. 50, pp. 893-906. ISSN 1876-6102; *****.
- KIM, J. G.; and GOETSCHALCKX, M. An Integrated Approach for the Concurrent Determination of the Block Layout and the Input and Output Point Locations Based on the Contour Distance. *International Journal of Production Research*, 2005, vol. 43, no. 10, pp. 2027-2047.
- KIM, J. G.; and KIM, Y. D. A Space Partitioning Method for Facility Layout Problems with Shape Constraints. *IIE Transactions*, 1998, vol. 30, no. 10, pp. 947-957.

- KIRKPATRICK, S.; GELATT, C. D. and VECCHI, M. P. Optimization by Simulated Annealing. *Science*, 1983, vol. 220, no. 4598, pp. 671-680.
- KNOWLES, J.; and CORNE, D. Recent Advances in Memetic Algorithms, 2004. *Memetic Algorithms for Multiobjective Optimization: Issues, Methods and Prospects*, pp. 313-352.
- KNOWLES, J.; and CORNE, D. *M-PAES: A Memetic Algorithm for Multiobjective Optimization*. Piscataway, New Jersey ed. IEEE Service Center, 2000.
- KNOWLES, J.; and CORNE, D. *The Pareto Archived Evolution Strategy: A New Baseline Algorithm for Multiobjective Optimisation*. Washington, D.C ed. IEEE Service Center, 1999.
- KOCHHAR, J. S.; and HERAGU, S. S. MULTIHOPE: A Tool for Multiple Floor Layout Problems. *International Journal of Production Research*, 1998, vol. 36, no. 12, pp. 3421-3435.
- Komarudin; and WONG, Kuan Yew. Applying Ant System for Solving Unequal Area Facility Layout Problems. *European Journal of Operational Research*, MAY 1, 2010, vol. 202, no. 3, pp. 730-746. ISSN 0377-2217.
- KOOPMANS, T. C.; and BECKMAN, M. Assignment Problems and the Location of Economic Activities. *Economics*, 1957, vol. 25, pp. 52-76.
- KORB, Oliver, et al. PharmACophore: Multiple Flexible Ligand Alignment Based on Ant Colony Optimization. *Journal of Chemical Information and Modeling*, SEP 2010, 2010, vol. 50, no. 9, pp. 1669-1681. ISSN 1549-9596.
- KOUVELIS, P.; CHIANG, W. and FITZSIMMONS, J. Simulated Annealing for Machine Layout Problems in the Presence of Zone Constraints. *European Journal of Operational Research*, 1992, vol. 57, pp. 203-223.
- KRASNOGOR, Natalio, et al. *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NICSO 2008)*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 9783642032110.
- KUKKONEN, S.; and LAMPINEN, J. An Extension of Generalized Differential Evolution for Multi-Objective Optimization with Constraints. *Lecture Notes in Computer Science*, 2004, vol. 3242, pp. 752-761.
- KUSIAK, A.; and HERAGU, S. S. The Facility Layout Problem. *International Journal of Production Research*, 1987, vol. 29, pp. 229-251.
- LAMPINEN, J. *DE's Selection Rule for Multiobjective Optimization*. , 2001.
- LANDA-BECERRA, R.; and COELLO COELLO, C. A. *Solving Hard Multiobjective Optimization Problems using ϵ -Constraint with Cultured Differential Evolution*. . Thomas Philip Runarsson, Hans-Georg Beyer, Edmund Burke, Juan J. Merelo-Guervos, L. Darrell Whitley, and Xin Yao ed., Reykjavik, Iceland ed. Springer. Lecture Notes in Computer Science Vol. 4193, 2006.
- LARSSON, Daniel. Developing the Structure of a Fire Index Method for Timber-Frame Multistorey Apartment Buildings. *Department of Fire Safety Engineering Lund University, Sweden*, 2000.
- LASRADO, Vernet; and NAZZAL, Dima. Design of a Manufacturing Facility Layout with a Closed Loop Conveyor with Shortcuts using Queueing Theory and Genetic Algorithms. *Proceedings of the 2011 Winter Simulation Conference (Wsc)*, 2011, pp. 1959-1970. ISSN 0891-7736; 978-1-4577-2109-0.
- LAWLER, E. L. The Quadratic Assignment Problem. *Management Science*, 1963, vol. 9, no. 4, pp. 586-599.
- LEE, Hsin-Yun. Integrating Simulation and Ant Colony Optimization to Improve the Service Facility Layout in a Station. *Journal of Computing in Civil Engineering*, MAR-APR 2012, 2012, vol. 26, no. 2, pp. 259-269. ISSN 0887-3801.

- LEE, K. -Y; ROH, M. -I and JEONG, H. -S. An Improved Genetic Algorithm for Multifloor Facility Layout Problems having Inner Structure Walls and Pasajes. *Computers and Operations Research*, 2005, vol. 32, pp. 879–899.
- LEE, R. C.; and MOORE, J. M. CORELAP - Computerized Relationship Layout Planning. *The Journal of Industrial Engineering*, 1967, vol. 18, no. 3, pp. 195-200.
- LESSING, L.; DUMITRESCU, I. and STUTZLE, T. A Comparison between ACO Algorithms for the Set Covering Problem. *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, Proceedings*, 2004, 2004, vol. 3172, pp. 1-12. ISSN 0302-9743; 3-540-22672-9.
- LEZCANO, Christian; PINTO, Diego and BARAN, Benjamin. Team Algorithms Based on Ant Colony Optimization - A New Multi-Objective Optimization Approach. *Parallel Problem Solving from Nature - Ppsn X, Proceedings*, 2008, 2008, vol. 5199, pp. 773-783. ISSN 0302-9743; 978-3-540-87699-1.
- LI, H.; and LANDA-SILVA, D. *Evolutionary Multi-Objective Simulated Annealing with Adaptive and Competitive Search Direction*. IEEE, 2008.
- LI, Xiaodong, et al. *Simulated Evolution and Learning*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 9783540896944.
- LI, Y.; and JIAO, L. Quantum-Inspired Immune Clonal Multiobjective Optimization Algorithm. *11th Pacific Asia Conference on Advances in Knowledge Discovery and Data Mining*, 2007, pp. 672-679.
- LIAO, Tianjun, et al. An Incremental Ant Colony Algorithm with Local Search for Continuous Optimization. *Gecco-2011: Proceedings of the 13th Annual Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2011, 2011, pp. 125-132. ISSN 978-1-4503-0557-0.
- LIAO, Tianjun, et al. Ant Colony Optimization for Mixed-Variable Optimization Problems. *Ieee Transactions on Evolutionary Computation*, AUG 2014, 2014, vol. 18, no. 4, pp. 503-518. ISSN 1089-778X.
- LIGGETT, R. S.; and MITCHELL, W. J. Optimal Space Planning in Practice. *Computer Aided Design*, 1981, vol. 13, pp. 277-288.
- LIN, J. -L; and CHANG, C. -H. Solving Multiple Floor Facility Layout Problems by Genetic Search. *Proceedings of the 5th Annual International Conference on Industrial Engineering. Theory, Applications and Practice.*, 2000.
- LIN, L. C.; and SHARP, G. P. Application of the Integrated Framework for the Plant Layout Evaluation Problem. *European Journal of Operational Research*, 1999, pp. 118-138.
- LIN, L. C.; and SHARP, G. P. Quantitative and Qualitative Indices for Plant Evaluation Problem. *European Journal of Production Research*, 1996, no. 116, pp. 100-117.
- LIN, L. C.; and SHARP, G. P. The Structured Criterion Set for Plant Layout Evaluation. *Working Paper. Georgia Institute of Technology*, 1996.
- LIU, Xiao-dong, et al. Experimental Study of Pedestrian Flow in a Fire-Protection Evacuation Walk. *2013 International Conference on Performance-Based Fire and Fire Protection Engineering (Icuffpe 2013)*, 2014, 2014, vol. 71, pp. 343-349. ISSN 1877-7058; *****.
- LIU, Ying, et al. *Advances of Computational Intelligence in Industrial Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008. ISBN 9783540782971.
- LOGENDRAN, R.; and KRIAUSAKUL, T. A Methodology for Solving the Unequal Area Facility Layout Problem. *International Journal of Production Research*, 2006, vol. 44, no. 7, pp. 1243-1272.

LOPEZ-IBANEZ, M.; PAQUETE, L. and STUTZLE, T. On the Design of ACO for the Biobjective Quadratic Assignment Problem. *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, Proceedings*, 2004, 2004, vol. 3172, pp. 214-225. ISSN 0302-9743; 3-540-22672-9.

LOPEZ-IBANEZ, Manuel. Ant Colony Optimization. *Gecco-2010 Companion Publication: Proceedings of the 12th Annual Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2010, 2010, pp. 2353-2384. ISSN 978-1-4503-0073-5.

LOPEZ-IBANEZ, Manuel; and STUETZLE, Thomas. Automatically Improving the Anytime Behaviour of Optimisation Algorithms. *European Journal of Operational Research*, JUN 16 2014, 2014, vol. 235, no. 3, pp. 569-582. ISSN 0377-2217.

LOPEZ-IBANEZ, Manuel; and STUETZLE, Thomas. The Automatic Design of Multiobjective Ant Colony Optimization Algorithms. *Ieee Transactions on Evolutionary Computation*, DEC 2012, 2012, vol. 16, no. 6, pp. 861-875. ISSN 1089-778X.

LOPEZ-IBANEZ, Manuel; and STUTZLE, Thomas. An Experimental Analysis of Design Choices of Multi-Objective Ant Colony Optimization Algorithms. *Swarm Intelligence*, SEP 2012, 2012, vol. 6, no. 3, pp. 207-232. ISSN 1935-3812.

LOPEZ-IBANEZ, Manuel; and STUTZLE, Thomas. An Analysis of Algorithmic Components for Multiobjective Ant Colony Optimization: A Case Study on the Biobjective TSP. *Artificial Evolution*, 2010, 2010, vol. 5975, pp. 134-145. ISSN 0302-9743; 978-3-642-14155-3.

LOPEZ-IBANEZ, Manuel; and STUTZLE, Thomas. Automatic Configuration of Multi-Objective ACO Algorithms. *Swarm Intelligence*, 2010, 2010, vol. 6234, pp. 95-106. ISSN 0302-9743; 978-3-642-15460-7.

LOPEZ-IBANEZ, Manuel; STUTZLE, Thomas and PAQUETE, Luis. Graphical Tools for the Analysis of Bi-Objective Optimization Algorithms [Workshop on Theoretical Aspects of Evolutionary Multiobjective Optimization]. *Gecco-2010 Companion Publication: Proceedings of the 12th Annual Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2010, 2010, pp. 1959-1962. ISSN 978-1-4503-0073-5.

LOURENCO, H. R.; MARTIN, O. C. and STUTZLE, T. Iterated Local Search. *Handbook of Metaheuristics*, 2003, 2003, vol. 57, pp. 321-353. ISSN 0884-8289.

MADAVAN, N. K. *Multiobjective Optimization using a Pareto Differential Evolution Approach*. Piscataway, New Jersey ed. IEEE Service Center, 2002.

MALAKOOTI, B. Multiple Objective Facility Layout: A Heuristic to Generate Efficient Alternatives. *International Journal of Production Research*, 1989, vol. 27, no. 7, pp. 1225-1238.

MALAKOOTI, B. Computer-Aided Facility Layout Selection (CAFLAS) with Applications to Multiple Criteria Manufacturing Planning Problems. *Large Scale Systems: Theory and Applications, Special Issue on Complex Systems Issues in Manufacturing*, 1987, vol. 12, pp. 109-123.

MALAKOOTI, B.; and D'SOUZA, G. I. Multiple Objective Programming for the Quadratic Assignment Problem. *International Journal of Production Research*, 1987, vol. 25, no. 2, pp. 285-300.

MALAKOOTI, B.; and RAVINDRAN, A. Experiments with an Interactive Paired Comparison Simplex Method for MOLP Problems. *Annals of Operations Research*, 1985, vol. 5, no. 3, pp. 575-597.

MALAKOOTI, B.; and TSURUSHIMA, A. An Expert System using Priorities for Solving Multiple-Criteria Facility Layout Problems. *International Journal of Production Research*, 1989, vol. 27, no. 5, pp. 793-808.

MANFRIN, Max, et al. Parallel Ant Colony Optimization for the Traveling Salesman Problem. *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, Proceedings*, 2006, 2006, vol. 4150, pp. 224-234. ISSN 0302-9743; 3-540-38482-0.

- MANIEZZO, V.; and COLORNI, A. Algodesk: An Experimental Comparison of Eight Evolutionary Heuristics Applied to the Quadratic Assignment Problem. *European Journal of Operational Research*, 1995, no. 81, pp. 188-204.
- MANIEZZO, Vittorio, et al. *Matheuristics*. Boston, MA: Springer US, 2010. ISBN 9781441913067.
- MARIANO, C. E.; and MORALES, E. *MOAQ an Ant-Q Algorithm for Multiple Objective Optimization Problems*. Banzhaf, W Daida, J Eiben, AE Garzon, MH Honavar, V Jakiela, M Smith, RE ed., , 1999, 1999. ISBN 1-55860-611-4.
- MASCIA, Franco, et al. Grammar-Based Generation of Stochastic Local Search Heuristics through Automatic Algorithm Configuration Tools. *Computers & Operations Research*, NOV 2014, 2014, vol. 51, pp. 190-199. ISSN 0305-0548.
- MATAI, R.; and SINGH, S. P. Multi-Objective Facility Layout Problem: A State of the Art Review Paper. *Sixth AIMS International Conference on Management*, 2008, vol. 28-31 december 2008.
- MATSUZAKI, K.; IROHARA, T. and YOSHIMOTO, K. Heuristic Algorithm to Solve the Multi-Floor Layout Problem with the Consideration of Elevator Utilization. *Computers & Industrial Engineering*, 1999, vol. 36, pp. 487-502.
- MAUR, Michael; LOPEZ-IBANEZ, Manuel and STUETZLE, Thomas. Pre-Scheduled and Adaptive Parameter Variation in MAX-MIN Ant System. *2010 Ieee Congress on Evolutionary Computation (Cec)*, 2010, 2010. ISSN 978-1-4244-8126-2.
- MCMULLEN, P. R. An Ant Colony Optimization Approach to Addressing a JIT Sequencing Problem with Multiple Objectives. *Artificial Intelligence in Engineering*, JUL 2001, 2001, vol. 15, no. 3, pp. 309-317. ISSN 0954-1810.
- MELIAN, B.; MORENO PÉREZ, J. A. and MORENO VEGA, J. M. Metaheurísticas: Una Visión Global. *Inteligencia Artificial. Reibistaiberoamericana De Inteligencia Artificial*, 2003, vol. 7, no. 19, pp. 7-28.
- MELLER, R. D. The Multi-Bay Manufacturing Facility Layout Problem. *International Journal of Production Research*, 1997, vol. 35, no. 5, pp. 1229-1237.
- MELLER, R. D.; and BOZER, Y. A. Alternative Approaches to Solve the Multi-Floor Facility Layout Problem. *Journal of Manufacturing Systems*, 1997, vol. 16, no. 3, pp. 192-203.
- MELLER, R. D.; and BOZER, Y. A. A New Simulated Annealing Algorithm for the Facility Layout Problem. *International Journal of Production Research*, 1996, vol. 34, no. 6, pp. 1675-1692.
- MELLER, R. D.; and GAU, K. Y. Facility Layout Objective Functions and Robust Layouts. *International Journal of Production Research*, 1996, vol. 34, no. 10, pp. 2727-2742.
- MESSAC, A.; ISMAIL-YAHAYA, A. and MATTSON, C. A. The Normalized Normal Constraint Method for Generating the Pareto Frontier. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, JUL 2003, 2003, vol. 25, no. 2, pp. 86-98. ISSN 1615-147X.
- MESSAC, Achille; and MATTSON, Christopher A. Generating Well-Distributed Sets of Pareto Points for Engineering Design using Physical Programming. *Optimization and Engineering*, DEC 2002, 2002, vol. 3, no. 4, pp. 431-450. ISSN 1389-4420.
- MEULEAU, N.; and DORIGO, M. Ant Colony Optimization and Stochastic Gradient Descent. *Artificial Life*, 2002, 2002, vol. 8, no. 2, pp. 103-121. ISSN 1064-5462.
- MEZURA-MONTES, E.; REYES-SIERRA, M. and COELLO COELLO, C. A. *Advances in Differential Evolution*. Berlin: Springer, 2008. *Multi-Objective Optimization using Differential Evolution: A Survey of the State-of-the-Art*, pp. 173-196.

MLADENOVIC, N.; and HANSEN, P. Variable Neighbourhood Search. *Computers and Operations Research*, 1997, vol. 24, no. 11, pp. 1097-1100.

MOHAN, B. Chandra; and BASKARAN, R. A Survey: Ant Colony Optimization Based Recent Research and Implementation on several Engineering Domain. *Expert Systems with Applications*, MAR 2012, 2012, vol. 39, no. 4, pp. 4618-4627. ISSN 0957-4174.

MONTALVÁ SUBIRATS, José M.; HOSPITALER PÉREZ, Antonioand Universidad Politécnica de Valencia Departamento de Ingeniería de la Construcción y de Proyectos de Ingeniería Civil. *Optimización Multiobjetivo De La Distribución En Planta De Procesos Industriales: Estudio De Objetivos*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2011.

MONTALVA, J. M., et al. *Enfoque Multiobjetivo Del Problema De Distribución En Planta De Procesos Industriales. Estado Del Arte*. Valencia ed. , 2012.

MONTREUIL, B.; and RATLIFF, H. D. Utilizing Cut Tress as Design Skeletons for Facility Layout. *IIE Transactions*, 1989, vol. 21, no. 2, pp. 136-143.

MOON, B., et al. Analysis of the Clustering Properties of the Hilbert Space-Filling Curve. *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, JAN-FEB 2001, 2001, vol. 13, no. 1, pp. 124-141. ISSN 1041-4347.

MOON, G.; and MCROBERTS, K. L. Combinatorial Optimization in Facility Layout. *Computers in Engineering*, 1989, vol. 17, pp. 43-48.

MOORE, J.; and CHAPMAN, R. *Application of Particle Swarm to Multiobjective Optimization*. , 1999.

MOORE, J. M. Computer Program Evaluates Plant Layout Alternatives. *Industrial Engineering*, 1971, no. 21, pp. 19.

MOORE, J. M. *Plant Layout and Design*. New York: The Macmillan company, 1962.

MORITZ, Ruby L. V., et al. Refined Ranking Relations for Multi Objective Optimization and Application to P-ACO. *Gecco'13: Proceedings of the 2013 Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2013, 2013, pp. 65-72. ISSN 978-1-4503-1963-8.

MULLEN, R. J., et al. A Review of Ant Algorithms. *Expert Systems with Applications*, AUG 2009, 2009, vol. 36, no. 6, pp. 9608-9617. ISSN 0957-4174.

MUTHER, R.; and DEMOOR, R. J. Planning an Organization Structure. *Sam Advanced Management Journal*, 1973, 1973, vol. 38, no. 1, pp. 28-33. ISSN 0749-7075.

MUTHER, Richard. *Distribución En Planta*. Editorial Hispano Europea S.A., 1981. ISBN 8425504619.

MUTHER, Richard. *Planificación y Proyección De La Empresa Industrial (Método SLP)*. Barcelona: Editores Técnicos Asociados, 1968.

MUTHER, Richard. *Practical Plant Layout*. New York: McGraw-Hill, 1955.

NADLER, G. What Systems really are. *Modern Materials Handling*, 1965, vol. 20, no. 7, pp. 41-47.

NAM, D.; and PARK, C. H. Pareto-Based Cost Simulated Annealing for Multiobjective Optimization. *Proceedings of the 4th Asia-Pacific Conference on Simulated Evolution and Learning (SEAL'02)*, 2002, vol. 2, pp. 522-526.

NAM, D.; and PARK, C. H. Multiobjective Simulated Annealing: A Comparative Study to Evolutionary Algorithms. *International Journal of Fuzzy Systems*, 2000, vol. 2, no. 2, pp. 87-97.

- NARASIMHA, Koushik S. Venkata; and KUMAR, Manish. Ant Colony Optimization Technique to Solve the Min-Max Single Depot Vehicle Routing Problem. *2011 American Control Conference*, 2011, 2011, pp. 3257-3262. ISSN 0743-1619; 978-1-4577-0081-1.
- NEBRO, A. J.; LUNA, F. and ALBA, E. New Ideas in Applying Scatter Search to Multiobjective Optimization. *Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Third International Conference, EMO 2005*, 2005, vol. Lecture Notes in Computer Science Vol. 3410, pp. 443-458.
- NEUMANN, Frank; WITT, Carsten and SpringerLink. *Bioinspired Computation in Combinatorial Optimization*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 9783642165443.
- NORMAN, B. A.; ARAPOGLU, R. A. and SMITH, A. E. Integrated Facilities Design using a Contour Distance Metric. *IIE Transactions*, 2001, vol. 33, pp. 337-344.
- NORMAN, B. A.; and SMITH, A. E. A Continuous Approach to Considering Uncertainty in Facility Design. *Computers and Operations Research*, 2006, vol. 33, pp. 1760-1775.
- NUGENT, C. E.; VOLLMAN, T. E. and RUMMLER, J. An Experimental Comparison of Techniques for the Assignment of Facilities to Location. *Operations Research*, 1968, vol. 16, pp. 150-173.
- ONTIVEROS MARTÍNEZ, Ramón, et al. *Algoritmo Interactivo De Solución Al Problema De Distribución En Planta, Con Control De Forma y Con Empleo De Técnicas De Análisis De Decisiones Multicriterio Discretas*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia, 2004.
- OSMAN, I. H.; and KELLY, J. P. *Meta-Heuristics: Theory and Applications*. Kluwer, 1996.
- OZDEMIR, G.; SMITH, A. E. and NORMAN, B. A. Incorporating Heterogeneous Distance Metrics within Block Layout Design. *International Journal of Production Research*, 2003, vol. 41, no. 5, pp. 1045-1056.
- PANIGRAHI, Bijaya K., et al. *Handbook of Swarm Intelligence*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 9783642173905.
- PARSOPOULOS, K. E., et al. *Vector Evaluated Differential Evolution for Multiobjective Optimization*. Portland, Oregon ed. IEEE Service Center, 2004.
- PASIA, Joseph M., et al. Solving a Bi-Objective Vehicle Routing Problem by Pareto-Ant Colony Optimization. *Engineering Stochastic Local Search Algorithms: Designing, Implementing and Analyzing Effective Heuristics*, 2007, 2007, vol. 4638, pp. 187-191. ISSN 0302-9743; 978-3-540-74445-0.
- PASIA, Joseph M.; HARTL, Richard F. and DOERNER, Karl F. Solving a Bi-Objective Flowshop Scheduling Problem by Pareto-Ant Colony Optimization. *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, Proceedings*, 2006, 2006, vol. 4150, pp. 294-305. ISSN 0302-9743; 3-540-38482-0.
- PATSIATZIS, D. I.; and PAPAGEORGIOU, L. G. Efficient Solution Approaches for the Multifloor Process Plant Layout Problem. *Industrial Engineering Chemical Research*, 2003, vol. 42, pp. 811-824.
- PATSIATZIS, D. I.; and PAPAGEORGIOU, L. G. Optimal Multi-Floor Process Plant Layout. *Computers and Chemical Engineering*, 2002, vol. 26, pp. 575-583.
- PELLEGRINI, Paola; FAVARETTO, Daniela and MORETTI, Elena. On MAX-MIN Ant System's Parameters. *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, Proceedings*, 2006, 2006, vol. 4150, pp. 203-214. ISSN 0302-9743; 3-540-38482-0.
- PELLEGRINI, Paola; STUETZLE, Thomas and BIRATTARI, Mauro. A Critical Analysis of Parameter Adaptation in Ant Colony Optimization. *Swarm Intelligence*, MAR 2012, 2012, vol. 6, no. 1, pp. 23-48. ISSN 1935-3812.

- PELLEGRINI, Paola; STUTZLE, Thomas and BIRATTARI, Mauro. Off-Line Vs. on-Line Tuning: A Study on MAX-MIN Ant System for the TSP. *Swarm Intelligence*, 2010, 2010, vol. 6234, pp. 239-250. ISSN 0302-9743; 978-3-642-15460-7.
- PINTO, Diego; and BARAN, Benjamin. Multiobjective Multicast Routing with Ant Colony Optimization. *Network Control and Engineering for QoS, Security and Mobility, V*, 2006, 2006, vol. 213, pp. 101-115. ISSN 1571-5736; 0-387-34825-5.
- PINTO, Diego; BARAN, Benjamin and FABREGAT, Ramon. Multi-Objective Multicast Routing Based on Ant Colony Optimization. *Artificial Intelligence Research and Development*, 2005, 2005, vol. 131, pp. 363-370. ISSN 0922-6389; 978-1-58603-560-0.
- PITAKASO, Rapeepan, et al. A MAX-MIN Ant System for Unconstrained Multi-Level Lot-Sizing Problems. *Computers & Operations Research*, SEP 2007, 2007, vol. 34, no. 9, pp. 2533-2552. ISSN 0305-0548.
- R., Muther. *Planificación y Proyección De La Empresa Industrial (Método SLP)*. Barcelona: Editores técnicos asociados, 1968.
- RADA-VILELA, Juan, et al. A Comparative Study of Multi-Objective Ant Colony Optimization Algorithms for the Time and Space Assembly Line Balancing Problem. *Applied Soft Computing*, NOV 2013, 2013, vol. 13, no. 11, pp. 4370-4382. ISSN 1568-4946.
- RADULESCU, Andreea; LOPEZ-IBANEZ, Manuel and STUETZLE, Thomas. Automatically Improving the Anytime Behaviour of Multiobjective Evolutionary Algorithms. *Evolutionary Multi-Criterion Optimization, Emo 2013*, 2013, 2013, vol. 7811, pp. 825-840. ISSN 0302-9743; 978-3-642-37140-0.
- RAMAN, D.; NAGALINGAM, S. V. and LIN, G. C. I. Towards Measuring the Effectiveness of a Facilities Layout. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2009, vol. 25, pp. 191-203.
- RAMKUMAR, A. S., et al. Iterated Fast Local Search Algorithm for Solving Quadratic Assignment Problems. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, JUN 2008, 2008, vol. 24, no. 3, pp. 392-401. ISSN 0736-5845.
- RAOOT, A. D.; and RAKSHIT, A. An Experimental Comparison of Systematic Placement Procedures for Facility Layout Design. *International Journal of Production Research*, 1993, vol. 31, no. 7, pp. 1735-1756.
- RAOOT, A. D.; and RAKSHIT, A. A 'Linguistic Pattern' Approach for Multiple Criteria Facility Layout Problems. *International Journal of Production Research*, 1993, vol. 31, no. 1, pp. 203-222.
- REED, R., Jr. *Plant Layout: Factors, Principles and Techniques*. Homewood, Ill: R.D. Irwin, 1961.
- REYES-SIERRA, M.; and COELLO COELLO, C. A. Multiobjective Particle Swarm Optimizers: A Survey of the State of Art. *Journal of Computational Intelligence Research*, 2006, vol. 2, no. 3, pp. 287-308.
- RIPON, Kazi Shah Nawaz, et al. Using Pareto-Optimality for Solving Multi-Objective Unequal Area Facility Layout Problem. *Gecco-2011: Proceedings of the 13th Annual Genetic and Evolutionary Computation Conference*, 2011, 2011, pp. 681-688. ISSN 978-1-4503-0557-0.
- ROBIC, T.; and FILIPIC, B. DEMO: Differential Evolution for Multiobjective Optimization. *Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Third International Conference, EMOO 2005*, 2005, pp. 520-533.
- ROSENBLATT, M. J. A Note on "A Multigoal Heuristic for Facilities Design Problems:MUGHAL". *International Journal of Production Research*, 1983, vol. 21, no. 3, pp. 437-439.
- ROSENBLATT, M. J. The Facilities Layout Problem: A Multi-Goal Approach. *International Journal of Production Research*, 1979, vol. 17, no. 4, pp. 323-332.

- ROSENBLATT, M. J.; and LEE, H. L. A Robustness Approach to Facilities Layout. *International Journal of Production Research*, 1987, vol. 25, no. 4, pp. 479-486.
- ROSENBLATT, M. J.; and SINUANY-STERN, Z. A Discrete Efficient Frontier Approach to the Plant Layout Problem. *Material Flow*, 1986, no. 3, pp. 227-281.
- SAATY, T. L. Axiomatic Foundation of the Analytic Hierarchy Process. *Management Science*, 1986, vol. 32, pp. 841-855.
- SAHIN, R.; and TÜRKBEY, O. A Simulated Annealing Algorithm to Find Approximate Pareto Optimal Solutions for the Multi-Objective Facility Layout Problem. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 41, pp. 1003-1018.
- SANGWAN, K. S.; and KODALI, R. Multicriteria Heuristic Model for Design of Facilities Layout using Fuzzy Logic and AHP. *International Journal of Industrial Engineering Theory Applications and Practice*, 2006, vol. 13, no. 4, pp. 364-373.
- Santamarina Siurana. *Apuntes De Arquitectura Industrial*.
- SANTAMARINA, C. *Métodos De Optimización En La Generación De Distribuciones De Plantas Industriales Mediante La Aplicación De Algoritmos Genéticos y Técnicas Basadas En Arboles De Cortes*. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia., 1995.
- SANTANA-QUINTERO, L. V.; and COELLO COELLO, C. A. An Algorithm Based on Differential Evolution for Multi-Objective Problems. *International Journal of Computational Intelligence Research*, 2005, vol. 1, no. 2, pp. 151-169.
- SARIN, S. C., et al. A Multiattribute Decision-Theoretic Approach for the Layout Design Problem. *European Journal of Operational Research*, 1992, vol. 57, no. 2, pp. 231-242.
- SAYIN, B. *Facilities Layout with Multiple Objectives*. PhD Thesis. Department of Industrial Engineering, University, North Carolina State, 1981.
- SCHAFFER, J. D. *Multiple Objective Optimization with Vector Evaluated Genetic Algorithms*. PhD thesis, University of Vanderbilt, 1984.
- SCHILDE, Michael, et al. Metaheuristics for the Bi-Objective Orienteering Problem.(Report). *Swarm Intelligence*, , Vol.3(3), p.179(23), 2009, vol. 3, no. 3, pp. 179. ISSN 1935-3812.
- SCHMUTTOR, B. E.; and MCCAULEY, D. B. *Method for Managing Intelligent, Integrated Facility and Fireground Management System for Integrated Facility and Fireground Management of e.g. Facility Appliances, Involves Communicating Event in Wired and Wireless Manner Across Network* .
- SCHOLZ, Daniel; PETRICK, Anitaand DOMSCHKE, Wolfgang. STaTS: A Slicing Tree and Tabu Search Based Heuristic for the Unequal Area Facility Layout Problem. *European Journal of Operational Research*, AUG 16 2009, 2009, vol. 197, no. 1, pp. 166-178. ISSN 0377-2217.
- SCRIABIN, M.; and VERGIN, R. C. A Cluster-Analytic Approach to Facility Layout. *Management Science*, 1985, pp. 33-49.
- SEEHOF, J. M.; and EVANS, W. O. Automated Layout Design Program. *The Journal of Industrial Engineering*, 1967, vol. 18, no. 12, pp. 690-695.
- SEPPÄNEN, J.; and MOORE, J. M. Facilities Planning with Graph Theory. *Management Science*, 1970, vol. 17, no. 4, pp. 242-253.

- SERAFINI, P. Multiple Criteria Decision Making. Expand and Enrich the Domains of Thinking and Application Berlin: Springer-Verlag, 1994. *Simulated Annealing for Multiple Objective Optimization Problems*, pp. 283-292.
- SERAFINI, P. Simulated Annealing for Multiple Objective Optimization Problems. *Proceedings of the Tenth International Conference on Multiple Criteria Decision Making*, 1992, pp. 87-96.
- SERAFINI, P. Mathematics of Multiobjective Optimization. *CSIM Courses and Lectures*, 1985, vol. 289.
- SHA, D. Y.; and CHEN, C. -W. A New Approach to the Multiple Objective Facility Layout Problem. *Integrated Manufacturing Systems*, 2001, vol. 12, no. 1, pp. 59-66.
- SHANG, J. S. Multicriteria Facility Layout Problem: An Integrated Approach. *European Journal of Operational Research*, 1993, vol. 66, no. 3, pp. 291-304.
- SHORE, R. H.; and TOMPKINS, J. A. Flexible Facilities Design. *AIIE Transactions*, 1980, vol. June.
- SICILIA, Juan-Antonio, et al. A Decision Support System for a Long-Distance Routing Problem. Based on the Ant Colony Optimization Metaheuristic. *Transportation: Can we do More with Less Resources? - 16th Meeting of the Euro Working Group on Transportation - Porto 2013*, 2014, 2014, vol. 111, pp. 1035-1044. ISSN 1877-0428; *****.
- SIMMONS, D. M. One Dimensional Space Allocation: An Ordering Algorithm. *Operations Research*, 1969, vol. 17, pp. 812-826.
- SINGH, Gurpreet; KUMAR, Neerajand VERMA, Anil Kumar. Ant Colony Algorithms in MANETs: A Review. *Journal of Network and Computer Applications*, NOV 2012, 2012, vol. 35, no. 6, pp. 1964-1972. ISSN 1084-8045.
- SINGH, S. P. *An Approximate Algorithm to Solve Facility Layout Problem*. , 2009, 2009. ISBN 978-1-4244-2927-1.
- SINGH, S. P.; and SINGH, V. K. An Improved Heuristic Approach for Multi-Objective Facility Layout Problem. *International Journal of Production Research*, 2009.
- SMITH, K. I. *A Study of Simulated Annealing Techniques for Multi-Objective Optimisation*. Phd Thesis. University of Exeter, UK, 2006.
- SMITH, K. I., et al. Dominance-Based Multiobjective Simulated Annealing. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 2008, vol. 12, no. 3, pp. 323-341.
- SOBRINO, Julián. *Arquitectura Industrial En España, 1830-1990*. Madrid: Madrid : Cátedra, 1996.
- SOCHA, Krzysztof; and DORIGO, Marco. A Colony Optimization for Continuous Domains. *European Journal of Operational Research*, MAR 16 2008, 2008, vol. 185, no. 3, pp. 1155-1173. ISSN 0377-2217.
- Song Wenhua, et al. *Compartmentalization of Warehouse with Performance Based Fire Design*. . Huang, P Wang, Y Li, SC Zheng, C Mao,ZH ed., , 2006. ISBN 7-03-018145-X.
- SRINIVAS, N.; and DEB, K. Multiobjective Optimization using Nondominated Sorting in Genetic Algorithms. *Evolutionary Computation*, 1994, vol. 2, no. 3, pp. 221-248.
- STOCKMEYER, L. Optimal Orientations of Cells in Slicing Floorplan Designs. *Information and Control*, 1983, vol. 57, pp. 91-101.
- STUTZLE, T. Parallelization Strategies for Ant Colony Optimization. *Parallel Problem Solving from Nature - Ppsn V*, 1998, 1998, vol. 1498, pp. 722-731. ISSN 0302-9743; 3-540-65078-4.

- STUTZLE, T.; and DORIGO, M. A Short Convergence Proof for a Class of Ant Colony Optimization Algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, AUG 2002, 2002, vol. 6, no. 4, pp. 358-365. ISSN 1089-778X.
- STUTZLE, T.; and HOOS, H. *MAX-MIN Ant System and Local Search for the Traveling Salesman Problem.*, 1997, 1997. ISBN 0-7803-3949-5.
- STUTZLE, T.; and HOOS, H. H. MAX-MIN Ant System. *Future Generation Computer Systems*, JUN 2000, 2000, vol. 16, no. 8, pp. 889-914. ISSN 0167-739X.
- STÜTZLE, Thomas, et al. *Engineering Stochastic Local Search Algorithms. Designing, Implementing and Analyzing Effective Heuristics.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 9783642037511.
- STÜTZLE, Thomas; and SpringerLink. *Learning and Intelligent Optimization.* Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009. ISBN 9783642111693.
- SUMAN, B. Study of Self-Stopping PDMOSA and Performance Measure in Multiobjective Optimization. *Computers & Chemical Engineering*, 2005, vol. 29, no. 5, pp. 1131-1147.
- SUMAN, B. Study of Simulated Annealing Based Algorithms for Multiobjective Optimization of a Constrained Problem. *Computers & Chemical Engineering*, 2004, vol. 28, pp. 1849-1871.
- SUMAN, B. Simulated Annealing-Based Multiobjective Algorithms and their Application for System Reliability. *Engineering Optimization*, 2003, vol. 35, no. 4, pp. 391-416.
- SUMAN, B. Multiobjective Simulated Annealing--A Metaheuristic Technique for Multiobjective Optimization of a Constrained Problem. *Foundations of Computing and Decision Sciences*, 2002, vol. 27, no. 3, pp. 171-191.
- SUMAN, B.; and KUMAR, P. A Survey of Simulated Annealing as a Tool for Single and Multiobjective Optimization. *Journal of the Operational Research Society*, 2006, vol. 57, no. 10, pp. 1143-1160.
- SUO, X. H.; and LIU, Z. Q. Relationships among SFLP, DFLP and Robust Layout. *E-Engineering & Digital Enterprise Technology*, 2008, 2008, vol. 10-12, pp. 235-241. ISSN 1660-9336; 978-0-87849-470-5.
- SUPPAPITNARM, A., et al. A Simulated Annealing Algorithm for Multiobjective Optimization. *Engineering Optimization*, 2000, vol. 33, no. 1, pp. 59-85.
- SURESH, G.; and SAHU, S. Multiobjective Facility Layout using Simulated Annealing. *International Journal of Production Economics*, 1993, vol. 32, pp. 239-254.
- TAM, K. Y.; and LI, S. G. A Simulated Annealing Algorithm for Allocating Space to Manufacturing Cells. *International Journal of Production Research*, 1992, vol. 30, no. 1, pp. 63-87.
- TAM, K. Y.; and LI, S. G. A Hierarchical Approach to the Facility Layout Problem. *International Journal of Production Research*, 1991, vol. 27, no. 4, pp. 165-184.
- TAMAKI, H.; KITA, H. and KOBAYASHI, S. Multi-Objective Optimization by Genetic Algorithms: A Review. *Proceedings of the 1996 International Conference on Evolutionary Computation (ICEC'96)*, 1996, pp. 517-522.
- TATE, D. M.; and SMITH, A. E. Unequal-Area Facility Layout by Genetic Search. *IIE Transactions*, 1995, vol. 27, pp. 465-472.
- TAVARES NETO, R. F.; and GODINHO FILHO, M. Literature Review regarding Ant Colony Optimization Applied to Scheduling Problems: Guidelines for Implementation and Directions for Future Research. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, JAN 2013, 2013, vol. 26, no. 1, pp. 150-161. ISSN 0952-1976.

- TEIXEIRA, Cristina, et al. Multi-Objective Ant Colony Optimization for the Twin-Screw Configuration Problem. *Engineering Optimization*, 2012, 2012, vol. 44, no. 3, pp. 351-371. ISSN 0305-215X.
- TEKINALP, O.; and KARSLI, G. A New Multiobjective Simulated Annealing Algorithm. *Journal of Global Optimization*, 2007, vol. 39, pp. 49-77.
- Tompkins. *Facilities Planning*. . ISBN 0-471-03299-9.
- TOMPKINS, J. A. How to Gather the Data You Need. *Modern Materials Handling*, 1978, no. June, pp. 50-56.
- TOMPKINS, J. A.; and REED, R. An Applied Model for the Facilities Design Problem. *International Journal of Production Research*, 1976, vol. 14, no. 5, pp. 583-595.
- TOMPKINS, J. A.; White, J.A., Bozer,Y.A.and TANCHOCO, J. M. A. *Facilities Planning*. John Wiley & Son, 2003.
- TOMPKINS, J. A.; and WHITE, J. A. *Facilities Planning*. John Wiley & Sons, 1984.
- TOMPKINS, J. A., et al. *Facilities Planning*. New York: John Wiley and sons, 1996.
- TONG, X. *SECOT: A Sequential Construction Technique for Facility Design*. PhD Thesis. University of Pittsburg., 1991.
- TOSCANO PULIDO, G.; and COELLO COELLO, C. A. *The Micro Genetic Algorithm 2: Towards Online Adaptation in Evolutionary Multiobjective Optimization*. . Carlos M. Fonseca, Peter J. Fleming, Eckart Zitzler, Kalyanmoy Deb and Lothar Thiele ed., Faro, Portugal ed. Springer, 2003.
- TUZKAYA, U. R.; ERTAY, T.and RUAN, D. Simulated Annealing Approach for the Multi-Objective Facility Layout Problem. *Studies in Computational Intelligence*, 2005, vol. 5, pp. 401-418.
- TWOMEY, C., et al. An Analysis of Communication Policies for Homogeneous Multi-Colony ACO Algorithms. *Information Sciences*, JUN 15 2010, 2010, vol. 180, no. 12, pp. 2390-2404. ISSN 0020-0255.
- ULUNGU, E. L.; TEGHEM, J.and FORTEMPS, P. Heuristics for Multi-Objective Combinatorial Optimization by Simulated Annealing. *Multiple Criteria Decision Making: Theory and Applications. Proceedings of the 6th National Conference on Multiple Criteria Decision Making*, 1995, pp. 228-238.
- ULUNGU, L. E., et al. MOSA Method: A Tool for Solving Multiobjective Combinatorial Optimization Problems. *Journal of Multicriteria Decision Anal*, 1999, vol. 8, pp. 221-236.
- UPTON, D. M. The Management of Manufacturing Flexibility. *California Management Review*, 1994, no. winter, pp. 72-89.
- URBAN, T. L. Combining Qualitative and Quantitative Analyses in Facility Layout. *Production and Inventory Management Journal*, 1989, no. 3, pp. 73-77.
- URBAN, T. L. A Multiple Criteria Model for the Facilities Layout Problem. *International Journal of Production Research*, 1987, vol. 25, no. 12, pp. 1805-1812.
- VALIULIS, John. Sealed Up Tight. New Considerations for Fire and Smoke Compartmentation. *Health Facilities Management*, 2006-Oct, 2006, vol. 19, no. 10, pp. 48-50. ISSN 0899-6210.
- VAN CAMP, D. J.; CARTER, M. W.and VANELLI, A. A Nonlinear Optimization Approach for Solving Facility Layout Problems. *European Journal of Operations Research*, 1991, vol. 57, pp. 174-189.
- VAN LAARHOVEN, P. J. M.; and AARTS, E. H. L. *Simulated Annealing: Theory and Applications*. Kluwer Academic Publishers, 1987.

- VAN VELDHUIZEN, D. A.; and LAMONT, G. *Multiobjective Optimization with Messy Genetic Algorithms*. Villa Olmo, Como, Italy ed. ACM, 2000.
- VILLAGRA, Marcos; and BARAN, Benjamin. Ant Colony Optimization with Adaptive Fitness Function for Satisfiability Testing. *Logic, Language, Information and Computation, Proceedings*, 2007, 2007, vol. 4576, pp. 352-361. ISSN 0302-9743; 978-3-540-73443-7.
- Vitruvio Polión. *De Architectura*. Vol. 1. . ISBN 88-06-12239-8.
- WAGHODEKAR, P. H.; and SAHU, S. A Critique of some Current Plant Layout Techniques. *International Journal of Operations & Production Management*, 1986, vol. 6, no. 1, pp. 54-61.
- WAGHODEKAR, P. H.; and SAHU, S. Facilities Layout with Multiple Objectives: MFLAP. *Engineering Cost and Production Economics*, 1986, vol. 10, pp. 105-112.
- WANG, M. J.; HU, M. H. and KU, M. Y. A Solution to the Unequal Area Facilities Layout Problem by Genetic Algorithm. *Computers in Industry*, 2005, vol. 56, pp. 207-220.
- WEBSTER, D. B.; and TYBERGHEIN, M. B. Measuring Flexibility. *V International Conference on Production Research*, 1979.
- WELGAMA, P. S.; and GIBSON, P. R. A Construction Algorithm for the Machine Layout Problem with Fixed Pick Up and Drop Off Points. *International Journal of Production Research*, 1993, no. 31, pp. 2575-2590.
- WIESEMANN, Wolfram; and STUTZLE, Thomas. Iterated Ants: An Experimental Study for the Quadratic Assignment Problem. *Ant Colony Optimization and Swarm Intelligence, Proceedings*, 2006, 2006, vol. 4150, pp. 179-190. ISSN 0302-9743; 3-540-38482-0.
- WONG, D. F.; and LIU, C. L. A New Algorithm for Floorplan Design. *23rd Design Automation Conference*, 1986, no. 7, pp. 101-107.
- WONG, Kuan Yew; and Komarudin. Solving Facility Layout Problems using Flexible Bay Structure Representation and Ant System Algorithm. *Expert Systems with Applications*, JUL 2010, 2010, vol. 37, no. 7, pp. 5523-5527. ISSN 0957-4174.
- WONG, Kuan Yew; and SEE, Phen Chiak. A New Minimum Pheromone Threshold Strategy (MPTS) for Max-Min Ant System. *Applied Soft Computing*, JUN 2009, 2009, vol. 9, no. 3, pp. 882-888. ISSN 1568-4946.
- Xiaohong Suo. . Dr. Faieza Abdul Aziz (Ed.), ISBN: 978-953-51-0530-5, InTech, DOI: 10.5772/48662 ed., , 2012. *Facility Layout, Manufacturing System*, pp. <http://www.intechopen.com/books/manufacturing-system/facility-layout>.
- XIONG, Ning, et al. A Walk into Metaheuristics for Engineering Optimization: Principles, Methods and Recent Trends. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, JUL 4 2015, 2015, vol. 8, no. 4, pp. 606-636. ISSN 1875-6891.
- XU, Rui; CHEN, Huaping and LI, Xueping. A Bi-Objective Scheduling Problem on Batch Machines Via a Pareto-Based Ant Colony System. *International Journal of Production Economics*, SEP 2013, 2013, vol. 145, no. 1, pp. 371-386. ISSN 0925-5273.
- XUE, F.; SANDERSON, A. C. and GRAVES, R. J. *Pareto-Based Multi-Objective Differential Evolution*. Canberra, Australia ed. IEEE Press, 2003.
- YANG, T.; and HUNG, C. C. Multiple-Attribute Decision Making Methods for Plant Layout Design Problem. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2007, vol. 23, pp. 126-137.
- YANG, T.; and KUO, C. A Hierarchical AHP/DEA Methodology for the Facilities Layout Design Problem. *European Journal of Operational Research*, 2003, vol. 147, pp. 128-136.

YANG, T.; and PETERS, B. A. Flexible Machine Layout Design for Dynamic and Uncertain Production Environments. *European Journal of Operational Research*, 1998, vol. 108, no. 1, pp. 49-64.

YANG, Xiaoling; and TAN, Ying. An Arithmetic-Analytical Expression of the Hilbert-Type Space-Filling Curves and its Applications. *Bulletin of the Malaysian Mathematical Sciences Society*, APR 2015, 2015, vol. 38, no. 2, pp. 841-854. ISSN 0126-6705.

YE, M.; and ZHOU, G. A Local Genetic Approach to Multi-Objective, Facility Layout Problems with Fixed Aisles. *International Journal of Production Research*, 2007, vol. 45, no. 22, pp. 5243-5264.

YEH, I. C. Construction-Site Layout using Annealed Neural-Network. *Journal of Computing in Civil Engineering*, JUL 1995, 1995, vol. 9, no. 3, pp. 201-208. ISSN 0887-3801.

YU, Jiapeng; and WANG, Chengen. A Max-Min Ant Colony System for Assembly Sequence Planning. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, AUG 2013, 2013, vol. 67, no. 9-12, pp. 2819-2835. ISSN 0268-3768.

YUAN, Zhi, et al. Continuous Optimization Algorithms for Tuning Real and Integer Parameters of Swarm Intelligence Algorithms. *Swarm Intelligence*, MAR 2012, 2012, vol. 6, no. 1, pp. 49-75. ISSN 1935-3812.

ZHENG, Xiao-Jun. A Connectivity Graph Generation Approach for Manhattan Path Calculation in Detailed Facility Layout. *Applied Mathematics and Computation*, JUN 15 2014, 2014, vol. 237, pp. 238-251. ISSN 0096-3003.

ZITZLER, E.; and THIELE, L. *An Evolutionary Algorithm for Multiobjective Optimization: The Strength Pareto Approach*. Zurich, Switzerland: , 1998.

ZITZLER, E.; LAUMANN, M. and THIELE, L. *SPEA2: Improving the Strength Pareto Evolutionary Algorithm*. Zurich: Technical Report 103, 2001.

ZYDALLIS, J.; VAN VELDHIJZEN, D. A. and LAMONT, G. *A Statistical Comparison of Multiobjective Evolutionary Algorithms Including the MOMGA-II*. . Eckart Zitzler, Kalyanmoy Deb, Lothar Thiele, Carlos A. Coello Coello and David Corne ed., Springer-Verlag, 2001.