



UNIVERSIDAD DE VALLADOLID

ESCUELA DE INGENIERÍAS INDUSTRIALES

TRABAJO FINAL DE GRADO

GRADO EN INGENIERÍA EN ORGANIZACIÓN INDUSTRIAL

REVISIÓN DE MÉTODOS DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

Autor:

Carlos Pérez Pérez

Tutor:

Dr. D. José Alberto Araúzo Araúzo

Valladolid, 8 de Junio de 2017



Titulo: Revisión de Métodos de Distribución en Planta.

Autor: Carlos Pérez Pérez

Tutor: José Alberto Araúzo Araúzo

Departamento: Departamento de Organización de Empresas y CIM.

Tribunal

---

Presidente

Secretario

Vocal

---

Fecha: 8 de Junio de 2017

Calificación:



# Resumen

---

El mercado actual exige que los fabricantes sean competitivos. Esto requiere el funcionamiento eficiente de las plantas de fabricación, y su capacidad para responder rápidamente a los cambios en la tecnología y la demanda. Si además se tiene presente que, según algunos estudios, los costos de manejo de materiales representan entre 20 y 50 por ciento del costo total de operación, la distribución de los equipos dentro de la planta tendrá una influencia fundamental en el buen desempeño del sistema.

En este documento se realiza una revisión y clasificación de los problemas de distribución en la planta de producción, así como de los métodos propuestos y utilizados hasta la fecha para resolverlos. Además, con el objetivo añadido de profundizar en el estudio del problema, se ha implementado en C un algoritmo tipo *greedy* que aborda uno de los tipos de problema de distribución en planta más presentes en la literatura. El método implementado minimiza el costo total del manejo de materiales, considerando la métrica de distancia Manhattan entre las áreas.

## Palabras clave

---

Dirección de Operaciones, Investigación Operativa, Distribución en Planta, Heurísticas, Metaheurísticas, Algoritmos Voraces



# Abstract

---

Current market requires competitive manufacturers. This implies the efficient operation of manufacturing factories, and its ability to respond fast to the changes in technology and demand. If you also take into account that according with some studies, the costs of the material management represent between twenty and fifty percent of the total operation cost, and the distribution of the equipment inside the plant has fundamental influence in the good work of the system.

In this final degree project, we perform a revision and classification of the distribution problems in the production plant, as well as the purposed and used methods to solve them. Furthermore, with the purpose of getting deeper into the study of the problem, a greedy type algorithm had been implemented. This algorithm addresses one of the distribution problem kinds present in the literature. The implemented method minimized the total cost of the material management , taking the Manhattan metric distance between the áreas.

## Keywords

---

Layout planning, heuristics, Greedy algorithm, Factory layout



*Show must go on.*  
-Queen-



## Agradecimientos

A mi familia, por el cariño, apoyo incondicional y paciencia con la que siempre me han tratado, en especial a mi abuelo Aurelio.

También quiero mencionar a mis amigos y compañeros por todos los momentos vividos.

Por último, quiero agradecer a mi tutor José Alberto Araúzo Araúzo, toda la ayuda que me han proporcionado y todo el tiempo que me ha dedicado.



# ÍNDICE

---

<b>INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>1</b>
<b>OBJETIVOS .....</b>	<b>2</b>
<b>CONTENIDO DE LA MEMORIA.....</b>	<b>3</b>
<b>CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA .....</b>	<b>5</b>
<b>1.1 FORMATOS BÁSICOS DE LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA.....</b>	<b>6</b>
1.1.1 DISTRIBUCIÓN POR PROCESO .....	6
1.1.2 DISTRIBUCIÓN POR PRODUCTO .....	9
1.1.3 DISTRIBUCIÓN DE POSICIÓN FIJA.....	11
1.1.4 DISTRIBUCIÓN CELULAR .....	13
1.1.5 DISTRIBUCIONES REALES Y TALLERES FLEXIBLES.....	14
<b>1.2 REPRESENTACIÓN DEL LAYOUT.....</b>	<b>16</b>
<b>1.3 REPRESENTACIÓN DISCRETA .....</b>	<b>17</b>
1.3.1 REPRESENTACIÓN CONTINUA.....	17
1.3.2 REPRESENTACIÓN CARTESIANA.....	19
<b>1.4 DISTANCIA MANHATTAN.....</b>	<b>20</b>
<b>1.5 COMPLEJIDAD COMPUTACIONAL .....</b>	<b>22</b>
1.5.1 CONCEPTOS PREVIOS.....	22
1.5.2 LA MÁQUINA DE TURING .....	23
1.5.3 CLASES DE COMPLEJIDAD .....	24
1.5.3.1 Clase P.....	24
1.5.3.2 Clase NP .....	25
1.5.3.3 Clase NP-completo.....	25
1.5.3.4 Clase NP-hard.....	26
1.5.3.5 Relación entre clases .....	27
<b>CAPÍTULO 2. MÉTODOS DE RESOLUCIÓN.....</b>	<b>29</b>

<b>2.1</b>	<b>MÉTODOS EXACTOS</b> .....	<b>32</b>
<b>2.2</b>	<b>MÉTODOS HEURÍSTICOS</b> .....	<b>34</b>
2.2.1	MÉTODOS METAHEURÍSTICOS .....	38
<b>2.3</b>	<b>MISCELÁNEA</b> .....	<b>46</b>
<b>2.4</b>	<b>SYSTEMATIC LAYOUT PLANNING ( SLP )</b> .....	<b>50</b>
2.4.1	FASES DEL SLP .....	51
2.4.2	TIPOS DE FLUJO .....	52
2.4.3	RELACIÓN ENTRE ACTIVIDADES.....	54
2.4.4	DIAGRAMA DE RELACIONES .....	57
2.4.5	NECESIDADES DE ESPACIO Y DISPONIBILIDAD .....	58
2.4.6	DISEÑO DE LA DISTRIBUCIÓN .....	61
2.4.6.1	Diseño del Diagrama de Espacio de Relaciones.....	61
2.4.6.2	Plano de Bloque y Distribución en Planta Detallada.....	62
2.4.6.3	Diseño de las distribuciones flexibles .....	63
2.4.6.4	Diseño del Sistema de Tratamiento de Materiales.....	64
2.4.6.5	Presentación del diseño de la distribución .....	65
2.4.7	SELECCIÓN, ESPECIFICACIÓN, IMPLEMENTACIÓN Y SEGUIMIENTO .....	66
<b>2.5</b>	<b>MÉTODO CRAFT</b> .....	<b>67</b>
<b>2.6</b>	<b>MÉTODO ALDEP</b> .....	<b>71</b>
2.6.1	PROCEDIMIENTO ALDEP .....	73
<b>2.7</b>	<b>CORELAP</b> .....	<b>74</b>
 <b><u>CAPÍTULO 3. ALGORITMO DE GREEDY APLICADO A PROBLEMA FPL</u></b> .....		<b><u>77</u></b>
<b>3.1</b>	<b>EXPLICACIÓN DEL ALGORITMO GREEDY</b> .....	<b>78</b>
<b>3.2</b>	<b>FORMULACIÓN DEL PROBLEMA</b> .....	<b>80</b>
<b>3.3</b>	<b>EJECUCIÓN</b> .....	<b>81</b>
<b>3.4</b>	<b>CRITERIO DE ASIGNACIÓN MEDIANTE GREEDY</b> .....	<b>85</b>
 <b><u>CAPÍTULO 4. EXPERIMENTOS NUMÉRICOS</u></b> .....		<b><u>91</u></b>
<b>4.1</b>	<b>HARDWARE Y SOFTWARE EMPLEADO</b> .....	<b>91</b>
<b>4.2</b>	<b>FABRICACIÓN ASIENTOS</b> .....	<b>92</b>
4.2.1	RESULTADOS .....	93
<b>4.3</b>	<b>FABRICACIÓN ELECTRODOMÉSTICOS</b> .....	<b>94</b>
4.3.1	RESULTADOS .....	95

<b>4.4</b>	<b>FÁBRICA TEXTIL</b> .....	<b>97</b>
4.4.1	RESULTADOS .....	98
<b>4.5</b>	<b>FÁBRICA TEXTIL</b> .....	<b>99</b>
4.5.1	RESULTADOS .....	100
<b><u>CAPÍTULO 5. ESTUDIO ECONÓMICO</u></b> .....		<b><u>101</u></b>
<b>5.1</b>	<b>ETAPAS DE DESARROLLO DEL TRABAJO</b> .....	<b>102</b>
<b>5.2</b>	<b>CÁLCULO DE COSTES</b> .....	<b>103</b>
5.2.1	COSTES DE PERSONAL .....	104
5.2.2	COSTES DE AMORTIZACIÓN .....	106
5.2.3	COSTES DE MATERIAL .....	107
5.2.4	GASTOS GENERALES .....	108
<b>5.3</b>	<b>COSTES TOTALES</b> .....	<b>108</b>
<b>5.4</b>	<b>PRECIO DE VENTA DEL TRABAJO</b> .....	<b>109</b>
<b><u>CAPÍTULO 6. CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO</u></b> .....		<b><u>111</u></b>
<b><u>BIBLIOGRAFÍA</u></b> .....		<b><u>115</u></b>
<b><u>ANEXO</u></b> .....		<b><u>121</u></b>
<b>6.1</b>	<b>CÓDIGO DEL PROGRAMA SELECCIONANDO LOCALIZACIONES</b> .....	<b>122</b>
<b>6.2</b>	<b>CÓDIGO DEL PROGRAMA APLICANDO ALGORITMO GREEDY</b> .....	<b>126</b>
<b>6.3</b>	<b>RESULTADOS PROBLEMA SUPUESTO</b> .....	<b>136</b>
<b>6.4</b>	<b>INDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>152</b>
<b>6.5</b>	<b>INDICE DE TABLAS</b> .....	<b>154</b>



# INTRODUCCIÓN

---

La distribución en planta, conocida también por *layout planing* en su traducción inglesa, se encarga de determinar la localización de las estaciones de trabajo, ya sean máquinas, departamentos o puestos de trabajo dentro de un espacio o instalaciones.

## Antecedentes

---

En las fábricas del pasado, las estaciones y zonas de trabajo, se organizaban de manera intuitiva por los jefes de los talleres, sin detenerse en las metodologías específicas. Fue entonces, en la época de la revolución industrial, cuando se comenzaron a revisar los criterios que podían mejorar la productividad, eficiencia y seguridad en las fábricas. El aspecto más relevante que se tenía en cuenta era la distribución en planta de los elementos, no obstante

---

las mejoras estaban enfocadas más en las máquinas que en el sistema de producción.

A comienzos del siglo pasado surgieron los primeros especialistas en métodos del trabajo, incitados por la especialización de las industrias y la necesidad de mejorar la eficiencia. En este momento nacieron algunas de las técnicas que hoy conocemos para aplicar en la organización industrial.

Posteriormente, durante la segunda guerra mundial, las industrias se vieron obligadas a reorganizar sus sistemas productivos para ofertar la demanda de bienes necesarios para la guerra. Al final de esta, los ingenieros se centraron en reconvertir el sistema productivo para los tiempos de paz. Las industrias en ese momento, tenían que hacer frente a la creciente demanda en forma eficiente ya que muchas veces esta demanda no era constante, y fluctuaba.

Es en esta etapa en la cual se reconoce la necesidad e importancia de cambiar la forma de resolver el problema de distribución de planta. Se cambia de mentalidad dejando paso a los ingenieros y diseñadores para implementar sus metodologías y encontrar la mejor solución al problema planteado, tratando de minimizar los desplazamientos internos, el uso de recursos y por consecuencia, el coste asociado a esos desplazamientos internos.

Pioneros en el desarrollo y aplicación de metodologías fueron Armor y Buffa que plantearon el método CRAFT (Armour & Buffa, 1963), desarrollado en el capítulo 0. Posteriormente, hasta la fecha, han sido desarrolladas infinidad de metodologías aplicando métodos exactos, heurísticos y también realizando simulaciones en 3D.

## Objetivos

---

La distribución en planta de una organización es un punto fundamental a tener en cuenta a la hora de diseñar una fábrica ya que la productividad de la instalación no la determina solamente la eficiencia de las máquinas o personas, sino también el cómo están

---

colocadas dentro del espacio. Una correcta distribución en planta aumentaría la productividad, y por lo tanto provocaría una ventaja competitiva. Por el contrario, una incorrecta distribución ocasionaría problemas a largo plazo para la organización ya que modificar las estaciones es un proceso muy costoso.

A lo largo de la historia la industria ha evolucionado, tratando de ser cada vez más eficiente, produciendo más y mejor tratando de minimizar costes. Son numerosas las metodologías aplicables al objeto de estudio de este trabajo.

El siguiente trabajo busca una clasificación de los métodos más relevantes. También, y no por ello menos importante, tenemos el objetivo de desarrollar un software aplicando algoritmo tipo Greedy y estudiar su repuesta

## Contenido de la memoria

---

El trabajo ha sido estructurado en 6 capítulos.

En el primer capítulo hablaremos sobre la problemática de las fabricas a la hora de organizarse detallando los diferentes formatos de distribución que existen. También haremos mención a la manera que que se representa este *layout* y por último hablaremos sobre la parte de complejidad computacional que afecta a este tipo de problemas.

En el segundo capítulo realizaremos una clasificación en función de su metodología, exactos, o aproximados entre los que distinguiremos heurísticos, metaheurísticos y otros.

En el tercer capítulo desarrollaremos un software aplicando y explicaremos su funcionamiento con un ejemplo.

En el cuarto capítulo compararemos resultados de nuestro softwares con otros programas hasta la fecha desarrollados hasta la fecha,



En el quinto capítulo haremos un estudio económico del presente trabajo.

En el sexto capítulo, a partir de los resultados obtenidos y analizados en el capítulo cuatro obtendremos las conclusiones más relevantes del amplio estudio realizado y propondremos futuras líneas de trabajo.

Y para finalizar en el anexo mostraremos el código del programa y resultados.

# DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

---

El problema de distribución en planta que se va a tratar en este trabajo consiste, en la asignación de  $M$  centros de trabajo a  $N$  localizaciones en una planta por proceso. Cuando hablamos de máquinas también me refiero a conjunto de máquinas o departamentos. Se ha de cumplir, no estrictamente, que  $M$  sea menor o igual que  $N$ . Al decir no estrictamente me refiero a que la empresa puede en algún caso prescindir de alguna máquina, o proceso, encargando este proceso a una empresa externa.

Durante el proceso de producción, los materiales fluyen desde una máquina a otra hasta que el proceso se completa. Siendo el objetivo minimizar el costo del manejo de materiales dentro del sistema.

## Formatos básicos de la distribución en planta

---

Los formatos según los cuales se arreglan los departamentos están definidos por el patrón general del flujo de trabajo; existen tres tipos básicos de formatos que son:

- distribución por proceso
- distribución por producto
- distribución de posición fija

Y adicionalmente consideraremos un tipo híbrido conocido como distribución celular. (Torrents, Vilda, & Postils, 2010)

### Distribución por proceso

---

La distribución por proceso, o también conocida como job-shop, es un formato en el cual los equipos o funciones similares se agrupan, como por ejemplo en un taller de mecanizado, todas las fresadoras en una zona y todas las talladoras en otra. De acuerdo con la secuencia establecida de las operaciones, los ítems van pasando de área en área hasta finalizar todas las operaciones necesarias para estar finalizado. Este tipo de distribución es típica en los pequeños talleres como por ejemplo el de vehículos, en donde se dedican áreas para determinados tipos de trabajos, como es el caso de chapa y pintura, mecánica rápida, ruedas, etc. (García & Quesada, 2005)

La ventaja de esta distribución es que se puede simultanear la producción de diferentes tipos de productos o la prestación de diversos servicios, y es la más eficaz. Por lo tanto estamos tratando con una distribución que aporta flexibilidad de producción o de prestación de un servicio. En este entorno cada producto o pequeño grupo de productos tiene

una secuencia diferente de producción. Otro ejemplo alternativo al taller de vehículos son los hospitales en los que un paciente tipo entra por admisión y en función de su dolencia pasará por una de las especialidades disponibles, traumatología, curas, cirugía, etc.

Otra gran ventaja de la distribución por proceso es su flexibilidad en equipamiento y en la labor de asignación. En el caso rotura de una máquina no implica la parada de todo el proceso; el trabajo puede ser transferido a otras máquinas en el departamento.

La distribución por proceso o job-shop es especialmente buena para producciones por lotes pequeños y para la producción de una amplia variedad de componentes diferentes en tamaño y forma o color o acabado superficial.

Este tipo de distribución cuenta con la desventaja del uso general del equipamiento, dado que toma más tiempo y dinero moverse a través del sistema y también hay una mayor dificultad en la planificación de rutas que tiene que seguir el item, la puesta a punto, y la previsión de materias primas. Otra desventaja con la que cuenta es que se requiere de un mayor nivel de inventarios entre operaciones, lo que se conoce como trabajo en curso o WIP, dada las grandes variaciones en el proceso productivo. Este tipo de distribución necesita de un alto nivel de entrenamiento y experiencia; los inventarios intermedios incrementan el capital invertido (Pierre, 1978).

En la distribución según proceso, la táctica más general es colocar los departamentos o centros de trabajo en las localizaciones más económicas. La localización más económica significa minimizar el coste por transporte de material entre las secciones, esto se consigue colocando, lógicamente, más cerca los departamentos con gran interdependencia en flujos de gente o materiales.

La búsqueda de la distribución óptima entre las áreas se puede hacer de forma analítica, minimizando las causas de coste de cada una de las distribuciones posibles, es decir, minimizando la función objetivo.

$$C = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M C_{ij} \cdot D_{ij} \cdot F_{ij}$$

Ecuación 0.1



La distribución orientada al proceso intenta minimizar las cargas o tiempos de transporte que más coste ocasionan. Esta función objetivo puede estar sujeta a más restricciones, como restricciones de área mínima para la sección, incompatibilidad entre zonas, etc...

Para la resolución de este tipo de problemas es habitual la aplicación de algoritmos matemáticos o gráficos, que minimicen los costes. Estos algoritmos se pueden aplicar cuando el número de departamentos no es muy elevado, pero cuando el número de éstos es mayor de 20 se hace necesaria la utilización de programas computacionales más complejos.

Este tipo de distribución tiene diferencias positivas y negativas descritas en la Tabla 0.1 respecto a los otros tipos de distribuciones:

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"><li>• Menor coste de inversión</li><li>• Mayor flexibilidad para fabricar una amplia gama</li><li>• Evita paradas de producción</li><li>• Adaptable a una demanda fluctuante</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mayores costes de desplazamiento</li><li>• Necesidad de personal especializado</li><li>• Tiempos de producción más altos</li><li>• Inventarios de productos intermedios WIP</li><li>• Planificación de la producción compleja</li></ul>

*Tabla 0.1 Ventajas y desventajas de la distribución por producto*

En el desarrollo de este trabajo fin de grado me centraré en esta problemática, la distribución en planta por procesos, haciendo una distinción entre métodos exactos, heurísticos y otros métodos. Dentro de los métodos heurísticos diferenciaremos entre métodos constructivos, y métodos de mejora. Y en el último capítulo desarrollaré un software aplicando el algoritmo de greedy para solucionar este tipo de problemas.

Por norma general la distribución por procesos se debe realizar por proceso, cuando:

- La maquinaria es cara o difícil de mover.
- En la fabricación de diversos productos.
- Si se tienen amplias variaciones en los tiempos requeridos por las diversas operaciones.
- La demanda de productos es intermitente o pequeña.

## Distribución por producto

---

La distribución por producto, o también conocida como flow-shop, es una distribución en la cual los equipos están fijos en una línea y el producto circula por ellas, ya sea una cinta o algún transporte adecuado. Las líneas de producción para los coches, las plantas químicas, entre otras son todas distribuciones por producto. Por lo tanto, la distribución por producto está organizada alrededor de un producto o una familia de productos con un gran volumen y poca diversidad (García & Quesada, 2005). En este tipo de producción ese entiende que:

- El volumen de producción es el adecuado para mantener ocupados los equipos.
- La demanda de producto es estable, para justificar la inversión en equipos especializados, dado que es una distribución que requiere una mayor inversión.
- El producto ya está estandarizado o en una fase de vida en la que no se produzcan cambios.
- Las materias primas de partida son uniformes en calidad y adecuadas para trabajar con equipos especializados.

Producciones repetitivas y continuas utilizan este tipo de distribución. Una versión de la distribución por producto es por ejemplo, una línea de fabricación y una línea de montaje. La línea de fabricación construye con máquinas en serie de componentes como automóviles, tiras de metal, partes de frigoríficos, etc. En una línea de montaje los elementos de producción forman grupos que se colocan en serie. Para el correcto funcionamiento de la línea los



tiempos de ciclo de cada máquina o grupo de trabajo debe de estar equilibrado con el del resto, para evitar así las temidas esperas o cuellos de botella. Lo ideal es que el tiempo de ciclo de cada una de las máquinas que conforman la línea fuera el mismo o lo más parecido posible (Pierre, 1978).

Las líneas de fabricación dependen del tiempo de ciclo para el equilibrado de las máquinas y por tanto requieren de cambios mecánicos y de ingeniería para facilitar el equilibrado. Por otro lado las líneas de montaje pueden equilibrarse desplazando las tareas de un individuo a otro. De esta manera la cantidad de tiempo requerido por cada individuo o estación es equivalente.

Uno de los principales problemas de la distribución orientada al producto es equilibrar la salida a cada centro de trabajo en la línea de producción mientras se obtiene la cantidad deseada de producto. El objetivo de la gestión es crear un flujo continuo y suave a lo largo de la línea de montaje con un mínimo de tiempo libre en cada centro de trabajo. Una línea de montaje bien equilibrada tiene la ventaja de facilitar la utilización del personal y de mantener equidad de carga de trabajos entre empleados. En resumen, el objetivo de una distribución orientada al producto es evitar el desequilibrio en una línea de montaje o producción.

La principal ventaja de la distribución en planta por producto es la baja variabilidad de coste por unidad normalmente asociado a grandes volúmenes y a la estandarización de productos. Este tipo de distribución también mantiene bajos costes de transporte de materiales, reducidos inventarios intermedios, y hace fácil la supervisión.

Estas ventajas suelen pesar más que las desventajas, como son:

- Es preciso un gran volumen de producción para justificar la gran inversión realizada.
- La parada de cualquier puesto de trabajo detiene la línea completa.
- Hay una falta de flexibilidad en el tratamiento de variedad de productos y en las tasas de producción.

En la distribución por producto el ítem se desplaza automáticamente por la línea, atravesando los centros de trabajo antes de ser completado. Este es el modo de funcionamiento de las líneas de montaje de vehículos, móviles, ordenadores, y gran parte de los establecimientos de comida rápida. La distribución orientada al producto utiliza medios más específicos que en la distribución orientada al proceso. De una manera más resumida en

la Tabla 0.2 vemos los pros y contras de esta distribución.

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Flujo de las máquinas constante</li> <li>• Baja variabilidad del coste de producción</li> <li>• Bajos costes de transporte del ítem internamente entre las estaciones</li> <li>• Bajo nivel de WIP</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Peligro de los cuellos de botella</li> <li>• La variación en las características de los productos es baja</li> <li>• Parada de una máquina implica parada de la línea entera</li> <li>• Altos costes de inversión</li> </ul>

Tabla 0.2 Ventajas y desventajas de distribución por producto

Por norma general la distribución por producto se debe realizar por proceso, cuando:

- Existan grandes cantidades a fabricar de un mismo ítem.
- Si el diseño es normalizado, estandarizado.
- Si la demanda es estable y el equilibrado de operaciones y circulación de materiales puedan ser logrados sin dificultad.

## Distribución de posición fija

En la distribución de posición fija el ítem permanece en un sitio y el equipo de fabricación se mueve hacia el producto. Claros ejemplos de este *layout* son los astilleros para la construcción de barcos, la construcción de puentes y edificios.

En la actualidad las técnicas de localización de distribución de posición fija no han sido bien desarrolladas. La industria de la construcción y los astilleros han basado su distribución en base a la experiencia. Las diferentes subcontratas o departamentos que trabajan en ella cambian de posición durante el periodo de construcción y frecuentemente la localización de estos depende de la importancia de cada uno (García & Quesada, 2005)



## REVISIÓN DE MÉTODOS DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

---

La determinación de la distribución fija es complicada fundamentalmente por tres razones:

- Hay limitación de espacio a la hora de construir el ítem generalmente por su envergadura.
- En las diferentes etapas del proceso de construcción las necesidades de personal son diferentes, por ejemplo al inicio de una obra de un edificio no se precisan de escayolistas o electricistas, pero si de encofrados, etc...
- El volumen de necesidades de materiales es dinámico. Por ejemplo, las necesidades de paneles de acero en la construcción de un barco cambia a lo largo del desarrollo del proyecto.

La distribución fija que se debe evitar siempre que sea posible. Por ejemplo en la aviación y también en los astilleros se intentan fabricar diferentes componentes de la construcción por separado para después ensamblarlos. En la siguiente Tabla 0.3 resumimos todos los pros y contras de este tipo de *layout*:

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"><li>• Mínimo movimiento del ítem, menor coste, y mayor seguridad</li><li>• Centros de producción independientes</li><li>• Máxima flexibilidad, producto más a medida del cliente</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Mayor coste de desplazamiento de máquinas</li><li>• Muy bajo ratio de utilización de los equipos</li><li>• Baja producción de un mismo ítem</li><li>• Baja estandarización</li></ul>

Tabla 0.3 Ventajas e inconvenientes de distribución de posición fija

En el momento de elegir o adoptar una solución, debe realizarse una distribución por posición fija, cuando:

- Sus operaciones de tratamiento y elaboración supongan máquinas o herramientas sencillas. Se fabrique una sola pieza o muy pocas de un artículo.
- El traslado de la pieza mayor por la fábrica implique muchas restricciones y tenga una gran envergadura, y su coste sea elevado.

## Distribución celular

En la distribución celular, se agrupan máquinas de diferentes células o centros de trabajo para trabajar en productos que tengan formas y requisitos de procesamiento similares. Una distribución de tecnología por centros de trabajo es similar a la distribución por proceso, y es similar a la distribución por producto en que las células están dedicadas a una gama limitada de productos (García & Quesada, 2005).

La distribución celular o tecnología por grupos, es usada cuando el volumen de producción garantiza un especial acomodamiento de la maquinaria y equipamiento. En un ambiente de manufactura, la tecnología de grupos identifica productos que tienen similares características y permiten no sólo a un grupo particular de cosas (por ejemplo, grandes cantidades de un mismo producto), sino a familias de cosas, ser procesadas en la misma célula de trabajo. La idea de la célula de trabajo es disponer máquinas, que normalmente estarían dispersas en varios grupos de trabajo, en pequeños grupos de trabajo con una distribución por proceso. Siendo por tanto esta disposición un paso intermedio entre la distribución por producto y la distribución por proceso (Pierre, 1978).

Ventajas	Inconvenientes
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mayor utilización de maquinaria.</li> <li>• Equipos con propósito general</li> <li>• Mezcla características de ambas distribuciones, con las ventajas que tienen.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Problemas asociados al WIP</li> <li>• Menores ratios de utilización según producto</li> <li>• Mayor nivel de especialización de las operaciones</li> <li>• Altos costes de inversión</li> </ul>

Tabla 0.4 Ventajas e inconvenientes distribución celular



## Distribuciones reales y talleres flexibles

---

Las distribuciones reales consisten en una combinación de los tipos clásicos, por producto, proceso o fija, aunque la línea de diferenciación entre las distribuciones no quede suficientemente clara.

Por lo general, una distribución lleva consigo una combinación entre los tipos clásicos de distribuciones, incluyendo modificaciones para aprovechar las ventajas de cada una de ellas. De esta forma se reduce el coste de manipulación y la cantidad de material en proceso y se consigue una flexible y elevada utilización de la mano de obra y la maquinaria. (Torrents, Vilda, & Postils, 2010)

Una distribución óptima, en cada caso particular, es la que mejor satisface nuestros objetivo, o parte de ellos. Por lo tanto, a veces, recurriremos en la mayor parte de los casos a una distribución intermedia entre proceso y cadena (García & Quesada, 2005)

Los siguientes criterios pueden servir de guía de cara a elegir la distribución adecuada:

- En principio, cada operación industrial simple implica una posición fija, en un instante de tiempo.
- Cuando aumenta la producción o número de operaciones es necesario una separación de operaciones.
- Cuando se avanza por el camino de la especialización y la estandarización y a mayores no existe movimiento de maquinaria, deberá desplazarse el material o bien los hombres sobre posiciones fijas, efectuando cada uno de ellos una operación.
- Por lo general en los procesos de elaboración y tratamiento debe transportarse el material.
- Cuando existe diversidad de productos o tamaños se suele agrupar la maquinaria de un mismo tipo, la pieza puede ser asignada a cualquier máquina que esté libre y los trabajadores a cualquier máquina de grupo, es necesaria una distribución por proceso.
- Cuando existe variedad en los tiempos de operación como ocurre en elaboración y tratamiento por lotes, los equipos de manejo irán agrupados por función, o sea,

distribución por proceso.

- Si existen pocas máquinas y éstas son costosas no se pueden tener máquinas paradas, usaríamos distribución por proceso.
- Cantidades grandes y producto estandarizado implica una producción en cadena para elaboración, tratamiento y montaje.

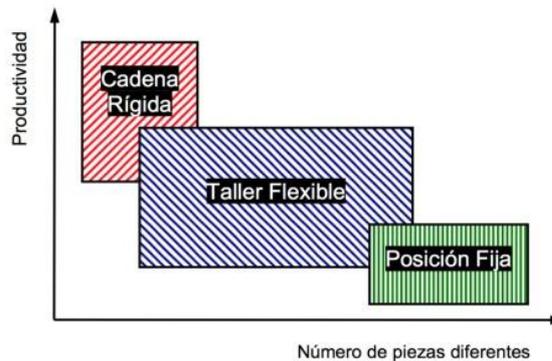


Figura 0-1 Elección distribución en función de la productividad y nº de piezas

Como apreciamos en la imagen si se tiene en cuenta la flexibilidad de un proceso de producción, frente a la productividad, en la Figura 0-1 observamos que, las líneas en cadena rígida son las más apropiadas para la fabricación de un gran número de piezas de las mismas características, constituyendo lo que se denomina un sistema de fabricación rígido. Se caracteriza por:

- Fabricación de piezas siempre iguales.
- Avance forzoso y en una única dirección.

Los sistemas flexibles por el contrario, se ajustan a la fabricación de piezas de series pequeñas, esto es, gran diversidad de lotes de dimensiones reducidas siendo las operaciones a realizar en proceso seleccionables. El taller flexible ofrece una amplia solución al dilema de productividad frente flexibilidad, ya que debe tenerse en cuenta que la mayoría de las series o lotes tienen un tamaño que correspondería a su rango de aplicación.

La fabricación flexible es un sistema de producción que permite conjugar altos índices de productividad y flexibilidad, y a la vez, abaratar costes y aumentar la calidad de los

productos. Este sistema implica un relanzamiento de los lotes de fabricación y la variedad de los mismos. La tendencia actual es conseguir que todos los procesos sean automáticos y con control central.

Por tanto es posible concluir que, si la cantidad del producto es suficiente, lograr una distribución que permita la producción en cadena es el objetivo de la implantación, debido a las ventajas que se obtienen (Pierre, 1978).

## Representación del Layout

---

A la hora de modelar el problema y exponer las distintas soluciones, hay que tener una metodología para realizarlo. Pueden existir varias representaciones de una misma solución. Estas representaciones pueden agruparse en tres tipos, al primer tipo se le denomina representación discreta, al segundo representación continua y al tercero representación cartesiana (Diego-Más, 2006).

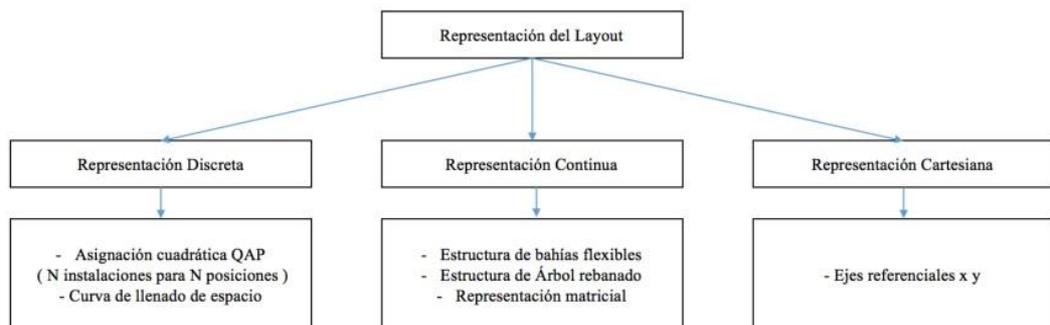


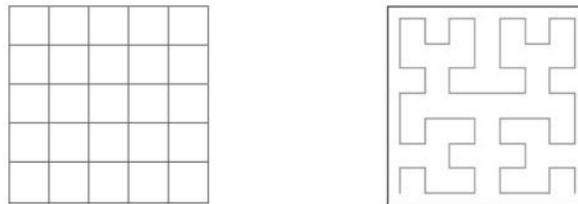
Figura 0-2 Clasificación diferentes tipos de representación

## Representación discreta

---

Las técnicas que formulan el problema de la distribución de instalaciones bajo modelos discretos, parten de una subdivisión del área de planta en una rejilla de cuadrículas de igual área. Las instalaciones serán situadas en la localización asignándoles el número suficiente de subdominios para cubrir sus necesidades espaciales (Armour & Buffa, 1963)

Si las instalaciones tienen dimensiones iguales y formas regulares, tenemos el problema de ubicar  $N$  instalaciones dentro de  $N$  posiciones, a la que se denomina Problema de Asignación Cuadrática (P). Sin embargo, si las dimensiones son desiguales es necesario adoptar otra estructura adicional. En ese sentido se utiliza la otra estructura adicional llamada Curva de Llenado de Espacio (SFC). (Balakrishnan, Cheng, & Wong, 2003)



*Figura 0-3 Dimensiones de las instalaciones en rejilla y curva de llenado*

## Representación continua

---

Las instalaciones tienen forma rectangular y geométrica flexible, significa que el ratio entre la altura y la anchura del área asignada a la actividad puede variar dentro de ciertos márgenes. En la representación de manera continua podemos distinguir entre dos posibles

estructuras, las que emplean arboles de corte, los modelos de bahías flexibles y la representación matricial (Tam, 1992)

Los árboles de corte, usa la representación del árbol para describir un *layout*, donde cada hoja representa una instalación y cada nudo interno es el operador del rebanado, como podemos apreciar en la Figura 0-4. Estos operadores pueden ser “b” corte abajo, “u” corte arriba, “r” corte a la derecha y “l” corte a la izquierda.

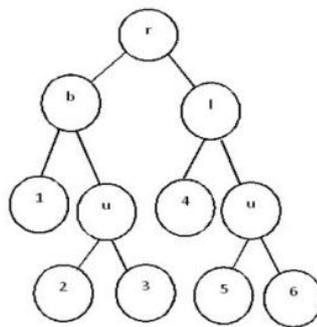


Figura 0-4 Árbol de corte

Las bahías flexibles permite la distribución de instalaciones rectangulares de área desigual. La localización es dividida en una dirección determinada en “bahías” de anchura variable. Dentro de cada una de estas bahías se coloca un número también variable de instalaciones que poseerán igual anchura, y altura proporcional al área requerida por cada una. Como podemos apreciar tanto la zona 2 y 3 como las zonas 4,5 y 6 tienen igual anchura respectivamente. (Chen T. , 1991)

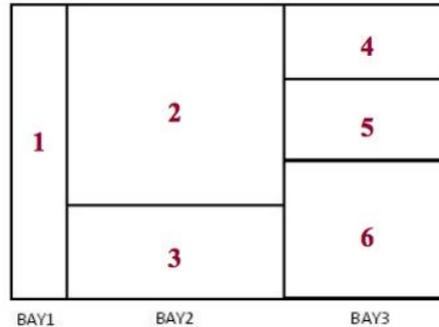


Figura 0-5 Bahías flexibles

La representación matricial consta de una matriz de 3 filas con N columnas (N es el número de instalaciones). La primera fila indica el orden en el cual las instalaciones han sido distribuidas en el área de superficie disponible (GHBDFCEA). La segunda fila contiene ceros y unos aleatorios que indican los grupos seleccionados de instalaciones a distribuirse. La tercera fila corresponde a las orientaciones: 0 línea vertical izquierda, 1 línea vertical derecha, 2 línea horizontal abajo y 3 línea horizontal arriba.

G	H	B	D	F	C	E	A
1	1	0	0	0	1	1	0
1	3	0	1	2	0	3	1

Figura 0-6 Representación matricial

## Representación cartesiana

La distribución de instalaciones bajo este esquema de representación parte del origen del sistema de coordenadas cartesianas. Los departamentos adoptan generalmente formas rectangulares o cuadradas, delimitadas por su ancho y su alto. La ubicación de una instalación queda definida mediante las coordenadas de su centro de gravedad respecto al origen. En la mayoría de modelos analíticos se usa esta representación.



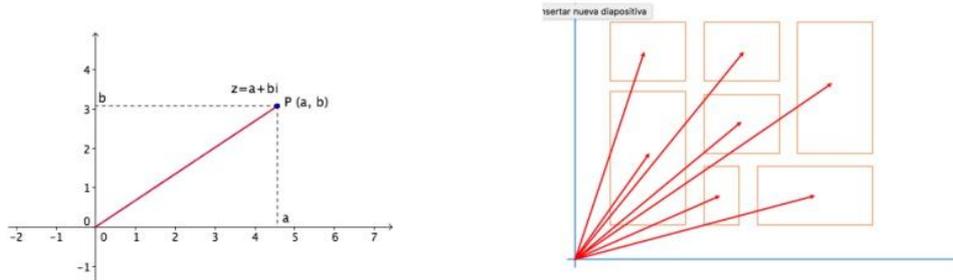


Figura 0-7 Representación cartesiana

## Distancia Manhattan

---

La distancia Manhattan o la distancia del taxista consiste en el cálculo de la distancia medida como la suma de los desplazamientos a lo largo de un eje vertical y horizontal.

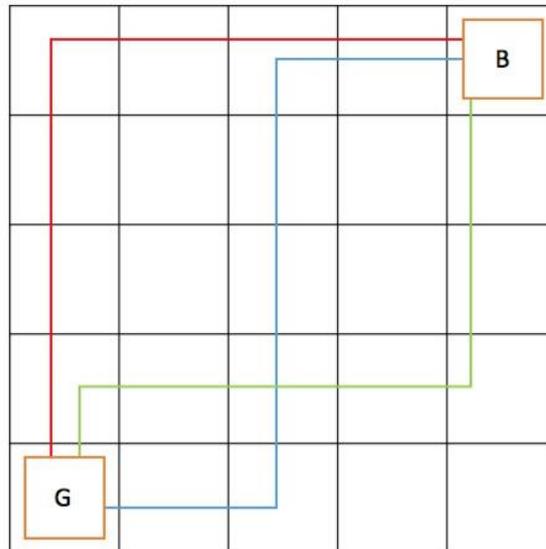


Figura 0-8 Ejemplo métrica Manhattan

Así pues para la imagen tenemos que la distancia entre G y B

Línea roja =  $4 + 4 = 8$  casillas

Línea azul =  $2 + 4 + 2 = 8$  casillas

Línea Verde =  $1 + 4 + 3 = 8$  casillas

Como vemos, las tres distancias son iguales, es decir, que vayamos por donde vayamos siempre vamos a recorrer la misma distancia.

## Complejidad computacional

---

La teoría de la complejidad computacional es la rama de la teoría de la computación que estudia los recursos requeridos durante el cómputo de un algoritmo destinado a resolver un problema, proporcionando un marco teórico que permite clasificar los problemas en fáciles o difíciles. Esta teoría fue desarrollada inicialmente para el estudio de los problemas algorítmicos y su aplicación ha sido de utilidad en optimización combinatoria (Pinedo 2008)

### Conceptos previos

---

La teoría de la complejidad computacional trata de medir el rendimiento de los algoritmos respecto de su tiempo de computación (Brucker 2007). La complejidad computacional estima la cantidad de recursos que se necesita para resolver diferentes problemas. Por ejemplo, no vale la pena aplicar un método exacto de resolución si sabemos que el problema es complejo (Tovey, 2002)

Para realizar una clasificación necesario diferenciar dos conceptos, problema de optimización y problema de decisión.

- En los problemas de optimización la solución de una instancia del problema consiste en el valor de las variables que hacen óptima la función objetivo.
- Los problemas de decisión son aquellos para los que una solución a una instancia del problema puede tomar sólo dos valores: sí o no (o de manera más formal 1 ó 0) solo admite dos variables como salida.

Otro término a definir, antes de abordar los tipos de clases de complejidad, es el de

algoritmo. Se puede definir un algoritmo como un procedimiento paso a paso para resolver el problema que se está tratando. El algoritmo más eficiente será el que nos proporciona la solución al problema con mayor rapidez ya que el tiempo es el recurso computacional que cobra a menudo mayor relevancia, aunque de una manera más general haga referencia a todos los recursos computacionales necesarios para resolver el problema.

## La máquina de Turing

---

En el análisis computacional se requiere un modelo formal de la computadora que va a realizar los cálculos. El objetivo es estudiar la complejidad del problema independientemente de la máquina que lo resuelva. La máquina de Turing es una máquina de cálculo teórica que sirve como modelo idealizado del cálculo matemático. Es una materialización de la idea de que la computación consiste en aplicar reglas mecánicas para manipular números, donde la persona-máquina que manipula dispone de algún medio que le permite memorizar los resultados intermedios (Arora & Barak, 2009).

En la máquina de Turing se realiza una acción (lectura o escritura) a partir del estado actual y de las variables de entrada. Utiliza una función de transición que, a partir de un estado inicial y una cadena de caracteres en una cinta, va leyendo una celda de la cinta, borrando el símbolo, escribe el nuevo símbolo y finalmente avanza a la izquierda o a la derecha (sólo una celda a la vez). El procedimiento se formula en forma de etapas muy simples del tipo: *"si se encuentra en el estado 30 y el símbolo leído es '0', entonces reemplazar este símbolo por un '1', pasar al estado 14, y mover a una celda adyacente (a derecha o izquierda)"*. Este proceso se repite hasta que se detiene en un estado final o de aceptación, representando así la salida.

Se distingue entre máquina de Turing determinista y no determinista. En la máquina de Turing determinista existe una única acción posible que la computadora puede tomar, dados el estado actual y las variables de entrada. Por el contrario, en la máquina de Turing no determinista, puede existir más de una posible combinación de actuaciones. Podemos entender la máquina de Turing no determinista como varias máquinas de Turing en paralelo,



funcionando de forma simultánea pero sin posibilidad de comunicarse entre sí. Esto permite resolver problemas de complejidad exponencial en tiempo polinómico (Papadimitrou & Steiglitz, 1998)

## Clases de complejidad

---

La teoría de la complejidad computacional se basa en dar respuesta a la pregunta, ¿Qué hace a algunos problemas computacionalmente difíciles y a otros sencillos? Las clases de complejidad, son el conjunto de problemas que necesitan de unos recursos equivalentes para resolverlos. Se cataloga como inherentemente difícil si su solución requiere de una cantidad significativa de recursos computacionales, sin importar el algoritmo utilizado. Determinando la complejidad de un problema no lo resolverá de manera directa, sin embargo va a permitir decidir qué tipo de método es el más adecuado para su resolución.

### 1.1.1.1 Clase P

---

La clase P, polinómicos, está formada por los problemas de decisión para los que existe al menos un algoritmo para una máquina de Turing determinista que resuelva el problema tal que el número de pasos necesario para resolverlo está acotado por un polinomio en  $n$ , donde  $n$  es la longitud de la entrada. Es decir, está compuesto por los problemas que pueden ser resueltos por algún algoritmo polinómico. (Brassard & Bratley, 1996)

Sea un algoritmo  $h$  que transforma una entrada  $x$  en una salida  $h(x)$ , que es la respuesta del problema resuelto por el algoritmo. Se dice que el algoritmo es polinómico si  $h(x)$  puede ser computado como máximo en  $O(p(|x|))$ , siendo  $p$  una función polinómica y  $|x|$  el tamaño

de la entrada de una entrada.

Sean  $P$  y  $Q$  problemas de decisión y  $P$  es reducible a  $Q$  ( $P \leq Q$ ), entonces si  $Q \in P \Rightarrow P \in P$  y de igual modo si  $P \notin P \Rightarrow Q \notin P$

### 1.1.1.2 Clase NP

---

En teoría de la complejidad computacional, NP es el acrónimo en inglés de Polinómico no determinista (Non-Deterministic Polynomial-time). Es el conjunto de problemas que pueden ser resueltos en tiempo polinómico por una máquina de Turing no determinista.

Una definición equivalente a la anterior es: la clase NP contiene todos los problemas de decisión para los que existe un certificado con el que la respuesta correcta puede ser verificada por una máquina de Turing en un número de pasos acotado por un polinomio en función del tamaño de la entrada. Se llama certificado a la información adicional que nos permite probar un problema NP en tiempo polinómico. Podemos decir que es el conjunto de problemas de decisión para los que, dada una posible solución del problema, podemos determinar en tiempo polinómico si la solución dada es correcta si conocemos un certificado. (Pinedo, 2008)

### 1.1.1.3 Clase NP-completo

---

En teoría de la complejidad computacional, un problema pertenece a la esta clase si cualquier problema NP se puede reducir a él (Blazewicz, 2007). Es decir, la clase de complejidad NP-completo es el subconjunto de los problemas de decisión en NP tal que todo problema en NP se puede reducir en cada uno de los problemas de *NP-completo*. Un



problema de decisión  $Q$  es *NP-completo* si  $Q \in NP$  y, para cualquier otro problema de decisión  $P \in NP$ , tenemos que  $P \propto Q$ . Es decir, que cualquier problema de NP no es más difícil que un problema de *NP-completo*. Por tanto, los problemas de NP-completo son los problemas más difíciles de NP.

Para probar que un determinado problema  $P$  pertenece a la clase *NP-completo*, es suficiente que un problema  $Q \in NP$  pueda ser transformado polinómicamente en  $P$ ,  $P \propto Q$

Podemos decir que un problema es NP-completo si es a la vez NP, verificable de forma no determinista en tiempo polinómico, y NP-hard (cualquier problema NP puede ser transformado en ese problema).

### 1.1.1.4 Clase NP-hard

---

La clase *NP-hard* está formada por el conjunto de problemas que son al menos tan difíciles como el problema más complejo de la clase NP. Los problemas de la clase NP no tienen por qué ser problemas de decisión, también incluye problemas de optimización u otros.

Dado un problema  $P$ , que puede ser un problema de decisión o un problema de optimización, se dice que es NP-hard si toda la clase de problemas NP reduce polinómicamente a  $P$  (Pinedo 2008).

Un problema de optimización es NP-hard si puede ser transformado en un problema de decisión que sea NP-completo (Brucker 2007). Como ya se ha comentado, los problemas de decisión no son más complejos que los correspondientes problemas de optimización. Por tanto, para demostrar que un problema de optimización es NP-hard es suficiente con transformarlo polinómicamente en algún problema conocido de la clase NP-completo.

Por el contrario, para probar que un problema de optimización es fácil, es suficiente con construir un algoritmo polinómico que lo resuelva. Existen un conjunto de problemas para los que todavía no se ha demostrado que sean NP-completo, ni se ha encontrado un algoritmo que los resuelva polinómicamente (Blazewicz *et al.* 2007).

### 1.1.1.5 Relación entre clases

La clase  $P$  es una subclase de  $NP$ ,  $P \subseteq NP$ . Uno de los grandes problemas en ciencias de la computación consiste en responder al siguiente problema de decisión: ¿ $P=NP$ ?, es la llamada conjetura  $P \neq NP$ .

La Figura 0-9 muestra las relaciones entre casos en caso de que  $P \neq NP$ . Es muy probable que los problemas de la clase *NP-completo* no formen parte de la clase de complejidad  $P$  ya que, en tal caso, si se tuviese una solución polinómica para algún problema de *NP-completo*, todos los problemas de  $NP$  tendrían también una solución en tiempo polinómico. Ésta es una de las cuestiones sin resolver en teoría de la complejidad, si  $NP=P$ .

La clase *NP-completo* juega un papel importante para resolver esta cuestión. Si se demuestra que un problema perteneciente a *NP-completo* puede ser resuelto en tiempo polinómico entonces  $P=NP$ . Es decir, que si un problema  $Q$  perteneciente a *NP-completo* pudiera ser resuelto en tiempo polinómico, entonces todos los problemas de  $NP$  podrían resolverse en tiempo polinómico, y por tanto tendríamos que  $P=NP$ . En ese caso existiría una gran cantidad de problemas que pueden ser resueltos en tiempo polinómico para los que todavía no se ha encontrado ningún algoritmo polinómico que los resuelva. Esto subraya la importancia conceptual de la clase *NP-completo* (Brucker 2007).

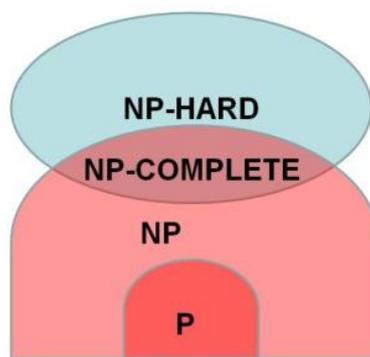


Figura 0-9. Clases de problemas si  $P \neq NP$  (Tovey 2002)

Otra forma de dar una respuesta a la conjetura es demostrar que para un problema NP-completo no existe solución en tiempo polinómico, ya que entonces ninguno de los problemas NP tendría solución.

# MÉTODOS DE RESOLUCIÓN

---

Un problema de distribución de planta se puede generalizar como un problema de optimización combinatoria y por lo tanto su naturaleza es un de un problema del tipo NP-hard. En pequeña escala se pueden usar métodos exactos pero a medida que aumentamos el número de entradas y de variable aumenta la complejidad computacional de los cálculos, por lo que se han desarrollado métodos para obtener soluciones aproximadas desarrollando heurísticas, metaheurísticas y otros métodos para obtener soluciones.

La solución de problemas referentes a la ubicación de actividades, es decir, la distribución en planta, se puede tratar principalmente de dos formas:

- Mediante métodos de análisis matemáticos: Para los cuales se precisan de computadores muy potentes para realizar las complejas iteraciones requeridas para encontrar la solución exacta. Las técnicas aplicadas pertenecen al campo de la investigación de operaciones.
- Algoritmos heurísticos: mediante el uso de algoritmos se busca obtener una solución aproximada dentro de ciertas tolerancias, que satisfaga el problema; la complejidad es menor y los algoritmos requeridos pueden operar en un computador normal.

En años recientes, los problemas de optimización combinatoria se han investigado y

---

tratado en su mayoría con un nuevo tipo de algoritmos llamados metaheurísticos.

La metaheurística es un proceso iterativo de generación que guía a una heurística subordinada al combinar diferentes conceptos para la exploración del espacio de búsqueda y usando estrategias de aprendizaje para estructurar la información con objeto de encontrar eficientemente soluciones cercanas al óptimo. En este apartado del capítulo, describiré brevemente los métodos hasta la fecha desarrollados.

El contenido de este capítulo es una clasificación de los métodos de *layout* en:

- Métodos exactos
- Métodos aproximados
  - Métodos heurísticos
  - Métodos Metaheurísticos
  - Miscelánea

El objetivo para estos métodos de resolución, genéricamente es el de organizar los departamentos, y generar un flujo de trabajo uniforme en una fábrica. Los componentes a tener en cuenta a la hora de implementar y desarrollar cualquier método para una correcta distribución en planta son:

- La cantidad de espacio requerida por las máquinas o puestos.
- La distancia que debe ser recorrida entre las áreas.
- La demanda estimada del producto.
- La cantidad de flujo entre las distintas secciones.
- Los requisitos de espacio de seguridad las secciones.
- La disponibilidad de espacio dentro de las instalaciones
- Determinar si se trata de instalaciones ya existentes con restricciones o de una nueva planta
- El flujo de personal.

Como se puede observar, el número de factores a tener en cuenta a la hora de diseñar una distribución en planta son muy elevados y, por lo tanto, difíciles de contemplar en su totalidad por un algoritmo de forma cualitativa.

La distribución en planta especifica la localización de los procesos, el equipamiento, las áreas de trabajo incluyendo también las zonas de atención al cliente y almacenamiento. Una distribución eficaz facilita el flujo de materias y personal entre departamentos. El objetivo de la gestión es acomodar al sistema en un pico de efectividad y eficiencia (García & Quesada, 2005).

La distribución en planta busca aquella ordenación de los equipos y de las áreas de trabajo que sea más económica y eficiente para la organización, al mismo tiempo que segura y satisfactoria para el personal que ha de realizar el trabajo. De forma más detallada, se podría decir que este objetivo general se alcanza a través de la consecución de hechos como:

- Disminución de la congestión entre las estaciones, evitando los cuellos de botella.
- Supresión de áreas ocupadas innecesariamente.
- Reducción del trabajo administrativo e indirecto, por métodos más automatizados evitando el papeleo.
- Mejora de la supervisión y el control, mediante aplicaciones tecnológicas.
- Mayor flexibilidad y facilidad de ajuste a los cambios de condiciones.
- Mayor y mejor utilización de la mano de obra, la maquinaria y los servicios.
- Reducción de las manutenciones y del material en proceso.
- Disminución del riesgo para el material o su calidad.
- Reducción del riesgo para la salud y aumento de la seguridad de los trabajadores.
- Elevación de la moral y la satisfacción del personal.
- Disminución de los retrasos y del tiempo de fabricación e incremento de la producción.

Son muchos los objetivos a cumplir por las organizaciones para tener una eficiente distribución en planta, pero en la mayor parte de los casos no son aplicables todos al cien por cien, por lo que se busca cumplir todas en la medida de lo posible llegando a un equilibrio entre los mismos. En cualquier caso, los objetivos básicos que ha de conseguir una buena distribución en planta, entre otros muchos, son:

- Unidad. Al perseguir el objetivo de unidad se pretende que no haya sensación de pertenecer a unidades distintas ligada exclusivamente a la distribución en planta.
- Circulación mínima. El movimiento de productos, personas o información se debe minimizar, colocando próximas entre si estaciones con mayor flujo de items.



- Seguridad. La Seguridad en el movimiento y el trabajo de personas y materiales es una exigencia en cualquier diseño de distribución en planta.
- Flexibilidad. Se alude a la flexibilidad en el diseño de la distribución en planta como la necesidad de diseñar atendiendo a los cambios que ocurrirán en el corto y medio plazo en volumen y en proceso de producción.

## Métodos exactos

---

Los métodos exactos garantizan una solución óptima usando programación matemática y algoritmos exactos. Algunos de estos métodos son por ejemplo la programación lineal muy utilizada en problemas de optimización, para que exista un problema de programación lineal, todas las funciones, objetivo y restricciones deben ser lineales.

La aplicación a problemas de distribución es bastante limitada, y algunos de estos métodos son estrictamente enumerativos, es decir, tratan de evaluar todas las posibles soluciones al problema, lo cuál, dado el carácter complejo del mismo, los hace ineficiente problemas de esta envergadura.

La utilización el algoritmo de ramificación y a cotación o ramificación y poda, o del inglés branch and bound, a problemas de Layout planning fue en el año 1962 por Gilmore, se trata de un algoritmo del tipo exacto, sin embargo reconocen que aún considerando el estado del arte de los algoritmos exactos la naturaleza compleja de los problemas de distribución impide que este tipo de método sea capaz de resolver instancias con más de 10 instalaciones, mientras que las instancias prácticas pueden ocuparse de entre 30 y 40 instalaciones por medio de métodos heurísticos. Esta técnica de se suele interpretar como un árbol de soluciones, donde cada rama nos lleva a una posible solución posterior a la actual. La sencillez de este algoritmo reside en que este mismo se encarga de detectar en qué

ramificación las soluciones dadas ya no están siendo óptimas, para podar esa rama del árbol y no continuar malgastando recursos y procesos en casos que se alejan de la solución óptima. Este tipo de algoritmos parten de una solución inicial generalmente obtenida mediante algún algoritmo heurístico.

Las técnicas *branch and bound* han evolucionado mucho en los últimos años, Gilmore resolvió en 1962 un problema cuadrático de asignación de tamaño 8 (Gilmore, 1962), en el año 2000 Anstreicher y sus colaboradores (Anstreicher C 2002) fueron capaces de resolver el problema tipo de tamaño 30 (Gilmore, 1962).

Continuando con esto, Xie y Sahinidis en 2008 nos proponen el mismo algoritmo de ramificación y poda para el problema de distribución de instalaciones continuo,. La novedad de su método dicen es la forma de resolver el problema de distribución rectangular de las instalaciones y extensiones al costo mínimo sin restricciones. Mediante podar de manera sistemática las regiones inferiores en el espacio de secuencia par. La búsqueda en el espacio de secuencias garantiza la terminación finita de la propuesta del algoritmo de ramificación y poda. (Xie & Sahinidis, 2009)

Otros investigadores exploran la posibilidad de la aplicación de la programación entera mixta para los FLP( *facility layout planing* ), cuyo objetivo está basado en el producto del coste del manejo de materiales y la distancia rectilínea entre los centroides de los departamentos. Aunque este es un método potente, solamente problemas con 6 o menos instalaciones pueden ser resueltos óptimamente (Meller & Gau, 1996).

Trece años después se desarrolló un modelo de programación lineal entera mixta para un número pequeño de variables y restricciones, en una planta de producción de óxido de etileno. Dado un conjunto de ítems de equipos con sus dimensiones y costos de conexión entre ellos, el problema consiste en determinar la localización de cada ítem de equipo (en coordenadas y orientación), con tal de minimizar el coste total de conexión y sujeto a restricciones de no superposición y al área limitada de la planta. (Papageorgiou & Xu , 2009)

Hadi-Vencheh y Mohamadghasemi en el año 2012 nos proponen un enfoque donde se ofrece un modelo de Programación no lineal para el problema de diseño de instalaciones con el objetivo de priorizar los modelos de *layouts* generados por la herramienta Espiral. Este modelo al mismo tiempo tiene en cuenta los conocimientos de los expertos con respecto a los pesos obtenidos por el proceso analítico jerárquico de criterios cualitativos, así como



las medidas de desempeño de los criterios cuantitativos. Siendo capaz de considerar el orden de clasificación de criterios. (Hadi-Vencheh & Mohamadghasemi, 2012)

## Métodos heurísticos

---

La teoría de la complejidad nos indica que, para los problemas de distribución en planta de con gran número de variables y de restricciones, es muy improbable encontrar métodos exactos de resolución.

Para la mayoría de los problemas de distribución en planta es inviable la aplicación de procedimientos exactos de solución que operen en tiempos realistas y con tecnologías asequibles, dada la complejidad y la innumerable cantidad de variables. Como alternativa surgen los procedimientos heurísticos.

Existen diversas definiciones acerca de métodos heurísticos, estos son procedimientos simples, a menudo basados en el sentido común, que tienden a ofrecer una buena solución, aunque no necesariamente la óptima, a problemas difíciles, de un modo fácil y rápido. Podemos distinguir según la primera iteración los métodos constructivos, métodos de mejora y métodos híbridos que combina ambos tipos.

Los métodos de mejoría parten de una solución inicial del problema, a partir de la cual realizando cambios y se analiza si la solución mejora hacia el óptimo que buscamos.

A este tipo de algoritmos de mejora pertenece el CRAFT (Armour & Buffa, 1963) que viene a ser el método tipo mejoría más antiguo, y uno de los pioneros. CRAFT (Computerized relatives allocation of facilities techniques), es un programa que se basa en un algoritmo que busca mejorar una solución inicial con el objetivo de minimizar el costo del manejo de materiales. Este uno de los métodos de mejora más utilizados, en él se parte de un prediseño y se procede a intercambiar la posición de las áreas dos a dos en un intento

de minimizar la función de costes de desplazamiento interno. En la página número 50 de este mismo capítulo podemos encontrar una descripción más detallada. Hicks & Cowen (1976) criticaron el procedimiento de intercambio porque puede llevar a las instalaciones a tener formas irregulares. De este tipo de métodos, CRAFT (Computerized Relative Allocation of Facilities Technique) es quizá el más conocido, muchos otros métodos son variaciones realizadas sobre la base de éste.

Tompkins y Reed en el año 1976 desarrollaron basándose en el programa CRAFT lo un software conocido como COFAD (Computerized facilities Technique). El CRAFT permite variedad en los equipos para el transporte de materiales. Este algoritmo permite seleccionar el tipo de distribución en planta como el sistema de manejo de materiales.

Los dos métodos mencionados anteriormente forman parte de los llamados algoritmos de mejora por cuanto requieren de una solución inicial para comenzar las iteraciones, ficticia o real, tratan de perfeccionarla según criterios de minimización de coste, siendo éste asociado, generalmente, al coste de transporte, manejo de materiales, ocupación, etc.

SPACECRAFT es otro método en una fase derivado de otro que emplea modelos bidimensionales, en este caso el CRAFT, pero en este caso aplicado a edificios con varias plantas (Johnson, 1982)

Mas adelante y siguiendo con la misma idea y la aplicación de este algoritmo propuesto por Buffa surge el WinQSB, este programa resuelve el problema de distribución funcional usando el mismo algoritmo de CRAFT, la cual es una heurística para mejorar la distribución inicial por intercambio de departamentos. Maneja varios parámetros adicionales como incompatibilidades entre adyacencia, o necesidad de iluminación y ventilación para determinados departamentos. (Chang, 2000)

Otro método de construcción también utilizado para la mejora de distribuciones es el BLOCPAN desarrollado por Donaghey y Pire. Utiliza la tabla de flujos entre departamentos para obtener el gráfico de relaciones entre departamentos. Utiliza las distancias o también adyacencias entre departamentos. El máximo número de departamentos que admite este método son 18.

MULTIPLE es un método de mejora por evaluación multi-niveles desarrollado por Bozer, Meller y Erlebacher. Utiliza como datos de partida la tabla de flujos entre



departamentos. Dónde la función objetivo es función de la distancia entre los departamentos, que son considerados elementos discretos. Utiliza curvas de relleno de espacio en la búsqueda de la distribución objetivo.

Los métodos constructivos construyen una solución que cumpla con las restricciones del problema mediante la elaboración de una única solución sin partir de una previa. Para ello se utilizan reglas que permitan la construcción de las soluciones de mayor calidad posible.

Estos programas que construyen el *layout* sin requerir una distribución inicial, ya que lo hacen a partir de las relaciones entre actividades de acuerdo a la información suministrada; de ellos el pionero es el ALDEP y CORELAP.

El primer programa desarrollado sin requerir una distribución inicial fue el ALDEP, por Seehof y Evans en el año 1967. Este método trabaja de la siguiente forma, primero una instalación es seleccionada aleatoriamente y es ubicado en el rincón izquierdo superior del *layout*. La siguiente instalación escogida para ser localizada es una que tiene la calificación de cercanía mayor o igual a una relación de cercanía especificada por el. Este método puede manejar fábricas con estructuras de de varios niveles.

El programa ALDEP es básicamente un programa de construcción, aunque debido al proceso de evaluación empleado en la aceptación y rechazo de un *layout* puede considerarse también como un programa de mejora. Este programa construye un *layout* sin la necesidad de la existencia de uno previo, pero también compara las soluciones obtenidas de forma análoga a como lo hace uno de mejora.

En el mismo año Lee y Moore, expusieron el CORELAP (Computerized Relationship *layout planning*). Ellos usan las relaciones de cercanía de cada instalación para determinar una distribución. Bajo este criterio, la instalación con calificación más alta es seleccionado y asignado al centro del área de la planta, para orientar la distribución de los departamentos restantes. Más tarde Sepponen introdujo valiosas modificaciones en estos programas, basadas en la mejora de los algoritmos de asignación. El CORELAP se diferencia del ALDEP, en que mientras en éste es necesario definir el entrono del edificio o de la planta, en el CORELAP es libre.

De manera general la mayor parte de los métodos basados en técnicas de corte o teoría de

grafos y algunos que hacen uso de la lógica difusa pertenecen a este grupo.

Los métodos descritos hasta ahora son los más desarrollados hasta la fecha, de una manera resumida podemos hacer una clasificación, en la Tabla 0.1, entre métodos cuantitativos y cualitativos en función de la entrada de datos y métodos de construcción y mejora en función de la primer individuo a analizar.

		TIPO	
		Construcción	Mejora
Entrada	Cuantitativa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• PLANET</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CRAFT</li> <li>• COFAD</li> <li>• MULTIPLE</li> </ul>
	Cualitativa	<ul style="list-style-type: none"> <li>• CORELAP</li> <li>• ALDEP</li> <li>• PLANET</li> <li>• CSP</li> <li>• BLOCPLAN</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• ALDEP</li> <li>• BLOCPLAN</li> </ul>

Tabla 0.1 Clasificación de métodos



## Métodos Metaheurísticos

---

Un método metaheurístico se define como un método heurístico para resolver un tipo de problema computacional general, usando los parámetros dados por el usuario sobre unos procedimientos genéricos y abstractos de una manera que se espera eficiente. El nombre combina el prefijo griego meta que significa más allá, o de nivel superior y heurístico cuyo significado es encontrar.

Las metaheurísticas generalmente se aplican a problemas que no tienen un algoritmo o heurística específica que dé una solución satisfactoria o bien cuando no es posible implementar ese método óptimo. La mayoría de las metaheurísticas tienen como objetivo los problemas de optimización combinatoria, pero por supuesto, se pueden aplicar a cualquier problema que se pueda reformular en términos heurísticos. (Blum & Roli, 2003)

Uno de los casos clásicos de optimización combinatoria es el Problema de Asignación Cuadrática (QAP), los autores Ravindra K. Ahuja, James B. Orlin y Ashish Tiwari en el año 2000 proponen un algoritmo genético de Greedy para un QAP. Estos autores incorporan la generación de una población inicial mediante una heurística de construcción aleatoria, nuevos esquemas de casamiento, un régimen especial de inmigración que propone la diversidad, la optimización local periódica del subconjunto de la población, alternamiento entre las diferentes poblaciones iniciales con opciones de eliminación del 50% y un diseño general que trata de encontrar un equilibrio entre la diversidad y un sesgo hacia los individuos más aptos. El pseudo código de este algoritmo sería así:

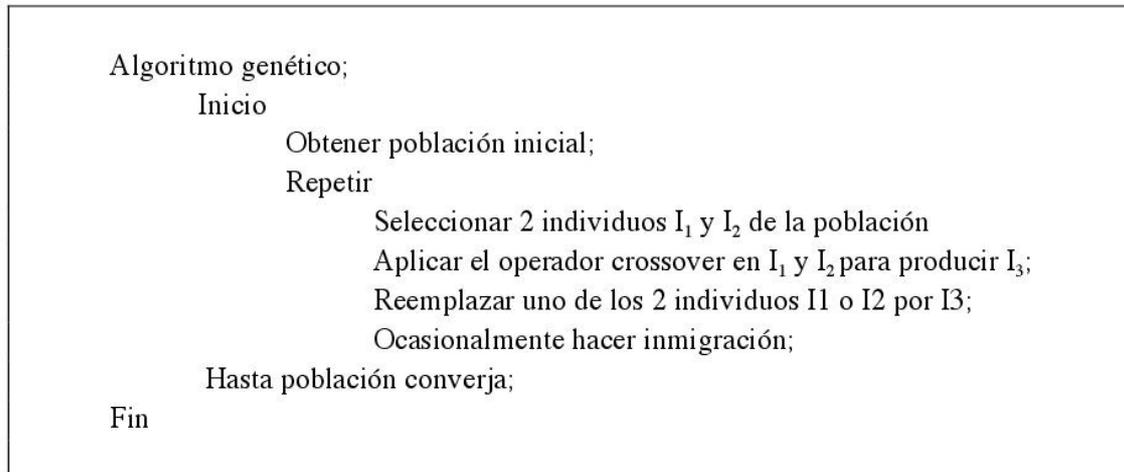


Figura 0-1 Esquema de algoritmo genético FLP

Comenzando con el libro clásico *Introducción a la investigación de operaciones*, donde definen la naturaleza de la metaheurística como un tipo general de método de solución que organiza la interacción entre los procedimientos de mejora local y las estrategias de más alto nivel para crear un proceso que sea capaz de escapar de un óptimo local y realizar una búsqueda vigorosa de una región factible, es decir, realizar una búsqueda más amplia para la búsqueda de un posible óptimo global. El problema de distribución en planta se complica por la dificultad de readaptar instalaciones ya existentes o desarrollar proyectos más flexibles, lo que trae como consecuencia la necesidad de nuevas herramientas para la gestión de proyectos de instalaciones industriales. (Hillier & Lieberman, 2010)

Es de gran importancia analizar el escenario actual que se tiene intención de modificar, incluyendo en ese análisis aspectos tecnológicos, económicos y financieros entre otros, y analizar también posibles estados futuros y la su viabilidad. (Troncoso, Alonso, Pose, & González, 2005)

La propuesta de estos autores que tienen en consideración las la modificación de factorías conservando parte de ellas, es la utilización de un algoritmo genético para la solución de problemas de distribución en planta de instalaciones industriales, donde pasillos enlazan las instalaciones no adyacentes. Los datos procesados son: la matriz de flujos, las áreas de las instalaciones y las respectivas relaciones de forma.

Cobo y Bedia en el año 2005, realizan una revisión de los métodos de distribución de

planta en busca de mejorar las soluciones a los problemas de redistribución generados por la aplicación de los métodos tradicionales; en su publicación “Un algoritmo híbrido basado en colonias de hormigas para la resolución de problemas de distribución en planta orientados a procesos.” consideran la posibilidad de incluir restricciones de tipo espacial o prioridades de cercanía. Desarrollan su trabajo utilizando dos técnicas metaheurísticas, por un lado los algoritmos basados en colonias de hormigas ( Ant Colony Optimization ) para la construcción concurrente del conjunto de soluciones parciales del problema por medio de asignaciones parciales de secciones a áreas de la planta y por otro lado un algoritmo genético con el fin de mejorar las soluciones obtenidas a partir del primer método. En la asignación con ACO utilizan información heurística obtenida de los datos del problema (distancias entre áreas, flujos entre secciones, y capacidades) y también la información que las hormigas precedentes aportan acerca del grado de eficiencia de las soluciones que se van obteniendo. (Ángel Cobo Ortega, 2005)

La técnica de colonia de hormigas se basa en la observación de la manera como las hormigas forrajeras, buscan el camino más corto para llegar a la fuente de alimento desde la colonia, este método se ha utilizado para resolver problemas de optimización combinatoria como el del agente viajero. El camino más corto entre el alimento y la colonia es determinado por los rastros de feromona que una hormiga deja al regresar de nuevo a ella, de modo que las otras hormigas puedan encontrar la fuente de alimento; la cantidad de feromona dejada por una hormiga se basa en la cantidad de alimentos encontrados, si las rutas entre la fuente de alimentación y la colonia son muy distantes, menos hormigas recorrerán estos caminos y el rastro eventualmente se evaporará; sin embargo, si el trayecto es corto, muchas hormigas recorrerán por este camino, lo cual será indicativo de una fuerte huella de feromonas.

El algoritmo genético es un método para resolver problemas de optimización con o sin restricciones el cual es basado en la selección natural, el proceso que conduce a la evolución biológica. El algoritmo genético repetidamente modifica una población de soluciones de individuos, en cada paso selecciona aleatoriamente individuos de la población actual para utilizarlos como padres y los usa para producir los hijos de la próxima generación. A través de sucesivas generaciones la población “evoluciona” hacia una solución óptima.

A raíz de esto se investigó acerca de la aplicación de un sistema de hormigas para resolver problemas de distribución de instalaciones de áreas desiguales (UA-FLP's, Unequal Areas Facility *layout planning*). El sistema propuesto es una variante del método

metaheurístico denominado colonia de hormigas (ACO), el algoritmo utiliza una representación de árbol cortado para representar el problema sin restringir demasiado el espacio solución; usa varios espacios de búsqueda local para mejorar su desempeño. Los autores presentan su método desarrollado en 3 fases: representación de la solución con hormigas, construcción de la solución y procedimientos de búsqueda local. Posteriormente lo aplican a la solución de varios casos expuestos en la literatura, concluyendo que su aplicación tiene ventajas al mejorar los resultados en contraste con las soluciones encontradas con otros métodos aplicados. (Young, 2010)

A diferencia de otros enfoques heurísticos que se centran principalmente en el aspecto de búsqueda, esta investigación adopta otro enfoque al racionalizar la estructura de datos de la representación de la solución para mejorar la solución intercambiar y almacenar las actividades dentro de un marco metaheurístico. Los resultados experimentales de probar los esquemas de codificación y decodificación de datos en un conjunto de datos DFLP han sido bastante prometedores en términos de calidad de la solución y tiempo computacional. En su artículo sobre una nueva estructura de datos para la representación de la solución híbrida de optimización con colonia de hormigas (ACO) menciona que el rediseño de las plantas existentes cada vez va a ser más común que la generación de nuevos diseños para nuevas instalaciones; consciente de esta realidad el investigador de la universidad Taiwanesa propone un revolucionario enfoque para problemas dinámicos de diseño de instalaciones donde la función objetivo sea la de minimizar el costo del transporte o flujo de materiales y el valor del reacondicionamiento de la instalación a través de múltiples periodos de tiempo; se busca en la asignación de departamentos para las distintas ubicaciones, mejorar la solución de intercambio y almacenamiento de actividades dentro de una estructura metaheurística.

El autor hace un profundo análisis de las bondades de su método comparándolo con otras soluciones metaheurísticos donde encuentra que la solución propuesta de codificar y decodificar los datos y procesarlos con la técnica de colonia de hormigas puede ser hasta ocho veces más rápida en tiempo de computo que otras propuestas heurísticas, como por ejemplo en los casos complejos donde se busca solucionar problemas dinámicos de diseño de instalaciones con hasta 30 departamentos y 10 periodos de tiempo. (Chen G. Y.-H., Abril 2013)

La búsqueda tabú, es un metaheurístico que guía a un procedimiento heurístico de búsqueda local para explorar la solución espacial más allá del óptimo local, se basa en la



premisa que la resolución de problemas para calificar como inteligente debe incorporar memoria adaptativa y exploración sensible. Siendo la memoria adaptativa el factor que permite la implementación de procedimientos capaces de buscar el espacio solución de manera económica y eficiente. Las elecciones locales se rigen por la búsqueda por lo que el algoritmo mejora la capacidad de otros métodos sin memoria que dependen de procesos semialeatorios para implementar una forma de muestreo. El énfasis en la exploración sensible, ya sea en implementación determinístico o probabilística deriva de la suposición que una mala estrategia seleccionada a menudo puede dar más información que una buena elección al azar. Este método se puede aplicar a una amplia gama de problemas de optimización. (Glover, 2007)

El problema dinámico de disposición de las instalaciones (DFLP) es el problema de encontrar posiciones de departamentos en el piso de la planta por períodos múltiples, los flujos de materiales entre los departamentos cambian durante el horizonte de planificación, de tal manera que los departamentos no se superponen y la suma del coste es el del manejo y reordenamiento del material. Para McKendal los departamentos pueden tener áreas desiguales y orientaciones libres. Como resultado, se desarrolla una técnica de búsqueda de límites, que coloca departamentos a lo largo de los límites de departamentos ya colocados, para el DFLP. La solución se mejora utilizando una heurística de búsqueda de tabú. Los resultados obtenidos demuestran la eficacia de la heurística. (McKendall A. , 2010)

Continuando con la aplicación de la búsqueda tabú en problemas de distribución en planta en hilera este caso (SRFLP), este problema consiste en encontrar una ubicación lineal óptima de las instalaciones rectangulares con dimensiones variables sobre una línea recta. (Samarghandi, 2010)

Representando las áreas en forma de Bahías flexibles el siguiente autor en su método propone el uso del heurístico probabilístico de búsqueda Tabú (PTS). Para la representación, se utiliza la estructura de bahía flexible (FBS), que es una disposición muy común en muchas instalaciones de fabricación y venta al por menor, las estructuras de bahías flexibles son relajadas permitiendo espacios vacíos dentro de las bahías, lo cual resulta en mayor flexibilidad en la asignación de departamentos entre estas, con lo cual pueden tener mayores longitudes dentro de las bahías siempre y cuando no se traslapen, ni sobrepasen sus fronteras. Para cumplir estos objetivos, las formas de los departamentos y su localización en las bahías son determinadas por LP (programación lineal). Los resultados comparativos muestran que

este enfoque es muy prometedor y capaz de encontrar nuevas mejores soluciones para varios problemas de prueba. (Kulturel-Konak, 2012)

En la siguiente propuesta los autores presentan dos implementaciones de búsqueda tabú, una que implica una búsqueda exhaustiva de la vecindad 2-opt y la otra una búsqueda exhaustiva de la vecindad de inserción. También presentamos técnicas para acelerar significativamente la búsqueda de los dos barrios. En otro artículo continuando con lo anteriormente investigado exponen un heurístico de búsqueda de vecindad llamado LK-Insert, para contribuir a los estudios de métodos de solución del problema de distribución de instalaciones de una hilera (SRFLP), este problema es reconocido por su alta complejidad matemática, se trata de arreglar las instalaciones en una sola hilera de manera que se minimice la suma ponderada de las distancias entre pares de instalaciones tomada entre sus centroides. (Kothari & Ghosh, 2013)

Rawabdeh y Thaboub en el año 2005, buscan aplicar un enfoque heurístico para resolver el problema de disposición de las máquinas en una instalación y la descripción de un nuevo sistema de diseño de diseño asistido por computadora. El sistema utiliza un nuevo enfoque para calcular las puntuaciones de adyacencia, apilar los departamentos y reservar o cambiar las formas y dimensiones del departamento. Los algoritmos del sistema se basan en el cálculo de la distancia mínima entre departamentos y la clasificación de cercanía departamental modificada. El resultado de su investigación fue FLASP (*Facility Layout Support Program*). FLASP podría reducir el número de iteraciones necesarias para alcanzar la solución óptima de los problemas de diseño restringiendo la ubicación de cada departamento dependiendo de las relaciones entre ellos. El sistema se basa en un conjunto de algoritmos que se ocupan de apilar, calcular las distancias rectilíneas más cortas entre los departamentos, el sistema de matriz de adyacencia, las capacidades de modificación y los pasillos principales de los planes de cada departamento. El programa recoge la importancia de las relaciones de adyacencia y las distancias entre departamentos de una manera que depende del concepto de que la puntuación de adyacencia no debe anularse sólo porque los dos departamentos ya no son estrictamente adyacentes. Considera más bien que la puntuación de adyacencia se desvanece gradualmente con el aumento de la distancia entre los dos departamentos, lo que conduce a una diferencia importante en consideración (Rawabdeh & Thaboub, 2005)

Usando la Metaheurística del templado simulado o enfriamiento simulado para



problemas de distribución dinámica cuando el edificio tiene áreas de tamaños iguales, en el desarrollo del método se intercambian aleatoriamente la ubicación de dos departamentos hasta que se obtiene una solución mejorada, y añadiendo un segundo enfoque es formulado a partir del primero en combinación con la estrategia de mejoramiento que ellos denominan “mirada hacia adelante y hacia atrás”. El templado simulado o simulated annealing, es un enfoque estocástico para resolver problemas de optimización combinatoria, inspirado en la idea del proceso de templado de sólidos, en el cual un sólido se calienta y luego se enfría lentamente de acuerdo al programa de tratamiento hasta que alcanza un estado estable de energía con propiedades físicas deseables. Si la temperatura inicial seleccionada no es lo suficientemente alta o si el proceso de enfriamiento fue muy rápido, podría presentarse deformación en el sólido en su estado de energía bajo.

Este mismo autor desarrolló sistemas híbridos de hormigas (HASs) para resolver el problema DFLP. Los resultados muestran que las HAS son técnicas eficientes para resolver el DFLP. Más importante aún, fue que encontró las mejores soluciones nuevas para más de la mitad de todos los problemas de prueba. (McKendall A. R., 2010)

Şahin, R. en 2011, considera un problema de disposición de instalaciones bi-objetivo (BOFLP) combinando los objetivos de minimización del coste total de la manipulación de materiales (cuantitativo) y la maximización de las calificaciones de calificación total, puntajes de la clasificación de cercanías (cualitativa). El autor propone un algoritmo de recocido simulado (SA) para resolver el BOFLP, así como una comparación de SA con los trabajos previos. Se muestra que el algoritmo SA funciona mejor que los trabajos anteriores.

En uno de los procedimientos exactos, el problema de disposición de la instalación se formula como un modelo de programación de entero mixto (MIP, Mixed integer programming) en el que se utilizan variables binarias (0/1) para evitar que los departamentos se superpongan entre sí. La obtención de una solución óptima para el modelo MIP es difícil, y actualmente sólo los problemas con un número limitado de departamentos pueden ser resueltos a la óptima. Motivados por esta situación, los autores desarrollan un procedimiento heurístico que utiliza gráficos para determinar y manipular la ubicación relativa de los departamentos en el diseño. Utilizan un procedimiento heurístico llamado “GRAPH”, compuesto por la técnica de graficado de pares y un algoritmo del tipo templado simulado (SA) en el procedimiento de búsqueda con el fin de mejorar la distribución. La técnica de representación de los gráficos elimina esencialmente las variables binarias en el modelo MIP,

lo que permite a la heurística resolver un gran número de modelos de programación lineal para construir y mejorar el diseño en un período relativamente corto de tiempo. El procedimiento de búsqueda para mejorar el diseño es impulsado por un algoritmo de recocido simulado. (Bozera & Wangb, 2012)

Azzaro en el año 2009 presenta un marco de optimización de Algoritmo Genético Multiobjetivo (MOGA) para el diseño de plantas discontinuas. Para este propósito, se implementan y comparan dos enfoques con respecto a tres criterios, es decir, el costo de inversión, el número de equipo y un indicador de flexibilidad basado en el trabajo en proceso el denominado WIP ( work in process ) calculado mediante el uso de un modelo de simulación de eventos discretos. El primer acercamiento implica un algoritmo genético para generar soluciones aceptables, de las cuales las mejores se eligen usando un algoritmo de Pareto Sort. El segundo enfoque combina el Algoritmo Genético anterior con una metodología de análisis multicriterio, es decir, el método Electre para encontrar las mejores soluciones. Los resultados de los dos procedimientos se estudian para un problema de gran tamaño y se hace una comparación entre los procedimientos. El problema de optimización multicriterio consiste en seleccionar entre un juego de alternativas una óptima, es decir, la que presente mejor calidad de las alternativas. (Azzaro, 2009)

La siguiente metodología busca desarrollar un procedimiento heurístico para resolver problemas de distribución de instalaciones y asignación de flujo de productos. Proponen un nuevo procedimiento heurístico integrado basado en la heurística alternante, un algoritmo de perturbación y una heurística de localización secuencial. Dado que la heurística alterna entre el diseño de la disposición de la instalación y los sub-problemas de asignación de la máquina del producto termina con el optimo local, finalmente desarrollan un algoritmo de perturbación basado en decisiones de asignación. Su solución busca conjuntamente determinar la configuración de la distribución de un juego de máquinas y asignarles producto de manera que se minimicen el costo total de manejo de materiales. Los resultados de un estudio experimental muestran que el procedimiento es eficiente y eficaz para identificar soluciones de calidad para problemas de tamaño pequeño a muy grande. (Taghavi & Murat, 2011)

Aiello, Scalia y Enea en el año 2012 en su artículo un “nuevo enfoque para tratar el problema de distribución de instalaciones de área desigual” proponen un nuevo algoritmo genético multiobjetivo (MOGA) para resolver problemas de disposición de instalaciones de



área desigual (UA-FLPs). El algoritmo genético sugerido se basa en la estructura de rebanado donde las ubicaciones relativas de las instalaciones en el suelo están representadas por una matriz de localización codificada en dos cromosomas. Un diseño de bloques se construye dividiendo el piso en un conjunto de bloques rectangulares utilizando cortes de guillotina que satisfacen las necesidades de áreas de los departamentos. El procedimiento toma en cuenta cuatro funciones objetivas mediante un enfoque evolutivo basado en Pareto, los costos de manejo de materiales, la relación de aspecto, la proximidad y la distancia. La principal ventaja de la formulación propuesta, con respecto a los enfoques referenciados existentes, es que el espacio de búsqueda es considerablemente amplio y se preserva la viabilidad de los diseños de disposición, mejorando así la calidad de las soluciones obtenidas (Aiello, Scalia, & Enea, 2012)

## Miscelánea

---

A partir del año 2005 empiezan a surgir nuevas técnicas de modelado, a partir de simulaciones por ordenador, una de las primeras herramientas fue creada por Meyers & Stephens. La simulación implica el modelado de un sistema real propuesto, para su posterior puesta en funcionamiento, y así poder analizar la respuesta y observar posibles puntos de mejora. Comercialmente se distribuyen programas para la simulación de procesos en ambientes gráficos con utilidades orientadas al diseño y distribución de instalaciones como: ProModel, Flexsim, FactoryCAD, y FactoryPlan. En ellos se puede simular la distribución proyectada antes de llevarla a la práctica, permitiendo ahorro de tiempo y dinero en la evaluación de la solución y el cálculo de resultado esperados.

De los programas de simulación el más relevante es el Promodel lanzado en 2011 por ProModel Corporation, es una herramienta de simulación basada en Windows para analizar problemas de producción de todo tipo y tamaño, se enfoca en utilización de recursos, capacidad de producción, productividad y niveles de inventario. Las aplicaciones típicas de

este software comprenden líneas de ensamble, talleres, líneas de transferencia, sistemas JIT, sistemas de manufactura flexible y cadenas de suministro.

Hoy en día, según el catálogo del Center for Environmental Research, se dispone aproximadamente de 80 programas de computadora dedicados a la optimización de desplazamientos internos en fábrica. Cuando un problema involucra 10 departamentos, es posible implementar más de tres millones de configuraciones diferentes. Por fortuna se han escrito programas de cómputo para manejar distribuciones de hasta 40 departamentos.

Es a partir del año 2011 cuando comienzan a surgir diversidad de métodos para resolver o mejorar problemas de distribución en planta. El objetivo de estos investigadores es esbozar y evaluar la aplicación de una ecuación WSC ( coeficiente de similitud ponderada ) a la formulación y diseño de sistemas de fabricación celular, proporcionando al diseñador del sistema un método adecuado para la creación de células de fabricación eficientes. (John E. , Kuznecov, Thomas, & Davies, 2011)

Los siguientes autores presentan una metodología sistemática y alternativa de toma de decisiones de múltiple atributo para la selección de problemas de selección de diseño de disposición de instalaciones. La metodología propuesta se basa en el método de índice de selección de preferencias (PSI). En la metodología propuesta se selecciona el diseño de disposición de la instalación apropiado para una aplicación dada sin considerar la importancia relativa entre los atributos de selección del diseño de disposición de la instalación. Se examinan dos tipos diferentes de problemas de selección de diseño de disposición de instalaciones para demostrar, validar y verificar la fiabilidad de la metodología propuesta. Finalmente, el estudio concluyó que la metodología de selección del diseño de disposición de la instalación basada en el método PSI es simple, lógica y más apropiada para resolver los problemas de selección del diseño de disposición de la instalación (Maniya & Bhatt, 2011)

La siguiente pareja de investigadores de la universidad Politécnica de Valencia proponen un nuevo algoritmo para la generación de la disposición de puestos de trabajo o departamentos en la planta industrial. El algoritmo evalúa cada disposición posible por una función de entropía y, a continuación, el diseño con el valor de entropía más bajo se selecciona como la solución óptima. En física se conoce como entropía a la magnitud termodinámica que indica el grado de desorden molecular de un sistema o en términos informáticos como la incertidumbre existente ante un conjunto de mensajes, del cual va a



recibirse uno solo. Utilizando esta definición y creando una metodología basada en el concepto de entropía, y adaptándolo a un problema de *layout planning* definiremos entropía como la manera de evaluar el desorden del sistema, el problema se formula en una base multicriterio, donde los atributos de cada elemento del *layout* son el espacio físico, el flujo del material, el tiempo de actividad y el costo total. Los atributos son utilizados en una función matemática que automatiza la resolución del problema de distribución de instalaciones. Según los autores este método es útil para resolver problemas en dos dimensiones sin ayuda de métodos adicionales y considerando las restricciones de espacio. El *layout* con el valor de entropía más bajo es seleccionado como la mejor solución. (Gonzalez-Cruz & Gomez-Senent, 2011)

Los problemas UA-FLP sólo se ha resuelto por criterios que pueden ser cuantificados. En el enfoque de estos autores incluyen un Algoritmo Genético Interactivo (IGA) que permite una interacción entre el algoritmo y el Decision Maker (DM, Tomador de decisiones). Involucrar los conocimientos del DM en el enfoque guía el proceso de búsqueda, ajustándolo a sus preferencias en cada generación del algoritmo. Centrados en ayudar al DM a encontrar una buena solución según criterios que pueden ser: subjetivos, desconocidos al principio o cambiados durante el proceso, de manera que el problema abordado difiere de un problema clásico de optimización. Con el fin de evitar la sobrecarga de la DM, toda la población se clasifica en clusters por, la idea es clasificar los elementos dentro de grupos y utilizar un algoritmo donde únicamente un elemento representativo de cada grupo es seleccionado para la evaluación del diseñador. El recuerdo de las mejores soluciones elegidas por el DM se mantiene como referencia. Las pruebas llevadas a cabo muestran que la IGA propuesta es capaz de capturar las preferencias de DM. (Garcia-Hernandez, Pierreval, Salas-Morera, & Arauzo-Azofra, 2013)

Los problemas de diseño de la distribución de instalaciones (FLD) son problemas multicriterio, por cuanto involucran aspectos cualitativos como la flexibilidad y cuantitativos como los temas de costos, manejo de materiales etc. Los siguientes autores trabajaron sobre incorporación criterios cualitativos además de criterios cuantitativos para evaluar patrones de disposición de instalaciones (FLPs). Presentaron su metodología de toma de decisiones basada en un simple modelo de programación no lineal (NLP) y un proceso de jerarquía analítica (AHP). Utilizando una herramienta de planificación de diseño asistida por ordenador, Spiral, para generar los FLP, así como sus datos cuantitativos. El AHP se aplica entonces para determinar los pesos de los criterios cualitativos. Se propone un modelo de

NLP para resolver el FLD de modo que considere simultáneamente los datos cuantitativos y cualitativos (Hadi-Vencheha & Mohamadghasemi, 2013)

Tres investigadores de la universidad de Palermo se centran en la exploración eficiente de un amplio espacio de solución, preservando la viabilidad de las soluciones y garantizando la convergencia hacia lo óptimo, estos autores presentan un método para distribución de instalaciones de área desigual (UA-FLP), que utiliza un algoritmo genético multiobjetivo en combinación con la utilización del método “Electre”. Hasta la fecha, hay pocos enfoques FLP multiobjetivos, y la mayoría de ellos emplean técnicas de optimización simplificadas que influyen finalmente en la calidad de las soluciones obtenidas y en el rendimiento del procedimiento de optimización. En el primer paso, las soluciones óptimas de Pareto se determinan empleando el Algoritmo Genético Multi Objetivo (MOGA) implementando cuatro funciones de aptitud separadas dentro de un procedimiento evolutivo de Pareto, siguiendo la estructura general del algoritmo genético de clasificación no dominada (NRGA) y la posterior selección de la solución óptima se lleva a cabo mediante el procedimiento de toma de decisiones multicriterio Electre. Este procedimiento permite al encargado de la toma de decisiones expresar sus preferencias sobre la base del conocimiento del conjunto de soluciones candidato. Los objetivos cuantitativos y cualitativos se consideran referentes al esquema de representación del diagrama de árbol de corte. Los resultados numéricos obtenidos superan los enfoques anteriores referenciados, lo que confirma la eficacia del procedimiento propuesto. (Aiello, Scalia, & Enea, septiembre 2013)

Muther plantea con el método SLP (*Systematic Layout Planning*) en el año 1961, este método fue uno de los más relevantes, y de los que más se hace uso hoy en día, por tal motivo lo desarrollaremos a fondo en el apartado 0.



## Systematic Layout Planning ( SLP )

---

El procedimiento comúnmente más utilizado para diseñar distribuciones en planta es el SLP, del acrónimo inglés *systematic layout planning*, traducido al español como planificación sistemática de distribución desarrollado por Muther. (Muther, 1973)

El procedimiento es aplicable en diversos ámbitos tales como la producción, transporte, almacenamiento, servicios de apoyo, servicios sanitarios entre otros.

Seis tipos de datos son necesarios para esta metodología:

1. Producto: Materias primas, productos en curso y terminados, piezas adquiridas por terceros.
2. Cantidad: Cantidad de producto o material tratado durante el proceso.
3. Recorrido: Secuencia y orden de las operaciones que siguen los productos.
4. Servicios: Auxiliares de producción, servicios para el personal, etc.
5. Tiempo: Unidad de medida, para determinar las cantidades de productos.
6. Coste: Coste del desplazamiento

Los principales objetivos del SLP, al igual que cualquier otro método de distribución en planta son:

- Minimizar la inversión en equipos
- Minimizar el tiempo de producción general
- Utilizar el espacio existente de forma más eficiente
- Proporcionar a los empleados el conveniente confort y seguridad
- Mantener la flexibilidad de arreglo y operación
- Minimizar el coste de manejo de materiales
- Minimizar variaciones en los tipos de equipos de manejo de materiales
- Facilitar el proceso de fabricación

- Facilitar la estructura de la organización

## Fases del SLP

---

La metodología del SLP implica tres fases: búsqueda, análisis y selección o síntesis.

- Fase de análisis

Se realiza una actividad de recopilación de información, tras esta actividad se realiza una actividad de análisis de esta información para la obtención del diagrama de relaciones.

- Fase de búsqueda

Se deben combinar el diagrama de relaciones obtenido en la fase anterior con consideraciones de necesidades de espacio para la construcción del diagrama de relaciones de espacio. Basado en el diagrama de relaciones de espacio y teniendo en cuenta las modificaciones de las consideraciones iniciales y las limitaciones prácticas obtenemos un número de diseños de distribución en planta alternativos.

- Fase de selección o síntesis

En este paso se selecciona la distribución en planta más adecuada entre las distintas distribuciones alternativas.



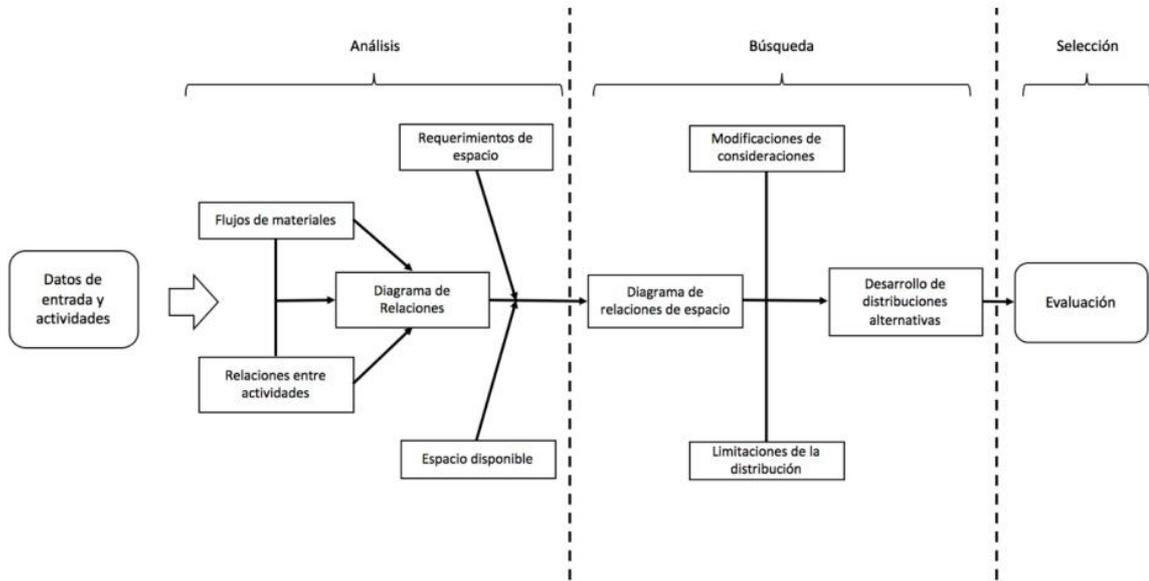


Figura 0-2 Diagrama proceso SLP

En la Figura 0-2 vemos de manera más ordenada las diferentes etapas. Los primeros 5 pasos del SLP implican el análisis del problema. Del paso 6 al 9, incluyendo la generación de distribuciones alternativas, constituye la fase de búsqueda en el proceso de diseño. En la fase de selección del diseño coincide con el paso 10 del SLP, en el que se evalúan las alternativas.

## Tipos de flujo

Para la metodología SLP podemos clasificar los flujos de materiales internamente en la distribución en dos tipos, horizontales y verticales.

Como vemos en la Figura 0-3 tenemos como mínimo cinco tipos básicos de flujo horizontal entre los que encontramos línea recta, en O, en S, en U o flujo circular.

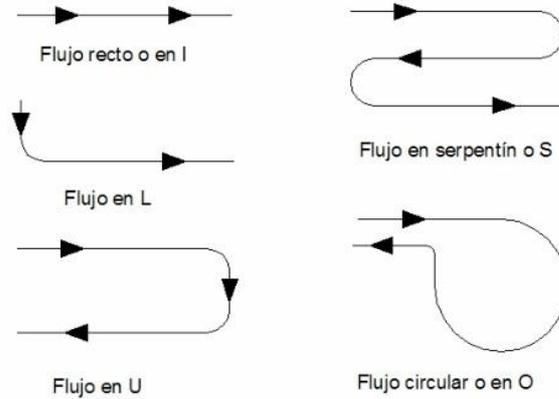


Figura 0-3 Tipos de flujo en planta

Otros tipos de flujos horizontales pueden ser desarrollados por la combinación de estos tipos básicos de flujo. El flujo en L es utilizado cuando el flujo recto no puede ser acomodado en la distribución existente o por motivos de costes. El flujo en U es muy popular porque permite administrar fácilmente las entradas y salidas de flujo. El flujo circular es aplicable cuando se desea que el flujo termine muy cerca del punto en que comienza el flujo. El flujo en serpentin es necesario cuando la línea de producción es tan larga que hace falta que esta haga zig-zag para caber en la planta.

Como vemos en la Figura 0-4 tenemos como mínimo seis tipos básicos de flujo vertical. El flujo vertical tipo (a) es normalmente utilizado cuando hay flujo entre edificios que tienen una elevada conexión. El tipo (b) es utilizado cuando las entradas y salidas tienen lugar en la misma planta. El tipo (c) cuando además de que las entradas y salidas tengan lugar en la misma planta del edificio, éstas tienen lugar en el mismo lado del edificio. El tipo (d) cuando existe un sistema de elevación de materias entre plantas centralizado. Cuando existan cintas transportadoras o elevadores inclinados se recurrirá a un flujo tipo (e). Cuando es necesaria la vuelta a la planta precedente de la materia se utiliza un flujo tipo (f).

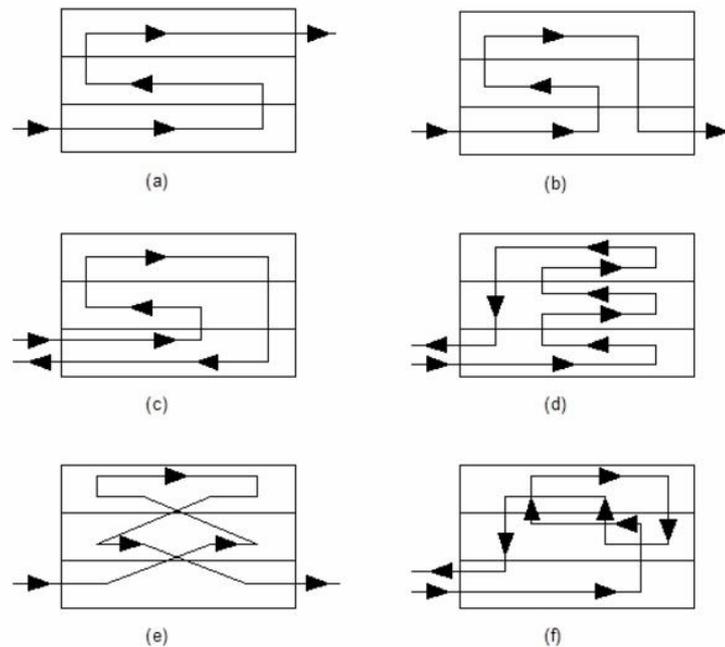


Figura 0-4 Tipos de flujo vertical

Los flujos verticales se utilizan en empresas con un solo edificio o en el caso de utilización de varios edificios pero en todo caso este tipo de flujos son utilizados normalmente en estructuras multiplanta.

## Relación entre actividades

---

Las distribuciones en planta precisan de una serie de restricciones de forma, por ejemplo la necesidad de cercanía entre departamentos o lejanía, no podemos poner la zona de fundición cerca de una zona de refrigeración por ejemplo. El análisis de flujos trata de relacionar varias actividades con unas bases cuantitativas dando pesos a las relaciones entre departamentos.

El gráfico de relación de actividades o *activity relationship chart*, ha sido diseñado

para facilitar la consideración de factores cualitativos. Desarrollado por Muther, el gráfico de relaciones reemplaza los números, o pesos, por ratios cualitativos de proximidad.

El significado de estas letras, en la Tabla 0.2, representa la importancia de cercanía entre secciones de la fábrica, desde absolutamente necesario hasta indeseable.

Ratio	Definición
A	Absolutamente necesario
E	Especialmente Importante
I	Importante
O	Normalmente proximidad OK
U	Sin importancia
X	Indeseable

Tabla 0.2 Leyenda relación entre actividades

Los ratios de proximidad representan un orden preferente de cercanía. Especialmente, el ratio A y el X son considerados los más importantes. Cualquier distribución debe satisfacer los ratios A y X. El ratio E es el segundo más importante, pero no todos los ratios E deben ser satisfechos por la distribución. El ratio I es el tercero en importancia, en la medida de lo posible este ratio debe ser satisfecho sin sacrificar los ratios A, X o E. En el mismo sentido el ratio O es el cuarto en importancia y sólo debe cumplirse si los ratios A, E, I y X no están en peligro. El ratio U es neutral, de aquí que pueda ser ignorado en el diseño de la distribución.

Cuando evaluamos la relación entre secciones para N actividades hay  $N \cdot (N - 1) / 2$  evaluaciones entre pares de actividades.

Como ejemplo ilustrativo, en la Figura 0-5 vemos que tenemos un total de 10 secciones en una fábrica cualquiera, por lo tanto  $N=10$ . El número de relaciones será:

$$\text{numero de relaciones} = \frac{N \cdot (N - 1)}{2} = \frac{10 \cdot (10 - 1)}{2} = 45$$

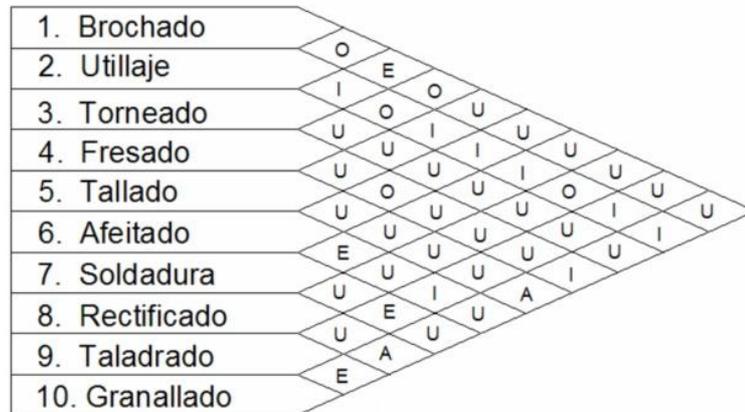


Figura 0-5 Gráfico de relación entre actividades

El proceso de desarrollo de las relaciones entre las actividades es bastante útil para generar una idea de las preferencias del *layout*, teniendo en cuenta las consideraciones del personal envuelto. Sin embargo, para ser más útil en el diseño de la distribución en planta, el ratio de proximidad debe reflejar un alto grado de discriminación. Como un ejemplo, muy pocas relaciones A y X deben ser asignadas. Como norma genérica no se permite más de un 5% de los ratios de proximidad A y X, no más de un 10% de E, no más de un 15% de I y no más de un 20% de O. Por lo tanto al menos un 50% de los ratios deben de ser U si seguimos esta regla.

Las distribuciones en planta se desarrollan generalmente usando un procedimiento jerárquico. Las distribuciones en planta se desarrollan primero determinando el tamaño, forma y disposición relativa de los departamentos u otras actividades. En el caso de una distribución en planta el gráfico de relación de actividades se construye como sigue:

- Crear una lista de todos los departamentos o actividades a incluir.
- Obtener los ratios de proximidad por entrevista de personas con experiencia o relacionada con cada una de las actividades.
- Determinar las razones usadas para la determinación de cada valor de los ratios de proximidad.
- Relacionar el valor de cada ratio con la razón de ese valor.
- Revisar el gráfico de relaciones y hacer los ajustes apropiados en los ratios.

## Diagrama de relaciones

El propósito del diagrama de relaciones es describir de manera gráfica lo anteriormente expuesto en el gráfico de relaciones, para expresarlo de una manera más visual y cómoda.

Este diagrama de relaciones une los nodos, o secciones, unos con otros con líneas. La unión de estos nodos se hace de acuerdo a esta tabla:

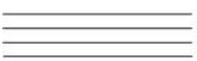
Leyenda		
	Ratio A	Absolutamente necesario
	Ratio E	Especialmente Importante
	Ratio I	Importante
	Ratio O	Normalmente proximidad OK
	Ratio U	Sin importancia
	Ratio X	Indeseable

Tabla 0.3 Leyenda de diagrama de relaciones

Siguiendo con el ejemplo anterior, con 10 secciones, para el diagrama de relaciones tenemos un total de 10 nodos, y teniendo en cuenta el gráfico de relaciones y aplicando la simbología de la Tabla 0.3. obtenemos el siguiente gráfico:



necesidades de espacio sino también la disponibilidad.

La tasa de producción es un factor a tener en cuenta a la hora del diseño de la distribución, y se determina trasladando previsiones de marketing al ámbito de las cantidades de producción requeridas. Y estas previsiones afectan a la distribución en planta de forma muy clara, en el sentido en que cuanto mayor sea la demanda prevista más número de máquinas deberán disponerse por cada sección, y también la variedad de productos prevista va a influir en la disposición de las máquinas para que la distribución sea más flexible, y también influirá en las especificaciones técnicas de las máquinas.

El Diagrama Relacional de Espacios es similar al Diagrama Relacional de Actividades presentado previamente, con la particularidad de que en este caso los símbolos distintivos de cada actividad son representados a escala, como apreciamos en la Figura 0-7, de forma que el tamaño que ocupa cada uno sea proporcional al área necesaria para el desarrollo de la actividad.

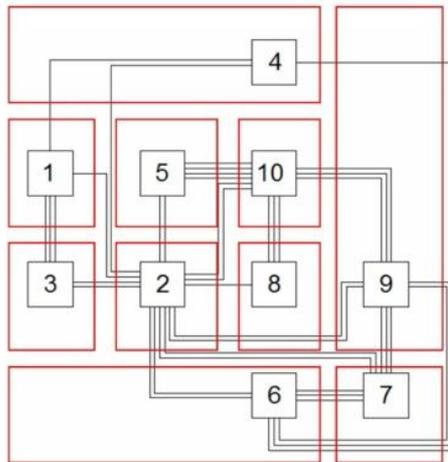


Figura 0-7 Gráfico de Necesidades de disponibilidad

Una vez se determinado cuantas máquinas se van a utilizar y el número de estas que va a gestionar cada sección, se puede determinar el espacio requerido por el equipamiento. Para la determinación de espacio existe varios métodos, los más relevantes son:

- Método del centro de producción.

Este método consiste en considerar las máquinas por tipos más todos los equipamientos asociados y todo el espacio requerido para sus operaciones. Al espacio de trabajo a los lados de la máquina se le suman además el espacio necesario para el mantenimiento y almacenamiento. El espacio total requerido es la multiplicación del número de máquinas similares por el espacio requerido de cada máquina.

- Método de conversión.

Utilizando este método, las necesidades de espacio de la distribución en planta objeto, son función de las necesidades de espacio que se tienen en la actualidad en una distribución en planta de base con una producción diferente.

Recordar que el total de espacio requerido no es una función lineal respecto a la producción. Simplemente porque la producción sea doble no necesariamente las necesidades de espacio son dobles. Este método es utilizado normalmente para determinar el espacio necesario en áreas de almacenamiento y departamentos de apoyo, donde el método del centro de producción es utilizado para determinar el espacio requerido para las áreas de producción.

- Método de plantillas

Método por el que las plantillas o modelos son colocadas en la distribución para obtener una estimación de la configuración general y de las exigencias espaciales.

- Método del espacio estándar.

En ciertos casos los estándares industriales pueden ser utilizados para determinar las necesidades de espacio. Además, los estándares pueden ser establecidos en pasadas aplicaciones exitosas. El uso de estándares semejantes sin una comprensión de sus asunciones subyacentes es peligroso. Semejantes estándares adoptados por otros pueden ser estrechamente estudiados y comparados con la presente distribución.

- Ratio de tendencia y método de proyección.

Este método está limitado a las necesidades generales de espacio. Es probablemente el menos exacto de los métodos presentados. Para usar este método, uno establece un ratio de pie cuadrado para algunos factores que pueden ser medidos y predichos para la distribución propuesta. Ejemplos de estos ratios son el pie cuadrado por hora directa

trabajada, pie cuadrado por unidad producida y pie cuadrado por supervisor.

## Diseño de la distribución

---

El siguiente paso una vez analizado el flujo de materiales y las relaciones entre actividades, determinado el diagrama de relaciones y las necesidades de espacio, hecho las asignaciones a actividades, se pueden diseñar las distribuciones alternativas.

En términos de las fases del proceso de diseño, se ha completado la primera fase de análisis, y ha comenzado la segunda fase o fase de búsqueda. El número de distribuciones alternativas deben ser diseñadas, basadas en el análisis de flujos, relaciones entre actividades y necesidades de espacio.

La consideración del diseño de la distribución del proceso incluye distintas fases

- El diseño del espacio del diagrama de relaciones
- Plano de bloques y distribución detallada
- Diseño de distribuciones flexibles
- Diseño de manejo de materiales
- Presentación del diseño de la distribución.

### 1.1.1.6 Diseño del Diagrama de Espacio de Relaciones

---

La distribución general es diseñada primero combinando las consideraciones de espacio con el diagrama de relaciones entre actividades. Manteniendo las mismas relaciones entre actividades que en el diagrama de relación entre actividades, el diagrama de relación de espacio se construye remplazando las unidades cuadradas por unidades a escala



representativas de la realidad.

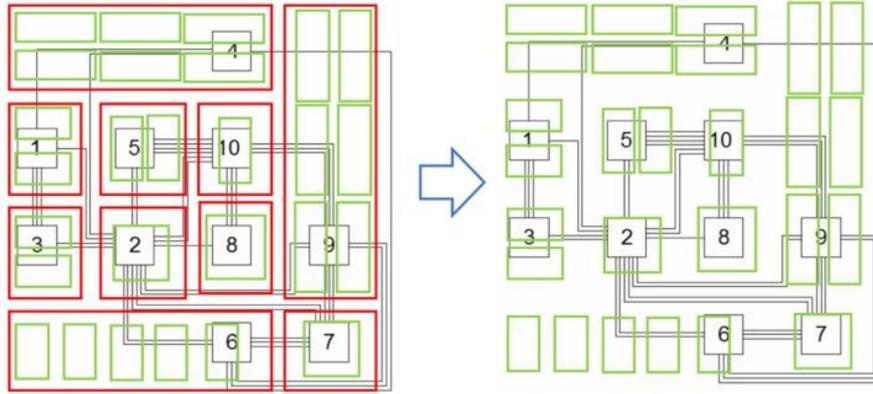


Figura 0-8 Diagrama de espacio de relaciones

Como vemos en el ejemplo, se sustituye las necesidades de espacio por el espacio real que ocuparían las máquinas, en color verde

### 1.1.1.7 Plano de Bloque y Distribución en Planta Detallada

---

Una vez construido el diagrama de relación de espacios, las plantillas de espacio son modificadas y ajustadas y las posiciones relativas de las actividades son cambiadas necesariamente para acomodar a las limitaciones prácticas y otras consideraciones. El plan de bloque resultante está entonces construido.

El plan de bloque es una representación escalada esquemática del edificio y normalmente muestra las posiciones internas y columnas. La distribución detallada de maquinaria y componentes está normalmente incluida en el plano de bloque.

Una vez que un número de planos de bloque han sido generados, el diseñador debe de elegir el plan de bloque antes de que se de el paso de la selección. También, la elección

depende de la situación y de la cultura de la organización. Si somos libres de elegir, se deben estrechar las alternativas del plan de bloques antes de obtener el plan de detalle final. Habrá al menos tantas alternativas de diseño de detalle de cada departamento como de bloques de plano. Si no se realiza la selección secuencial el número de alternativas será menor.

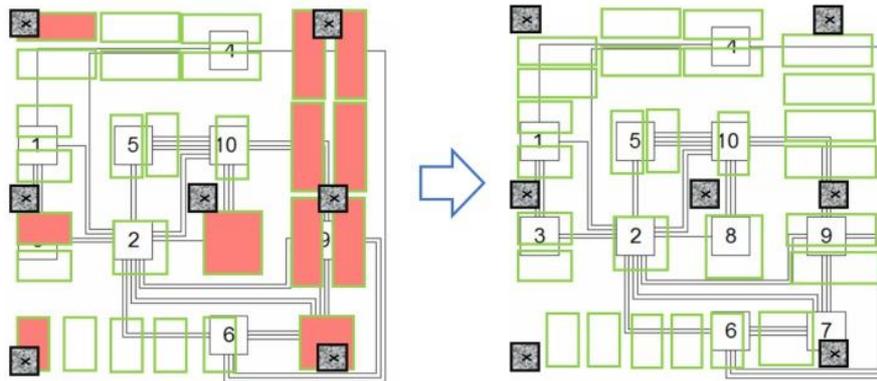


Figura 0-9 Ejemplo de plano de Bloque y distribución en planta detallada

Como apreciamos en el ejemplo de la figura, la asignación de diversas máquinas al espacio las hacía coincidir con columnas, lo cual ha desencadenado en una reubicación de las mismas.

### 1.1.1.8 Diseño de las distribuciones flexibles

En el diseño tanto de la distribución total como de la distribución parcial, debemos recordar considerar la posibilidad de futuras expansiones, futuras compresiones y otro tipo de modificaciones. Es importante que la distribución sea suficientemente importante para poder realizar cambios en el diseño del producto, diseño del proceso y diseño del programa. En general, los estudios de distribución resultan de los cambios que ocurren en los requisitos de espacio, equipos y gente. La mejor manera de alcanzar una distribución flexible es anticipar los cambios que pueden ocurrir.

Hay básicamente dos tipos de expansión: expansión en los tamaños de las actividades existentes e incremento del número de actividades realizadas.

### 1.1.1.9 Diseño del Sistema de Tratamiento de Materiales

---

Una distribución en planta detallada no debe ser diseñada sin tener en cuenta consideraciones de las necesidades del tratamiento de materiales. La elección del método de tratamiento y equipamiento es una parte integral del diseño de la distribución. Es extremadamente importante incorporar métodos de tratamientos de materiales efectivos en la distribución. El tratamiento de materiales implica, movimiento, almacenamiento y control del material. Un punto de vista de los sistemas de manejo de materiales sería el siguiente: *proporcionar la cantidad correcta de material en el lugar correcto, en el momento oportuno, en la secuencia correcta, en la posición correcta, en condiciones correctas, en la orientación correcta, con el coste correcto y usando el método correcto.*

El diseño de sistemas de manejos de materiales sigue básicamente la misma secuencia de pasos reseñados para el diseño de distribuciones en planta. Varias de las herramientas que hemos empleado en el análisis de problemas de distribución son normalmente utilizadas en el análisis de manejo de materiales. Algunas veces la fase de búsqueda del proceso de diseño requiere un gran grado de familiaridad con los tipos, capacidades, limitaciones, y costes de los equipos de manejo de materiales.

Para objetivos de diseño de distribuciones es importante que el sistema de manejo de materiales sea diseñado en paralelo con la distribución.

### 1.1.1.10 Presentación del diseño de la distribución

---

Una vez generado un número de diseños alternativos hay que presentarlos, es decir, esquematizarlos de manera gráfica.

Básicamente, hay tres métodos de visualizar la representación de distribuciones:

- Dibujos o bosquejos.
- Modelos por iconos en dos dimensiones
- Modelos por iconos en tres dimensiones.

Los dibujos y bosquejos tienen la ventaja de ser fáciles de realizar. La mayor desventaja de los dibujos manuales es su falta de flexibilidad. Si hay un cambio en el diseño toda la distribución debe ser redibujada. Cuando probablemente va a haber cambios es recomendable la utilización de ordenadores. Así la modificación de la distribución sólo implicaría la modificación de un archivo informático y su posterior impresión.

Los modelos por iconos en dos dimensiones, normalmente llamadas plantillas, son el método más común de presentación de diseños de distribución en planta. Sin embargo, tanto con los dibujos y modelos como con las plantillas los sistemas de representación gráfica CAD tienen una gran importancia. Las plantillas pueden ser creadas para representar máquinas individuales, puestos de trabajo individuales, grupos de máquinas, e incluso departamentos. Cuando las plantillas necesarias han sido creadas y almacenadas en el ordenador, el diseñador de la distribución puede crear varias alternativas rápidamente usando los sistemas CAD.

Los modelos en tres dimensiones a escala pueden también ser creados físicamente o por medio de un ordenador mediante software de modelado 3D tal como *Adobe Illustrator* o *3dMAX*.



## Selección, Especificación, Implementación y Seguimiento

---

Ahora que los diseños de distribución alternativos han sido preparados, hay que decidir que distribución cumple mejor los requisitos, en estos requisitos normalmente está la minimización de costes, lo que conlleva una disminución de distancias entre departamentos.

Si los costes suponen una importante consideración en la evaluación de distribuciones alternativas, es necesario que los costes más importantes sean cuantificados. Esto no es fácil por muchas razones. Primero, interesan los costes incrementales en lugar de costes estándar. Segundo, interesan los costes futuros en lugar de costes pasados o presentes. Además, en el caso de una nueva distribución no se tiene ninguna experiencia previa en la que podemos basar nuestras estimaciones de costes futuros.

Muchas veces los costes no son la consideración más importante en la evaluación del diseño de la distribución. Normalmente, un número de distribuciones alternativas van a tener aproximadamente el mismo coste, y otras consideraciones se usan en la elección del diseño descritas en los objetivos del punto 0.

Aunque en la fase de diseño ya se han discutido los pasos del desarrollo, es necesario tener en cuenta otro factor. El factor aceptación por parte del equipo de la empresa, hay que explicar las ventajas del cambio y saber venderlo para su aceptación.

Asumiendo que la distribución ha sido aceptada por las personas apropiadas de la organización, debe ser instalada. Cuando se instala la distribución es importante recordar que una considerable cantidad de planificación debe preceder a la instalación de equipos y acondicionamiento de locales. Una vez que se hacen los planos todas las actividades deben ser programadas. La instalación de la distribución puede involucrar gran número de actividades, y un modelo de programación de proyectos como el método del camino crítico Pert-CPM, puede ser bastante útil. Una vez que la distribución ha sido instalada, debe de realizarse un seguimiento para comprobar que se cumplen los requisitos de diseño, y corroborar su eficiencia.

## Algoritmo CRAFT

---

El programa informático conocido como CRAFT del acrónimo *Computerized relatives allocation of facilities techniques*, se basa en un algoritmo de mejora para minimizar el coste de los desplazamientos internos del material, ítems o personas. (Salas Morera, Cubero Atienza, Hervás Martínez, Pérez Alcántara, & Sanz Tapia, 2007)

Cierta información es necesaria para describir el problema de distribución de planta:

- Número de departamentos,  $n$
- Áreas físicas de cada departamento,  $A_i$  para  $i=1\dots n$
- Dimensiones físicas de la planta en la cual los departamentos serán ubicados: longitud,  $L(x)$  y ancho  $W(y)$ .
- Flujo de productos entre cada par de departamentos:  $f_{ij}$  para  $i=1\dots n$  y  $j=1\dots n$
- Costo del manejo de material entre cada par de departamentos medidas en dólares/pie:  $c_{ij}$
- para  $i=1\dots n$  y  $j=1\dots n$
- La distancia de un departamento a otro:  $d_{ij}$

Teniendo en cuenta como coste de transporte la siguiente ecuación:

$$\text{Coste de transporte} = \text{flujo} \cdot \text{distancia} \cdot \text{unidad de coste}$$

*Ecuación 0.1*

Este método utiliza una formulación de distribución por criterios cuantitativos y puede resolver problemas de hasta 40 departamentos o centros de actividad.

Al ser un algoritmo de mejora, se parte de una solución inicial, la cual se va mejorando. El algoritmo asume que el coste de desplazamiento es independiente de la utilización del equipamiento y que el coste de desplazamiento es lineal en relación a la longitud de desplazamiento, no siendo así en la realidad.



Las distancias consideradas entre las áreas son siempre las distancias rectilíneas que unen los centroides de los departamentos, entendiendo como centroide geométrico el centro de simetría.

Para cualquier otro objeto de forma irregular de dos dimensiones, el centroide es el punto donde un soporte simple puede equilibrar este objeto. Por lo general, el centroide de un objeto bidimensional o tridimensional se encuentra utilizando integrales dobles o triples.

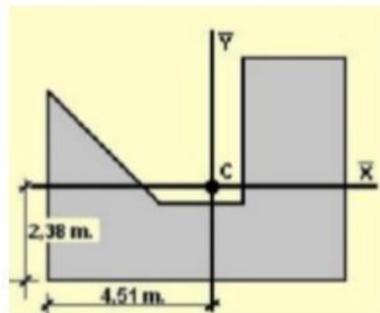


Figura 0-10 Cálculo del centroide de una localización

Procedimiento de la resolución de distribución en planta mediante CRAFT:

- Determinar el centroide de cada uno de los departamentos en la distribución de partida.
- Calcular distancias rectilíneas entre centroides.
- Calcular el coste de transporte de la distribución.
- Considerar los intercambios entre los departamentos fronterizos o aquellos de igual dimensión.
- Determinar el coste de transporte para cada intercambio interdepartamental.
- Seleccionar y llevar a cabo el cambio de posición de los departamentos que proporcionan las mayores reducciones en coste de transporte.
- Repetir el proceso para cada nueva distribución obtenida hasta que el cambio de la posición de los departamentos no implique una reducción en el coste de transporte.

Consideraciones

- Solo se consideran los intercambios posibles entre los departamentos del mismo tamaño o entre los departamentos que son adyacentes.

- Los departamentos de desigual tamaño que no sean adyacentes no son considerados para el intercambio.
- Selecciona el mejor de todos los posibles intercambios.
- Puede no obtenerse una reducción de costes tras la realización de un intercambio.
- La hipótesis de los centroides puede dar lugar a extrañas formas de departamentos y a inaceptables distribuciones en planta, pero de bajo coste.
- El algoritmo permite fijar departamentos y departamentos comodín. Estos departamentos pueden ser usados para rellenar irregularidades del edificio, representar obstáculos o áreas no utilizables, representar espacio extra y añadir localizaciones aisladas para evaluación en la distribución final.

Como ejemplo ilustrativo imaginemos una asignación de 10 departamentos a 10 zonas colocadas de la siguiente manera.

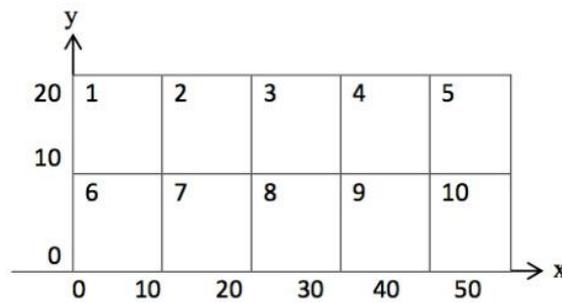


Figura 0-11 Distribución de las localizaciones en planta

Vemos que el área a colocar los departamentos es de 1000 m<sup>2</sup>, de 20·50. A continuación nos fijamos en la tabla de flujos de intercambio de ítems entre departamentos y de la matriz distancias entre las zonas.



	A									
De	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
A					5				1	9
B				3	4		1			
C				1			9			2
D							6		1	
E						8	3			
F							2	5		
G								6		
H									8	
I										
J										

Figura 0-12 Matriz de flujos entre los 10 departamentos

La matriz distancias entre zonas es sencilla ya que únicamente debemos calcular la distancia entre los centros de masas y en este caso son cuadrados, y hacemos cálculo de distancias con la metodología Manhattan, capítulo 0, es decir, yendo por los catetos no por la hipotenusa.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	0	10	20	30	40	10	20	30	40	50
2		0	10	20	30	40	10	20	30	40
3			0	10	20	30	20	10	20	30
4				0	10	20	30	20	10	20
5					0	10	20	30	20	10
6						0	10	20	30	20
7							0	10	20	30
8								0	10	20
9									0	10
10										0

Figura 0-13 Distancias Manhattan de las localizaciones

Teniendo esto construimos la matriz distancia flujo y calculamos los costes con la Ecuación 0.1. Suponiendo un primer caso con la distribución A,B,C...I,J obtenemos:

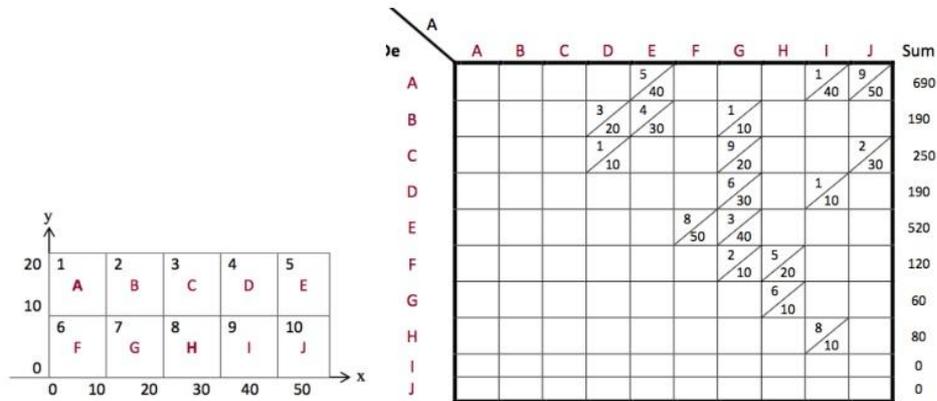


Figura 0-14 Resultado ejemplo propuesto

A partir de esta primera solución, iríamos realizando intercambios entre zonas y en el caso de minimizar el coste nos quedaríamos con esa solución así hasta llegar a un óptimo.

Es un método bastante tedioso ya que tenemos un total de  $n!$  soluciones analizables lo que en nuestro caso quiere decir que tenemos  $10! = 3.628.800$  posibles soluciones.

Mejoras de CRAFT son CRAFT-3D o el SPACECRAFT de Cinar, 1975 y Johnson, 1982 respectivamente, en las que se aborda el problema de la distribución tridimensional de las instalaciones a partir de la filosofía general de CRAFT.

## Algoritmo ALDEP

El método ALDEP procedente del acrónimo *Automated Layout Design Program* traducido al español como Programa de diseño de la distribución automatizado. Fue desarrollado por la empresa IBM en el año 1967 y fue originalmente descrito por Seehof y Evans. Anteriormente se desarrolló programa ALDBP solamente maneja problemas de distribución con criterios cualitativos (Rodríguez, 2012).



Los datos para ALDEP incluyen una matriz de relaciones y limitaciones como tamaño del edificio, ubicaciones fijas para departamentos, escaleras, etc. El programa ALDEP comienza por seleccionar al azar un departamento y lo coloca en el plan de distribución. En el segundo plan se revisan todos los departamentos restantes y solamente se selecciona al azar uno que tenga una calificación de relación de alta cercanía y se coloca en la distribución cerca del primer departamento. Si no puede encontrar una calificación de alta cercanía, se selecciona un departamento al azar y se coloca en la distribución, a continuación del anterior.

Este proceso de selección continúa hasta que se han colocado todos los departamentos en el plan de distribución. Se calcula entonces una calificación total para el diagrama mediante la conversión de cada relación de cercanía a una escala numérica y sumando los valores de estas relaciones en el plan de distribución. Se repite varias veces todo el proceso y como primer paso en cada ocasión se comienza con un departamento diferente que es seleccionado al azar. Cada interacción da como resultado la generación de un plan de distribución alternativo (Deshpande, Patil, Baviskar, & Gandhi, 2016).

El programa ALDEP es útil para generar un gran número de buenas distribuciones para su revisión. El programa puede controlarse para que solamente se impriman las distribuciones que tengan una calificación especificada o mayor a ésta. Esta tiene el efecto de reducir el número de diagramas que se tienen que revisar. Aunque ALDEP es un programa heurístico útil para generar buenos diseños, sólo produce soluciones óptimas por accidente.

ALDEP ahorra mucho del trabajo tedioso que implica la distribución, sin embargo, aún se requiere un juicio para llegar a la solución final. El programa ALDEP está diseñado para manejar hasta un máximo 63 departamentos y un edificio de 3 pisos.

Su principal característica es que la gama de soluciones consideradas, empeora a lo largo del desarrollo del algoritmo, lo que posiblemente le impide acercarse al óptimo. Las soluciones obtenidas son susceptibles de ser llevadas a la práctica.

Una de sus limitaciones es que la solución obtenida depende de la actividad que se coloca primero, por lo que se debe probar con varias opciones distintas.

## Procedimiento ALDEP

---

Es un procedimiento constructivo que calcula el ratio total de proximidad (TCR del inglés *total closeness rating*) para cada departamento. El TCR es la suma de valores numéricos asignados a las relaciones de proximidad en el gráfico de relaciones, por medio de los coeficientes A, E, I, O, U, X, ”, al igual que en el método de Systematic Layout planning en el capítulo 0. Estos pesos numéricos son llamados *Closeness Rating* (CR) “Necesidades de proximidad”, que vemos en la Tabla 0.1.

Los pasos para la selección de los departamentos:

1. Selección de la primera actividad entrante, de forma aleatoria.
2. La segunda actividad entrante es aquella que tiene un mayor TCR con la actividad elegida anteriormente. En caso de no haber ninguna relacionada, se escoge una aleatoriamente, que se ubica siguiendo un orden de avance establecido y con el ancho de banda del punto anterior.

Se repiten los pasos anteriores hasta que todos los departamentos son seleccionados.

Procedimiento de emplazamiento o localización de los departamentos:

1. Colocar el primer departamento en la esquina superior izquierda y extenderla hacia abajo. La anchura de la extensión está determinada por la anchura disponible.
2. El siguiente departamento comienza donde el anterior finaliza disponiéndose los departamentos en forma de serpentin como se muestra en la Figura 0-15.



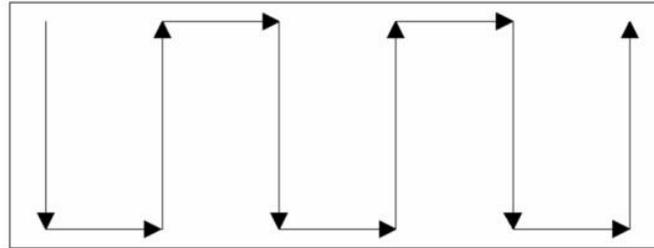


Figura 0-15 Diagrama ubicación método ALDEP

Puede acomodarse a una variedad de formas de edificios e irregularidades.

Los ratios utilizados por ALDEP para la determinación de la cantidad de adyacencia entre los departamentos suelen tomar los valores:

$$A=64; E=16; I=4; O=1; U=0; X=-1024$$

Tabla 0.4 Pesos numéricos

## Algoritmo CORELAP

---

Desarrollado por Lee y Moore en 1967. CORELAP es una metodología basada en la aplicación del Diagrama de Relaciones en un software, de ahí proviene su nombre *Computer Relationship Program*.

Usa la tabla de relaciones entre departamentos como entrada, el usuario es quien asigna los pesos para cada una de las relaciones. La distribución se construye mediante el cálculo del Ratio total de proximidad (TCR) para cada departamento.

Esta técnica también puede ser utilizada en forma manual partiendo del Diagrama de Relaciones para luego catalogar cada departamento de acuerdo a su puntaje de relaciones.

---

El valor del TCR es la suma de los valores numéricos asignados a las relaciones en el gráfico de relaciones. Los valores que toman normalmente las constantes para la determinación del TCR suelen ser:

$$A=6; E=5; I=4; O=3; U=2; X=1$$

Esta herramienta no requiere una formulación matemática compleja, se inicia con el Diagrama de relaciones de SPL, *single layout planning*, del que luego en el apartado 0 más atrás hablaremos. Luego analizamos del grado de importancia de la relación entre departamentos, por el modelo TCR (Total Closeness Relationship). Comienza introduciendo en el centro el departamento con valor TCR más alto y va asignando valores de cercanía a los espacios ubicados a su alrededor.

1. Proceso de selección de los departamentos:
  1. Seleccionar el departamento con el mayor TCR.
  2. En caso de empate en el valor de TCR se tomará el departamento con la mayor área de departamento
  3. Paso iterativo
    - i. Se selecciona el departamento con el mayor ratio de proximidad con los ya colocados.
    - ii. Ver casos de empate.
2. Proceso de colocación:
  1. El primer departamento se sitúa en el centro.
  2. Para los siguientes departamentos en ser colocados:
    - i. Se evalúan todas las posibles situaciones.
    - ii. Para cada combinación se calcula
      - i. Ratio de colocación usando el CR y la longitud de borde (se computa un promedio de ambos valores como ratio).
      - ii. Se escoge el ratio de colocación más alto.
      - iii. Se rompen los empates por el menor contacto de borde.

CORELAP se puede utilizar para diseñar, o analizar, una distribución física sin importar el número de departamentos que tiene la planta. Permite incluir variables subjetivas en el momento de desarrollar el diagrama de relaciones, permitiendo incluir valores de cercanía que no están numéricamente reflejados en la Carta *From-To*. Esta herramienta no



asegura encontrar la mínima distancia recorrida ya que simplemente va colocando un departamento al lado de otro de acuerdo al grado de relación que tienen (Handling, 2003).

Por las características presentadas, CORELAP no asegura encontrar una solución con distancia mínima recorrida y tampoco permite encontrar alternativas para estudio ya que su aplicación es limitada a una sola respuesta.

Este programa parte de una distribución previa que ha de tomarse como punto de partida y supone que el costo de las interrelaciones entre operaciones o departamentos es producto de las matrices de distancia e intensidades de tráfico, que son los *inputs* del problema. Tras calcular el costo que genera la distribución inicial, intercambia los departamentos de dos en dos (versiones más avanzadas lo hacen de tres en tres), evaluando el costo de cada cambio y adoptando de entre todos, aquél con menor costo, aplicándoles a éste el mismo proceso. Cuando el costo no puede ser disminuido o se ha alcanzado un total de iteraciones específicas, la mejor ordenación conseguida se imprime como solución.

La evaluación del *layout* propuesto por el procedimiento se realizará mediante puntuación basada en la adyacencia. El índice de esta evaluación es el sumatorio de las adyacencias producidas por el valor de su CR.

# ALGORITMO DE GREEDY

## APLICADO A PROBLEMA FPL

---

Los algoritmos tipo *greedy*, también conocidos por algoritmos voraces, se utilizan habitualmente en problemas de optimización, como el que vamos a estudiar. La solución se va construyendo en etapas. En cada una de estas etapas se añade un nuevo elemento a la solución parcial, el que nos parece el mejor candidato en ese momento

El término voracidad hace referencia a que se consume el mejor elemento lo antes posible sin pensar en futuras consecuencias, por lo que diremos que un algoritmo es *greedy* cuando en cada paso, elige la ‘mejor’ solución local.

## Explicación del Algoritmo Greedy

---

Para resolver la problemática que plantean los problemas FPL, *facility Layout planning* o *Factory Layout planning*, hemos desarrollado una metodología aplicando un algoritmo tipo *greedy*. En esta metodología aplicamos el principio de avaricia que caracteriza a estos algoritmos, seleccionando la mejor localización para cada departamento.

Un ejemplo claro de esta metodología es el problema de cambio de moneda, donde se comienza dando la de mayor peso y se va disminuyendo. En este ejemplo queremos dar 36 céntimos en monedas.

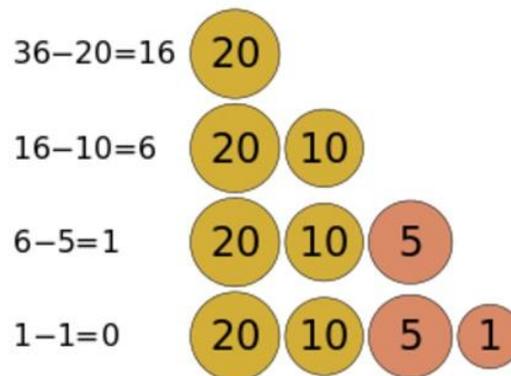


Figura 0-1 problema cambio de moneda

Utilizaremos un algoritmo de *greedy* cuando un problema exhibe la propiedad ‘optimal-substructure’. Es decir, que toda solución óptima a un problema puede ser construida considerando soluciones óptimas de los subproblemas, en nuestro caso cada subproblema es asignar la mejor localización, es decir, la de menor coste, al departamento que tenga mayor repercusión en el futuro, es decir, el más caro.

De una manera más detallada, vamos a ver los pasos que da el software, desarrollado en el anexo 0, para seleccionar la distribución de menor coste.

---

1. Evaluar el coste de las relaciones entre departamentos por unidad de distancia
2. Seleccionar dos departamentos con máximo coste de relación entre sí
3. Asignar posiciones cercanas entre si a esos dos departamentos
  - A. Evaluar costes de relación entre departamentos asignados y no asignados para cada posición
  - B. Seleccionar la localización de mínimo coste para cada departamento
  - C. Asignar el departamento a la localización con máximo coste de la lista anterior
    - Volver al paso A hasta que todos los departamentos estén asignados a las localizaciones
    - Volver al paso 3 cambiando las localizaciones de los dos primeros

*Figura 0-2 Procedimiento algoritmo greedy*



## Formulación del problema

---

Imaginemos la construcción de una silla de madera. A continuación queremos analizar lo que nos ha costado la producción de ella. Estos costes engloban desde que se adquiere la materia prima, en este caso imaginemos que la compramos a un proveedor y no somos los encargados de producirla para simplificar el sistema, hasta que el consumidor final la adquiere. El coste total de la producción de esta silla sería un sumatorio de costes donde entran los costes de transporte internos en la planta donde se fabrique, además de coste de materia prima, costes de electricidad, costes diseño y así una larga lista de costes. Nuestro problema consiste en minimizar los costes de transporte internamente en la producción de la fábrica, consiguiendo así una fabricación más económica y eficiente.

El habitual problema de distribución en planta, FLP, consiste como hemos descrito en el capítulo 1, en la colocación de  $N$  departamentos de áreas establecidas en una planta industrial de tamaño  $W \times H$ , la misma que debe dividirse en  $q$  localizaciones, donde el número de departamentos ha de ser menor o igual que el número de localizaciones y sin ninguna limitación para ubicar las instalaciones.

Los datos de entrada a nuestro problema serían los costes de transporte, codificados como  $C_{ij}$ , lo que indica el coste de transporte desde la localización  $i$  hasta la localización  $j$  de la instalación, estos costos habitualmente se suelen considerar constantes en función de la distancia a recorrer pero la realidad no es así, ya que no es lo mismo transportar una silla que un sofá por ejemplo. Otro dato de entrada sería la distancia entre localizaciones  $D_{ij}$  lo que indica la distancia desde la localización  $i$  hasta la localización  $j$  de la instalación, para nuestro problema determinaremos esta distancia a partir de la distancia Manhattan que posteriormente describiremos como se calcula. Y por último una matriz con los productos a fabricar, cada uno de estos productos con una ruta de fabricación, la cual implica el uso de las diferentes máquinas que disponemos.

El objetivo de nuestro problema, como en la mayoría de problemas de distribución en planta FLP, es minimizar la función de costes de desplazamientos internos, que es nuestra función objetivo. Definiremos esta función objetivo como:

$$C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N F_{ij} \cdot C_{ij} \cdot D_{ij}$$

El Problema de Distribución de Planta puede modelarse como un Problema de Asignación Cuadrática (QAP) y si es así pertenece a la clase de los problemas NP-hard, descritos en el capítulo 0.

## Ejecución

---

A modo de ejemplo supongamos una fábrica con 9 localizaciones, distribuidas en una regilla tal y como apreciamos en la imagen, a las que le asignamos 9 zonas de trabajo.

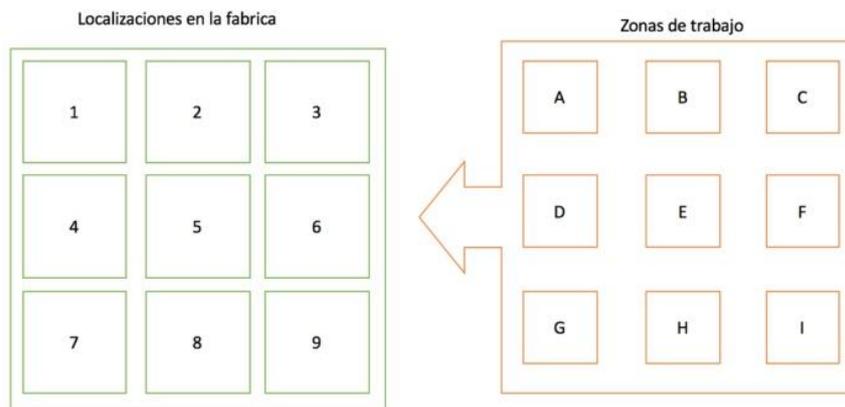


Figura 0-3 Gráfico de localizaciones y zonas de trabajo o departamentos

En esta fábrica que hemos planteado se fabrican 5 productos diferentes, cada producto con una ruta de fabricación diferente, es decir, implicando diferentes máquinas y una cantidad a producir diferente. Como cada producto tiene una envergadura diferente, suponemos costes de transportes diferentes para cada producto.

PRODUCTO	RUTA DE FABRICACIÓN							COSTE DESPLAZAMIENTO	CANTIDAD
1	A	C	B	A	E	G		2	100
2	B	C	E	D	G			1	200
3	C	A	G	H	I	F	E	2	400
4	A	B	D	E				2	200
5	D	A	B	C	A			1	150

Tabla 0.1 Datos de entrada de la producción de la fábrica

$$\text{Coste de desplazamiento} = \frac{\text{Unidades monetarias}}{\text{Unidad producto} \cdot \text{metro}}$$

A continuación calculamos la relación coste de relaciones entre departamentos, esto lo hacemos para todas las relaciones entre departamentos. El coste será el resultado de multiplicar el flujo entre cada departamento por el coste del desplazamiento.

Por ejemplo, la relación A-C implica al producto 1 y también al producto 3 y 5 ya que son recíprocas A-C y C-A. Por lo tanto el coste para relación A-C es:

$$A-C = 2 \cdot 100 + 2 \cdot 400 + 1 \cdot 150 = 1.150 \text{ €}$$

Siguiendo el ejemplo construimos la tabla de los costes de relaciones, que posteriormente multiplicaremos por la distancia entre departamentos.

		HACIA								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
DESDE	A	0	750	1150	150	200	0	800	0	0
	B		0	550	400	0	0	0	0	0
	C			0	0	200	0	0	0	0
	D				0	600	0	200	0	0
	E					0	800	200	0	0
	F						0	0	0	800
	G							0	800	0
	H								0	800
	I									0

Tabla 0.2 Matriz de coste de relaciones entre departamentos

Una vez obtenida esta tabla, es hora de calcular la localización de los departamentos en la fábrica. A modo de ejemplo supongamos una distribución como la planteada en la imagen

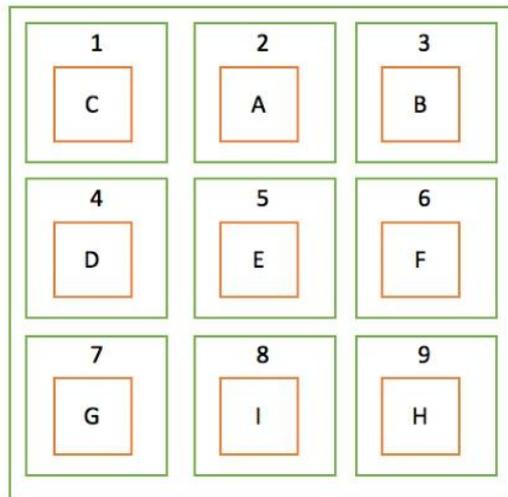


Figura 0-4 Primera asignación aleatoria del problema

A partir de esta distribución calculamos las correspondientes distancias Manhattan como hemos explicado en el capítulo 0.

		HACIA								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
DESDE	A	0	1	1	2	1	2	3	3	2
	B	1	0	2	3	2	1	4	2	3
	C	1	2	0	1	2	3	2	4	3
	D	2	3	1	0	1	2	1	3	2
	E	1	2	2	1	0	1	2	2	1
	F	2	1	3	2	1	0	3	1	2
	G	3	4	2	1	2	3	0	2	1
	H	3	2	4	3	2	1	2	0	1
	I	2	3	3	2	1	2	1	1	0

Tabla 0.3 Matriz de distancias Manhattan entre departamentos

Como vemos la matriz es simétrica, ya que es la misma distancia ir de A-C que de C-A. Ahora multiplicamos las dos matrices, distancias y costes de relación entre departamentos.

Obteniendo la siguiente matriz

		HACIA								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
DESDE	A	0	750	1150	300	200	0	2400	0	0
	B		0	1100	1200	0	0	0	0	0
	C			0	0	400	0	0	0	0
	D				0	600	0	200	0	0
	E					0	800	400	0	0
	F						0	0	0	1600
	G							0	1600	0
	H								0	800
	I									0

Tabla 0.4 Matriz de costes ( Distancia entre departamentos · coste de relación entre departamentos )

Lo que da un coste total de = 13.500 € / metro.

Ya solo quedaría multiplicarlo por la por la distancia entre los centroides de los departamentos, en este caso 7 metros. 94.500 €

Todo este problema lo podemos resolver mediante el Software que he desarrollado en el Anexo 0, donde el usuario selecciona las localizaciones del problema.

Los datos de entrada en este software son:

- N\_FILAS donde definimos el número de filas
- N\_COLUMNAS donde definimos el número de columnas
- N\_DEPART donde definimos el número de departamentos ( estos pueden ser igual o menor que el resultado del producto de Filas·Columnas )
- N\_PRODUCTOS donde definimos el número Productos a fabricar
- RUTA\_P\_LARGO donde definimos la el número maximo de máquinas por el que pasan los productos
- ruta\_p[N\_PRODUCTOS][RUTA\_P\_LARGO la ruta que sigue cada producto
- flujos\_p[N\_PRODUCTOS] donde definimos la cantidad a fabricar
- costo\_u\_p[N\_PRODUCTOS] donde definimos el coste de transporte por unidad de distancia de cada producto
- asignar[N\_FILAS][N\_COLUMNAS] donde asignamos cada departamento a una localización

Con todos estos datos, el programa calcula el coste que implica la distribución seleccionada.

## Criterio de asignación mediante Greedy

---

Continuando con el problema anterior, y con los mismos datos de entrada, usaremos



## REVISIÓN DE MÉTODOS DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

el algoritmo de tipo *greedy* para asignar de manera óptima departamentos no asignados a localizaciones libres.

Comenzamos con una primera asignación de dos departamentos, a dos localizaciones cercanas entre sí, estos serán los de mayor coste de relación entre sí, en nuestro caso A-C a las localizaciones 1 - 2.

		HACIA								
		A	B	C	D	E	F	G	H	I
DESDE	A	0	750	1150	150	200	0	800	0	0
	B		0	550	400	0	0	0	0	0
	C			0	0	200	0	0	0	0
	D				0	600	0	200	0	0
	E					0	800	200	0	0
	F						0	0	0	800
	G							0	800	0
	H								0	800
	I									0

Tabla 0.5 Matriz de costes de relación entre departamentos, con máximo

Por lo tanto tendremos un conjunto de Departamentos asignados y no asignados, DA y DN, y a su vez un conjunto LA y LN localizaciones libres y localizaciones ocupadas. De manera más esquemática lo vemos en la imagen.

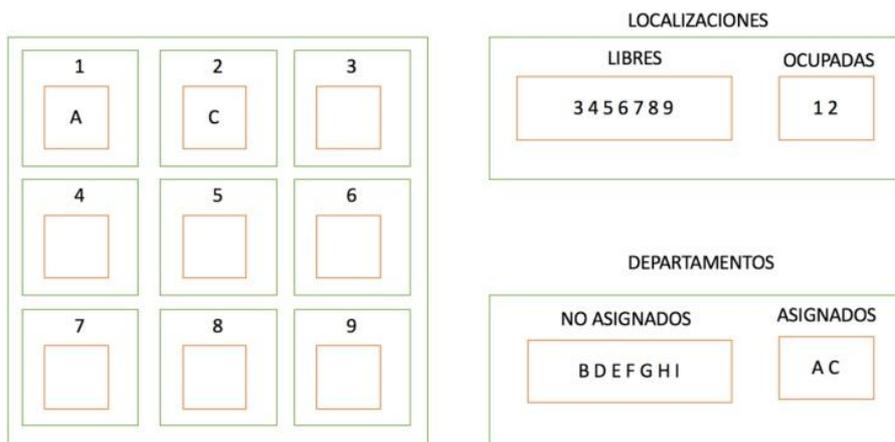


Figura 0-5 Gráfico inicial de asignación de localizaciones a departamentos

Ahora vamos a analizar el impacto de situar un departamento no asignado en una localización libre. Escogemos un departamento  $i$ , perteneciente al grupo de departamentos no asignados, y  $p$  como la localización libre. Este impacto lo calculamos como:

$$g(i, p) = \sum_{j \in DM} \text{Coste } ij \cdot \text{Distancia } (p, x_j)$$

Con esto, vamos a calcular el mejor departamento y su mejor localización. Para ello nos quedamos con la localización de mínimo coste para cada departamento.

$$g(i, p_i) = \text{Min}\{g(i, p)\}$$

A continuación de esto tendremos una lista con los departamentos no asignados, sus correspondientes localizaciones con coste mínimo. Por otra parte, el mejor departamento del conjunto respecto al coste total, en relación con los departamentos ya asignados es tal que el coste máximo ya que si se deja el departamento para la última localización, entonces es posible aumentar considerablemente el valor de la función objetivo, porque la distancia entre este departamento y los departamentos asignados es más probable que aumente considerablemente. Teniendo en cuenta lo anterior asignamos el departamento con mayor coste.

$$g(b, p) = \text{Max}\{g(i, p_i)\}$$

En nuestro caso, el departamento B a la posición 4



DEPARTAMENTO NO ASIGNADO	POSICION	COSTE MIN
B	4	1850
D	4	150
E	3	600
F	3	0
G	4	800
H	3	0
I	3	0

Tabla 0.6 Tabla resultado de mínimos costes para cada departamento

Nuestro problema continuaría teniendo ahora tres departamentos asignados a tres localizaciones y seis departamentos no asignados con 6 localizaciones libres.

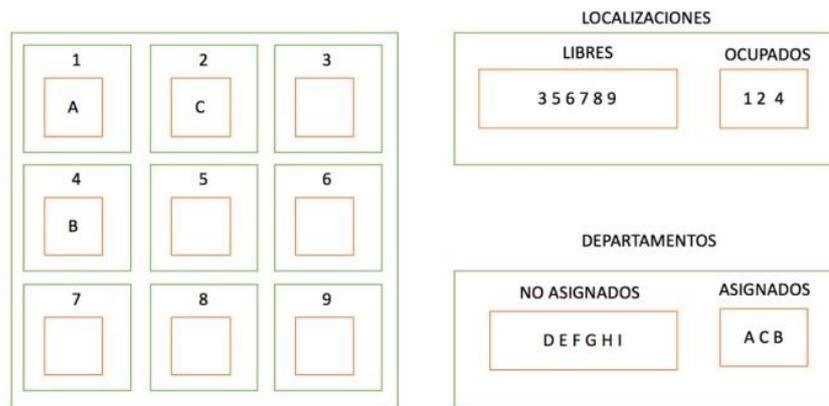


Figura 0-6 Gráfico de asignación tras primera iteración de localizaciones a departamentos

Continuaríamos iterando hasta que queden todos los departamentos asignados a localizaciones libres, obteniendo una asignación mediante este algoritmo y poder así calcular el coste final.

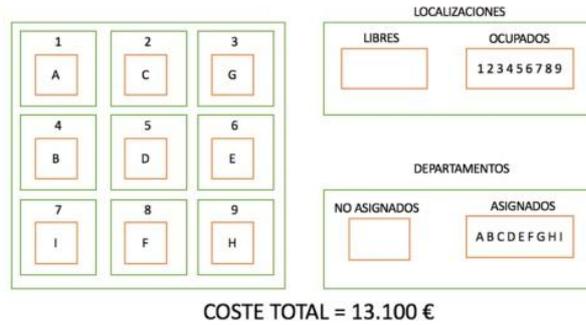


Figura 0-7 Gráfico final de asignación de localizaciones a departamentos

Este resultado sería para la asignación de A-C en las posiciones 1-2, pero tenemos más soluciones de este problema por ejemplo colocando A-C en las posiciones 2-3, o también 4-5.

Mediante este algoritmo se da el conocido efecto espejo. Es decir, que el resultado de asignar A-C a las posiciones 1-2 es el mismo que el de asignarlo a las posiciones 7-8, 9-8 y 3-2.

Por lo que finalmente tendremos los siguientes resultados:

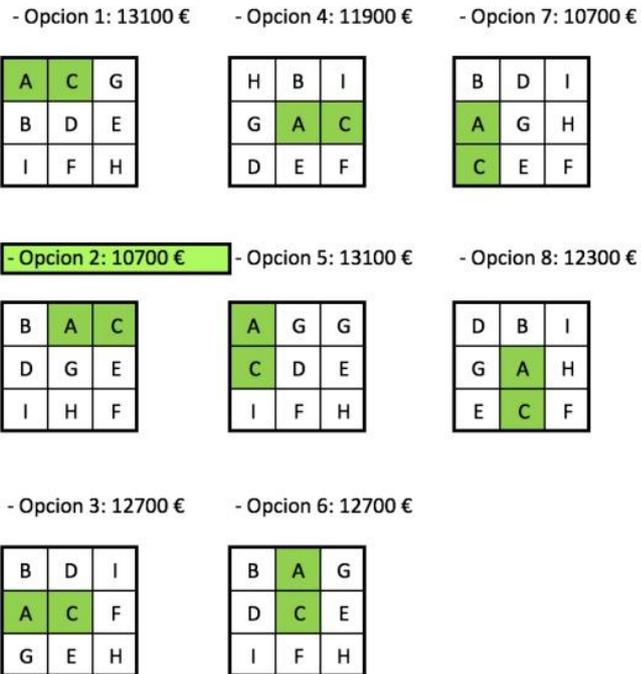


Figura 0-8 Gráficos de asignación de localizaciones a departamentos

Como apreciamos en los resultados hay soluciones iguales para distintas selecciones de A-C debido a la simetría del problema. En el último capítulo analizaremos más casos.

# EXPERIMENTOS NUMÉRICOS

---

## Hardware y software empleado

---

El algoritmo desarrollado ha sido implementado en el lenguaje de programación C y compilado con el programa *XCode Versión 8.3.2 Apple Inc.* y los experimentos se han desarrollado en una computadora personal Apple Macbook con procesador Intel(R) Core(TM) i5 2.60 Ghz, 8GB de RAM con el sistema operativo macOS Sierra 10.12.3.

En los siguientes apartados del capítulo haremos una evaluación comparativa del algoritmo programado con siete ejemplos numéricos.

---

## Fabricación Asientos

---

Esteban Ikeda produce seis tipos de asientos confeccionados a través de 10 departamentos de operación dentro de su actual planta de producción.

Cada asiento requiere el paso por distintos departamentos de la fábrica, descritos en la siguiente tabla:

ASIENTO	SECUENCIA DE PROCESO					CANTIDAD	COSTE
1	0	1	5	4	10	1000	1
2	2	6	3	9	-1	2000	1
3	2	10	1	9	-1	3000	1
4	1	7	8	10	-1	1000	1
5	2	5	6	9	-1	2000	1
6	1	7	4	10	-1	4000	1

1	2	3	4
5	6	7	8

Tabla 0.1 Datos problema Nissan

## Resultados

Tras introducir los datos observamos los resultados, y vemos que el departamento 1 y 7 es el que mayor coste de tránsito tiene, por lo que nos quedamos con ellos y los asignamos.

		HACIA									
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
DESDE	1	0	0	0	0	1000	0	5000	0	3000	3000
	2		0	0	0	2000	2000	0	0	0	3000
	3			0	0	0	2000	0	0	2000	0
	4				0	1000	0	4000	0	0	5000
	5					0	2000	0	0	0	0
	6						0	0	0	2000	0
	7							0	1000	0	0
	8								0	0	1000
	9									0	0
	10										0

Tabla 0.2 Coste relaciones entre departamentos



- Opcion 1: 67000 €				
1	7	4	10	8
5	6	9	2	3

- Opcion 5: 61000 €				
1	10	9	2	3
7	4	5	6	8

- Opcion 2: 65000 €				
5	1	7	4	10
6	9	3	8	2

- Opcion 6: 60000 €				
10	1	2	6	9
4	7	5	3	8

- Opcion 3: 61000 €				
8	5	1	7	4
3	6	9	2	10

- Opcion 7: 63000 €				
5	10	1	6	9
2	4	7	3	8

- Opcion 4: 56000 €				
6	9	5	1	7
3	8	2	10	4

Tabla 0.3 Resultados problema Nissan

La distribución óptima sería la opción nº 4, que dista de los resultados ofrecidos por el modelo PSD ( coste optimo 53000€ ) y otra aplicación del algoritmo tipo *greedy* ( 56000 € para la distribución 4 8 6 10 3 1 5 7 2 9 ).

## Fabricación Electrodomésticos

---

Nuestro software también es aplicable a máquinas en línea, dado que únicamente lo que habría que modificar sería el número de filas y poner 1. En el artículo de *A genetic algorithm for facility layout problems of different manufacturing environments* (El-Baz, noviembre 2004) encontramos este tipo de problemas. Uno de estos problemas es aplicado a

---

una fábrica de electrodomésticos de 12 departamentos con 18 productos con diferentes recorridos. Veamos como lo resuelve nuestro software.

Electrodoméstico	SECUENCIA DE PROCESO					CANTIDAD	COSTE
1	1	4	2	6	0	100	1
2	3	5	12	10	0	120	1
3	2	4	12	6	0	50	1
4	5	8	10	0	0	45	1
5	3	5	12	6	0	60	1
6	4	2	4	6	0	80	1
7	1	5	9	0	0	90	1
8	3	7	10	4	8	120	1
9	1	4	6	0	0	140	1
10	3	12	8	10	0	180	1
11	2	6	2	4	6	80	1
12	11	9	10	8	0	60	1
13	1	4	5	7	0	70	1
14	2	4	6	2	6	150	1
15	3	7	9	10	0	120	1
16	3	10	12	9	12	120	1
17	5	10	8	9	12	100	1
18	2	8	9	10	0	90	1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----

Tabla 0.4 Datos problema Electrodomésticos

## Resultados

Tras introducir los datos observamos los resultados, y vemos que el departamento 2 y 6 es el que mayor coste de tránsito tiene, por lo que nos quedamos con ellos y los asignamos.



## REVISIÓN DE MÉTODOS DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

		HACIA											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
DESDE	1	0	0	0	310	90	0	0	0	0	0	0	0
	2		0	0	540	0	560	0	90	0	0	0	0
	3			0	0	180	0	240	0	0	120	0	180
	4				0	70	450	0	120	0	120	0	50
	5					0	0	70	45	90	100	0	180
	6						0	0	0	0	0	0	110
	7							0	0	120	120	0	0
	8								0	190	385	0	180
	9									0	270	60	340
	10										0	0	240
	11											0	0
	12												0

Tabla 0.5 Coste relaciones entre departamentos

Para esta distribución tenemos indiscutiblemente 11 alternativas para nuestros resultados y estos son los resultados:

- Opcion 1: 12530 €

2	6	4	8	10	12	9	1	5	3	7	11
---	---	---	---	----	----	---	---	---	---	---	----

- Opcion 7: 15725 €

9	10	12	8	1	4	2	6	5	3	7	11
---	----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	----

- Opcion 2: 12175 €

4	2	6	1	8	10	12	9	5	3	7	11
---	---	---	---	---	----	----	---	---	---	---	----

- Opcion 8: 15710 €

5	9	10	12	8	1	4	2	6	3	7	11
---	---	----	----	---	---	---	---	---	---	---	----

- Opcion 3: 11730 €

1	4	2	6	5	8	10	12	9	3	7	11
---	---	---	---	---	---	----	----	---	---	---	----

- Opcion 9: 15220 €

3	5	9	10	12	8	1	4	2	6	7	11
---	---	---	----	----	---	---	---	---	---	---	----

- Opcion 4: 13995 €

8	1	4	2	6	10	12	9	5	3	7	11
---	---	---	---	---	----	----	---	---	---	---	----

- Opcion 10: 11550 €

7	3	5	9	10	12	8	1	4	2	6	11
---	---	---	---	----	----	---	---	---	---	---	----

- Opcion 5: 17770 €

12	8	1	4	2	6	10	9	5	3	7	11
----	---	---	---	---	---	----	---	---	---	---	----

- Opcion 11: 13085 €

11	7	3	5	1	9	10	8	12	4	2	6
----	---	---	---	---	---	----	---	----	---	---	---

- Opcion 6: 18100 €

10	12	8	1	4	2	6	9	5	3	7	11
----	----	---	---	---	---	---	---	---	---	---	----

Tabla 0.6 Resultados problema Electrodomésticos

La distribución óptima sería la opción nº 10, que dista de los resultados ofrecidos por el

modelo propuesto por El-Baz mediante algoritmos genéticos ( coste optimo 11.440€ ) y otra aplicación del algoritmo tipo *greedy* ( mismo resultado económico 11.550 € para la distribución 8 10 2 9 3 11 1 7 4 5 12 6 ).

## Fábrica textil

Un problema tomado del artículo *A genetic algorithm with the heuristic procedure to solve the multiline layout problema*, de Amir Sadrzadeh propone una fábrica donde se realizan 38 referencias diferentes en un total de 24 departamentos, la fábrica tiene un tamaño de 5 por 6, es decir, un total de 30 localizaciones, lo cual quiere decir que sobran 6 localizaciones.

Las rutas de fabricación son las que se muestran a continuación:

Artículo	SECUENCIA DE PROCESO					CANTIDAD	COSTE	Artículo	SECUENCIA DE PROCESO					CANTIDAD	COSTE
1	22	1	13	21		130	1	20	10	17	12			130	1
2	3	20	24			150	1	21	4	16				105	1
3	14	7	23	24		125	1	22	2	5	11	19		130	1
4	15	6	18	8	12	145	1	23	20	12				150	1
5	15	6	18	8	12	5	65	1	24	7	14	23		185	1
6	9	17	10			78	1	25	15	6	18	8	10	145	1
7	9	17	10			95	1	26	15	6	18	8	12	65	1
8	4	16				160	1	27	9	17				95	1
9	21	1	13	21		85	1	28	6	18	8	12		160	1
10	2	11	19	5	21	105	1	29	2	20	17			85	1
11	3	20				130	1	30	14	7	23	24	16	105	1
12	3	20				140	1	31	22	1	13	21	2	130	1
13	2	11	19			150	1	32	3	20				150	1
14	2	11	19	5		185	1	33	11	19	5			125	1
15	3	20				78	1	34	20	12	21			145	1
16	22	1	13	21		95	1	35	16	11	14			65	1
17	1	12	22			160	1	36	4	16				78	1
18	15	6	18	8	12	85	1	37	4	16				95	1
19	4	16				105	1	38	1	13	19			160	1

Tabla 0.7 Datos referencias textiles



## Resultados

Una vez introducido todos estos parámetros en el software desarrollado, vemos que el departamento 11 y el 19 son los que mayor peso tienen por lo que los ponemos próximos. Los resultados que vuelca el programa son los siguientes:

- Opcion 1: 16478 € <table border="1"><tr><td>11</td><td>19</td><td>5</td><td>12</td><td>20</td><td>8</td></tr><tr><td>2</td><td>21</td><td>13</td><td>1</td><td>22</td><td>3</td></tr><tr><td>0</td><td>9</td><td>10</td><td>17</td><td>6</td><td>18</td></tr><tr><td>0</td><td>4</td><td>16</td><td>24</td><td>15</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>7</td><td>14</td><td>23</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	11	19	5	12	20	8	2	21	13	1	22	3	0	9	10	17	6	18	0	4	16	24	15	0	0	7	14	23	0	0	- Opcion 7: 12922 € <table border="1"><tr><td>21</td><td>2</td><td>5</td><td>16</td><td>4</td><td>7</td></tr><tr><td>13</td><td>11</td><td>19</td><td>24</td><td>23</td><td>14</td></tr><tr><td>1</td><td>12</td><td>20</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>22</td><td>8</td><td>18</td><td>6</td><td>15</td><td>0</td></tr><tr><td>10</td><td>17</td><td>9</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	21	2	5	16	4	7	13	11	19	24	23	14	1	12	20	3	0	0	22	8	18	6	15	0	10	17	9	0	0	0	- Opcion 13: 14300 € <table border="1"><tr><td>4</td><td>23</td><td>21</td><td>13</td><td>1</td><td>22</td></tr><tr><td>16</td><td>24</td><td>2</td><td>5</td><td>12</td><td>20</td></tr><tr><td>7</td><td>14</td><td>11</td><td>19</td><td>8</td><td>3</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>15</td><td>6</td><td>18</td><td>17</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>9</td><td>10</td></tr></table>	4	23	21	13	1	22	16	24	2	5	12	20	7	14	11	19	8	3	0	0	15	6	18	17	0	0	0	0	9	10	- Opcion 19: 13337 € <table border="1"><tr><td>13</td><td>21</td><td>1</td><td>22</td><td>6</td><td>15</td></tr><tr><td>11</td><td>2</td><td>12</td><td>8</td><td>18</td><td>4</td></tr><tr><td>19</td><td>5</td><td>20</td><td>3</td><td>24</td><td>16</td></tr><tr><td>0</td><td>9</td><td>17</td><td>10</td><td>23</td><td>14</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>7</td></tr></table>	13	21	1	22	6	15	11	2	12	8	18	4	19	5	20	3	24	16	0	9	17	10	23	14	0	0	0	0	0	7	- Opcion 25: 13647 € <table border="1"><tr><td>22</td><td>20</td><td>3</td><td>6</td><td>15</td><td>24</td></tr><tr><td>1</td><td>12</td><td>8</td><td>18</td><td>4</td><td>16</td></tr><tr><td>13</td><td>21</td><td>17</td><td>10</td><td>14</td><td>23</td></tr><tr><td>11</td><td>2</td><td>9</td><td>0</td><td>7</td><td>0</td></tr><tr><td>19</td><td>5</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	22	20	3	6	15	24	1	12	8	18	4	16	13	21	17	10	14	23	11	2	9	0	7	0	19	5	0	0	0	0
11	19	5	12	20	8																																																																																																																																																					
2	21	13	1	22	3																																																																																																																																																					
0	9	10	17	6	18																																																																																																																																																					
0	4	16	24	15	0																																																																																																																																																					
0	7	14	23	0	0																																																																																																																																																					
21	2	5	16	4	7																																																																																																																																																					
13	11	19	24	23	14																																																																																																																																																					
1	12	20	3	0	0																																																																																																																																																					
22	8	18	6	15	0																																																																																																																																																					
10	17	9	0	0	0																																																																																																																																																					
4	23	21	13	1	22																																																																																																																																																					
16	24	2	5	12	20																																																																																																																																																					
7	14	11	19	8	3																																																																																																																																																					
0	0	15	6	18	17																																																																																																																																																					
0	0	0	0	9	10																																																																																																																																																					
13	21	1	22	6	15																																																																																																																																																					
11	2	12	8	18	4																																																																																																																																																					
19	5	20	3	24	16																																																																																																																																																					
0	9	17	10	23	14																																																																																																																																																					
0	0	0	0	0	7																																																																																																																																																					
22	20	3	6	15	24																																																																																																																																																					
1	12	8	18	4	16																																																																																																																																																					
13	21	17	10	14	23																																																																																																																																																					
11	2	9	0	7	0																																																																																																																																																					
19	5	0	0	0	0																																																																																																																																																					
- Opcion 2: 14432 € <table border="1"><tr><td>2</td><td>11</td><td>19</td><td>5</td><td>3</td><td>24</td></tr><tr><td>21</td><td>13</td><td>1</td><td>12</td><td>20</td><td>15</td></tr><tr><td>4</td><td>16</td><td>22</td><td>8</td><td>18</td><td>6</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>10</td><td>17</td><td>14</td><td>23</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>9</td><td>7</td><td>0</td></tr></table>	2	11	19	5	3	24	21	13	1	12	20	15	4	16	22	8	18	6	0	0	10	17	14	23	0	0	0	9	7	0	- Opcion 8: 15680 € <table border="1"><tr><td>12</td><td>21</td><td>2</td><td>5</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>1</td><td>13</td><td>11</td><td>19</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>8</td><td>22</td><td>18</td><td>6</td><td>15</td><td>0</td></tr><tr><td>20</td><td>3</td><td>24</td><td>16</td><td>4</td><td>0</td></tr><tr><td>17</td><td>10</td><td>9</td><td>23</td><td>14</td><td>7</td></tr></table>	12	21	2	5	0	0	1	13	11	19	0	0	8	22	18	6	15	0	20	3	24	16	4	0	17	10	9	23	14	7	- Opcion 14: 15582 € <table border="1"><tr><td>7</td><td>9</td><td>3</td><td>21</td><td>13</td><td>1</td></tr><tr><td>14</td><td>17</td><td>20</td><td>2</td><td>5</td><td>12</td></tr><tr><td>23</td><td>10</td><td>24</td><td>11</td><td>19</td><td>22</td></tr><tr><td>4</td><td>16</td><td>15</td><td>6</td><td>18</td><td>8</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	7	9	3	21	13	1	14	17	20	2	5	12	23	10	24	11	19	22	4	16	15	6	18	8	0	0	0	0	0	0	- Opcion 20: 13487 € <table border="1"><tr><td>21</td><td>13</td><td>1</td><td>22</td><td>24</td><td>16</td></tr><tr><td>2</td><td>11</td><td>12</td><td>20</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>5</td><td>19</td><td>8</td><td>18</td><td>6</td><td>15</td></tr><tr><td>0</td><td>10</td><td>17</td><td>14</td><td>23</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>9</td><td>7</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	21	13	1	22	24	16	2	11	12	20	3	4	5	19	8	18	6	15	0	10	17	14	23	0	0	0	9	7	0	0	- Opcion 26: 15168 € <table border="1"><tr><td>20</td><td>22</td><td>3</td><td>10</td><td>24</td><td>23</td></tr><tr><td>12</td><td>1</td><td>8</td><td>17</td><td>16</td><td>4</td></tr><tr><td>21</td><td>13</td><td>18</td><td>6</td><td>15</td><td>14</td></tr><tr><td>2</td><td>11</td><td>0</td><td>9</td><td>0</td><td>7</td></tr><tr><td>5</td><td>19</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	20	22	3	10	24	23	12	1	8	17	16	4	21	13	18	6	15	14	2	11	0	9	0	7	5	19	0	0	0	0
2	11	19	5	3	24																																																																																																																																																					
21	13	1	12	20	15																																																																																																																																																					
4	16	22	8	18	6																																																																																																																																																					
0	0	10	17	14	23																																																																																																																																																					
0	0	0	9	7	0																																																																																																																																																					
12	21	2	5	0	0																																																																																																																																																					
1	13	11	19	0	0																																																																																																																																																					
8	22	18	6	15	0																																																																																																																																																					
20	3	24	16	4	0																																																																																																																																																					
17	10	9	23	14	7																																																																																																																																																					
7	9	3	21	13	1																																																																																																																																																					
14	17	20	2	5	12																																																																																																																																																					
23	10	24	11	19	22																																																																																																																																																					
4	16	15	6	18	8																																																																																																																																																					
0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																					
21	13	1	22	24	16																																																																																																																																																					
2	11	12	20	3	4																																																																																																																																																					
5	19	8	18	6	15																																																																																																																																																					
0	10	17	14	23	0																																																																																																																																																					
0	0	9	7	0	0																																																																																																																																																					
20	22	3	10	24	23																																																																																																																																																					
12	1	8	17	16	4																																																																																																																																																					
21	13	18	6	15	14																																																																																																																																																					
2	11	0	9	0	7																																																																																																																																																					
5	19	0	0	0	0																																																																																																																																																					
- Opcion 3: 14958 € <table border="1"><tr><td>21</td><td>2</td><td>11</td><td>19</td><td>5</td><td>16</td></tr><tr><td>13</td><td>1</td><td>12</td><td>20</td><td>3</td><td>24</td></tr><tr><td>0</td><td>22</td><td>8</td><td>18</td><td>6</td><td>15</td></tr><tr><td>0</td><td>10</td><td>17</td><td>14</td><td>23</td><td>4</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>9</td><td>7</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	21	2	11	19	5	16	13	1	12	20	3	24	0	22	8	18	6	15	0	10	17	14	23	4	0	0	9	7	0	0	- Opcion 9: 15873 € <table border="1"><tr><td>20</td><td>12</td><td>21</td><td>2</td><td>5</td><td>0</td></tr><tr><td>22</td><td>1</td><td>13</td><td>11</td><td>19</td><td>0</td></tr><tr><td>3</td><td>8</td><td>17</td><td>10</td><td>9</td><td>0</td></tr><tr><td>6</td><td>18</td><td>15</td><td>14</td><td>7</td><td>0</td></tr><tr><td>24</td><td>16</td><td>4</td><td>23</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	20	12	21	2	5	0	22	1	13	11	19	0	3	8	17	10	9	0	6	18	15	14	7	0	24	16	4	23	0	0	- Opcion 15: 13932 € <table border="1"><tr><td>15</td><td>6</td><td>22</td><td>1</td><td>21</td><td>13</td></tr><tr><td>4</td><td>18</td><td>8</td><td>12</td><td>2</td><td>5</td></tr><tr><td>16</td><td>24</td><td>3</td><td>20</td><td>11</td><td>19</td></tr><tr><td>14</td><td>23</td><td>10</td><td>17</td><td>9</td><td>0</td></tr><tr><td>7</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	15	6	22	1	21	13	4	18	8	12	2	5	16	24	3	20	11	19	14	23	10	17	9	0	7	0	0	0	0	0	- Opcion 21: 13855 € <table border="1"><tr><td>16</td><td>21</td><td>13</td><td>1</td><td>22</td><td>24</td></tr><tr><td>4</td><td>2</td><td>11</td><td>12</td><td>20</td><td>3</td></tr><tr><td>0</td><td>5</td><td>19</td><td>8</td><td>18</td><td>6</td></tr><tr><td>0</td><td>9</td><td>10</td><td>17</td><td>23</td><td>15</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>7</td><td>14</td><td>0</td></tr></table>	16	21	13	1	22	24	4	2	11	12	20	3	0	5	19	8	18	6	0	9	10	17	23	15	0	0	0	7	14	0	- Opcion 27: 13527 € <table border="1"><tr><td>3</td><td>20</td><td>22</td><td>10</td><td>24</td><td>23</td></tr><tr><td>8</td><td>12</td><td>1</td><td>17</td><td>16</td><td>4</td></tr><tr><td>18</td><td>21</td><td>13</td><td>9</td><td>7</td><td>14</td></tr><tr><td>6</td><td>2</td><td>11</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>15</td><td>5</td><td>19</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	3	20	22	10	24	23	8	12	1	17	16	4	18	21	13	9	7	14	6	2	11	0	0	0	15	5	19	0	0	0
21	2	11	19	5	16																																																																																																																																																					
13	1	12	20	3	24																																																																																																																																																					
0	22	8	18	6	15																																																																																																																																																					
0	10	17	14	23	4																																																																																																																																																					
0	0	9	7	0	0																																																																																																																																																					
20	12	21	2	5	0																																																																																																																																																					
22	1	13	11	19	0																																																																																																																																																					
3	8	17	10	9	0																																																																																																																																																					
6	18	15	14	7	0																																																																																																																																																					
24	16	4	23	0	0																																																																																																																																																					
15	6	22	1	21	13																																																																																																																																																					
4	18	8	12	2	5																																																																																																																																																					
16	24	3	20	11	19																																																																																																																																																					
14	23	10	17	9	0																																																																																																																																																					
7	0	0	0	0	0																																																																																																																																																					
16	21	13	1	22	24																																																																																																																																																					
4	2	11	12	20	3																																																																																																																																																					
0	5	19	8	18	6																																																																																																																																																					
0	9	10	17	23	15																																																																																																																																																					
0	0	0	7	14	0																																																																																																																																																					
3	20	22	10	24	23																																																																																																																																																					
8	12	1	17	16	4																																																																																																																																																					
18	21	13	9	7	14																																																																																																																																																					
6	2	11	0	0	0																																																																																																																																																					
15	5	19	0	0	0																																																																																																																																																					
- Opcion 4: 13632 € <table border="1"><tr><td>13</td><td>21</td><td>2</td><td>11</td><td>19</td><td>5</td></tr><tr><td>1</td><td>12</td><td>8</td><td>18</td><td>6</td><td>15</td></tr><tr><td>22</td><td>20</td><td>3</td><td>24</td><td>16</td><td>4</td></tr><tr><td>9</td><td>17</td><td>10</td><td>23</td><td>14</td><td>7</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	13	21	2	11	19	5	1	12	8	18	6	15	22	20	3	24	16	4	9	17	10	23	14	7	0	0	0	0	0	0	- Opcion 10: 16963 € <table border="1"><tr><td>8</td><td>20</td><td>12</td><td>21</td><td>2</td><td>5</td></tr><tr><td>3</td><td>22</td><td>1</td><td>13</td><td>11</td><td>19</td></tr><tr><td>18</td><td>6</td><td>17</td><td>10</td><td>9</td><td>0</td></tr><tr><td>24</td><td>15</td><td>16</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>23</td><td>14</td><td>7</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	8	20	12	21	2	5	3	22	1	13	11	19	18	6	17	10	9	0	24	15	16	4	0	0	23	14	7	0	0	0	- Opcion 16: 15888 € <table border="1"><tr><td>11</td><td>2</td><td>21</td><td>12</td><td>20</td><td>8</td></tr><tr><td>19</td><td>5</td><td>13</td><td>1</td><td>22</td><td>3</td></tr><tr><td>0</td><td>9</td><td>10</td><td>17</td><td>6</td><td>18</td></tr><tr><td>0</td><td>4</td><td>16</td><td>24</td><td>15</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>7</td><td>14</td><td>23</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	11	2	21	12	20	8	19	5	13	1	22	3	0	9	10	17	6	18	0	4	16	24	15	0	0	7	14	23	0	0	- Opcion 22: 14055 € <table border="1"><tr><td>1</td><td>12</td><td>22</td><td>8</td><td>18</td><td>6</td></tr><tr><td>13</td><td>21</td><td>20</td><td>3</td><td>24</td><td>15</td></tr><tr><td>11</td><td>2</td><td>17</td><td>10</td><td>16</td><td>4</td></tr><tr><td>19</td><td>5</td><td>7</td><td>14</td><td>23</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>9</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	1	12	22	8	18	6	13	21	20	3	24	15	11	2	17	10	16	4	19	5	7	14	23	0	0	0	9	0	0	0																															
13	21	2	11	19	5																																																																																																																																																					
1	12	8	18	6	15																																																																																																																																																					
22	20	3	24	16	4																																																																																																																																																					
9	17	10	23	14	7																																																																																																																																																					
0	0	0	0	0	0																																																																																																																																																					
8	20	12	21	2	5																																																																																																																																																					
3	22	1	13	11	19																																																																																																																																																					
18	6	17	10	9	0																																																																																																																																																					
24	15	16	4	0	0																																																																																																																																																					
23	14	7	0	0	0																																																																																																																																																					
11	2	21	12	20	8																																																																																																																																																					
19	5	13	1	22	3																																																																																																																																																					
0	9	10	17	6	18																																																																																																																																																					
0	4	16	24	15	0																																																																																																																																																					
0	7	14	23	0	0																																																																																																																																																					
1	12	22	8	18	6																																																																																																																																																					
13	21	20	3	24	15																																																																																																																																																					
11	2	17	10	16	4																																																																																																																																																					
19	5	7	14	23	0																																																																																																																																																					
0	0	9	0	0	0																																																																																																																																																					
- Opcion 5: 15290 € <table border="1"><tr><td>24</td><td>22</td><td>1</td><td>13</td><td>11</td><td>19</td></tr><tr><td>3</td><td>20</td><td>12</td><td>21</td><td>2</td><td>5</td></tr><tr><td>6</td><td>18</td><td>8</td><td>17</td><td>10</td><td>9</td></tr><tr><td>15</td><td>23</td><td>16</td><td>14</td><td>7</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>4</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	24	22	1	13	11	19	3	20	12	21	2	5	6	18	8	17	10	9	15	23	16	14	7	0	0	0	4	0	0	0	- Opcion 11: 13487 € <table border="1"><tr><td>21</td><td>13</td><td>1</td><td>22</td><td>24</td><td>16</td></tr><tr><td>2</td><td>5</td><td>12</td><td>20</td><td>3</td><td>4</td></tr><tr><td>11</td><td>19</td><td>8</td><td>18</td><td>6</td><td>15</td></tr><tr><td>0</td><td>10</td><td>17</td><td>14</td><td>23</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>9</td><td>7</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	21	13	1	22	24	16	2	5	12	20	3	4	11	19	8	18	6	15	0	10	17	14	23	0	0	0	9	7	0	0	- Opcion 17: 13812 € <table border="1"><tr><td>2</td><td>11</td><td>8</td><td>18</td><td>6</td><td>15</td></tr><tr><td>5</td><td>19</td><td>12</td><td>20</td><td>3</td><td>24</td></tr><tr><td>21</td><td>13</td><td>1</td><td>22</td><td>4</td><td>16</td></tr><tr><td>0</td><td>10</td><td>17</td><td>7</td><td>14</td><td>23</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>9</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	2	11	8	18	6	15	5	19	12	20	3	24	21	13	1	22	4	16	0	10	17	7	14	23	0	0	9	0	0	0	- Opcion 23: 15565 € <table border="1"><tr><td>12</td><td>1</td><td>8</td><td>22</td><td>18</td><td>6</td></tr><tr><td>21</td><td>13</td><td>20</td><td>3</td><td>24</td><td>15</td></tr><tr><td>2</td><td>11</td><td>17</td><td>10</td><td>16</td><td>4</td></tr><tr><td>5</td><td>19</td><td>7</td><td>14</td><td>23</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>9</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	12	1	8	22	18	6	21	13	20	3	24	15	2	11	17	10	16	4	5	19	7	14	23	0	0	0	9	0	0	0																															
24	22	1	13	11	19																																																																																																																																																					
3	20	12	21	2	5																																																																																																																																																					
6	18	8	17	10	9																																																																																																																																																					
15	23	16	14	7	0																																																																																																																																																					
0	0	4	0	0	0																																																																																																																																																					
21	13	1	22	24	16																																																																																																																																																					
2	5	12	20	3	4																																																																																																																																																					
11	19	8	18	6	15																																																																																																																																																					
0	10	17	14	23	0																																																																																																																																																					
0	0	9	7	0	0																																																																																																																																																					
2	11	8	18	6	15																																																																																																																																																					
5	19	12	20	3	24																																																																																																																																																					
21	13	1	22	4	16																																																																																																																																																					
0	10	17	7	14	23																																																																																																																																																					
0	0	9	0	0	0																																																																																																																																																					
12	1	8	22	18	6																																																																																																																																																					
21	13	20	3	24	15																																																																																																																																																					
2	11	17	10	16	4																																																																																																																																																					
5	19	7	14	23	0																																																																																																																																																					
0	0	9	0	0	0																																																																																																																																																					
- Opcion 6: 15643 € <table border="1"><tr><td>2</td><td>5</td><td>21</td><td>12</td><td>20</td><td>8</td></tr><tr><td>11</td><td>19</td><td>13</td><td>1</td><td>22</td><td>3</td></tr><tr><td>0</td><td>9</td><td>10</td><td>17</td><td>6</td><td>18</td></tr><tr><td>0</td><td>4</td><td>16</td><td>24</td><td>15</td><td>0</td></tr><tr><td>0</td><td>7</td><td>14</td><td>23</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	2	5	21	12	20	8	11	19	13	1	22	3	0	9	10	17	6	18	0	4	16	24	15	0	0	7	14	23	0	0	- Opcion 12: 13725 € <table border="1"><tr><td>16</td><td>21</td><td>13</td><td>1</td><td>22</td><td>24</td></tr><tr><td>4</td><td>2</td><td>5</td><td>12</td><td>20</td><td>3</td></tr><tr><td>0</td><td>11</td><td>19</td><td>8</td><td>18</td><td>6</td></tr><tr><td>0</td><td>9</td><td>10</td><td>17</td><td>23</td><td>15</td></tr><tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>7</td><td>14</td><td>0</td></tr></table>	16	21	13	1	22	24	4	2	5	12	20	3	0	11	19	8	18	6	0	9	10	17	23	15	0	0	0	7	14	0	- Opcion 18: 12912 € <table border="1"><tr><td>21</td><td>2</td><td>11</td><td>23</td><td>14</td><td>7</td></tr><tr><td>13</td><td>5</td><td>19</td><td>24</td><td>16</td><td>4</td></tr><tr><td>1</td><td>12</td><td>20</td><td>3</td><td>0</td><td>0</td></tr><tr><td>22</td><td>8</td><td>18</td><td>6</td><td>15</td><td>0</td></tr><tr><td>10</td><td>17</td><td>9</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	21	2	11	23	14	7	13	5	19	24	16	4	1	12	20	3	0	0	22	8	18	6	15	0	10	17	9	0	0	0	- Opcion 24: 15430 € <table border="1"><tr><td>20</td><td>12</td><td>1</td><td>22</td><td>17</td><td>9</td></tr><tr><td>8</td><td>21</td><td>13</td><td>24</td><td>10</td><td>0</td></tr><tr><td>3</td><td>2</td><td>11</td><td>23</td><td>16</td><td>4</td></tr><tr><td>18</td><td>5</td><td>19</td><td>14</td><td>7</td><td>0</td></tr><tr><td>6</td><td>15</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr></table>	20	12	1	22	17	9	8	21	13	24	10	0	3	2	11	23	16	4	18	5	19	14	7	0	6	15	0	0	0	0																															
2	5	21	12	20	8																																																																																																																																																					
11	19	13	1	22	3																																																																																																																																																					
0	9	10	17	6	18																																																																																																																																																					
0	4	16	24	15	0																																																																																																																																																					
0	7	14	23	0	0																																																																																																																																																					
16	21	13	1	22	24																																																																																																																																																					
4	2	5	12	20	3																																																																																																																																																					
0	11	19	8	18	6																																																																																																																																																					
0	9	10	17	23	15																																																																																																																																																					
0	0	0	7	14	0																																																																																																																																																					
21	2	11	23	14	7																																																																																																																																																					
13	5	19	24	16	4																																																																																																																																																					
1	12	20	3	0	0																																																																																																																																																					
22	8	18	6	15	0																																																																																																																																																					
10	17	9	0	0	0																																																																																																																																																					
20	12	1	22	17	9																																																																																																																																																					
8	21	13	24	10	0																																																																																																																																																					
3	2	11	23	16	4																																																																																																																																																					
18	5	19	14	7	0																																																																																																																																																					
6	15	0	0	0	0																																																																																																																																																					

Tabla 0.8 Resultados referencias fábrica textil

La distribución óptima sería la opción nº 7, que dista de los resultados ofrecidos por el modelo propuesto por Amir Sadrzadeh mediante algoritmos genéticos ( coste optimo 11.662€ ) y otra aplicación del algoritmo tipo *greedy* ( similar resultado económico 12.397 €).

## Fábrica Mediana

Para demostrar la rapidez y la eficiencia de nuestro softwares, hemos introducido un problema generado aleatoriamente. Hemos supuesto un total de 40 referencias las cuales cada una de ellas ha de pasar, aleatoriamente, por 6 departamentos diferentes. Hemos supuesto un total de 100 departamentos asignables a 100 localizaciones. Los costes y las cantidades también han sido generados de manera aleatoria mediante la función, del programa *Microsoft Excel*, = aleatorio.entre (min;max).

Las localizaciones están en una distribuidas en 10 filas y 10 columnas

Artículo	SECUENCIA DE PROCESO						CANTIDAD	COSTE	Artículo	SECUENCIA DE PROCESO						CANTIDAD	COSTE
1	58	60	87	17	99	93	199	3	21	77	91	35	55	27	88	109	2
2	64	70	14	95	67	31	255	1	22	76	34	11	13	20	92	192	3
3	77	2	88	91	90	81	153	2	23	12	83	90	24	94	81	264	3
4	70	35	52	19	17	61	161	3	24	42	80	75	28	35	81	245	3
5	82	39	57	12	83	24	278	2	25	56	64	96	27	82	63	186	2
6	73	22	79	47	99	61	285	1	26	65	72	21	27	69	49	283	2
7	99	66	26	22	72	22	293	3	27	79	58	2	78	21	80	237	1
8	10	17	42	32	10	39	129	1	28	34	57	61	43	1	49	264	1
9	9	18	8	22	65	86	111	3	29	10	66	36	40	37	79	239	1
10	94	44	55	25	92	88	244	2	30	22	3	1	51	65	88	190	1
11	5	30	5	90	6	75	239	3	31	55	33	80	44	39	90	174	1
12	79	2	44	22	51	89	251	2	32	23	55	98	58	63	72	109	2
13	73	95	58	98	43	60	125	2	33	44	56	24	40	9	14	154	2
14	70	57	97	93	91	58	167	3	34	77	57	66	93	6	29	101	3
15	17	36	49	89	96	51	186	2	35	58	89	8	36	76	24	162	2
16	53	82	60	96	49	46	208	1	36	49	59	7	43	10	93	179	2
17	24	53	93	15	55	95	109	3	37	26	1	49	57	58	72	173	1
18	95	25	58	42	9	18	173	3	38	78	61	95	91	71	88	109	2
19	12	31	3	80	90	15	278	2	39	25	77	79	52	49	74	174	3
20	39	77	47	88	92	17	68	3	40	78	31	33	80	50	1	80	3

Tabla 0.9 Datos entrada de las referencias



1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
71	72	73	74	75	76	77	78	79	80
81	82	83	84	85	86	87	88	89	90
91	92	93	94	95	96	97	98	99	100

Figura 0-1 Diseño de las localizaciones

## Resultados

---

Una vez introducido todos estos parámetros en el software desarrollado, en tan solo 14,92 segundos nuestro software nos da una solución tras 90 iteraciones, cambiando de lugar los departamentos 22 y 72 que son los que mayor coste de relación tienen.

El resultado óptimo de nuestro problema es el mostrado en la imagen, el resto de soluciones las podemos encontrar en el anexo..

-Opcion 37: 220942 €

10	93	87	97	47	86	71	20	34	13
17	99	36	91	19	88	92	53	76	11
61	66	60	57	95	39	55	82	63	56
43	26	65	58	44	77	25	94	24	40
51	22	72	8	79	98	2	21	78	37
1	49	89	96	52	35	27	69	12	64
73	9	42	70	80	90	15	81	83	4
18	14	28	75	3	6	33	67	31	16
50	7	74	32	30	5	23	38	41	45
46	59	48	54	62	29	68	84	85	100

Figura 0-2 Resultado problema

# ESTUDIO ECONÓMICO

---

El estudio económico es una parte fundamental de cualquier proyecto debido a que determina la viabilidad económica de llevarlo a cabo en la práctica, en fin y al cabo, si es rentable y si merece la pena desde el punto de vista económico realizar dicha inversión. En este capítulo haremos un repaso del coste económico que ha tenido la realización de cada una de las diferentes etapas del proyecto, en el caso de que hubieran sido contratadas a un equipo profesional cualificado.

Describiremos las distintas etapas o fases que se consideran en los cálculos realizados para hallar los costes de este trabajo final de grado. A continuación, explicaremos cómo hemos calculado los diferentes costes (de personal, de amortización, de material) y los gastos generales. Por último indicaremos los costes generales y el precio de venta del presente TFG.

## Etapas de desarrollo del trabajo

---

En este apartado se hace un desglose del tiempo invertido en la realización del presente trabajo, teniendo en cuenta las distintas tareas que lo componen. El tiempo total invertido en el presente trabajo se ha estimado en tres meses.

Por tanto, es necesario mostrar a continuación las etapas desarrolladas desde que comenzamos este trabajo:

- Definición del trabajo: En esta primera etapa realizamos un primer contacto con la organización de fábricas de todo tipo, por proceso, por producto etc... Para ello fue necesario realizar una búsqueda exhaustiva y un estudio de los artículos que hablaban al respecto. Dentro de esta área de investigación, se recopiló información sobre las distintas heurísticas aplicables al problema tipo FLP.
- Estado del arte: Una vez recopilada la información, nos dispusimos a hacer una clasificación de todas las metodologías, y crear un estado del arte de la organización de fábricas por producto.
- Familiarización con el software informático *Xcode ( Versión 8.3.2 Apple Inc. )* y programación tipo C: llevamos a cabo un profundo estudio, tanto de las instrucciones del propio lenguaje, como de las funcionalidades que *Xcode* permite para facilitar la labor de programación, complementado con un curso de programación C online de la pagina web [www.aulafacil.com](http://www.aulafacil.com)
- Análisis FLP: Una vez se dispuso qué métodos heurísticos comparar, decidimos elegir una metodología y aplicarla a problemas de Layout, en este caso Algoritmo de tipo *greedy*. El siguiente paso fue elegir qué lenguaje de programación, decidimos elegir programación C, ya que cumplía todos los requisitos que el problema solicitaba, y era el lenguaje que más experiencia teníamos. En esta misma etapa recopilamos de la información necesaria para programar el algoritmo estudiado. De esta manera se conocimos todas las

variables que intervinieran y se pensó la manera de estructurar el programa. Esta etapa permitió tener una idea muy clara de lo que se quería hacer y cómo conseguirlo, lo que ahorró, sin duda, una cantidad de tiempo importante en el desarrollo del problema que cuenta, de por sí, de una gran complejidad.

- Programación del algoritmo: En esta etapa, y a partir del modelo pensado en la etapa anterior, se programó el algoritmo, primero para introducción manual y luego aplicando el algoritmo tipo *greedy*. Sin lugar a dudas, ésta es la etapa es la que más tiempo llevó, necesitando de un esfuerzo importante tanto de análisis de los distintos fallos, como de rigor y atención al detalle a la hora de programar.
- Análisis de resultados: Una vez realizado el programa y habiéndose cercionado de su correcto funcionamiento, procedimos a la realización de numerosos experimentos para la obtención de los resultados necesarios. La posterior comparación de dichos resultados nos permitió valorar los distintos métodos programados.
- Edición de la documentación: En esta sexta etapa, redactamos el tomo del presente trabajo fin de grado.

## Cálculo de costes

---

Vamos a determinar de manera aproximada el coste que ha conllevado la realización de este proyecto y para llevarlo a cabo de una manera correcta, debemos realizar un cálculo de las horas efectivas para poder determinar las tasas por hora del salario. Los días efectivos de trabajo anual deberán ser calculados en función de datos históricos recopilados de años anteriores. De esta manera, ya podremos conocer el número de horas por año que trabajarían los profesionales involucrados en la realización de este trabajo, y, así, determinar el coste laboral generado en función de las horas utilizadas.



Cálculo de las horas efectivas trabajadas a lo largo de los tres meses del año:

Calculo de días efectivos			
	Días/mes	Meses	
Días por año	30	3	90
Sábados y domingos	8		24
Días Festivos	2		6
Días festivos reconocidos	1		3
Días perdidos	1		3
Estimado de días efectivos			54
<b>Total horas</b>	<b>432</b>		<b>Horas</b>

Tabla 0.1 Tabla 4. Días efectivos trabajados por año.

## Costes de personal

---

A continuación vamos a calcular los costes salariales correspondientes al ingeniero que realiza el presente trabajo. Tanto la investigación como el desarrollo del software han sido realizados por un ingeniero graduado en Ingeniería de Organización Industrial por la Universidad de Valladolid. Las funciones realizadas por dicho ingeniero son:

- Definir los objetivos del trabajo.
- Recopilación de información en las distintas bases de datos de la escuela y de internet.
- Realizar la programación mediante el Software: *Xcode ( Versión 8.3.2 Apple Inc. )*.
- Llevar a cabo el análisis de los resultados y realizar los experimentos necesarios utilizando el software desarrollado.
- Llegar a unas conclusiones.

- Realizar los distintos informes y editar la documentación correspondiente.

Horas empleadas TFG			
	días	Horas/día	
Definición del trabajo y objetivos	5	8	40
Recopilación de información	20		160
Programación del algoritmo	15		120
Realización de experimentos	2		16
Comparativa con metodologías existentes	2		16
Edición de la documentación	10		80
<b>Total horas</b>		<b>432</b>	<b>Horas</b>

Tabla 0.2 Desglose del tiempo empleado en cada etapa (en horas)

Después de detallar las horas empleadas en cada etapa del trabajo, ya podemos calcular el salario de dicho ingeniero. Tomando como dato el salario neto anual para un ingeniero en 40.000 €, según una reconocida web de empleo (Payscale, 2017). El salario total y la retribución horaria están reflejados en la siguiente tabla:

Remuneración ingeniero	
Sueldo bruto anual	30.000,00 €
sueldo en 3 meses	7.500,00 €
Seguridad social ( 35% )	2.625,00 €
Total 3 Meses	10.125,00 €
Total coste Horario ( €/hora )	23,44 €

Tabla 0.3 Salario del ingeniero (en euros).

Lo siguiente que vamos a hacer es asignar a cada etapa o actividad el número de horas dedicadas y, así, calcular el coste por actividad. Calculamos el porcentaje de cada etapa y lo multiplicamos por salario del ingeniero. Todo ello se puede observar en la siguiente tabla:

Coste de las horas efectivas trabajadas			
	Horas		Coste por Etapa
Definición del trabajo y objetivos	40	9%	937,50 €
Recopilación de información	160	37%	3.750,00 €
Programación del algoritmo	120	28%	2.812,50 €
Realización de experimentos	16	4%	375,00 €
Comparativa con metodologías existentes	16	4%	375,00 €
Edición de la documentación	80	19%	1.875,00 €
<b>Total horas</b>	<b>432</b>		<b>10.125,00 €</b>

*Tabla 0.4 Coste de las horas efectivas trabajadas (en euros). Se incluye total y porcentaje relativo de cada etapa.*

## Costes de amortización

---

Seguido de los costes de personal calcularemos los costes de las amortizaciones de los equipos utilizados en la elaboración del presente trabajo fin de grado. Para su realización fue necesario el uso tanto de un ordenador personal, como de un conjunto de periféricos y consumibles.

En la siguiente tabla detallaremos los materiales utilizados durante el desarrollo del TFG a los que les hemos aplicado una amortización lineal de tres años con valor residual nulo.

Coste amortización	
Equipo Informático	Coste
Ordenador Apple MacBook Pro 2,6 GHz Intel Core i5	1.899,00 €
MAC OS Sierra 10.12.3 (16D32)	- €
Microsoft Office 2013 119	119,00 €
licencia Xcode	- €
Impresora Samsung DX2020	159,00 €
<b>Total</b>	<b>2.177,00 €</b>
<b>Amortización anual</b>	<b>725,67 €</b>
<b>Amortización 3 meses</b>	<b>181,42 €</b>

Tabla 0.5 Coste y amortización de los equipos utilizados (en euros).

Estos son los costes de amortización del material, pudiéndose abaratar utilizando un equipo informático más económico ( en torno a los 600 € ) y software libre para la edición de la documentación.

## Costes de material

En el tercer paso vamos a evaluar los gastos correspondientes a los materiales que han sido necesarios.

Coste de Material	
Material papelería	20,00 €
CD's	2,00 €
Pendrive	20,00 €
Material reprografía	100,00 €
<b>Total coste</b>	<b>142,00 €</b>

Tabla 0.6 Costes de material (en euros)

Detallando como material de papelería todo lo referente a bolígrafos, subrayadores y fotocopias, y detallando como material reprográfico todo lo referente a la impresión y encuadernación de los diferentes tomos de este trabajo.

## Gastos generales

---

Por último, calcularemos los gastos generales, o gastos indirectos, refiriéndonos a todos los gastos de trabajo no incluidos, pero de gran importancia.

Costes Generales		
	€/mes	
Uso de Oficina	200,00 €	600,00 €
Electricidad	20,00 €	60,00 €
Calefacción	15,00 €	45,00 €
transporte	18,00 €	54,00 €
Internet	15,00 €	45,00 €
Agua	2,00 €	6,00 €
<b>Total coste</b>		<b>810,00 €</b>

Tabla 0.7 Costes de material (en euros)

## Costes totales

---

El coste del presente trabajo fin de grado se obtiene como suma de los costes totales

---

definidos en los apartados anteriores. En la siguiente tabla se refleja todos estos costes y el porcentaje de cada partida sobre el total de los costes:

Costes totales	
Remuneración ingeniero	10.125,00 €
Coste de Material	142,00 €
Costes Generales	810,00 €
Coste amortización	181,42 €
<b>Total coste</b>	<b>11.258,42 €</b>

Tabla 0.8 Costes totales TFG

Como apreciamos, los costes de personal son los que mayor peso tienen en este trabajo, debido a que se trata de un trabajo de investigación, donde el factor humano es imprescindible.

## Precio de venta del trabajo

El coste total de la realización del trabajo es de 11.260 € el que vamos a añadir nuestro beneficio sumado 20% sobre el coste del trabajo y un 21% de IVA. En la siguiente tabla se pueden observar todos estos cálculos:

Precio de venta	
Total coste	11.258,42 €
Beneficio del 20%	2.251,68 €
total coste + Beneficio	13.510,10 €
Impuestos ( 21% IVA )	2.364,27 €
<b>Total coste</b>	<b>15.874,37 €</b>



*Tabla 0.9 Costes de material (en euros)*

# CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS DE TRABAJO

---

## Conclusiones

---

En este trabajo final de grado hemos llevado a cabo una clasificación de las distintas metodologías aplicables a problemas de distribución en planta. Estos problemas requieren de un gran número de cálculos complejos, y debido a su tipología hemos visto que los métodos

---

exactos son totalmente inviables a partir de un número alto de departamentos asignables.

Los métodos comúnmente más desarrollados son aquellos basados en algoritmos metaheurísticos, como búsqueda tabú, colonia de hormigas o algoritmos genéticos entre otros.

En la segunda parte del presente trabajo, hemos desarrollado un software para la resolución de problemas de distribución en planta, para fabricas con distribuciones por proceso ( FPL ). Este programa desarrollado en programación C, cuenta con la ventaja de su facilidad para la introducción de datos y su rápido cómputo para la obtención de una distribución de buena calidad.

El programa cuenta con la particularidad de que podemos asignar costes de desplazamiento distintos a cada producto en función de su naturaleza ( no cuesta lo mismo transportar un lápiz que una silla ), y calcularlos de una manera eficiente mediante la matriz de coste de relaciones entre departamentos.

A la vista de los resultados de los benchmark del capítulo 4, no apreciamos una mejora sustancial comparado con otros métodos a la hora de ofrecer una distribución óptima. Esto es debido a la voracidad del algoritmo tipo *greedy* empleado. Pero por el contrario y gracias a esta voracidad, podemos aplicarlo problemas muy grandes ( de tamaño 1000 incluso ) en apenas unos segundos, y ofrecer al usuario una solución de calidad.

## Líneas futuras de trabajo

---

El algoritmo desarrollado, podríamos optimizarlo aplicando una metaheurística adicional. Utilizándolo en la parte donde asignamos departamentos no asignados a localizaciones libres, en la cual seleccionamos el primer mínimo de cada departamento, y el primer máximo del conjunto. Esta metaheurística adicional podría probar con los siguientes

---

mínimos y máximos.

Otra dirección que podríamos tomar en futuras investigaciones, sería la adición de restricciones adicionales, como por ejemplo incompatibilidad entre adyacencias departamentales, o por el contrario, necesidades de proximidad.





# BIBLIOGRAFÍA

---

Ángel Cobo Ortega, A. M. (2005). Un algoritmo híbrido basado en colonias de hormigas para la resolución de problemas de distribución en planta orientados a procesos . Cantabria.

Aiello, G., Scalia, G. L., & Enea, M. (septiembre 2013). A non dominated ranking Multi Objective Genetic Algorithm and electre method for unequal area facility layout problems .

Aiello, Scalia, L., & Enea. (2012). A multi objective genetic algorithm for the facility layout problem based upon slicing structure encoding.

Armour, & Buffa. (1963). A heuristic algorithm and simulation approach to relative location of facilities.

Arora, & Barak. (2009). Computational Complexity: A modern Approach.

Azzaro. (2009). Mutual benefits of two multicriteria analysis methodologies: A case study for batch plant design. Toulouse.

---

Balakrishnan, Cheng, & Wong. (2003). FACOPT: A User Friendly FACility Layout OPTimization System.

Blazewicz, J. (2007). Handbook on Scheduling: Models and Methods for advanced Planning ( Internacional handbook on Information Systems ).

Blum, & Roli. (2003). comparison., Metaheuristics in combinatorial optimization: Overview and conceptual.

Bozera, Y., & Wangb, C.-T. (2012). A graph-pair representation and MIP-model-based heuristic for the unequal-area facility layout problem.

Brassard, G., & Bratley, P. (1996). Fundamental Algorithms.

Chang. (2000). Facility Location and Layout Copyright.

Chen, G. Y.-H. (Abril 2013). A new data structure of solution representation in hybrid ant colony optimization for large dynamic facility layout problems.

Chen, T. (1991). A sequential construction technique for facility design.

Deshpande, V., Patil, N. D., Baviskar, V., & Gandhi, J. (2016). Plant Layout Optimization Using CRAFT and ALDEP Methodology.

Diego-Más. (2006). Optimización de la distribución en planta de instalaciones industriales mediante algoritmos genéticos.

El-Baz, M. A. (noviembre 2004). A genetic algorithm for facility layout problems of different manufacturing environments.

García, D. d., & Quesada, I. F. (2005). Distribución en planta.

Garcia-Hernandez, Pierreval, Salas-Morera, & Arauzo-Azofra. (2013). Handling qualitative aspects in Unequal Area Facility Layout Problem: An Interactive Genetic Algorithm.

Gilmore. (1962). ptimal and Suboptimal Algorithms for the Quadratic Assignment Problem.

Glover, F. L. (2007). Principles of Tabu Search, Handbook of approximations Algorithms and metaheuristics.

Gonzalez-Cruz, M. C., & Gomez-Senent, E. (2011). An entropy-based algorithm to solve the facility layout design problem.

Hadi-Vencheh, & Mohamadghasemi. (2012). An integrated AHP–NLP methodology for facility layout design Journal of Manufacturing Systems.

Hadi-Vencheha, & Mohamadghasemi. (2013). Journal of Manufacturing Systems.

Handling, M. M. (2003). How To Create Plant Layouts From Scratch.

Hillier, F., & Lieberman, G. J. (2010). Introducción a la investigación de operaciones.

John, E, Kuznecov, A., & Thomas, A. &. (2011). cturing design. International Journal of Productivity and performance Management.

John, E, Kuznecov, A., Thomas, A., & Davies, A. (2011). A weighted similarity coefficient technique for manufacturing design.

Johnson. (1982). SPACECRAFT for multifloor Layout planning.

Kothari, R., & Ghosh, D. (2013). Insertion based Lin–Kernighan heuristic for single row facility layout.

Kulturel-Konak, S. (2012). A linear programming embedded probabilistic tabu search for the unequal-area facility layout problem with flexible bays.

Maniya, K., & Bhatt, M. (2011). An alternative multiple attribute decision making methodology for solving optimal facility layout design selection problems.

McKendall, A. (2010). Heuristics for the dynamic facility layout problem with unequal-area departments.

McKendall, A. R. (2010). Heuristics for the dynamic facility layout problem with unequal-area departments.



Muther, R. (1973). *Sistematic Layout Planning*.

Papadimitrou, C., & Steiglitz, K. (1998). *Computacional Optimization: Algorithms and Complexity*.

Papageorgiou, L., & Xu, G. (2009). *Process plant layout using an improvement-type algorithm*.

Payscale. (2017). *Mechanical Engineer Salary*.

Pierre, M. (1978). *Distribución en planta*.

Pinedo, M. (2008). *Scheduling. Theory, algorithms and Systems*.

Rawabdeh, & Thaboub. (2005). *A new heuristic approach for a computer-aided facility layout*. *Journal of Manufacturing Technology Management*.

Rodriguez, Z. (2012). *Métodos de distribución*.

Sahin. (2011). *A simulated annealing algorithm for solving the bi-objective facility layout problem*.

Salas Morera, L., Cubero Atienza, A., Hervás Martínez, C., Pérez Alcántara, R., & Sanz Tapia, E. R. (2007). *Aproximación al diseño de distribución en planta por medio de algoritmos tradicionales y genéticos*.

Samarghandi, H. &. (2010). *n efficient tabu algorithm for the single row facility layout problem*.

Taghavi, A., & Murat, A. (2011). *A heuristic procedure for the integrated facility layout design and flow assignment problem*.

Tam, K. Y. (1992). *Genetic Algorithms, Function Optimization, and Facility Layout Design*.

Torrents, A. S., Vilda, F. G., & Postils, I. A. (2010). *Manual práctico de diseño de sistemas productivos*.

Tovey. (2002). Tutorial on computational complexity.

Troncoso, J. C., Alonso, J. A., Pose, J., & González, J. L. (2005). Procedimiento para resolución del problema de las distribuciones de las instalaciones en Plantas Industriales.

Xie, & Sahinidis. (2009). A branch-and-bound algorithm for the continuous facility layout problem. *Computers & Chemical Engineering*.

Young, W. K. (2010). Applying Ant System for solving Unequal Area Facility Layout Problems. Pennsylvania.





# ANEXO

---

## CÓDIGO DEL PROGRAMA SELECCIONANDO

### LOCALIZACIONES

---

```
//
// main.c
// RESOLUCIÓN PROBLEMA FLP INTRODUCCIÓN MANUAL
//
// Created by carlos perez on 15/5/17.
// Copyright © 2017 carlos perez. All rights reserved.
//

#define N_FILAS 3          //Definimos unas cuantas constantes para nuestro
problema
#define N_COLUMNAS 3      // En el caso de querer cambiar el número de
ruta, de departamentos o de productos
#define N_DEPART 9       // solo tendríamos que modificarlos aquí y ya
estaría.
#define N_PRODUCTOS 5
#define RUTA_P_LARGO 7
#define DIMENSIÓN 7

#include <stdio.h>

int dista_man(int x1,int x2,int y1,int y2)
{
    // La siguiente función nos calcula las distancias Manhattan
para nuestro problema
    int dist_x = x1 - x2;
    int dist_y = y1 - y2;
    if(dist_x<0){
        dist_x = -dist_x;
    }
    if(dist_y<0){
        dist_y= -dist_y;
    }
    return dist_x + dist_y; // esta distancia total será la suma de
catetos
}
```

```

int main()
{
    int ruta_p[N_PRODUCTOS][RUTA_P_LARGO]={0,2,1,0,4,6,-1},{1,2,4,3,6,-1,-1},{2,0,6,7,8,5,4},{0,1,3,4,-1,-1,-1},{3,0,1,2,0,-1,-1}};
    int flujos_p[N_PRODUCTOS]={100,200,400,200,150};
    int costo_u_p[N_PRODUCTOS]={2,1,2,2,1};
    int costo_m[N_DEPART][N_DEPART]; // datos del problema
    int dista_inst[N_DEPART][N_DEPART]; // Aquí es donde ponemos la
    ruta, la cantidad a producir, el coste de trasnporte interno
    int dista_dep[N_DEPART][N_DEPART];
    int depart_pos_x[N_DEPART];
    int depart_pos_y[N_DEPART];
    int inst_pos_x[N_DEPART]={0,1,2,0,1,2,0,1,2}; // damos posiciones a
    los departamentos. En el caso de tener departamentos que no se modifiquen
    es decir ej: 5 departamentos en 8 celdas...
    int inst_pos_y[N_DEPART]={0,0,0,1,1,1,2,2,2};
    int asignar[N_FILAS][N_COLUMNAS];
    int coste_total=0;
    int i, j, k, l;

    printf("Matriz distancias Manhattan entre las localizaciones \n\n");
    // un primer cálculo de la distancia entre INSTALACIONES ( no
    departamentos )
    for(i=0; i<N_DEPART; i++){
        printf("\n");
        for(j=0; j<N_DEPART; j++){
            dista_inst[i][j]=dista_man(inst_pos_x[i], inst_pos_x[j],
inst_pos_y[i], inst_pos_y[j]);
            printf("%4d", dista_inst[i][j]);
        }
        printf("\n");
    }
    printf("\n");

    // inicializamos la matriz con ceros para hacer mas eficiente el
    problema y ahorrar memoria
    for(i=0; i<N_DEPART; i++){
        for(j=i+1; j<N_DEPART; j++){
            costo_m[i][j]=0;
        }
    }
    printf("\n");
    for(i=0; i<N_DEPART; i++){
        for(j=0; j<=i; j++){
            printf(" ");
        }
        for(j=i+1; j<N_DEPART; j++){ // calculamos la tabla de coste de

```



flujo entre departamentos, es decir FLUJOxCOSTE al que luego añadiremos la distancia

```

        for(k=0; k<N_PRODUCTOS; k++){
            for(l=0; l<RUTA_P_LARGO-1; l++){
                if(ruta_p[k][l]==i && ruta_p[k][l+1]==j){
                    costo_m[i][j] += flujos_p[k] * costo_u_p[k];
                }
                if(ruta_p[k][l]==j && ruta_p[k][l+1]==i){
                    costo_m[i][j] += flujos_p[k] * costo_u_p[k];
                }
            }
        }
        printf("%4d", costo_m[i][j]);
    }
    printf(" \n");
}

printf("Introduce el Departamento que quieres introducir en la
localización:\n");
printf("(recuerde que el departamento introducido ha de estar
comprendido entre 0 y %i no introduciendo dos veces el mismo
departamento)\n",N_DEPART );
for (i=0; i<N_FILAS; i++)
{
    for (j=0; j<N_COLUMNAS; j++)
    {
        printf("Localización[%i][%i]=", i, j);
        scanf("%i", &asignar[i][j]);
        if( asignar[i][j]>=N_DEPART || asignar[i][j]<0 )
        {
            printf("El valor introducido es erroneo
\n[%i][%i]=", i, j);
            scanf("%i", &asignar[i][j]);
        }
    }
}

printf("Perfecto, ya has asignado todos los departamentos a las
localizaciones.\n\n Esta es la matriz distancia entre los
departamentos\n\n");

for(i=0; i<N_FILAS; i++){
    for(j=0; j<N_COLUMNAS; j++){
        depart_pos_x[asignar[i][j]] = i;
        depart_pos_y[asignar[i][j]] = j;
    }
}

for(i=0; i<N_DEPART; i++){

```

```
    }
    // calculamos las nuevas distancias Manhattan reutilizando la función
de arriba
    for(i=0; i<N_DEPART; i++){
        printf("%i _", i);
        for(j=0; j<N_DEPART; j++){
            dista_dep[i][j]=dista_man(depart_pos_x[i], depart_pos_x[j],
depart_pos_y[i], depart_pos_y[j]);
            printf("%4d", dista_dep[i][j]);
        }
        printf("\n");
    }

    for(i=0; i<N_DEPART; i++){
        for(j=i+1; j<N_DEPART; j++){
            coste_total += dista_dep[i][j] * costo_m[i][j];
        }
    }

    printf("\n- Opcion seleccionada \n\n");

    for(i=0; i<N_FILAS; i++){
        for(j=0; j<N_COLUMNAS; j++){
            printf(" %2i ", asignar[i][j]);
        }
        printf("\n\n");
    }
    printf("\n");

    printf(" El Coste total para la distribución seleccionada es: %d
€\n\n", coste_total*DIMENSION);

    return 0;
}
```



## CÓDIGO DEL PROGRAMA APLICANDO ALGORITMO GREEDY

---

```
//  
//  
// main.c  
// RESOLUCIÓN PROBLEMA FLP APLICANDO ALGORITMO GREEDY  
//  
// Created by carlos perez on 15/5/17.  
// Copyright © 2017 carlos perez. All rights reserved.  
//  
#define ABECEDARIO 26  
  
#define N_FILAS 3 //Definimos unas cuantas constantes para nuestro  
problema  
#define N_COLUMNAS 3 // En el caso de querer cambiar el número de  
ruta, de departamentos o de productos  
#define N_DEPART 9 // solo tendríamos que modificarlos aquí y ya  
estaría.  
#define N_PRODUCTOS 5  
#define RUTA_P_LARGO 7  
#define DIMENSION 1  
  
#include <stdio.h>  
#include <stdlib.h>  
  
int dista_man(int x1,int x2,int y1,int y2)  
{ // La siguiente función nos calcula las distancias Manhattan  
para nuestro problema  
int dist_x = x1 - x2;  
int dist_y = y1 - y2;  
if(dist_x<0){  
dist_x = -dist_x;  
}  
if(dist_y<0){  
dist_y= -dist_y;  
}  
return dist_x + dist_y; // esta distancia total será la suma de  
catetos
```

```

}

//La siguiente función evalúa de cada departamento en las distintas
posiciones
int evaluar(int prueba_x, int prueba_y, int
posiciones[N_FILAS][N_COLUMNAS], int costo_m[N_DEPART][N_DEPART], int
departamento_evaludado){
    int costo_prueba = 0;
    int i,j;
    int distancia;
    for(i=0; i<N_FILAS; i++){
        for(j=0; j<N_COLUMNAS; j++){
            if(posiciones[i][j] != -1){
                distancia = dista_man(prueba_x, j, prueba_y, i); //
hacemos uso de la función manhattan
                if(posiciones[i][j] < departamento_evaludado){
                    costo_prueba += distancia *
costo_m[posiciones[i][j]][departamento_evaludado];
                    printf("Evaluando %d en %d %d: %d dist :%d
%d\n",departamento_evaludado, i, j,
costo_m[posiciones[i][j]][departamento_evaludado], distancia,
posiciones[i][j]);
                }else{
                    costo_prueba += distancia *
costo_m[departamento_evaludado][posiciones[i][j]];
                    printf("Evaluando %d en %d %d: %d dist :%d
%d\n",departamento_evaludado, i, j,
costo_m[departamento_evaludado][posiciones[i][j]], distancia,
posiciones[i][j]);
                }
            }
        }
    }
    printf("\n");
    return costo_prueba; // devolvemos el coste la posible situación del
departamento i en la posición libre, teniendo el coste de intercambio con
el resto de departamentos
}

// Función que asigna cada departamento a la posición
void asignar_departamento(int *lista_dep_libres, int num_dep_libres, int
*lista_dep_ocupados, int num_dep_ocupados, int *inst_pos_x, int
*inst_pos_y, int posiciones[N_FILAS][N_COLUMNAS], int
costo_m[N_DEPART][N_DEPART]){
    int i, j, k;
    int min_coste[N_DEPART];
    int min_pos_x[N_DEPART];
    int min_pos_y[N_DEPART];
    int departamento_elegido = lista_dep_libres[0];

```



```

int min_departamento_coste;
int min_x, min_y;
int max_departamento_coste;
int max_departamento_num;
int max_x, max_y;
printf("Libres:\n"); // una vez calculado los costes de todos
los departamentos no asignados en todas las posiciones seleccionamos el
minimo de cada posición
for(i=0;i<num_dep_libres;i++){
    printf("%i\n", lista_dep_libres[i]);
}
printf("Ocupados:\n");
for(i=0;i<num_dep_ocupados;i++){
    printf("%i\n", lista_dep_ocupados[i]);
}
for(j=0; j<N_FILAS; j++){
    for(k=0; k<N_COLUMNAS; k++){
        printf("%4i", posiciones[j][k]);
    }
    printf("\n");
}
int coste_prueba;
for(i=0;i<num_dep_libres;i++){
    min_departamento_coste = 100000000; // asignamos un valor muy
grande al minimo y los comparamos todos.
    min_x = -1;
    min_y = -1;
    for(j=0; j<N_FILAS; j++){
        for(k=0; k<N_COLUMNAS; k++){
            if(posiciones[j][k] == -1){
coste_prueba=evaluar(k,j,posiciones,costo_m,lista_dep_libres[i]);
                if(coste_prueba < min_departamento_coste){
                    min_departamento_coste = coste_prueba;
                    min_x = k;
                    min_y = j;
                }
                printf("Resultado: %d, %d\n\n", coste_prueba,
min_departamento_coste);
            }
        } // seleccionamos el PRIMER minimo, es decir que si en
nuestro problema hay dos minimos iguales, nos quedamos con el del
departamento mas temprano en calcularlo
    }
    min_coste[i]=min_departamento_coste;
    min_pos_x[i]=min_x;
    min_pos_y[i]=min_y;
}
printf("Lista de mínimos:\n"); // tenemos una lista de todos los
minimos

```

```

    for(i=0;i<num_dep_libres;i++){
        printf(" %3i (%3i): %d %d, min: %d\n", i, lista_dep_libres[i],
min_pos_y[i], min_pos_x[i], min_coste[i]);
    }
    max_departamento_num = 0;
    max_departamento_coste = min_coste[0];
    max_x = min_pos_x[0];
    max_y = min_pos_y[0];
    for(i=1;i<num_dep_libres;i++){
        if(max_departamento_coste < min_coste[i]){
            max_departamento_num = i;
            max_departamento_coste = min_coste[i];
            max_x = min_pos_x[i];
            max_y = min_pos_y[i];
        }
    }

    // es hora de quedarse asignar el departamento mas dañino, es decir
    el de mayor coste.
    printf("Máximo: i: %i num: %i valor: %i pos: %i %i\n",
max_departamento_num, lista_dep_libres[max_departamento_num],
max_departamento_coste, max_x, max_y);
    posiciones[max_y][max_x] = lista_dep_libres[max_departamento_num];
    departamento_elegido = lista_dep_libres[max_departamento_num];
    lista_dep_ocupados[num_dep_ocupados] = departamento_elegido;
    i=0;
    while(lista_dep_libres[i] != departamento_elegido &&
i<num_dep_libres){
        i++;
    }
    j=i;
    num_dep_libres--;
    for(i=j;i<num_dep_libres;i++){
        lista_dep_libres[i] =lista_dep_libres[i+1];
    }
    num_dep_ocupados++;
    if(num_dep_libres > 0){ // Llamamos otravez a la misma funcion, es
decir, que f(asignar_departamento) es una funcion recursiva. se llama a
si misma hasta que TODOS esten asignados
        asignar_departamento(lista_dep_libres, num_dep_libres,
lista_dep_ocupados, num_dep_ocupados, inst_pos_x, inst_pos_y, posiciones,
costo_m);
    }else{
        printf("Libres:\n");
        for(i=0;i<num_dep_libres;i++){
            printf("%i\n", lista_dep_libres[i]);
        }
        printf("Ocupados:\n");
        for(i=0;i<num_dep_ocupados;i++){
            printf("%i\n", lista_dep_ocupados[i]);
        }
    }

```



```

    }
    printf("Todo asignado.\n"); // Checkeo de que todo esta OK
}

int main()
{
    int ruta_p[N_PRODUCTOS][RUTA_P_LARGO]={0,2,1,0,4,6,-1},{1,2,4,3,6,-1,-1},{2,0,6,7,8,5,4},{0,1,3,4,-1,-1,-1},{3,0,1,2,0,-1,-1}};
    int flujos_p[N_PRODUCTOS]={100,200,400,200,150};
    int costo_u_p[N_PRODUCTOS]={2,1,2,2,1};
    int costo_m[N_DEPART][N_DEPART]; // datos del problema
    int dista_inst[N_DEPART][N_DEPART]; // Aquí es donde ponemos la
    ruta, la cantidad a producir, el coste de transporte interno
    int dista_dep[N_DEPART][N_DEPART];
    int depart_pos_x[N_DEPART];
    int depart_pos_y[N_DEPART];
    int inst_pos_x[N_DEPART]={0,1,2,0,1,2,0,1,2}; // damos posiciones a
    los departamentos. En el caso de tener departamentos que no se modifiquen
    es decir ej: 5 departamentos en 8 celdas...
    int inst_pos_y[N_DEPART]={0,0,0,1,1,1,2,2,2};
    int asignar[N_FILAS][N_COLUMNAS];
    int coste_total=0;
    int num_letra=0;
    int letras_min[ABECEDARIO]={'a','b','c','d','e','f','g','h','i','j','k',
    'l','m','n','o','p','q','r','s','t','u','v','w','x','y','z'};
    int letras_may[ABECEDARIO]={'A','B','C','D','E','F','G','H','I','J','K',
    'L','M','N','O','P','Q','R','S','T','U','V','W','X','Y','Z'};
    FILE *fichero;
    char leer_fichero[200];

    fichero=fopen("flujos_p.txt","r");
    if(fichero == NULL){
        printf("Error al abrir flujos_p.txt\nUsando datos por
defecto.\n");
    }else{
        i=0;
        while (i<N_PRODUCTOS && !feof(fichero) ){
            fscanf(fichero,"%d",&flujos_p[i]);
            i++;
        }
    }
    for(i=0;i<N_PRODUCTOS ;i++){
        printf("%d\n",flujos_p[i]);
    }
    scanf("%d",&i); //Pausa para leer
    i=0;

```

```

    int i, j, k, l, a, b;

    printf("Matriz distancias Manhattan entre las localizaciones \n\n");
    // un primer cálculo de la distancia entre INSTALACIONES ( no
    departamentos )
    for(i=0; i<N_DEPART; i++){
        printf("\n");
        for(j=0; j<N_DEPART; j++){
            dista_inst[i][j]=dista_man(inst_pos_x[i], inst_pos_x[j],
inst_pos_y[i], inst_pos_y[j]);
            printf("%4d", dista_inst[i][j]);
        }
        printf("\n");
    }
    printf("\n");

    // inicializamos la matriz con ceros para hacer mas eficiente el
    problema y ahorrar memoria
    for(i=0; i<N_DEPART; i++){
        for(j=i+1; j<N_DEPART; j++){
            costo_m[i][j]=0;
        }
    }
    printf("\n");
    for(i=0; i<N_DEPART; i++){
        for(j=0; j<=i; j++){
            printf(" ");
        }
        for(j=i+1; j<N_DEPART; j++){ // calculamos la tabla de coste de
flujo entre departamentos, es decir FLUJOxCOSTE al que luego añadiremos
la distancia
            for(k=0; k<N_PRODUCTOS; k++){
                for(l=0; l<RUTA_P_LARGO-1; l++){
                    if(ruta_p[k][l]==i && ruta_p[k][l+1]==j){
                        costo_m[i][j] += flujos_p[k] * costo_u_p[k];
                    }
                    if(ruta_p[k][l]==j && ruta_p[k][l+1]==i){
                        costo_m[i][j] += flujos_p[k] * costo_u_p[k];
                    }
                }
            }
            printf("%4d", costo_m[i][j]);
        }
        printf(" \n\n");
    }
}

```



```

int max = costo_m[0][0];
int max_i=0;
int max_j=0;
for(i=0; i<N_DEPART; i++){
    for(j=i+1; j<N_DEPART; j++){
        if(costo_m[i][j] > max){
            max = costo_m[i][j];
            max_i=i;
            max_j=j; // hacemos una primera asignacion de 2
departamentos para que la distancia sea mínima entre ellos
        }
    }
}

printf("Max %i %i %i\n", max, max_i, max_j);

int lista_dep_libres[N_DEPART];
int num_dep_libres = N_DEPART - 2;
int lista_dep_ocupados[N_DEPART];
int num_dep_ocupados = 2;

for(i=0; i<N_FILAS; i++){
    for(j=0; j<N_COLUMNAS; j++){
        asignar[i][j] = -1;
    }
}
lista_dep_ocupados[0]=max_i;
lista_dep_ocupados[1]=max_j; // tenemos una lista de ocupados y
libres, los dos primeros ocupados son los de mayor coste entre si

int largo_lista_resultados = (N_FILAS-1)*((N_COLUMNAS+1)/2) +
((N_FILAS+1)/2) * (N_COLUMNAS-1);
int lista_resultados_coste[largo_lista_resultados];
int
lista_resultados_posiciones[largo_lista_resultados][N_FILAS][N_COLUMNAS];
int lista_resultados_pos=0;
int saltar;

// probamos la asignacion de estos dos primeros departamentos en
posiciones horizontales
// Desplazamientos horizontales
for(a=0; a < (N_FILAS+1)/2; a++){
    for(b=0; b<N_COLUMNAS-1; b++){
        for(i=0; i<N_FILAS; i++){
            for(j=0; j<N_COLUMNAS; j++){
                asignar[i][j] = -1;
            }
        }
        asignar[a][b] = max_i;
        asignar[a][b+1] = max_j;
    }
}

```

```

    saltar=0;
    for(i=0;i<N_DEPART-2;i++){
        if(i+ saltar == max_i || i+ saltar == max_j){
            saltar++;
        }
        lista_dep_libres[i] = i + saltar;
    }

    printf("Probando: %i %i\n",a,b);
    for(i=0; i<N_FILAS; i++){
        for(j=0; j<N_COLUMNAS; j++){
            printf(" %3i",asignar[i][j]);
        }
        printf("\n");
    }
    asignar_departamento(lista_dep_libres, num_dep_libres,
lista_dep_ocupados, num_dep_ocupados, inst_pos_x, inst_pos_y, asignar,
costo_m);
    for(i=0; i<N_FILAS; i++){
        for(j=0; j<N_COLUMNAS; j++){
            printf(" %3i",asignar[i][j]);
        }
        printf("\n");
    }
    for(i=0; i<N_FILAS; i++){
        for(j=0; j<N_COLUMNAS; j++){
            depart_pos_x[asignar[i][j]] = i;
            depart_pos_y[asignar[i][j]] = j;
        }
    }
    for(i=0; i<N_DEPART; i++){
        printf("%i _ ", i);
        for(j=0; j<N_DEPART; j++){
            dista_dep[i][j]=dista_man(depart_pos_x[i],
depart_pos_x[j], depart_pos_y[i], depart_pos_y[j]);
            printf("%4d", dista_dep[i][j]);
        }
        printf("\n");
    }
    coste_total = 0;
    for(i=0; i<N_DEPART; i++){
        for(j=i+1; j<N_DEPART; j++){
            coste_total += dista_dep[i][j] * costo_m[i][j];
            printf("%4d %4d %4d %4d \n", i,j, dista_dep[i][j],
costo_m[i][j]);
        }
    }
    lista_resultados_coste[lista_resultados_pos] = coste_total;
    for(i=0; i<N_FILAS; i++){
        for(j=0; j<N_COLUMNAS; j++){

```



```

lista_resultados_posiciones[lista_resultados_pos][i][j] = asignar[i][j];
    }
    }
    lista_resultados_pos++;
    printf("Coste total: %d\n", coste_total);
}
}
// probamos la asignacion de estos dos primeros departamentos en
posiciones horizontales
// Desplazamientos verticales
for(a=0; a < N_FILAS-1; a++){
    for(b=0; b<(N_COLUMNAS+1)/2; b++){
        for(i=0; i<N_FILAS; i++){
            for(j=0; j<N_COLUMNAS; j++){
                asignar[i][j] = -1;
            }
        }
        asignar[a][b] = max_i;
        asignar[a+1][b] = max_j;
        saltar=0;
        for(i=0; i<N_DEPART-2; i++){
            if(i+ saltar == max_i || i+ saltar == max_j){
                saltar++;
            }
            lista_dep_libres[i] = i + saltar;
        }

        printf("Probando: %i %i\n",a,b);
        for(i=0; i<N_FILAS; i++){
            for(j=0; j<N_COLUMNAS; j++){
                printf(" %3i",asignar[i][j]);
            }
            printf("\n");
        }
        asignar_departamento(lista_dep_libres, num_dep_libres,
lista_dep_ocupados, num_dep_ocupados, inst_pos_x, inst_pos_y, asignar,
costo_m);
        for(i=0; i<N_FILAS; i++){
            for(j=0; j<N_COLUMNAS; j++){
                printf(" %3i",asignar[i][j]);
            }
            printf("\n");
        }
        for(i=0; i<N_FILAS; i++){
            for(j=0; j<N_COLUMNAS; j++){
                depart_pos_x[asignar[i][j]] = i;
                depart_pos_y[asignar[i][j]] = j;
            }
        }
    }
}

```

```

        for(i=0; i<N_DEPART; i++){
            printf("%i _ ", i);
            for(j=0; j<N_DEPART; j++){
                dista_dep[i][j]=dista_man(depart_pos_x[i],
depart_pos_x[j], depart_pos_y[i], depart_pos_y[j]);
                printf("%4d", dista_dep[i][j]);
            }
            printf("\n");
        }
        coste_total = 0;
        for(i=0; i<N_DEPART; i++){
            for(j=i+1; j<N_DEPART; j++){
                coste_total += dista_dep[i][j] * costo_m[i][j];
                printf("%4d %4d %4d %4d \n", i,j, dista_dep[i][j],
costo_m[i][j]);
            }
            lista_resultados_coste[lista_resultados_pos] = coste_total;
            for(i=0; i<N_FILAS; i++){
                for(j=0; j<N_COLUMNAS; j++){
                    lista_resultados_posiciones[lista_resultados_pos][i][j] = asignar[i][j];
                }
                lista_resultados_pos++;
                printf("Coste total: %d\n", coste_total);
            }
        }
        // para finalizar y analizar el coste que es el objetivo de este
        problema imprimimos los resultados : Distribución y Coste
        for(k=0; k<lista_resultados_pos; k++){
            printf("- Opcion %i: %i Ä\n", k+1,
lista_resultados_coste[k]*DIMENSION);

            //printf("Distribución de los departamentos en las celdas\n\n");
            for(i=0; i<N_FILAS; i++){
                for(j=0; j<N_COLUMNAS; j++){
                    num_letra = lista_resultados_posiciones[k][i][j];
                    if(num_letra > ABECEDARIO){
                        printf(" %c ", letras_may[num_letra / ABECEDARIO]);
                        num_letra = num_letra % ABECEDARIO;
                    }
                    printf(" %c ", letras_may[num_letra]);
                    //printf("%D\t", lista_resultados_posiciones[k][i][j]+1);
                }
                printf("\n");
            }
            printf("\n");
        }
    }

```



```
return 0;
}
```

## Resultados problema supuesto

---

- Opción 1: 261063 €

22	72	65	21	91	99	93	63	80	42
51	26	89	66	58	98	15	82	90	10
44	8	96	27	25	88	60	92	17	3
55	2	79	77	95	47	57	39	61	6
73	69	78	36	49	87	1	43	75	33
56	64	19	52	28	53	97	94	24	31
23	34	76	71	50	35	81	12	83	5
11	37	86	67	14	70	20	40	18	9
13	4	16	59	74	7	38	41	32	30
45	48	54	62	46	68	84	85	100	29

- Opción 46: 260711 €

22	26	51	66	89	99	93	49	69	1
72	65	21	8	96	58	15	36	17	60
44	79	27	47	88	91	97	52	35	90
55	2	77	25	95	61	10	43	42	80
63	82	39	57	92	98	70	6	87	3
73	56	78	64	53	24	94	19	81	75
86	37	20	71	76	59	74	28	12	83
23	13	11	34	67	7	40	50	5	33
4	16	38	41	45	29	14	18	9	31
48	54	62	68	84	85	32	46	30	100

- Opción 2: 271230 €

51	22	72	65	21	80	3	42	90	6
44	26	8	66	27	1	33	58	15	75
89	96	55	49	36	69	91	25	95	31
2	79	93	99	88	77	57	97	78	98
52	73	87	17	92	61	39	60	28	24
35	81	94	56	43	82	70	12	83	5
19	37	64	10	47	53	63	76	9	18
23	46	86	74	71	50	34	14	40	30

- Opción 47: 243589 €

26	22	66	44	99	93	10	2	19	55
65	72	51	61	17	36	43	79	52	73
71	8	1	89	49	97	91	77	25	95
7	21	96	57	58	39	88	47	27	69
74	20	63	78	98	60	92	82	15	35
59	50	14	70	87	42	3	80	90	6
86	46	64	56	94	53	24	75	28	81
4	13	11	18	9	76	31	12	83	5

4	16	7	59	20	32	11	13	67	29
38	41	45	48	54	62	68	84	85	100

- Opción 3: 252985 €

44	51	22	72	65	36	94	24	56	40
89	66	26	8	17	10	19	63	64	18
96	2	99	93	88	61	15	53	71	9
49	58	79	91	47	43	42	50	33	76
1	55	77	52	92	98	80	3	20	67
25	27	21	95	87	78	90	83	31	5
60	57	39	97	35	6	81	12	14	34
69	74	82	73	70	28	75	37	13	30
59	46	23	4	86	7	32	16	11	38
41	45	48	54	62	29	68	84	85	100

16	38	41	45	32	34	40	33	37	67
48	54	62	68	84	85	100	29	23	30

- Opción 48: 255289 €

44	26	22	51	94	36	8	24	81	56
66	65	72	17	57	97	53	90	35	64
2	99	79	77	61	39	52	19	70	83
55	93	58	25	89	15	49	1	6	12
10	91	95	47	43	96	21	80	42	3
37	88	92	98	60	87	27	76	40	5
86	67	14	63	78	82	33	75	28	31
32	20	73	13	7	74	69	34	9	18
23	71	4	16	38	46	59	50	29	30
41	45	48	54	62	68	84	11	85	100

- Opción 4: 264807 €

89	44	51	22	72	65	19	56	11	86
96	8	66	26	55	21	99	64	37	23
58	49	2	79	52	69	93	97	34	46
25	1	36	77	27	87	17	10	76	18
95	98	57	42	43	47	61	78	14	9
91	60	88	92	80	35	70	24	40	32
6	90	39	73	3	15	81	94	29	4
74	63	82	83	75	33	53	13	16	38
59	50	7	12	31	28	41	45	48	54
67	71	5	20	30	62	68	84	85	100

- Opción 49: 265719 €

66	44	26	22	51	94	89	96	81	75
99	93	65	72	91	42	8	24	35	21
2	10	79	58	15	88	90	80	6	27
57	55	77	39	47	92	52	70	83	12
97	17	25	95	98	87	82	53	69	28
36	61	43	1	60	49	56	3	31	33
76	78	19	63	9	5	40	64	50	67
32	37	73	14	18	71	20	74	29	4
34	7	86	59	46	30	13	16	38	41
11	23	45	48	54	62	68	84	85	100

- Opción 5: 246955 €

96	89	44	51	22	72	65	56	64	86
63	58	8	66	26	79	99	19	23	4
60	55	2	52	98	21	93	87	15	13
25	49	77	88	36	92	47	17	20	46
27	95	91	57	1	43	61	10	32	11
82	42	39	35	97	73	78	53	16	38
69	80	90	3	6	24	94	76	34	41

- Opción 50: 251706 €

99	66	44	26	22	51	32	86	4	16
93	17	61	65	72	96	21	74	38	41
36	10	87	2	8	89	70	78	46	45
47	57	97	79	77	49	52	69	20	59
91	58	88	39	92	1	35	37	71	48
19	60	43	55	25	27	28	50	13	7
15	53	63	95	82	73	64	67	23	54



## REVISIÓN DE MÉTODOS DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

33	75	28	81	83	12	31	67	45	48
59	74	71	70	50	7	40	37	54	62
18	9	5	14	30	29	68	84	85	100

42	98	80	90	6	3	81	5	30	62
31	12	75	83	24	94	14	29	68	84
76	33	56	34	40	9	18	11	85	100

- Opción 6: 256536 €

55	96	89	44	51	22	72	65	94	37
25	63	58	8	66	26	79	52	35	19
95	60	77	2	49	73	21	1	81	14
92	91	98	57	88	36	47	43	24	40
87	27	69	93	99	61	17	70	53	76
15	82	42	39	10	97	64	56	9	18
67	90	80	3	83	12	78	28	50	34
20	71	33	6	74	31	7	86	11	4
23	5	75	46	59	32	16	38	41	45
13	30	48	29	54	62	68	84	85	100

- Opción 51: 266572 €

26	66	99	93	10	43	73	15	90	50
22	61	17	57	97	87	39	63	80	3
72	65	1	36	49	60	70	82	42	31
51	8	89	96	58	91	95	98	24	53
44	79	52	77	19	25	55	81	94	56
21	2	88	47	92	35	64	76	34	40
37	78	12	27	83	69	6	18	9	75
86	71	20	74	7	28	14	67	5	33
4	16	13	46	59	32	23	30	11	38
41	45	48	54	62	68	29	84	85	100

- Opción 7: 267356 €

73	55	96	89	44	51	22	72	65	23
95	25	63	58	8	66	26	79	47	71
42	92	91	77	2	88	21	52	35	19
82	61	27	93	60	99	17	94	81	87
80	39	49	57	70	36	1	24	28	76
3	64	98	10	43	56	53	40	86	34
90	15	83	69	78	14	50	37	11	4
9	18	12	97	5	59	30	16	38	41
6	75	31	67	32	7	29	45	48	54
33	20	74	46	13	62	68	84	85	100

- Opción 52: 259300 €

66	26	10	43	98	77	25	55	15	94
99	22	93	1	91	79	95	47	90	6
65	72	51	89	21	87	2	92	88	24
17	61	97	58	96	60	44	19	80	42
57	36	8	49	27	73	52	35	3	9
39	70	14	53	82	78	28	81	40	18
86	76	69	50	71	56	33	12	83	75
34	59	7	63	64	37	20	31	5	32
11	4	46	74	16	13	67	23	30	29
38	41	45	48	54	62	68	84	85	100

- Opción 8: 264333 €

15	73	55	96	89	44	51	22	72	65
3	95	25	63	58	8	66	26	79	47
80	42	92	91	77	2	88	21	52	35
90	82	61	27	93	60	99	17	94	81
56	64	39	49	57	70	36	1	28	50
24	6	83	98	10	43	87	14	37	19

- Opción 53: 237506 €

99	66	26	87	60	47	92	90	6	67
93	17	22	10	91	25	88	15	83	71
61	65	72	43	58	95	44	55	12	31
57	36	39	51	79	77	2	78	76	34
97	73	89	42	98	80	75	3	50	33
70	8	1	96	82	21	27	24	53	5

75	31	12	53	69	78	76	71	4	86
33	5	9	18	97	59	34	7	16	38
30	20	40	74	32	11	41	45	48	54
29	67	23	13	46	62	68	84	85	100

14	19	49	69	52	63	28	56	20	29
64	18	40	9	35	81	94	13	11	30
46	86	37	7	59	4	16	23	38	41
45	48	74	32	54	62	68	84	85	100

- Opción 9: 241038 €

20	28	75	42	73	27	44	21	22	72
33	94	3	80	92	96	88	51	26	65
56	24	31	15	55	95	2	89	79	58
81	83	12	90	82	25	77	66	60	91
64	53	35	71	52	39	47	63	8	98
13	76	6	70	69	49	99	57	93	87
34	67	40	9	5	1	17	36	43	10
11	29	37	18	14	19	61	78	97	86
4	16	38	50	30	32	74	7	41	45
48	54	62	68	23	59	46	84	85	100

- Opción 54: 253043 €

93	99	66	26	15	90	92	6	24	83
10	91	17	22	25	44	47	19	53	12
58	61	65	72	95	55	88	78	5	76
97	57	87	39	77	79	2	70	94	20
43	60	98	36	51	89	52	35	81	30
42	80	75	8	21	27	28	3	31	34
71	33	82	1	49	96	56	67	40	37
9	18	63	73	14	69	64	29	11	13
7	50	86	59	74	23	4	16	38	41
32	45	48	54	46	62	68	84	85	100

- Opción 10: 248490 €

26	65	66	99	93	10	74	76	50	34
22	72	44	17	36	61	43	3	75	86
51	8	49	1	57	97	98	80	31	33
89	96	21	58	39	91	78	42	12	67
79	2	87	60	88	77	92	90	6	11
52	69	27	47	19	25	24	56	83	7
73	63	55	82	70	95	53	64	28	59
35	81	15	37	32	18	40	9	5	13
4	94	46	23	71	14	20	29	30	16
38	41	45	48	54	62	68	84	85	100

- Opción 55: 245751 €

10	93	99	66	26	12	83	51	96	32
91	61	17	97	22	87	8	89	19	74
43	58	57	65	72	60	63	1	21	69
53	39	36	82	42	24	80	49	75	28
25	95	77	79	44	6	35	52	27	56
88	98	2	55	15	90	70	76	64	34
92	14	47	78	31	94	3	33	50	46
67	73	18	9	40	81	59	29	13	11
71	7	37	86	30	5	4	16	38	41
20	45	48	23	54	62	68	84	85	100

- Opción 11: 259110 €

66	26	65	57	97	58	27	69	88	12
51	22	72	89	44	21	79	2	55	63
99	93	10	96	39	91	77	82	25	15
1	49	8	43	87	60	52	95	92	90
17	36	61	19	3	98	47	42	80	6

- Opción 56: 245181 €

66	99	93	10	43	91	1	19	71	7
26	17	36	97	87	58	49	52	98	74
22	61	57	8	60	89	95	25	55	59
72	65	51	73	96	79	77	2	86	46
21	44	39	88	42	47	92	35	32	20



## REVISIÓN DE MÉTODOS DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

---

76	73	53	70	31	78	35	94	24	83
50	34	40	56	71	28	33	81	75	20
74	86	37	64	67	14	18	9	32	5
11	59	13	7	4	16	38	41	23	30
45	46	48	54	62	68	84	85	100	29

12	78	3	80	27	69	28	50	13	23
83	53	15	90	82	63	67	5	30	4
24	31	75	6	33	14	29	16	38	41
76	94	70	81	9	18	45	48	54	62
40	34	56	64	37	11	68	84	85	100

- Opción 12: 246885 €

99	66	26	65	25	44	55	92	15	83
93	51	22	72	95	79	2	47	90	6
17	61	91	87	39	77	19	88	24	94
10	97	57	58	98	52	27	21	81	12
36	89	8	60	69	82	35	42	80	76
43	96	49	1	70	28	3	5	75	56
53	71	73	63	64	40	78	31	20	34
32	74	86	14	67	9	30	33	50	29
7	59	46	4	37	18	23	16	13	11
38	41	45	48	54	62	68	84	85	100

- Opción 57: 239464 €

99	66	17	61	36	57	39	47	74	59
93	26	10	87	97	49	1	77	14	50
91	22	8	19	95	89	52	79	3	18
65	72	43	60	58	51	96	25	42	9
88	73	92	44	55	15	35	2	80	28
53	21	82	27	6	90	70	78	75	5
32	20	63	69	98	94	81	31	64	33
71	86	7	12	83	24	76	34	56	30
4	13	11	29	67	40	37	16	38	41
45	48	54	62	23	46	68	84	85	100

- Opción 13: 261830 €

93	99	66	26	65	44	15	90	6	83
10	91	51	22	72	96	19	21	40	12
47	17	58	88	89	60	87	24	94	80
43	97	79	77	2	8	52	76	81	34
36	61	57	1	49	55	27	35	78	42
98	95	39	25	92	82	70	69	3	75
53	71	37	50	63	56	14	5	31	28
32	67	20	73	86	64	30	18	33	9
7	59	13	46	74	23	4	16	29	11
38	41	45	48	54	62	68	84	85	100

- Opción 58: 254124 €

93	99	66	57	97	83	12	31	67	5
10	91	26	58	39	90	6	80	50	75
61	17	22	77	15	44	73	42	28	30
95	65	72	25	55	2	63	3	33	32
51	36	88	79	47	87	78	71	56	37
89	43	92	98	60	24	18	9	40	29
49	8	1	21	82	53	76	34	4	16
96	52	27	70	69	14	64	11	38	41
19	35	81	94	74	46	45	48	54	62
7	86	20	59	23	13	68	84	85	100

- Opción 14: 233504 €

10	93	99	66	26	65	32	86	4	16
87	36	17	51	22	72	19	46	38	41
43	49	61	1	8	52	21	74	45	48
97	57	96	89	79	47	35	70	64	54

- Opción 59: 254201 €

10	93	99	66	57	97	39	53	69	70
49	36	17	26	89	8	82	52	19	35
43	1	61	22	51	96	44	47	27	28
60	87	65	72	58	91	77	79	21	64

60	58	91	44	77	2	88	78	37	71
69	39	95	27	25	92	73	50	20	62
15	98	82	55	63	28	81	94	13	23
90	53	42	80	24	3	40	56	5	30
6	83	12	75	76	34	31	67	11	68
7	59	9	14	18	33	29	84	85	100

90	15	98	95	63	88	2	25	55	78
24	94	80	75	42	92	81	56	14	20
6	83	12	3	31	9	18	37	13	23
74	76	34	33	50	86	71	4	16	38
5	40	30	73	32	67	41	45	48	54
59	7	46	29	11	62	68	84	85	100

- Opción 15: 252640 €

91	10	93	99	66	26	65	88	92	15
60	87	36	17	51	22	72	2	19	44
58	43	49	61	1	8	77	25	55	90
98	97	57	96	89	95	79	52	35	6
71	82	39	70	69	21	47	27	42	80
74	63	53	76	64	78	94	81	75	3
32	37	40	50	73	56	24	28	12	83
4	7	59	34	14	86	9	33	20	31
16	38	46	11	41	67	18	23	29	5
45	48	54	62	68	84	85	100	13	30

- Opción 60: 244551 €

7	10	93	99	66	57	97	39	12	19
1	49	36	17	26	91	87	44	77	52
50	43	51	61	22	8	95	25	15	2
73	96	89	65	72	58	60	55	79	83
71	69	76	92	88	98	6	47	90	35
86	20	34	64	27	70	3	82	31	78
11	32	37	40	21	53	42	80	75	24
13	59	18	9	14	63	56	28	81	94
46	74	4	16	38	29	67	33	5	30
41	45	48	54	62	68	84	23	85	100

- Opción 16: 250225 €

74	91	10	93	99	66	26	65	88	47
53	60	87	36	17	51	22	72	92	19
98	58	43	49	61	1	8	79	52	44
56	95	97	57	96	89	25	77	2	55
24	90	82	39	15	69	81	27	35	94
80	6	63	70	64	3	73	21	28	20
42	83	12	33	31	71	50	78	86	13
75	76	40	37	14	67	46	4	16	23
9	5	34	7	59	11	38	41	45	48
18	32	30	29	54	62	68	84	85	100

- Opción 61: 246924 €

99	93	17	61	91	95	15	87	60	19
66	57	97	88	58	92	90	6	42	33
26	10	47	36	77	25	43	3	80	75
22	39	73	2	79	55	24	94	83	12
72	65	44	82	89	52	63	31	28	56
8	51	1	49	96	98	35	81	64	67
21	53	78	27	70	76	34	40	9	18
86	32	50	71	14	20	5	7	59	4
16	38	74	69	37	11	30	29	41	45
48	54	62	46	23	13	68	84	85	100

- Opción 17: 228864 €

71	74	91	10	93	99	66	26	65	88
18	73	60	87	36	17	51	22	72	92
50	98	58	43	49	61	1	8	79	52

- Opción 62: 254048 €

93	99	91	47	57	97	15	90	6	24
10	66	17	61	25	95	55	12	83	94
53	26	58	79	77	39	76	81	34	40



## REVISIÓN DE MÉTODOS DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

9	42	95	97	57	96	89	25	77	2
33	3	63	39	70	19	55	44	47	35
31	80	90	82	69	15	27	21	20	81
12	83	6	24	53	28	64	78	37	94
67	75	14	76	40	7	56	13	86	4
29	32	5	34	59	11	23	16	38	41
45	48	30	54	46	62	68	84	85	100

51	22	88	92	2	44	31	78	73	5
65	72	43	98	87	82	27	63	56	67
9	42	36	60	80	75	21	33	37	30
89	14	52	35	70	69	28	13	11	29
1	19	49	71	3	64	23	4	16	38
96	8	86	20	50	46	41	45	48	54
18	32	7	74	59	62	68	84	85	100

- Opción 18: 227063 €

46	71	63	91	10	93	99	66	26	65
34	76	73	60	87	36	17	51	22	72
59	74	98	58	43	49	61	1	8	79
7	64	70	95	97	57	96	89	25	77
11	32	53	35	19	52	92	47	88	2
13	94	81	82	69	39	27	55	44	21
29	56	24	6	90	15	80	42	3	37
4	16	40	28	83	12	75	31	86	78
38	41	45	14	67	33	20	9	18	48
54	62	68	30	5	84	50	23	85	100

- Opción 63: 251487 €

28	93	99	17	61	15	90	19	6	80
35	10	66	43	36	12	24	83	81	42
70	97	26	57	1	39	52	94	53	75
56	51	22	8	49	44	47	82	5	3
64	65	72	89	96	77	79	31	76	40
7	91	87	60	58	95	2	88	33	30
59	69	21	27	25	55	92	78	50	34
86	32	73	98	63	14	71	29	18	9
4	16	38	46	74	67	37	20	13	11
41	45	48	54	62	23	68	84	85	100

- Opción 19: 260565 €

44	66	2	99	93	15	10	80	42	56
26	65	55	94	88	91	90	24	3	6
22	72	79	17	47	58	36	98	75	83
51	57	77	25	95	92	19	87	28	12
89	97	39	61	49	52	43	53	33	76
8	70	27	81	1	35	60	5	31	34
96	21	64	82	78	69	14	18	9	30
73	86	37	63	50	71	20	40	67	32
4	16	23	59	74	7	13	38	11	29
41	45	48	54	46	62	68	84	85	100

- Opción 64: 252313 €

37	76	93	99	17	61	15	90	19	6
40	35	10	66	43	36	12	24	83	81
74	70	97	26	57	1	39	52	94	53
14	56	51	22	8	49	44	47	82	5
9	64	65	72	89	96	77	79	80	42
34	28	91	87	60	58	95	2	88	75
18	59	7	63	21	25	55	92	3	30
11	32	71	73	78	69	31	27	50	33
13	4	86	16	46	98	67	20	38	29
41	45	48	54	62	68	23	84	85	100

- Opción 20: 263124 €

99	66	10	17	61	36	43	90	6	80
93	26	65	57	97	1	39	15	19	42

- Opción 65: 260188 €

53	75	80	93	99	17	61	15	90	19
31	76	35	10	66	43	36	12	24	83

51	22	72	8	87	49	47	95	52	75
89	96	91	58	60	77	79	25	24	3
73	44	21	98	88	2	92	55	83	12
32	56	27	69	82	53	5	35	94	76
71	64	63	70	78	50	14	81	28	34
4	16	86	59	74	7	30	40	33	31
38	41	45	48	46	20	67	29	18	9
54	62	68	84	85	13	37	23	100	11

78	82	70	97	26	57	1	39	52	6
28	3	56	51	22	8	49	44	47	94
34	33	64	65	72	89	96	77	79	81
67	50	42	91	87	60	58	95	2	88
32	14	9	63	21	27	25	55	92	5
11	13	18	73	7	69	98	74	40	71
4	16	38	86	59	41	46	20	29	30
45	48	54	62	68	84	85	23	37	100

- Opción 21: 263586 €

93	99	66	17	61	15	90	6	36	19
10	91	26	65	95	43	55	1	50	76
58	51	22	72	25	98	44	8	35	5
97	57	60	87	77	79	2	49	52	34
89	39	92	88	47	28	70	69	81	30
42	96	80	75	27	73	24	83	12	29
63	82	3	21	78	31	33	94	74	23
53	64	9	18	14	40	56	59	13	11
32	71	20	86	67	7	37	46	4	16
38	41	45	48	54	62	68	84	85	100

- Opción 66: 237241 €

93	10	91	97	95	55	15	90	6	67
99	88	58	57	25	77	42	71	12	83
66	17	61	92	79	2	80	24	75	28
26	43	47	44	39	78	76	94	81	34
22	73	98	60	87	70	35	3	31	56
72	65	36	82	63	52	19	33	40	5
21	27	53	49	1	64	14	9	37	29
51	96	89	20	69	32	13	18	11	30
86	7	8	59	50	23	4	16	38	41
45	48	46	74	54	62	68	84	85	100

- Opción 22: 239024 €

10	93	99	66	57	97	39	12	83	86
61	36	17	26	65	87	77	19	31	67
1	49	51	22	72	44	79	52	3	50
43	96	89	8	58	60	47	2	42	33
69	91	15	98	95	25	88	92	80	71
76	78	21	27	70	55	82	35	75	28
34	53	90	24	94	81	63	18	9	32
74	64	6	56	40	14	13	20	4	16
7	59	46	73	37	23	38	41	45	48
11	30	5	29	54	62	68	84	85	100

- Opción 67: 235006 €

10	93	87	97	91	15	90	24	6	83
17	99	36	19	88	92	77	80	76	12
61	66	60	57	58	95	25	42	75	5
43	26	39	47	79	2	55	3	31	40
78	22	44	52	98	35	56	94	28	34
65	72	21	49	70	27	81	69	33	30
8	1	82	89	96	73	50	9	18	67
32	51	53	63	64	20	14	37	29	11
7	59	46	74	71	13	23	4	16	38
86	41	45	48	54	62	68	84	85	100

- Opción 23: 241350 €

43	10	93	99	66	57	97	39	82	70
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----

- Opción 68: 247607 €

97	10	93	19	91	88	92	42	15	33
----	----	----	----	----	----	----	----	----	----



## REVISIÓN DE MÉTODOS DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

87	61	36	17	26	65	77	79	19	63
60	1	49	51	22	72	44	52	25	55
64	96	91	89	8	58	98	2	95	35
56	69	15	53	27	88	47	92	94	81
6	24	90	83	21	78	12	28	73	67
76	3	80	42	74	31	33	37	14	23
34	7	75	59	71	86	13	20	4	16
32	40	50	5	9	18	38	41	45	48
29	11	46	30	54	62	68	84	85	100

61	17	99	36	58	1	47	95	90	6
43	57	66	39	77	49	89	25	80	83
98	87	26	44	60	2	51	55	3	12
71	78	22	8	79	52	96	94	24	31
73	65	72	21	27	82	69	81	76	34
32	70	53	56	40	35	9	5	75	28
7	86	64	63	18	14	20	50	30	67
4	16	38	37	59	74	13	23	11	29
41	45	48	54	62	46	68	84	85	100

- Opción 24: 254374 €

91	43	10	93	99	66	57	97	39	82
58	87	61	36	17	26	65	77	25	47
98	95	1	49	51	22	72	44	79	55
81	60	35	52	89	8	88	2	92	63
94	24	90	15	53	96	70	27	69	14
28	42	80	19	83	12	21	56	9	18
76	75	6	3	71	73	78	64	37	20
34	5	33	40	74	31	67	86	13	23
30	7	59	50	46	4	16	38	41	45
11	32	29	48	54	62	68	84	85	100

- Opción 69: 243018 €

43	97	10	93	15	90	80	3	6	50
87	61	17	99	36	19	42	24	83	53
1	49	57	66	39	69	70	81	12	75
60	89	51	26	52	27	82	64	5	31
96	58	91	22	8	88	35	63	33	76
95	98	65	72	44	92	21	94	28	30
25	77	55	79	2	40	78	56	67	34
7	74	59	47	18	14	9	32	29	11
46	86	71	73	37	20	13	4	16	38
41	45	23	48	54	62	68	84	85	100

- Opción 25: 256140 €

34	91	43	10	93	99	66	57	97	39
60	58	87	61	36	17	26	65	77	25
76	98	95	1	49	51	22	72	44	79
6	53	90	15	52	89	8	88	2	55
28	56	24	94	35	63	70	92	47	82
75	42	80	81	19	96	83	12	27	69
11	71	3	33	73	64	31	21	78	37
7	5	14	40	59	74	67	86	20	13
30	50	9	18	32	46	4	16	38	23
29	41	45	48	54	62	68	84	85	100

- Opción 70: 259808 €

91	43	97	10	93	77	25	55	71	7
60	87	61	17	99	36	95	82	74	59
58	1	49	57	66	39	2	44	69	46
98	96	89	51	26	79	92	27	20	23
12	19	52	88	22	8	47	63	73	13
90	15	35	65	72	21	56	50	86	11
80	83	6	70	53	76	64	34	29	4
42	3	81	31	33	78	67	16	38	41
24	94	75	28	40	32	37	45	48	54
5	9	18	14	30	62	68	84	85	100

- Opción 26: 259754 €

- Opción 71: 248408 €

32	86	20	43	10	93	99	66	57	97
13	73	87	60	61	36	17	26	65	39
11	18	98	95	58	91	51	22	72	12
14	9	42	21	92	47	25	70	77	79
4	28	69	27	63	88	44	82	2	83
23	75	80	78	76	35	55	6	15	90
16	38	33	3	96	19	89	8	49	52
41	45	67	64	34	81	94	53	31	24
48	54	50	7	29	71	56	1	5	40
62	68	84	85	100	46	59	30	74	37

10	91	58	43	15	98	90	6	83	67
93	61	63	95	82	60	87	53	12	14
99	17	57	97	36	42	80	3	75	33
66	44	88	39	55	19	70	28	31	9
26	2	77	25	27	49	1	89	69	40
22	79	92	47	52	35	51	96	5	18
72	65	73	94	8	81	24	56	37	30
21	71	78	7	76	34	59	50	64	4
32	13	20	23	11	74	46	29	16	38
41	86	45	48	54	62	68	84	85	100

- Opción 27: 258868 €

13	11	32	34	97	10	93	99	66	57
4	7	86	43	87	61	36	17	26	65
16	59	74	76	1	49	21	51	22	72
38	41	46	73	60	8	89	77	12	39
45	48	64	98	53	96	91	58	82	70
54	30	71	5	19	52	27	79	83	35
20	37	40	92	88	69	25	24	90	2
23	29	56	50	78	55	95	15	44	6
62	68	67	33	14	28	75	47	63	80
84	85	100	18	9	31	94	3	81	42

- Opción 72: 236141 €

97	10	43	60	53	74	6	76	34	7
61	93	87	91	88	92	15	24	59	71
17	99	36	19	12	47	90	83	40	20
57	66	1	49	52	95	81	94	50	5
39	26	58	77	79	25	2	31	56	11
51	22	8	98	35	44	55	3	13	30
65	72	89	96	27	69	80	42	64	37
82	70	21	78	28	73	75	9	18	4
63	14	32	46	16	67	33	29	38	41
86	45	48	54	62	68	23	84	85	100

- Opción 28: 252262 €

66	99	93	10	57	97	91	60	43	12
44	17	36	61	39	58	87	56	76	83
26	65	2	55	77	88	92	64	98	34
22	72	94	79	25	95	24	53	73	71
51	89	49	47	15	90	6	40	20	5
21	8	96	1	81	35	70	33	37	14
78	19	27	52	82	80	42	31	11	30
86	74	69	3	63	75	28	9	18	13
4	46	59	50	32	67	29	16	7	38
41	45	48	23	54	62	68	84	85	100

- Opción 73: 254497 €

60	97	10	43	67	71	32	7	59	4
87	61	93	91	47	1	19	74	16	38
36	17	99	95	77	49	52	70	46	41
39	57	66	25	55	69	12	35	23	45
58	44	26	98	2	89	83	28	48	54
82	8	22	88	79	96	56	73	64	62
27	65	72	92	21	51	14	20	86	68
42	63	53	50	78	31	9	18	13	84
80	90	15	3	24	94	5	81	30	85
76	6	33	75	34	40	37	29	11	100



## REVISIÓN DE MÉTODOS DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

- Opción 29: 254131 €

93	99	91	36	49	97	39	77	52	35
10	66	17	61	57	43	87	79	19	81
89	26	65	58	1	60	25	47	2	70
51	22	72	8	95	92	44	88	74	94
96	90	98	69	27	55	82	24	76	28
64	15	6	53	83	12	56	59	71	34
5	73	21	63	78	75	14	40	7	11
86	3	80	42	31	18	9	37	13	4
30	32	33	50	46	20	23	16	38	41
45	48	29	54	67	62	68	84	85	100

- Opción 74: 241439 €

58	60	97	10	43	98	25	7	23	4
89	87	61	93	91	95	55	32	71	16
96	36	17	99	77	92	19	64	20	13
27	39	57	66	88	76	70	14	34	11
21	2	44	26	79	52	47	56	46	38
49	51	8	22	1	74	67	73	59	41
42	82	65	72	53	35	9	18	86	45
69	78	63	15	94	40	50	37	48	54
80	90	6	3	24	81	5	29	62	68
75	33	83	12	31	28	30	84	85	100

- Opción 30: 249424 €

87	93	99	17	61	97	19	39	15	90
60	10	66	43	36	57	47	55	82	6
58	91	26	65	95	25	77	92	63	24
96	51	22	72	79	2	88	44	12	83
98	89	53	21	52	49	27	76	5	94
71	8	78	1	31	3	35	81	42	80
59	7	73	37	69	70	33	30	40	75
4	32	86	50	74	64	28	34	20	56
16	38	41	45	67	14	23	18	9	29
48	54	62	68	84	46	85	11	13	100

- Opción 75: 248928 €

91	58	60	97	10	43	90	83	6	5
98	89	87	61	93	42	15	12	75	30
95	96	36	17	99	27	80	76	33	34
55	25	39	57	66	82	63	53	28	23
88	49	77	44	26	69	3	31	67	32
47	1	51	8	22	21	73	50	13	11
92	2	79	65	72	78	24	40	37	29
35	52	19	70	20	14	9	18	4	16
81	94	64	56	7	86	38	41	45	48
71	74	59	46	54	62	68	84	85	100

- Opción 31: 242082 €

79	87	93	99	17	61	97	19	52	70
77	60	10	66	43	36	57	39	35	76
25	58	91	26	65	95	49	1	53	64
55	44	51	22	72	89	96	82	94	81
2	47	98	27	15	90	8	69	24	56
92	88	42	80	63	6	83	12	28	34
37	33	78	21	3	31	14	74	50	40
20	71	86	75	73	7	9	59	46	11
13	23	32	29	67	5	18	4	16	38
41	45	48	54	62	30	68	84	85	100

- Opción 76: 254914 €

91	58	92	95	25	9	18	71	20	13
10	88	97	79	77	78	33	14	37	4
93	61	57	2	55	27	69	67	32	23
99	17	44	42	47	80	70	75	16	38
66	63	39	90	15	6	3	28	29	41
26	43	98	82	36	21	5	76	34	11
22	60	87	73	83	12	31	30	45	48
72	65	53	24	94	19	81	40	86	54
8	89	96	49	52	35	59	74	62	68
7	51	1	56	64	50	46	84	85	100

- Opción 32: 240324 €

49	52	87	93	99	17	61	97	19	46
98	77	60	10	66	43	36	57	39	86
55	25	58	91	26	65	95	70	82	63
1	79	44	51	22	72	42	28	50	73
2	35	89	47	15	8	80	3	33	67
69	92	96	88	90	6	78	75	31	32
27	74	81	64	24	21	83	12	29	4
59	7	94	56	53	76	34	14	11	16
20	37	71	5	40	18	9	13	38	41
23	45	48	30	54	62	68	84	85	100

- Opción 77: 230106 €

87	43	60	98	73	20	71	7	13	4
97	10	58	91	78	67	34	59	11	16
61	93	19	88	95	53	76	14	38	41
17	99	36	25	92	47	70	64	45	48
57	66	77	79	2	52	35	56	74	54
39	26	82	44	49	1	81	94	50	46
51	22	8	55	89	96	24	40	37	62
65	72	15	27	12	21	69	28	86	68
5	63	90	6	83	31	3	33	29	84
30	32	23	75	42	80	9	18	85	100

- Opción 33: 265200 €

35	49	52	87	93	99	17	61	97	19
47	98	77	60	10	66	43	36	57	39
42	55	25	58	91	26	65	95	70	82
15	1	79	44	51	22	72	8	63	46
90	81	2	89	88	92	76	14	32	34
28	80	6	96	74	21	7	67	73	86
75	94	69	53	27	33	64	20	13	11
24	83	12	40	78	56	37	4	16	38
9	3	18	31	71	23	41	45	48	54
5	59	50	30	29	62	68	84	85	100

- Opción 78: 239808 €

3	1	43	19	80	31	6	33	75	50
49	97	10	52	42	90	74	28	59	7
82	61	93	91	12	15	83	53	5	9
36	17	99	87	47	35	24	81	76	18
39	57	66	98	77	95	70	40	30	34
96	44	26	60	55	25	94	14	32	11
89	51	22	58	79	64	56	73	37	13
8	65	72	63	92	67	29	4	16	38
27	69	88	2	78	20	41	45	48	54
46	86	21	71	23	62	68	84	85	100

- Opción 34: 251347 €

92	47	77	25	87	93	99	17	61	97
28	55	79	98	60	10	66	43	36	57
88	2	42	95	58	91	26	65	19	39
75	15	44	96	89	51	22	72	49	52
6	90	80	27	69	8	1	21	82	35
40	24	76	83	34	53	3	78	94	81
20	71	9	14	64	18	31	63	12	70
5	33	56	37	50	67	73	7	74	59
13	30	32	4	11	16	38	86	46	41

- Opción 79: 259214 €

80	3	1	43	33	52	19	74	50	7
42	49	97	10	28	69	35	9	59	32
90	75	61	93	91	5	81	18	30	46
6	36	17	99	87	76	77	40	34	11
15	39	57	66	55	53	95	70	14	23
24	96	44	26	60	82	25	73	20	13
8	89	51	22	58	2	98	63	4	16
83	21	65	72	27	79	47	37	38	41
94	12	31	78	88	92	67	45	48	54



## REVISIÓN DE MÉTODOS DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

29	23	45	48	54	62	68	84	85	100
----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

- Opción 35: 249062 €

90	15	63	82	97	87	93	99	17	61
24	92	47	39	60	57	10	66	43	36
53	88	77	25	58	91	95	26	65	19
6	2	79	55	98	44	51	22	72	52
76	78	69	27	21	70	89	96	49	35
83	12	80	40	28	42	94	8	1	81
5	34	75	56	3	64	71	14	73	50
20	31	67	33	37	9	18	74	7	86
30	29	11	13	23	32	4	46	59	16
38	41	45	48	54	62	68	84	85	100

56	64	29	86	71	62	68	84	85	100
----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

- Opción 80: 268427 €

33	80	3	1	43	25	31	12	9	50
6	42	49	97	10	95	55	83	74	29
15	90	88	61	93	91	77	19	18	59
24	92	36	17	99	87	52	47	40	7
69	75	39	57	66	98	79	14	67	71
82	27	96	44	26	60	2	56	32	37
94	8	89	51	22	58	78	64	23	4
53	5	21	65	72	35	28	86	16	38
76	81	20	70	63	73	41	45	48	54
34	30	46	11	13	62	68	84	85	100

- Opción 36: 248500 €

12	92	25	91	97	87	36	93	99	17
42	98	95	58	60	57	19	10	66	61
80	88	47	52	1	49	43	8	26	65
75	2	77	79	39	73	89	51	22	72
3	28	55	15	44	90	96	27	69	21
83	31	20	35	82	70	63	6	53	78
50	9	18	14	40	24	74	76	34	86
33	71	32	81	94	5	56	64	11	4
16	67	13	37	30	59	7	29	38	41
45	48	23	54	62	46	68	84	85	100

- Opción 81: 240344 €

58	63	60	98	3	75	28	33	67	59
91	95	87	42	80	1	31	14	9	7
10	25	55	43	90	15	12	83	18	5
93	61	73	97	27	6	24	53	40	76
99	17	92	82	36	49	19	69	37	34
66	77	57	39	21	52	35	81	50	30
26	2	88	44	96	70	94	56	29	11
22	79	47	51	89	8	64	13	4	16
72	65	78	20	32	74	46	38	41	45
71	86	23	48	54	62	68	84	85	100

- Opción 37: 258732 €

99	93	17	61	91	36	87	19	42	80
66	57	97	47	58	49	60	52	6	3
44	10	39	2	43	1	55	82	15	31
26	65	77	79	12	25	95	83	90	35
22	72	8	88	27	92	69	63	70	75
51	89	96	21	98	78	94	24	81	33
56	53	64	73	74	50	76	18	9	28
86	32	37	71	20	59	34	40	67	5

- Opción 82: 254643 €

5	1	50	6	14	34	28	75	30	11
87	43	60	90	15	76	40	18	37	7
97	10	49	83	98	24	31	9	74	59
61	93	19	91	52	95	53	3	29	67
17	99	36	12	77	25	55	80	20	13
57	66	96	58	70	35	81	42	33	32
39	26	89	82	79	47	94	71	23	4
51	22	8	88	92	2	78	16	38	41

4	16	38	41	7	46	23	29	14	30
45	48	54	62	13	68	11	84	85	100

**- Opción 38: 220942 €**

10	93	87	97	47	86	71	20	34	13
17	99	36	91	19	88	92	53	76	11
61	66	60	57	95	39	55	82	63	56
43	26	65	58	44	77	25	94	24	40
51	22	72	8	79	98	2	21	78	37
1	49	89	96	52	35	27	69	12	64
73	9	42	70	80	90	15	81	83	4
18	14	28	75	3	6	33	67	31	16
50	7	74	32	30	5	23	38	41	45
46	59	48	54	62	29	68	84	85	100

65	72	44	27	69	73	86	45	48	54
46	63	64	21	56	62	68	84	85	100

**- Opción 83: 281934 €**

2	3	1	88	52	80	90	31	6	75
79	49	43	25	55	42	69	12	83	24
77	97	10	91	95	92	15	35	56	94
82	61	93	87	27	19	74	28	53	81
36	17	99	63	47	78	33	76	5	40
39	57	66	60	21	70	64	9	37	30
96	89	26	58	50	67	34	18	29	4
8	51	22	98	20	14	32	11	13	16
44	65	72	71	73	23	38	41	45	48
46	59	7	86	54	62	68	84	85	100

**- Opción 39: 243761 €**

97	10	93	87	60	91	25	55	53	15
61	17	99	36	58	98	95	42	80	90
43	57	66	8	39	77	19	82	70	6
49	89	26	65	79	52	27	69	35	75
96	51	22	72	47	63	92	21	3	24
1	64	44	78	2	88	50	12	83	94
32	56	73	76	34	40	31	33	28	81
74	7	59	37	71	18	14	9	67	5
46	4	16	86	11	13	20	23	30	29
38	41	45	48	54	62	68	84	85	100

**- Opción 84: 241032 €**

67	31	3	1	35	80	42	75	28	50
32	12	49	43	52	69	33	81	9	18
76	83	97	10	19	95	90	24	6	14
34	70	61	93	91	25	15	94	40	5
74	36	17	99	77	87	92	53	71	20
82	39	57	66	60	88	47	56	37	30
64	96	89	26	58	98	27	7	59	13
63	8	51	22	79	2	21	78	29	4
11	46	65	72	44	55	23	16	38	41
45	48	86	73	54	62	68	84	85	100

**- Opción 40: 261609 €**

43	97	10	93	91	77	35	81	94	14
95	61	17	99	36	87	52	82	19	53
60	58	57	66	49	39	2	70	24	78
25	96	1	26	65	79	44	69	64	28
55	89	51	22	72	47	27	63	21	76
98	15	90	8	88	83	12	40	56	34
92	42	80	6	9	75	18	31	67	11

**- Opción 85: 238054 €**

50	67	31	3	1	35	80	42	75	28
32	14	12	49	43	52	69	33	81	9
74	76	83	97	10	19	95	90	24	6
59	7	70	61	93	91	25	15	94	40
46	34	36	17	99	77	87	92	53	18
4	82	39	57	66	60	88	47	56	5
16	64	96	89	26	58	98	27	71	20



## REVISIÓN DE MÉTODOS DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

7	33	3	73	74	59	86	37	4	16
32	50	5	46	71	29	38	41	45	48
20	23	30	13	54	62	68	84	85	100

38	63	8	51	22	79	2	21	78	30
41	11	86	65	72	44	55	37	13	29
45	48	54	62	73	68	23	84	85	100

- Opción 41: 256063 €

15	43	97	10	93	91	78	19	7	59
87	95	61	17	99	36	2	76	71	34
39	60	58	57	66	49	77	70	14	74
90	25	96	1	26	65	79	52	64	37
98	55	89	51	22	72	44	47	73	23
6	82	24	83	8	88	63	40	56	11
80	42	53	12	69	94	81	35	13	4
3	92	27	21	31	28	9	18	16	38
75	5	33	67	50	86	46	41	45	48
30	32	29	20	54	62	68	84	85	100

- Opción 86: 239080 €

20	9	18	14	5	34	30	13	11	4
33	94	83	24	53	76	40	32	16	38
31	42	12	75	81	28	37	67	29	41
3	80	15	90	35	6	19	50	23	45
73	92	55	82	52	69	70	56	59	48
27	96	95	25	39	49	1	64	74	46
44	88	2	77	47	99	17	61	7	54
21	51	89	66	63	57	36	78	62	68
22	26	79	60	8	93	43	87	84	85
72	65	58	91	98	10	97	71	86	100

- Opción 42: 255468 €

90	15	43	97	10	93	91	88	92	7
6	87	95	61	17	99	36	2	19	47
80	39	60	58	57	66	49	77	50	32
42	98	25	96	1	26	65	79	78	59
75	24	55	89	51	22	72	44	21	56
83	12	94	3	53	8	76	52	64	20
5	82	81	27	69	63	40	34	71	37
28	9	35	31	70	73	74	86	11	13
33	30	18	14	67	4	46	16	38	41
29	45	23	48	54	62	68	84	85	100

- Opción 87: 246198 €

83	24	3	80	90	56	76	75	50	5
12	1	31	42	94	81	6	33	9	32
87	43	60	98	15	53	40	28	18	7
97	10	49	25	55	69	34	67	74	59
61	93	19	52	95	92	35	14	11	30
17	99	36	77	91	88	37	20	29	13
57	66	96	58	47	70	64	46	71	4
39	26	89	82	2	27	78	23	16	38
51	22	8	79	44	21	41	45	48	54
65	72	73	63	86	62	68	84	85	100

- Opción 43: 260054 €

6	90	15	43	97	10	93	91	88	92
24	80	87	95	61	17	99	36	2	56
94	42	39	60	58	57	66	49	77	76
75	3	98	25	96	1	26	65	79	64
12	83	82	55	89	51	22	72	44	19
81	40	5	53	27	69	8	21	52	47

- Opción 88: 255546 €

90	80	3	42	31	12	83	5	50	30
6	15	1	58	98	24	56	40	9	29
33	75	43	25	60	94	81	67	18	7
28	97	10	95	87	35	19	14	59	32
76	61	93	91	52	53	64	37	13	4
36	17	99	77	92	70	47	71	20	16

35	28	31	33	63	70	50	78	20	34
18	9	37	30	14	73	74	71	86	13
29	32	67	7	59	4	16	46	38	11
41	45	48	23	54	62	68	84	85	100

39	57	66	49	88	69	34	74	11	38
55	44	26	2	79	78	23	46	41	45
8	51	22	89	63	96	73	48	54	62
82	65	72	21	27	86	68	84	85	100

- Opción 44: 260614 €

76	56	53	19	43	97	10	93	91	52
12	24	6	87	95	61	17	99	36	2
83	42	98	39	60	58	57	66	49	77
75	80	90	15	25	96	1	26	65	79
28	3	69	21	55	89	51	22	72	44
31	64	82	27	78	70	92	8	88	35
34	40	33	5	14	63	50	94	47	81
67	9	18	37	30	7	59	73	74	71
11	32	29	13	23	4	20	46	86	16
38	41	45	48	54	62	68	84	85	100

- Opción 89: 254803 €

75	90	80	3	42	28	24	83	31	32
76	6	15	1	58	60	56	12	50	29
40	33	55	43	91	87	98	37	7	23
5	9	97	10	79	25	53	59	67	4
18	14	61	93	77	95	47	71	16	38
34	19	17	99	2	88	92	78	20	41
36	39	57	66	49	52	35	81	74	46
30	82	44	26	27	64	70	94	13	45
8	63	51	22	89	96	69	48	54	62
11	86	65	72	21	73	68	84	85	100

- Opción 45: 251844 €

83	24	90	15	87	43	97	10	93	91
6	94	12	19	95	39	61	17	99	36
76	81	70	98	60	77	58	57	66	49
64	40	56	35	52	25	96	1	26	65
34	5	73	14	47	79	89	51	22	72
30	67	31	78	55	2	44	92	8	88
29	37	28	75	82	80	42	27	63	69
11	13	4	33	7	3	9	21	53	59
16	38	41	45	23	50	18	20	71	74
48	54	62	68	84	85	32	100	46	86

- Opción 90: 246562 €

9	75	90	80	3	42	28	24	83	31
18	76	6	15	1	58	60	56	12	67
50	40	33	55	43	91	87	98	7	32
30	34	5	97	10	79	25	53	71	4
29	37	14	61	93	77	95	47	59	16
23	11	19	17	99	2	88	92	78	46
13	36	39	57	66	49	52	35	81	74
20	38	82	44	26	27	64	70	94	41
45	8	63	51	22	89	96	69	48	54
62	68	86	65	72	21	73	84	85	100



# INDICE DE FIGURAS

---

FIGURA 1-1 ELECCIÓN DISTRIBUCIÓN EN FUNCIÓN DE LA PRODUCTIVIDAD Y Nº DE PIEZAS .....	15
FIGURA 1-2 CLASIFICACIÓN DIFERENTES TIPOS DE REPRESENTACIÓN .....	16
FIGURA 1-3 DIMENSIONES DE LAS INSTALACIONES EN REJILLA Y CURVA DE LLENADO .....	17
FIGURA 1-4 ÁRBOL DE CORTE .....	18
FIGURA 1-5 BAHÍAS FLEXIBLES .....	19
FIGURA 1-6 REPRESENTACIÓN MATRICIAL .....	19
FIGURA 1-7 REPRESENTACIÓN CARTESIANA .....	20
FIGURA 1-8 EJEMPLO MÉTRICA MANHATTAN .....	21
FIGURA 1-9. CLASES DE PROBLEMAS SI $P \neq NP$ (TOVEY 2002) .....	27
FIGURA 2-1 ESQUEMA DE ALGORITMO GENÉTICO FLP .....	39
FIGURA 2-2 DIAGRAMA PROCESO SLP .....	52
FIGURA 2-3 TIPOS DE FLUJO EN PLANTA.....	53
FIGURA 2-4 TIPOS DE FLUJO VERTICAL .....	54
FIGURA 2-5 GRÁFICO DE RELACIÓN ENTRE ACTIVIDADES .....	56
FIGURA 2-6 EJEMPLO DE DIAGRAMA DE RELACIONES.....	58

---

FIGURA 2-7 GRÁFICO DE NECESIDADES DE DISPONIBILIDAD.....	59
FIGURA 2-8 DIAGRAMA DE ESPACIO DE RELACIONES.....	62
FIGURA 2-9 EJEMPLO DE PLANO DE BLOQUE Y DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DETALLADA .....	63
FIGURA 2-10 CALCULO DEL CENTROIDE DE UNA LOCALIZACIÓN .....	68
FIGURA 2-11 DISTRIBUCIÓN DE LAS LOCALIZACIONES EN PLANTA .....	69
FIGURA 2-12 MATRIZ DE FLUJOS ENTRE LOS 10 DEPARTAMENTOS .....	70
FIGURA 2-13 DISTANCIAS MANHATTAN DE LAS LOCALIZACIONES.....	70
FIGURA 2-14 RESULTADO EJEMPLO PROPUESTO .....	71
FIGURA 2-15 DIAGRAMA UBICACIÓN MÉTODO ALDEP .....	74
FIGURA 3-1 PROBLEMA CAMBIO DE MONEDA.....	78
FIGURA 3-2 GRÁFICO DE LOCALIZACIONES Y ZONAS DE TRABAJO O DEPARTAMENTOS .....	81
FIGURA 3-3 PRIMERA ASIGNACIÓN ALEATORIA DEL PROBLEMA .....	83
FIGURA 3-4 GRÁFICO INICIAL DE ASIGNACIÓN DE LOCALIZACIONES A DEPARTAMENTOS .....	86
FIGURA 3-5 GRÁFICO DE ASIGNACIÓN TRAS PRIMERA ITERACIÓN DE LOCALIZACIONES A DEPARTAMENTOS .....	88
FIGURA 3-6 GRÁFICO FINAL DE ASIGNACIÓN DE LOCALIZACIONES A DEPARTAMENTOS .....	89
FIGURA 3-7 GRÁFICOS DE ASIGNACIÓN DE LOCALIZACIONES A DEPARTAMENTOS.....	90
FIGURA 4-1 DISEÑO DE LAS LOCALIZACIONES .....	100
FIGURA 4-2 RESULTADO PROBLEMA.....	100



## INDICE DE TABLAS

---

TABLA 1.1 VENTAJAS Y DES VENTAJAS DE LA DISTRIBUCIÓN POR PORDUCTO .....	8
TABLA 1.2 VENTAJAS Y DESVENTAJAS DE DISTRIBUCIÓN POR PRODUCTO .....	11
TABLA 1.3 VENTAJAS E INCONVENIENTES DEITRIBUCION DE POSICIÓN FIJA .....	12
TABLA 1.4 VENTAJAS E INCONVENIENTES DISTRIBUCIÓN CELULAR .....	13
TABLA 2.1 CLASIFICACIÓN DE MÉTODOS.....	37
TABLA 2.2 LEYENDA RELACIÓN ENTRE ACTIVIDADES.....	55
TABLA 2.3 LEYENDA DE DIAGRAMA DE RELACIONES.....	57
TABLA 2.4 PESOS NUMÉRICOS .....	74
TABLA 3.1 DATOS DE ENTRADA DE LA PRODUCCIÓN DE LA FÁBRICA .....	82
TABLA 3.2 MATRIZ DE COSTE DE RELACIONES ENTRE DEPARTAMENTOS .....	83
TABLA 3.3 MATRIZ DE DISTANCIAS MANHATTAN ENTRE DEPARTAMENTOS .....	84
TABLA 3.4 MATRIZ DE COSTES ( DISTANCIA ENTRE DEPARTAMENTOS · COSTE DE RELACIÓN ENTRE DEPARTAMENTOS ).....	84
TABLA 3.5 MATRIZ DE COSTES DE RELACIÓN ENTRE DEPARTAMENTOS, CON MÁXIMO .....	86
TABLA 3.6 TABLA RESULTADO DE MÍNIMOS COSTES PARA CADA DEPARTAMENTO.....	88
TABLA 4.1 DATOS PROBLEMA NISSAN .....	92
TABLA 4.2 COSTE RELACIONES ENTRE DEPARTAMENTOS .....	93
TABLA 4.3 RESULTADOS PROBLEMA NISSAN .....	94
TABLA 4.4 DATOS PROBLEMA ELECTRODOMÉSTICOS .....	95
TABLA 4.5 COSTE RELACIONES ENTRE DEPARTAMENTOS .....	96

---

---

TABLA 4.6 RESULTADOS PROBLEMA ELECTRODOMÉSTICOS .....	96
TABLA 4.7 DATOS REFERENCIAS TEXTILES .....	97
TABLA 4.8 RESULTADOS REFERENCIAS FÁBRICA TEXTIL .....	98
TABLA 4.9 DATOS ENTRADA DE LAS REFERENCIAS .....	99
TABLA 4.10 RESULTADOS REFERENCIAS FÁBRICA TEXTIL .....	99
TABLA 5.1 TABLA 4. DÍAS EFECTIVOS TRABAJADOS AL AÑO .....	104
TABLA 5.2 DESGLOSE DEL TIEMPO EMPLEADO EN CADA ETAPA (EN HORAS).....	105
TABLA 5.3 SALARIO DEL INGENIERO (EN EUROS).....	105
TABLA 5.4 COSTE DE LAS HORAS EFECTIVAS TRABAJADAS (EN EUROS). SE INCLUYE TOTAL Y PORCENTAJE RELATIVO DE CADA ETAPA. ....	106
TABLA 5.5 COSTE Y AMORTIZACIÓN DE LOS EQUIPOS UTILIZADOS (EN EUROS).....	107
TABLA 5.6 COSTES DE MATERIAL (EN EUROS).....	107
TABLA 5.7 COSTES DE MATERIAL (EN EUROS).....	108
TABLA 5.8 COSTES DE MATERIAL (EN EUROS).....	110

