



TESIS DE GRADO EN
INGENIERÍA INDUSTRIAL

**EL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN EN PLANTA
(LAYOUT): APLICACIÓN DE UN MÉTODO DE
COMPARACIÓN ESTADÍSTICA Y EL MÉTODO
HEURÍSTICO DE TEMPLE SIMULADO**

Autor: Juan Miguel AMOROSO
juan.m.amoroso@gmail.com

Director de Tesis: Ing. Roberto Mariano GARCÍA
rmgarcia@fibertel.com.ar

2006



Resumen Ejecutivo

Una de las problemáticas de índole estratégico que mayor interés ha recibido por parte de las empresas dedicadas a la manufactura, es la de diseño de la distribución en planta o *layout*. La distribución en planta tiene un fuerte impacto en el desempeño de la empresa productiva, y a la vez representa un gran riesgo para la empresa dada la dificultad y el alto costo que insume el cambio del *layout*.

El enfoque clásico del problema de distribución en planta se centra en el conocimiento sobre el marco productivo de la planta, esto es, con un conocimiento de los niveles y formas de producción. Esta certeza sobre el marco productivo fue cambiando a lo largo de los años. En la actualidad, el comportamiento de los mercados sugiere una mayor velocidad de cambio, tanto de productos, como de niveles de demanda. Esto trae consigo un sometimiento de la distribución en planta a distintos escenarios.

A raíz del contexto en el que se desenvuelven las empresas manufactureras, las medidas de efectividad de la distribución en planta se trasladan a un análisis de la flexibilidad. Esto implica una evaluación del desempeño general de la planta en los diversos escenarios de producción en los que pueda estar inmersa la empresa.

Este trabajo evalúa el problema de distribución en planta en un marco de incertidumbre productiva, empleando para ello un modelo derivado del modelo clásico de Asignación Cuadrática.

Para el análisis del problema, se desarrollan dos herramientas de esencia estadística, donde la clave es la comparación entre alternativas posibles de distribución en planta. La primera de ellas consiste en el empleo de un método de Comparaciones Múltiples para el cuál se desarrollan los pasos del método, así como las características principales que definen la aplicabilidad del mismo. La segunda herramienta es el método heurístico de Temple Simulado. Para este último se desarrolla un marco teórico sobre el método y la inclusión del método estadístico de comparación entre alternativas de *layout*.

En una etapa posterior, se analizan las implicancias detrás del diseño de un plano del *layout*. En esta instancia, se destaca tanto el impacto del criterio del diseñador de instalaciones, como las características internas de los departamentos de la planta al momento de arribar a un plano de distribución en planta.



Los métodos y herramientas aplicados permiten llegar a un esquema generalizado de resolución de problemas de distribución en planta bajo esquemas productivos inciertos.



Executive Brief

One of the problems of strategic importance to manufacturing enterprises that has received considerable interest is the design of the facility layout. The facility layout has a great impact on the production performance of the manufacturing company, also representing a great source of risk given the difficulty and the high costs involved on a redesign process of the layout.

The classical approach for modeling the facility layout problem departs from a certainty on the knowledge of the production context of the manufacturing facility, that is, with certainty on production levels and process routings. This certainty has changed over the years. Now-a-days, the complex behavior of markets suggests a greater rate of change in product types, as well as demands. This exposes the facility layout to a wide range of production scenarios.

Due to the uncertain context to which the modern manufacturing facility must accommodate, performance measures of the facility layout shift towards a flexibility analysis. This implies an evaluation of the general performance of the layout under the many possible production scenarios.

This work focuses on the evaluation of the facility layout problem on an uncertain production context, applying, for the purpose, a stochastic model derived from the classical Quadratic Assignment formulation.

As a problem solving strategy, two statistic based methods are proposed; these methods focus on the comparison of layout alternatives. The first method consists of a statistical Multiple Comparison for means procedure, for which a stepwise description of the method is provided, as well as the essential characteristics that define the method's applicability. The second tool consists of the heuristic procedure known as Simulated Annealing. For the latter, a theoretical description of the method, and the inclusion of a statistical method for the comparison between layout alternatives, is performed.

On a later stage, an analysis is conducted, on the intricacies behind the design of a layout plan. Here, focus is placed on the impact of the criteria of the facilities planner or designer, as well as on the influence of department internal characteristics on the conformation of a basic plan for the layout.

The methods and tools applied in this work allow for the development of a generalized methodology for the solution of facility layout problems under uncertain production schemes.





Referencia Bibliográfica

En este trabajo se desarrolla la problemática de distribución en planta en un marco de incertidumbre productiva. Se utilizan para la resolución del problema dos herramientas. La primera de ellas corresponde a un método de Comparaciones Múltiples. Como segundo procedimiento se emplea el método heurístico de Temple Simulado, con la inclusión de un método de comparación estadística.

Se analiza, también, el impacto de las decisiones y el criterio del diseñador de instalaciones en la confección de un plano básico de la distribución en planta.

Palabras Clave: Problema de Distribución en Planta, Problema de Asignación Cuadrática Estocástica, Comparaciones Múltiples, Test de Tukey, Temple Simulado, Test de Welch.



Abstract

This work concerns the problematic of facilities layout design on an uncertain production context. Problem solving is focused on the application of two methods. The first one involves the usage of a statistical Multiple Comparison procedure. The second method involves the use of Simulated Annealing, with an imbedded statistical comparison method.

A later analysis deals with the intricacies and impact, of the criteria and decisions made by the designer, on the development of a basic layout plan.

Key Words: Facilities Layout Problem (FLP), Stochastic Quadratic Assignment Problem (STQAP), Multiple Comparison Procedures, Tukey Test, Simulated Annealing, Welch Test.



Índice:

1.	EL DISEÑO DE PLANTAS DE MANUFACTURA	1
1.1.	Introducción	1
1.2.	El rol del planeador de instalaciones	2
1.3.	Esquema general del problema	2
1.3.1.	El diseño del sistema de manejo de materiales.....	3
1.3.2.	Relación entre el manejo de material y el <i>Layout</i> de la planta.....	4
2.	LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA (<i>LAYOUT</i>)	7
2.1.	Introducción	7
2.2.	Revisión de métodos de análisis de la distribución en planta	8
2.2.1.	Métodos de resolución.....	10
2.2.2.	Una variante del QAP: el Problema de Asignación Cuadrática Estocástica	12
2.3.	Flexibilidad de la distribución en planta	12
2.3.1.	Medidas de flexibilidad	13
2.3.2.	Flexibilidad y los principales sistemas productivos	16
2.4.	Modelado del problema	19
2.5.	Complejidad y abordaje del problema.....	21
3.	ANÁLISIS DEL PROBLEMA PARA EL CASO DE UNA PLANTA PEQUEÑA	23
3.1.	Introducción	23
3.1.1.	Sectorización de la planta.....	24
3.1.2.	Estimación de los volúmenes de producción	24
3.1.3.	Descripción de la secuencia de producción.....	25
3.2.	Simulación y análisis de una alternativa de <i>layout</i>	26
3.3.	Aplicación de un procedimiento de Comparaciones Múltiples	29
3.3.1.	Análisis de la Varianza (ANOVA).....	30
3.3.2.	El Test de Tukey para comparaciones de a pares.....	33
3.4.	Análisis de las mejores alternativas de distribución en planta	36
4.	ANÁLISIS DEL PROBLEMA EN PLANTAS DE MEDIANO Y GRAN TAMAÑO.....	39
4.1.	Introducción	39
4.2.	El método de Temple Simulado	39
4.2.1.	Relación con el problema de Distribución en Planta.....	42
4.2.2.	Incertidumbre y la comparación de estados vecinos (Test de Welch)	43
4.2.3.	El esquema o plan de enfriamiento	46
4.3.	Aplicación al caso de una planta de 12 departamentos.....	48
4.3.1.	Información previa y datos de entrada.....	48
4.3.2.	Selección del esquema de enfriamiento y significación de los ensayos de comparación.....	50
4.3.3.	Resultados de la aplicación del Temple Simulado.....	52
4.3.4.	Elección de una alternativa de <i>layout</i>	55



5.	EL DISEÑO DEL PLANO DEL <i>LAYOUT</i>	57
5.1.	Efecto de las áreas y formas de los departamentos sobre la distribución en planta.....	57
5.2.	Diseño del plano básico del <i>layout</i>	58
6.	PROCEDIMIENTO GENERAL PARA EL ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA.....	63
6.1.	Esquema general del procedimiento.....	63
6.2.	Aplicación del procedimiento a otros modelos del problema.....	64
7.	CONCLUSIONES.....	67
8.	BIBLIOGRAFÍA.....	69



El Problema de Distribución en Planta (*Layout*): Aplicación de un método de comparación estadística y el método heurístico de Temple Simulado





1. EL DISEÑO DE PLANTAS DE MANUFACTURA

1.1. Introducción

En el ámbito industrial, el diseño de una planta de manufactura comprende uno de los proyectos de mayor importancia y envergadura. Las decisiones que se tomen a raíz de la fase de planificación tendrán un fuerte impacto sobre la rentabilidad del producto, por lo que deben evaluarse con criterio las implicancias y consideraciones derivadas del estudio.

A grandes rasgos, el objetivo de la organización manufacturera es seleccionar un producto, diseñarlo, producirlo y venderlo [1]. Cada una de estas fases conlleva a una variedad de decisiones complejas que deben tomarse, cuyo impacto se mide en el resultado final: el éxito del producto en el mercado. Muchas de estas decisiones representan un gran peso para quienes dirigen la empresa puesto que la necesidad de solventar contingencias fruto de las alternativas por las que se optaron en la fase de planificación puede llevar al fracaso, cuando no se dispone de los recursos necesarios.

La etapa inicial de selección del producto se enfoca en la problemática de encontrar un mercado atractivo para poder ingresar. En esta instancia los esfuerzos se centran en la investigación de mercado y pronóstico de la demanda. Una vez escogido el producto, el enfoque se desplaza hacia la ingeniería y el diseño del mismo, de aquí se obtiene un producto pensado desde el punto de vista de la manufactura. La etapa siguiente es el diseño de la planta que sustente el objetivo comercial de la empresa. Esta fase implica una gran variedad de instancias que incluyen, entre otras: el diseño de los procesos para conformar el producto; el desarrollo del sistema de manejo de materiales; y el emplazamiento de recursos productivos dentro de la planta. Finalmente, la concreción de la venta implica esfuerzos en lo referido a la distribución y acciones de comercialización.

Es en la etapa de diseño de la planta de manufactura donde se abre un panorama amplio para quienes toman decisiones, dado que las alternativas son variadas, y el impacto en el resultado final es considerable. Entre los beneficios de un diseño apropiado de la planta cabe mencionar el incremento en la eficiencia del transporte de materiales, el acortamiento en los tiempos de transporte, y la reducción de los tiempos de ciclo así como de los costos de manufactura [Francis *et. al.* 1992; Jajodia *et. al.* 1992; Sims 1991]. En resumen, el correcto diseño de la planta realza la eficiencia de la gestión productiva en general, contribuyendo a la meta final de la organización manufacturera de llevar un producto al mercado que resulte en un beneficio económico.



1.2. El rol del planeador de instalaciones

El planeador de instalaciones es el principal responsable de coordinar los diferentes departamentos que operan en la planta para lograr la mayor eficiencia posible en las operaciones de manufactura [1].

Tradicionalmente, se asocia el trabajo de un planeador de instalaciones con el diseño del esquema de la planta, y su sistema de manejo de materiales. Sin embargo, se trata de una labor de mayor alcance y responsabilidad. Entre las cuestiones adicionales que presenta el trabajo de un planificador de instalaciones están la selección de equipos y máquinas, el desarrollo de las políticas de producción, el control de seguimiento de procedimientos de seguridad, especificación del grado y tipo de automatización, y establecer las aptitudes requeridas de la mano de obra.

El objetivo que comanda el trabajo del planeador de instalaciones es muy amplio, dado que para lograr la mayor eficiencia en la producción, la influencia sobre un único aspecto presenta limitaciones en el grado de mejora. Por ejemplo, un sistema de producción apropiado, puede no ser exitoso si la mano de obra no está calificada para la labor. En consecuencia, para alcanzar su objetivo, el planeador de instalaciones debe tener en mente todas las áreas en el espectro de sus responsabilidades. Así es que la integración de los diversos problemas y aspectos a tratar en el diseño y planificación de una planta de manufactura cobra relevancia.

1.3. Esquema general del problema

La problemática del diseño de una planta de manufactura abarca un área de estudio de gran magnitud dentro de la cuál se pueden distinguir una gama de problemas que atienden objetivos específicos, en algunos casos relacionados entre sí; y que confluyen al objetivo esencial que subyace a la labor del planeador de instalaciones. La relación entre algunos de estos problemas presenta una dificultad adicional, haciendo del abordaje de cada uno separadamente una tarea difícil que requiere de un alto grado de entendimiento y criterio de decisión, sobre todo en cuanto a los supuestos y restricciones que se consideren en cada problema.

Las principales áreas de estudio o problemas dentro del problema de diseño de plantas de manufactura son:

- *Conformación de Departamentos/Células:* Este problema consiste en el agrupamiento de los recursos (máquinas, equipos, etc.) en unidades



productivas. El agrupamiento puede llevarse a cabo por maquinaria de similar funcionalidad, como en el caso de los sistemas de producción tradicionales del tipo taller de labores (*job shop*); o bien, en base a sistemas modernos de producción como la manufactura celular y la manufactura flexible, donde se agrupan máquinas distintas para la elaboración de las diversas piezas o componentes de los productos.

- *Diseño Intra-Departamental/Celular*: El problema trata la configuración, o *layout* de los recursos de producción dentro de los departamentos o células. El *layout* dependerá del sistema de manejo de materiales involucrado en cada departamento o célula [Hamann 1992].
- *Diseño del Centro de Manufactura*: Este problema concentra dos áreas de estudio: i) el problema de distribución en planta (*layout*) de los departamentos o células en el centro, ii) el diseño del sistema de manejo de materiales entre los departamentos/células.

1.3.1. El diseño del sistema de manejo de materiales

Las razones básicas por las que el sistema de manejo de materiales es un aspecto importante en el diseño de una planta de manufactura son el impacto que tiene en los costos operativos, y la relación que presenta con los otros problemas dentro de un estudio de diseño de planta.

La definición que proporciona el MHI (Material Handling Institute) establece que “El manejo de material comprende todas las operaciones básicas relacionadas con el movimiento de los productos a granel, empacados, y unitarios, en estado semisólido o sólido por medio de maquinaria, y dentro de los límites de un lugar de comercio”.

En referencia a la definición, cabe aclarar que lo que distingue al manejo de materiales del transporte es que el transporte refiere al movimiento de materiales de proveedores a los lugares de comercio, o de los lugares de comercio a los clientes. Adicionalmente, con respecto a los movimientos en un sistema de manejo de materiales, estos implican tanto movimientos horizontales (a nivel de piso), o verticales. Finalmente, la definición establece los materiales específicos considerados para el diseño de un sistema de manejo de materiales. El concepto de carga unitaria o producto unitario se refiere al número de objetos dispuestos de forma tal que pueden ser manejados como un solo objeto. Esto surge de la utilidad y practicidad desde el punto de vista económico de transportar el material en un menor número de viajes (menor frecuencia).



Las perspectivas al momento de diseñar un sistema de manejo de materiales se centran en algunos objetivos o metas:

- Aumentar la eficiencia del flujo de material, garantizando la disponibilidad de materiales cuando y donde se necesitan.
- Reducir el costo del manejo de material.
- Mejorar la utilización de las instalaciones.
- Mejorar las condiciones de seguridad y de trabajo.
- Facilitar la manufactura.
- Incrementar la productividad.

Con estos objetivos en mente, para diseñar un sistema de manejo de materiales, el enfoque general es iterativo; arribar a una solución satisfactoria es un proceso de idas y vueltas para lo cuál el diseñador debe ser capaz de analizar tres factores esenciales: a) la elección de la carga unitaria, b) la selección del equipo y la maquinaria de transporte, c) la determinación de los movimientos y rutas que deben seguir los equipos de manejo.

1.3.2. Relación entre el manejo de material y el *Layout* de la planta

Dos problemas fuertemente relacionados en el diseño de plantas de manufactura son el de diseño del sistema de manejo de materiales, y el problema de configuración (*Layout*) en planta.

De manera específica, el problema de distribución en planta requiere el conocimiento del costo operativo de los equipos de manejo de material, con el fin de ubicar los recursos productivos de manera de minimizar el costo de manejo de material. Por otro lado, para diseñar el sistema de manejo de material se debe conocer la distribución en planta, para poder determinar distancias de recorridos, tiempos, orígenes y destinos, necesarios para la selección del equipo que transportará material dentro de la planta y para el conformado de las rutas o recorridos internos.

A raíz de la interdependencia entre los problemas de distribución en planta y diseño del sistema de manejo de material, muchos diseñadores plantean la resolución de ambos problemas conjuntamente. Actualmente, la manera práctica de resolución de ambas problemáticas en conjunto implica resolver primero un problema, y utilizar su solución para resolver el otro, y con esta nueva solución volver a resolver el primero; y así hasta arribar a una solución satisfactoria desde un punto de vista global.

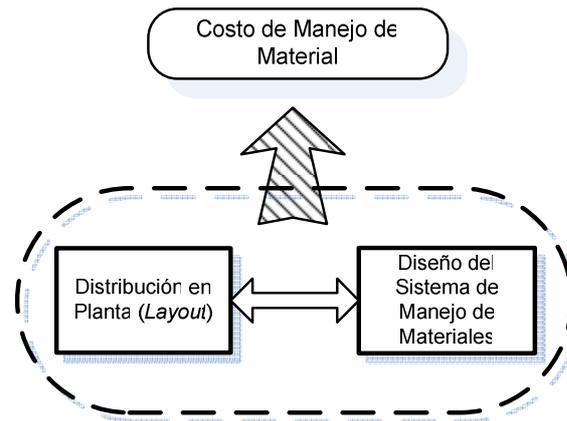


Figura 1.3.2-1: Relación entre la distribución en planta y el diseño del sistema de manejo de materiales

En una perspectiva amplia, ambos problemas apuntan al costo de manejo de material (Figura 1.3.2-1); dos maneras de reducir el costo de manejo de material son: i) disponiendo los departamentos estrechamente relacionados de manera que la distancia entre ellos sea corta, ii) seleccionando el equipo apropiado para efectuar los movimientos entre departamentos. Sin embargo, las restricciones de capacidad y de espacio, junto con el requerimiento de producción, y la disponibilidad de recursos hacen del objetivo de minimizar el costo de manejo de material una tarea difícil.

En este trabajo se aborda la problemática de distribución en planta (*Layout*), o distribución de recursos productivos dentro del centro de manufactura, bajo un punto de vista abierto en cuanto al manejo de materiales, sin hacer hincapié en la selección de equipos, ni confección de recorridos. Dada la estrecha relación entre el diseño del sistema de manejo de materiales y el *layout*, se deja en claro la dependencia de ambos dentro del esquema general del diseño de plantas de manufactura, estableciéndose las limitaciones que surgen de enfocarse en un único problema.





2. LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA (*LAYOUT*)

2.1. Introducción

El problema de distribución en planta (*Layout*) comprende el área de estudio focalizada en la ubicación o disposición dentro de la planta de manufactura de los recursos de producción. La necesidad de análisis de la distribución en planta surge del uso de recursos de producción fijos como máquinas y equipos cuya movilidad dentro de la planta se ve restringida; y del requerimiento de un orden espacial que facilite la organización y promueva la eficiencia de la producción.

La problemática tiene implicancias tanto geométricas y arquitectónicas como de índole productivo. Si bien el objetivo de la distribución en planta es la eficiencia productiva, la opción de una alternativa de *layout* genera restricciones estructurales y de arquitectura de la planta. Consecuentemente, en caso de analizar la distribución en una planta preexistente, son las alternativas de *layout* las que se ven restringidas por las dimensiones y el diseño estructural de la planta. Esta dependencia entre lo productivo y lo estructural agrega una complejidad adicional al problema de distribuir los recursos en planta, haciendo de su estudio un enfoque relevante.

Dentro del problema general del diseño de plantas de manufactura, la distribución en planta es uno de los problemas más importantes. D. R. Sule (1994) ofrece dos razones que justifican la importancia del estudio de la distribución en planta: i) los costos de manejo de materiales abarcan del 30 al 75% de los costos totales de manufactura, por lo que un ahorro en los costos de manejo de material a raíz de una correcta distribución en planta impacta directamente en la eficiencia de la gestión productiva; ii) la distribución en planta es un propósito a largo plazo, y comprende un proyecto costoso, por lo que cualquier necesidad de reacomodo o modificación representa un gran gasto.

Muther (1981) realza la importancia del problema de distribución en planta al postular que la misma es un factor fundamental en las industrias, determinando la eficiencia y posiblemente la supervivencia de la empresa. Los objetivos que plantea para la distribución en planta son:

1. Integración de los factores que hacen a la distribución.
2. Movimiento del material según distancias mínimas.
3. Circulación del trabajo a través de la planta.
4. Utilización efectiva del espacio.



5. Satisfacción y seguridad de los trabajadores.
6. Flexibilidad en la disposición que facilite ajustes posteriores.

Según Muther, para que una distribución en planta sea considerada eficiente, debe reflejar una mejora en la producción: el impacto directo de la distribución en planta es económico; debiendo ser, además, segura y satisfactoria para quienes trabajan dentro de la planta. Los seis objetivos son una generalización de una diversidad de requisitos que debe cumplir una distribución en planta eficiente; ejemplos de estos objetivos son la reducción de retrasos en la producción, la disminución los tiempos de fabricación y las cantidades de material en proceso, la disminución de la congestión, y el incremento en la seguridad de los trabajadores.

En su desarrollo del problema de distribución en planta, Muther plantea los seis objetivos básicos en forma de principios para encarar el problema de distribución en planta de una manera ordenada y sistemática. La metodología SLP (*Systematic Layout Planning*) debida a Muther [2], surge como un procedimiento general para abordar el problema de distribución en planta. Esta metodología cobra interés y se convierte en el procedimiento más utilizado de los últimos 30 años. El SLP es en esencia un método manual de resolución de la distribución en planta; con la creciente complejidad y tamaño de los sistemas de manufactura el uso de la metodología SLP como fue concebida se dificulta, por lo que los esfuerzos investigativos se vuelcan hacia el uso de la computación y la investigación de operaciones como soporte para la resolución del problema.

2.2. Revisión de métodos de análisis de la distribución en planta

En el método manual de resolución del problema de distribución en planta, a través de la metodología SLP, el diseñador se vale de técnicas gráficas y su criterio para decidir entre las distintas alternativas de *layout*. La aplicación de los métodos manuales de resolución está limitada a problemas de escala reducida que no presentan complicaciones, como ser en el esquema de flujo de material. Adicionalmente, existe una tendencia a evaluar alternativas en base a objetivos cuantificables y no simplemente las consideraciones del diseñador. Sin embargo, el uso de técnicas computacionales y de investigación de operaciones sirve de complemento al trabajo del diseñador en la elección de una distribución en planta.

Las formulaciones del problema de distribución en planta se dividen en aquellos orientados a *layouts* de área igual, y de área desigual. Las distribuciones en planta de área igual se refieren a aquellos problemas donde



las restricciones geométricas son despreciables, tal el caso de una planta donde los departamentos son de dimensiones similares. Los problemas de área desigual tienen en consideración las restricciones geométricas de cada departamento o estación de trabajo y de la planta.

La formulación clásica para problemas de área igual es la conocida como Problema de Asignación Cuadrática (*QAP – Quadratic Assignment Problem*). La primera aplicación del QAP es debida a Koopmans y Beckman (1957) quienes lo utilizaron como modelo matemático relacionado a actividades económicas. La denominación Cuadrática se refiere a que la función objetivo es cuadrática con respecto a las variables de decisión. La formulación del problema es la siguiente:

QAP:

$$\min Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N f_{ij} d_{kl} x_{ik} x_{jl} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^n x_{ik} = 1 \quad \forall k \in \{1, \dots, N\} \quad (2)$$

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

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad \forall i, j \in \{1, \dots, N\} \quad (4)$$

Dadas N ubicaciones preestablecidas dentro de la planta, y n departamentos o células, se busca encontrar la asignación de cada departamento a una ubicación de manera tal que se minimice el manejo de materiales total dado por Z . Siendo f_{ij} el flujo de material entre los departamentos i y j ; y d_{kl} la distancia entre las ubicaciones k y l . Las x_{ik} son las variables de decisión binarias (asignaciones) que determinan si el departamento i es asignado a la ubicación k . Las restricciones (2) y (3) aseguran la asignación de un único departamento a cada ubicación, y una ubicación para cada departamento, respectivamente.

El QAP pertenece a una clase de problemas de optimización combinatoria del tipo *NP-Duros* en la teoría de la complejidad computacional. Esta clase de problemas se caracterizan por la carencia de un método de resolución analítica en tiempo polinómico, esto fue demostrado por primera vez por Sahni y Gonzales (1976). La dificultad del problema es evidente teniendo en consideración que para una distribución en planta de N departamentos, se deben analizar $N!$ alternativas; la búsqueda mediante una enumeración exhaustiva de todas las soluciones posibles no es razonable. Por este motivo,



se han publicado varias investigaciones dedicadas a la búsqueda de métodos eficientes para el QAP.

La aplicación del QAP se ve limitada a problemas donde los lugares candidatos para la asignación de cada departamento son los mismos (N departamentos y N ubicaciones). Sin embargo, esto no es cierto en todos los casos; hay instancias donde la planta no tiene sectores predefinidos, y debido a los tamaños y dimensiones variables de los departamentos las asignaciones son complejas, puesto que la distancia entre departamentos depende de cómo se ubican en la planta. Estos problemas son los denominados de área desigual. Existe una variedad de formulaciones para los problemas de área desigual. Kusiak y Heragu [3] dan una descripción de las distintas formulaciones para este tipo de problemas.

2.2.1. Métodos de resolución

La clasificación propuesta por Kusiak y Heragu divide a los métodos de resolución de problemas de distribución en planta en dos tipos: algoritmos óptimos, y subóptimos.

Los algoritmos óptimos se dividen en dos grupos: Algoritmos de Ramificación y Acotamiento y Algoritmos de Plano de Corte. Gran parte de los Algoritmos de Ramificación y Acotamiento se desarrollaron en la década del '60. Algunos de los principales investigadores sobre este tipo de algoritmos son Gilmore (1962), Lawler (1963), Crowston (1971). Los algoritmos de Plano de Corte surgieron en la década del '80, con investigadores como Bezaraa y Sherali (1980) y Burkard y Bonninger (1983). El uso de métodos óptimos se dificulta con problemas de más de 15 departamentos y ubicaciones. Anstreicher *et. al.* (2000) resolvieron de manera óptima un problema de 30 departamentos y ubicaciones.

La necesidad de resolución de problemas de gran tamaño de manera eficiente dio lugar al surgimiento de los algoritmos subóptimos. La clasificación propuesta por Kusiak y Heragu distingue a los procedimientos subóptimos como: i) procedimientos de construcción, ii) procedimientos de mejoramiento, iii) procedimientos híbridos (mejoramiento y construcción), iv) métodos basados en la teoría de grafos. La Tabla 2.2.1-1, adaptada del libro de D. R. Sule muestra la clasificación de los principales procedimientos subóptimos. Los procedimientos de construcción parten de un *layout* vacío y van agregando departamentos a la planta hasta llegar a una distribución satisfactoria. Los procedimientos de mejoramiento parten de una solución inicial sobre la cuál se llevan a cabo intercambios entre departamentos hasta llegar a la mejor disposición de los mismos.



En la década del '90 surgen una variedad de aplicaciones de técnicas denominadas metaheurísticas. Ejemplos de estas técnicas son los Algoritmos Genéticos, Redes Neuronales, Temple Simulado, la Búsqueda Tabu y los Algoritmos de Colonias de Hormigas. Estos métodos muestran una gran versatilidad, al poder emplearse como algoritmos de solución para una diversidad de problemas, entre ellos de optimización combinatoria. Algunas aplicaciones de Algoritmos Genéticos al problema de distribución en planta pueden encontrarse en [5, 6]. Una aplicación de Algoritmos de Colonias de Hormigas puede encontrarse en [7]. Para aplicaciones de Redes Neuronales ver [8]. En cuanto a la técnica de Temple Simulado, referirse a [9,10].

Método/Clasificación	Heurísticos	Métodos probabilistas	Teoría de grafos
Construcción	CORELAP	Simulación	Foulds (1983) Foulds y Robinson (1976, 1978) Seppanen y Moore (1970, 1975)
	MAT		
	PLANET		
	RMA Comp I		
	LSP		
	INLAYT		
	FLAT		
Mejoramiento	ALDEP	Muestreo sesgado	
	FATE		
	COFAD		
	CRAFT		
	FRAT		
	Proc. De Hillier		
	PLOP		
COL			
Híbridos		FLAC	
		DISCON	

Tabla 2.2.1-1: Procedimientos subóptimos de resolución del prob. de distribución en planta.

En lo que respecta a este trabajo se analiza la problemática de distribución en planta mediante una variante del Problema de Asignación Cuadrática denominada Problema de Asignación Cuadrática Estocástica. A pesar de las limitaciones como modelo detallado de la distribución en planta, se estudia su utilidad como elemento a incluir en una metodología de resolución del problema de distribución en planta para casos que presentan incertidumbre en los flujos de material dentro de la planta. En la sección 2.2.2 se describen las consideraciones generales y desarrollos sobre la variante mencionada del QAP.



2.2.2. Una variante del QAP: el Problema de Asignación Cuadrática Estocástica

Una formulación alternativa al QAP, que contempla la incertidumbre en los parámetros y la información del problema, es la denominada Problema de Asignación Cuadrática Estocástica (*STQAP – Stochastic Quadratic Assignment Problem*). La formulación del mismo es similar al QAP, con la salvedad de que la información sobre flujos y distancias es incierta. Una de las pocas investigaciones sobre el STQAP corresponde a Li y McGregor Smith (1994), quienes hicieron un enfoque de la problemática mediante el empleo de sistemas de colas. Los dos parámetros más comúnmente utilizados en el análisis del STQAP son el valor esperado y la varianza. El problema de minimizar la varianza es de gran complejidad. Burkard *et. al.* [11] demostraron que este problema ya no tiene una función objetivo cuadrática sino cuártica, a este tipo de problemas se los denomina de Asignación BiCuadrática.

El STQAP da cuenta de una fuerte limitación en los planteos clásicos del problema de distribución en planta. Los métodos clásicos se basan en estimaciones sobre las formas y volúmenes de los flujos de material dentro de la planta que pueden ser útiles en casos donde hay un alto grado de conocimiento de la demanda de los productos y los patrones de flujo. En contextos de volatilidad en los volúmenes de producción, y con esquemas productivos de flujos complejos, el empleo de formulaciones como el STQAP puede resultar de gran utilidad para estudiar distribuciones en planta más robustas a una variedad de escenarios. En este trabajo, el estudio del problema de distribución en planta se lleva a cabo sobre las bases de la incertidumbre en el contexto para buscar la alternativa de *layout* más robusta. La sección 2.3 analiza el concepto de robustez o flexibilidad del *layout*.

2.3. Flexibilidad de la distribución en planta

Las tendencias modernas en ingeniería de empresas manufactureras indican un claro sesgo hacia la búsqueda de soluciones que permitan una integración con el entorno altamente cambiante. El acortamiento de los ciclos de vida de los productos, y la rápida aparición de nuevos productos hacen necesaria la adaptabilidad de la planta a los distintos escenarios posibles.

Muchos de los avances y técnicas recientes de ingeniería aplicadas a la manufactura se enfocan en el desarrollo de nuevas tecnologías, y metodologías de gestión de la producción, que provean la mayor flexibilidad a los cambios en el entorno. Ejemplos de estos avances son las metodologías JIT (*Just In Time*), o TQM (*Total Quality Management*). Sin embargo, no se ha



puesto demasiada atención al diseño físico de una distribución en planta que permita la adaptabilidad a los cambios en el contexto. Algunos autores que resaltaron la importancia de la flexibilidad en la distribución en planta son Webster y Tybergein (1980), Bullington y Webster (1987). Una revisión de los estudios sobre la flexibilidad de la distribución en planta se puede encontrar en [12].

Un *layout* flexible se define como aquel capaz de soportar de manera efectiva cambios y variabilidad. Las fuentes de variabilidad y cambio pueden incluir [12]:

- Fluctuaciones en las demandas y la mezcla (*mix*) de productos.
- Introducción de nuevos productos o eliminación de productos existentes.
- Cambios en el diseño o fabricación de los productos.
- Expansión o contracción de la planta.
- Introducción de nueva maquinaria y eliminación de las existentes.
- Cambios en la configuración del sistema de manejo de materiales.

Estas se clasifican en aquellas relacionadas al producto o al proceso. Las tres primeras fuentes de variabilidad mencionadas corresponden a las relacionadas al producto y las restantes a las relacionadas al proceso. Ambos tipos impactan sobre el flujo de materiales dentro de la planta. Un cambio en la demanda de un producto incrementa el flujo en la secuencia de departamentos por los que este producto pasa en su fabricación. Así mismo, un cambio de equipamiento, o adquisición de nuevos equipos de manejo de materiales, permite el transporte de un volumen de material distinto al original.

2.3.1. Medidas de flexibilidad

Las medidas de flexibilidad de un layout se dividen en dos grupos básicos: i) basadas en la geometría, ii) basadas en el flujo.

Medidas basadas en la geometría:

Existen varias medidas de flexibilidad basadas en la geometría del *layout*, estas medidas se basan en las distancias de recorridos. La primera medida basada en la geometría surge de considerar como flexibilidad a la distancia promedio recorrida por los productos. Sea L_i la alternativa de *layout* i . Se define como flexibilidad $\phi_1(L_i)$:

$$\phi_1(L_i) = \sum_{j=1}^P \frac{d_j}{P} \quad (5)$$



Siendo d_j la distancia recorrida por una unidad del producto j , y P la cantidad total de productos.

Al utilizar la expresión (5) se puede topar con la dificultad de no conocer con certeza el recorrido de los productos en la planta, o en caso de no conocerse todo el set de productos. Como alternativa se plantea otro indicador que toma como base la distancia media entre cada par de departamentos. La flexibilidad $\phi_2(L_i)$ es:

$$\phi_2(L_i) = \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \frac{d_{jk}}{N \cdot (N-1)} \quad (6)$$

Donde d_{jk} es la distancia entre los departamentos j y k , y N es el número total de departamentos. En este caso, no se tienen en cuenta las variabilidades en las distancias recorridas. Una alternativa es el cómputo de un indicador de varianza para la flexibilidad. Es común el uso de otra medida de flexibilidad $\phi_3(L_i)$, denominada medida entrópica:

$$\phi_3(L_i) = \frac{\sum_{j=1}^N \gamma_j}{N} \quad (7)$$

Donde γ_j está dado por:

$$\gamma_j = - \sum_{k \neq j}^N \rho_{jk} \log(\rho_{jk}) \quad (8)$$

y

$$\rho_{jk} = \frac{1/d_{jk}}{\sum_{k \neq j}^N 1/d_{jk}} \quad (9)$$

El parámetro ρ_{jk} es una medida de la facilidad de acceso relativa, desde el departamento j al departamento k . El parámetro γ_j es una medida de flexibilidad del manejo de material disponible desde j .

1. γ_j es mínimo e igual a cero cuando $\rho_{jk} = 1$ (la flexibilidad en el manejo de materiales en j es cero dado que hay un único camino desde j).



2. γ_j aumenta cuando disminuye la diferencia entre los ratios de distancia relativa, y es máximo cuando $\rho_{jk} = 1/(N-1)$ para todo k (la flexibilidad es máxima cuando j está equidistante al resto de los departamentos).
3. cuando los ρ_{jk} son iguales para todo k , γ_j aumenta con un aumento en el número de departamentos accesibles desde j .
4. γ_j no cambia cuando se coloca un nuevo departamento si este está infinitamente lejano a j $\rho_{j(N+1)} = 0$.

Para una revisión de medidas entrópicas de flexibilidad en el diseño de distribuciones en planta, ver [12].

Medidas basadas en el flujo:

La medida de flexibilidad basada en el flujo más utilizada es la que se obtiene como valor esperado del manejo de material total en la planta. Esta medida de flexibilidad $\phi_4(L_i)$ es:

$$\phi_4(L_i) = \mu_i = E(Z) = E \left[\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N f_{ij} d_{kl} x_{ik} x_{jl} \right] \quad (10)$$

Donde Z es el manejo de materiales total, coincidente con la expresión (1), con la salvedad que en este caso Z no es la función objetivo del QAP sino del STQAP. El problema surge en la estimación de las distribuciones de los flujos y distancias; cuando la variabilidad es muy grande, se recomienda el uso de distribuciones iguales [12].

Las medidas de flexibilidad deben proveer a la empresa de un indicador para tomar una decisión; la de seleccionar la mejor alternativa de layout bajo una perspectiva de robustez. Para afianzarse en el mercado, y para sustentar su existencia, la empresa manufacturera debe poder acomodarse al contexto, reduciendo el impacto de la variabilidad. Para ello, el diseño de una distribución en planta flexible es uno de los puntos fuertes a considerar por parte de quienes toman decisiones. Con este objetivo en mente, para seleccionar la mejor alternativa se deben considerar otros factores que impactan en la flexibilidad. En la sección 2.3.2 se describen los principales sistemas de producción, y su relación con la distribución en planta y la flexibilidad.



2.3.2. Flexibilidad y los principales sistemas productivos

Los sistemas productivos representan la forma en que se lleva a cabo la producción dentro de la planta. Así mismo, los métodos de trabajo y operación dependen fuertemente de la disposición de las máquinas y puestos de trabajo (distribución en planta). Las características del producto a elaborar y los volúmenes de producción impactan en la elección del sistema productivo. Los cuatro sistemas de producción principales son: la producción de taller, la producción masiva, la producción por lotes, y la manufactura celular y flexible.

1. *Producción de Taller*: Este sistema se caracteriza por su utilidad en la producción de una gran cantidad de productos, de volúmenes de producción no muy grandes. La disposición de los recursos, o el *layout* es el denominado *layout por procesos (job shop)* (Figura 2.3.2-1). El criterio de localización de los recursos de producción es en base a su propósito o funcionalidad. Las maquinarias y equipos similares se agrupan para conformar departamentos dentro de la planta, y los productos se van elaborando a lo largo de una secuencia de departamentos que depende del tipo de producto.

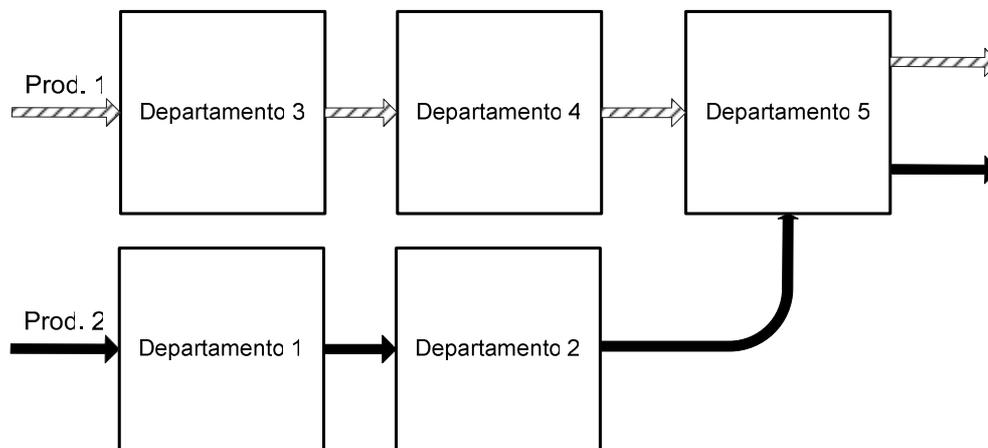


Figura 2.3.2-1: Ejemplo de un sistema de producción de taller.

2. *Producción Masiva*: La producción masiva es útil en aquellos casos donde se fabrican pocos tipos de productos, en un gran volumen. Tal es el caso de las líneas de montaje, donde los montajes parciales van pasando de una estación a otra dentro de la planta por un sistema de manejo de materiales rápido. La disposición del *layout* de la planta en estos casos se denomina del tipo *layout por producto (flow shop)* (Figura 2.3.2-2). Las estaciones de trabajo se disponen de manera tal de promover un flujo de material continuo dentro de la planta.

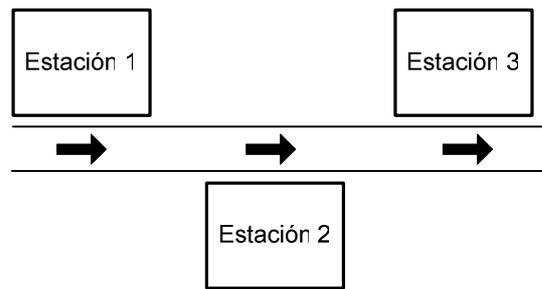


Figura 2.3.2-2: Ejemplo de un sistema de producción masiva.

3. *Producción por lotes*: La producción por lotes es un sistema que se sitúa entre la producción masiva y la producción de taller. Este sistema es adecuado para una empresa que debe fabricar una diversidad de productos en volúmenes grandes. En este sistema la capacidad de la planta excede la demanda, de manera de producir lotes a almacenar para cubrir demandas futuras de un producto, y así poder transformar la instalación para la manufactura de otro producto. La disposición de los recursos productivos en la planta se lleva a cabo por lo general agrupándolos por tareas, pudiendo agruparse máquinas de distinta funcionalidad.
4. *Manufactura Celular y Flexible*: Este sistema es apropiado para la elaboración de una gran variedad de productos con volúmenes de producción no tan elevados como para hacer factible la producción en masa o por lotes. La manufactura celular busca la conformación de células de trabajo donde se elaboren piezas similares, para ello existe el concepto de Tecnología de Grupo (*GT – Group Technology*) que busca agrupar las piezas similares en células donde se ubican las máquinas y equipos necesarios para la elaboración de las piezas. Al dedicarse a la elaboración de un grupo de piezas similares, cada célula contiene máquinas de distinta funcionalidad. La manufactura flexible es un caso de manufactura celular donde el grado de automatización es elevado, de esa manera la re-configuración de máquinas se lleva a cabo a mayor velocidad otorgando mayor flexibilidad en la producción.

En cuanto a la distribución o *layout* de recursos en la planta, cabe agregar al *layout de posición fija*. Esta distribución en planta es común en los casos donde el manejo de materiales es excesivamente costoso por tratarse de un producto de grandes dimensiones, como aviones o barcos. En este sistema los procesos de ensamblaje se llevan a cabo sobre el producto que permanece en una posición fija en la planta. Los volúmenes de producción posibles son muy bajos. El movimiento de materiales es mínimo, y son muy flexibles a cambios en la manufactura del producto. Sin embargo, presentan la desventaja de tener



que movilizar equipos y personal. Esta alternativa se suele sugerir cuando las demás no son aplicables.

Los sistemas de producción de taller presentan la ventaja principal de tener una gran flexibilidad en cuanto a las secuencias de producción, permitiendo que se adapte el layout por procesos (*job shop*) a una diversidad de productos. En contra parte, estos sistemas requieren de mano de obra altamente capacitada, y presentan costos elevados de manejo de materiales, así como altos niveles de inventarios de producto en proceso.

Los sistemas de producción masiva presentan una mayor eficiencia en el manejo de materiales, con inventarios reducidos de producción en proceso. En estos sistemas el flujo de materiales es simple, siendo en algunos casos, unidireccional y en línea recta, o del tipo bucle cerrado como en algunas líneas de montaje. Adicionalmente, no requieren de una alta capacitación de la mano de obra. Los sistemas de producción masiva son poco flexibles a cambios en los esquemas productivos.

Los sistemas de manufactura celular y flexible permiten lograr una producción de alto volumen con una gran flexibilidad en la secuencia de operaciones para los distintos productos. Presentan mejoras en cuanto a la productividad y la utilización de las maquinas con respecto a los sistemas de producción masiva, obteniéndose a la vez flujos más ordenados y suaves que en los sistemas de producción de taller. En contrapartida, los sistemas de manufactura celular y flexible pueden presentar altos niveles de cantidad de producto en proceso, y por lo general requieren de un alto nivel de especialización de los operarios.

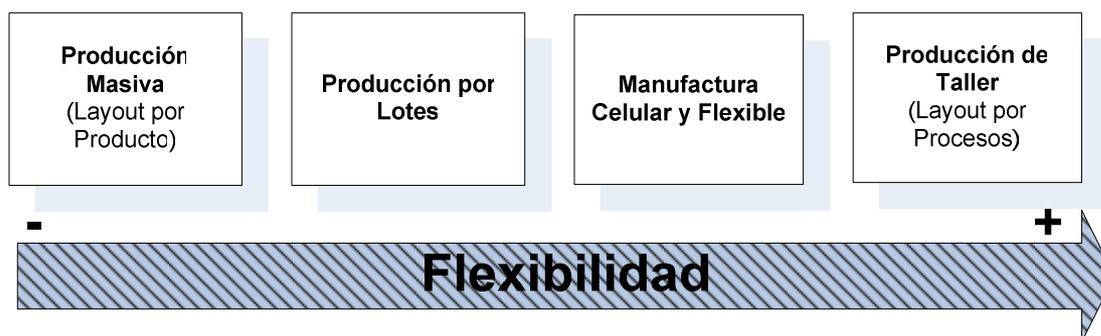


Figura 2.3.2-3: Flexibilidad de sistemas productivos.

En resumen, el sistema productivo depende fuertemente de la variedad de productos, sus características y sus demandas. Cada alternativa es apropiada en determinados casos y presentan una serie de ventajas y desventajas. La figura 2.3.2-3 muestra un ordenamiento de los sistemas de distribución principales y sus respectivos *layouts* en base a la flexibilidad de los mismos.



Este trabajo se orienta al diseño de distribuciones en planta para los sistemas de producción más flexibles: manufactura celular y flexible, y producción de taller, principalmente, aunque la metodología puede emplearse en problemas con esquemas de producción por lotes.

Los sistemas del tipo producción masiva, al igual que los de posición fija son muy rígidos en cuanto al diseño del *layout*. En estos casos la distribución en planta está subordinada a otro aspecto de más importancia, el manejo de materiales. En los sistemas de producción masiva se prefiere un sistema veloz de manejo de material con flujos suaves y simples, y configurar la distribución en planta alrededor de este. En el caso de los sistemas de fabricación en posición fija, los costos de manejo de material hacen impráctico el uso de otra alternativa.

2.4. Modelado del problema

Se analiza el problema de distribución en planta desde el punto de vista de su flexibilidad, empleando para ello la formulación del problema conocida como Problema de Asignación Cuadrática Estocástica (STQAP). Los fundamentos de aplicación del análisis son los siguientes:

- Para poder aplicar el modelo STQAP, las restricciones geométricas y estructurales de la planta no son tenidas en cuenta en el análisis de las propuestas de distribución en planta. Sin embargo, son consideradas en una etapa posterior, para el diseño del plano del *layout*.
- El análisis se hace sobre la base de fuentes de variabilidad relacionadas al producto, descritas en 2.3, dejando de lado las causas de variabilidad relacionadas al proceso (aunque estas últimas podrían tenerse en cuenta, modificando el modelo).
- La aplicación del modelo se adecua a sistemas de producción de taller (*job shop*) y manufactura celular y flexible, no se analizará su aplicación a sistemas de producción masiva (*flow shop*), o con *layouts* de posición fija.

Antes del comienzo del análisis se deben conocer o estimar dos parámetros del problema. En primer lugar, se deben tener estimaciones de las distancias entre posibles ubicaciones para los departamentos. Una forma de estimar las distancias proviene de dividir la planta en sectores, aproximadamente iguales, y estimar distancias entre los centros de los sectores; con las distancias estimadas se procede a conformar la Matriz de Distancias entre ubicaciones. La Tabla 2.4-1 muestra un ejemplo de una Matriz de Distancias para una planta de 5 sectores.



Ubic.	1	2	3	4	5
1	0,00	8,00	14,00	17,50	9,00
2	8,00	0,00	11,00	14,50	13,00
3	14,00	11,00	0,00	21,00	12,00
4	17,50	14,50	21,00	0,00	20,50
5	9,00	13,00	12,00	20,50	0,00

Tabla 2.4-1: Ejemplo de una Matriz de Distancias entre cinco ubicaciones.

El segundo parámetro a conocer corresponde a la estimación de los flujos de material. Bajo el supuesto de flujos estocásticos, se deben proveer estimaciones de los flujos por medio de alguna distribución de probabilidades. Algunas distribuciones comunes para ello pueden ser la distribución Normal, o la Triangular (con valores más probable, máximo y mínimo).

Una forma sencilla de obtener los flujos entre departamentos proviene del Plan de Producción. La Tabla 2.4-2 muestra un ejemplo de un Plan de Producción para el caso de demanda conocida (demanda determinista). El Plan de Producción condensa la información sobre la cantidad a producir de cada producto (en el horizonte analizado) y el patrón de flujo, o la secuencia de operaciones (departamentos por los que pasa el producto) de cada producto. Si bien las cantidades de producto no atraviesan realmente cada departamento de su secuencia (se va produciendo una transformación de la materia prima hasta alcanzar el nivel de producción), esta forma de estimar flujos es válida no como medición exacta, sino como medida de ponderación de la distancia en la formulación del problema, así grandes producciones de un producto generan un alto flujo de materias primas y otros materiales por los departamentos de su secuencia por lo que se desea ubicar los departamentos de manera cercana. Con las producciones proyectadas y la secuencia de operaciones se puede conformar la Matriz de Flujos entre departamentos (Tabla 2.4-3).

Producto	Secuencia de Producción	Producción Semanal
1	A - B - C - E	250,00
2	C - A - B - D - E	300,00
3	B - C - A - D - E	520,00

Tabla 2.4-2: Ejemplo de un Plan de Producción de tres productos (producciones conocidas).

Dpto.	A	B	C	D	E
A		550,00		520,00	
B			770,00	300,00	
C	820,00				250,00
D					820,00
E					

Tabla 2.4-3: Ejemplo de una Matriz de Flujo, elaborada a partir de Tabla 2.4-2.



La Matriz de Flujos provee una medida de la cantidad de material que debe viajar entre cada departamento, independientemente de dónde estén ubicados. Por otro lado, la Matriz de Distancias otorga una estimación de las distancias entre ubicaciones fijas en la planta donde se pueden ubicar los departamentos. La forma de vincular ambas medidas es a través del Manejo de Material Total:

$$Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N f_{ij} d_{kl} x_{ik} x_{jl} \quad (11)$$

Siendo las x_{ij} las variables de asignación; variables binarias cuyo valor es 1 si el departamento i se asigna a la ubicación j y 0 en caso contrario. Debido a la incertidumbre en los parámetros, Z también es incierto. El dilema del diseñador es encontrar un *layout* que sea eficiente en el manejo de materiales bajo una perspectiva de flexibilidad. A los efectos del análisis, se considera el criterio de flexibilidad basada en el flujo (10) (valor esperado de Z).

2.5. Complejidad y abordaje del problema

En el análisis de la distribución en planta, bajo el planteo descrito en la sección 2.4, surgen dos factores que dificultan la búsqueda de las distribuciones más flexibles o robustas. En primer lugar, la naturaleza del modelo de asignación cuadrática da lugar a que la búsqueda de alternativas de *layout* se lleve a cabo sobre un espacio de soluciones que crece rápidamente con el número de departamentos que se requiere disponer en la planta. Por otro lado, la inclusión de la incertidumbre en el modelo, hace de la evaluación de cada alternativa de *layout* una tarea compleja, ya que el criterio de evaluación se traslada desde la observación del comportamiento en un marco estático hacia la necesidad de contemplar la *performance* general en un número infinito de escenarios posibles.

La complejidad creciente con el número de departamentos a ubicar en la planta parte de que al considerar N departamentos a ubicar en los N posibles sectores de la planta, se trata de un problema de programación combinatoria. Los problemas de este tipo presentan la característica de tener una cantidad finita de soluciones factibles. Sin embargo, el análisis exhaustivo de todas las posibles soluciones es cada vez menos eficiente a medida que N aumenta. En el problema de distribución en planta con N departamentos y N ubicaciones, la cantidad de soluciones factibles es $N!$ que corresponde a todas las permutaciones posibles de N . La Tabla 2.5-1 muestra el crecimiento en la cantidad de soluciones posibles frente a incrementos en la cantidad de departamentos y ubicaciones a considerar en el análisis de la distribución en



planta. En plantas con una cantidad razonable de departamentos ($N = 14$) la cantidad de alternativas posibles es del orden de 10^{10} .

<i>N</i> <i>(Dptos./ Ubic.)</i>	<i>Cantidad de</i> <i>Alternativas</i>
5	120
6	720
7	5040
8	40320
9	362880
10	3628800
11	39916800
12	479001600
13	6227020800
14	87178291200

Tabla 2.5-1: Crecimiento de la cantidad de alternativas posibles frente a incrementos de N .

La complejidad adicional debida a la inclusión de la incertidumbre en el problema da lugar al posible uso de técnicas de simulación de escenarios estáticos, como la simulación de Monte Carlo, para evaluar el resultado de una alternativa sobre una gran cantidad de escenarios. Debido a que la experimentación en el contexto real de la planta puede ser altamente costosa, se modela el problema para ser evaluado bajo determinados supuestos de variabilidad en la producción. A pesar de la facilidad y el bajo consumo de recursos que representa el uso de técnicas de simulación en el problema de distribución en planta, se debe tener en cuenta que la simulación de una gran cantidad de escenarios posibles (gran cantidad de corridas de la simulación) es eficiente sólo cuando se evalúan unas pocas alternativas de *layout*. En el caso de tener que analizar decenas de alternativas o más, la simulación de una gran cantidad de escenarios para evaluar el comportamiento de cada una es un proceso tedioso y poco eficiente en el sentido computacional y operativo.

Este trabajo divide la problemática de distribución en planta en dos análisis; el primero para el caso de plantas pequeñas (con un máximo de 8 departamentos y ubicaciones), y el segundo para el caso de plantas grandes (con más de 8 departamentos y ubicaciones). En ambos casos, se hace hincapié en el uso de técnicas de comparación estadística para evaluar a los distintos *layouts*, tomando de base para la comparación el resultado de la simulación de una cantidad limitada de escenarios.



3. ANÁLISIS DEL PROBLEMA PARA EL CASO DE UNA PLANTA PEQUEÑA

3.1. Introducción

El enfoque de este capítulo se sitúa en el análisis de la distribución en planta para lo que se denomina en la sección 2.5 como plantas pequeñas, o de pequeño tamaño.

El problema de distribución en planta para plantas pequeñas tiene la particularidad de presentar una complejidad reducida en lo que respecta a la cantidad de alternativas de *layout* a evaluar. Esto implica que a lo sumo se requiere la evaluación de 40320 alternativas de *layout*, lo cuál es posible empleando un procedimiento apropiado.

El resto de este capítulo se centra en el desarrollo del procedimiento para el estudio del problema de distribución en planta en el caso de plantas de pequeño tamaño. A fines didácticos, el análisis se lleva a cabo sobre la base de un caso de aplicación al diseño de la distribución en planta de una empresa productora de conectores, adaptado del libro de D. R. Sule [2].

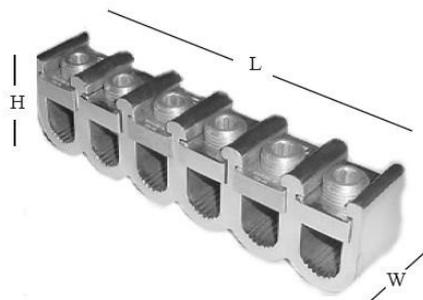


Figura 3.1-1: Ejemplo de un conector para Pedestal.

El caso a analizar corresponde al de una empresa productora de conectores como el que se observa en la Figura 3.1-1, que fabrica seis tipos de productos bajo un sistema del tipo taller de labores (*job shop*). La producción contempla la interacción entre siete áreas productivas claramente identificadas (Tabla 3.1-1).

Depto.	Descripción
A	Almacén
B	Formación
C	Maquinado
D	Tratamiento Térmico
E	Acabado
F	Ensamble y Pruebas
G	Moldeo a Presión

Tabla 3.1-1: Departamentos de la planta productora de conectores.



3.1.1. Sectorización de la planta

En base al planteo del modelo expuesto en 2.4, se debe efectuar una suposición inicial sobre las posibles ubicaciones dentro de la planta, en las cuales se ubicarán los departamentos de manera de obtener una distribución en planta satisfactoria desde el punto de vista de la flexibilidad. A raíz de la determinación de las posibles ubicaciones, surge la estimación de las distancias entre cada ubicación, y la conformación de la Matriz de Distancias. La Tabla 3.1.1-1 expone la Matriz de Distancias entre ubicaciones (en metros) para el caso de la empresa fabricante de conectores.

Ubic.	1	2	3	4	5	6	7
1	0,00	11,25	21,75	9,30	10,50	16,50	19,05
2	11,25	0,00	10,50	16,20	10,95	7,65	12,30
3	21,75	10,50	0,00	25,05	18,60	8,55	12,90
4	9,30	16,20	25,05	0,00	7,65	17,70	17,70
5	10,50	10,95	18,60	7,65	0,00	10,35	10,35
6	16,50	7,65	8,55	17,70	10,35	0,00	5,25
7	19,05	12,30	12,90	17,70	10,35	5,25	0,00

Tabla 3.1.1-1: Distancia entre ubicaciones para el caso de la empresa de fabricante de conectores.

3.1.2. Estimación de los volúmenes de producción

La estimación de los volúmenes de fabricación y su incertidumbre se lleva a cabo por medio de la distribución de probabilidades Triangular. Este tipo de distribución es de uso común cuando no se conoce de manera precisa la verdadera distribución de la variable en consideración, por lo que debe recurrirse a estimaciones subjetivas. Los parámetros que definen a la distribución Triangular son tres: i) el valor mínimo que puede tomar la variable; ii) el valor más probable; iii) el valor máximo posible. La Figura 3.1.2-1 muestra un ejemplo de distribución Triangular donde se distinguen los tres parámetros mencionados.

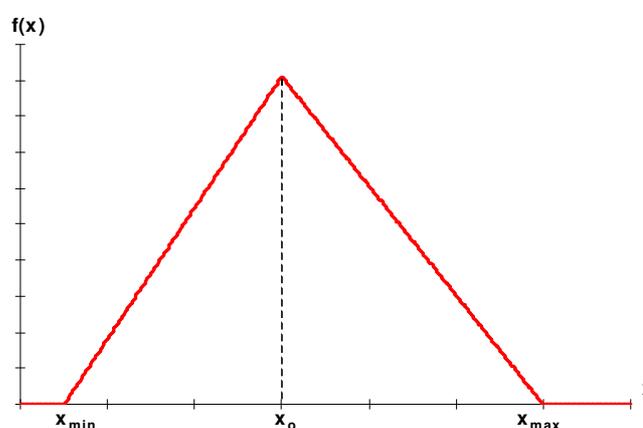


Figura 3.1.2-1: Ejemplo de distribución Triangular para la variable x .



El empleo de otras distribuciones está sujeto al caso específico que se desea estudiar; esto es, la naturaleza del proceso productivo de cada empresa. Este trabajo no hace énfasis sobre las diversas formas de estimar los volúmenes de producción u otras variables requeridas en el análisis.

En el caso de la empresa de manufactura de conectores, se dispone de los volúmenes de producción semanal estimados (mínimo, más probable y máximo) para los seis productos, expresados en la unidad de carga base de la planta (Tabla 3.1.2-1).

Producto	Producción Semanal		
	Mínima	Más Prob.	Máxima
1	380	450	505
2	340	390	412
3	1350	1400	1460
4	17	25	33
5	130	190	220
6	3650	3875	4230

Tabla 3.1.2-1: Estimación de los volúmenes de prod. mínimo, más probable y máximo para el caso de la empresa de fabricación de conectores.

3.1.3. Descripción de la secuencia de producción

Hasta este punto, el problema contempla el aspecto estocástico en los volúmenes de producción, únicamente. Se contempla, adicionalmente, la información referente a las secuencias de producción de cada producto dentro de la planta (Tabla 3.1.3-1).

Producto	Secuencia de Producción
1	A-B-C-D-E-F-A
2	A-F-A
3	A-C-F-A
4	A-B-C-E-A
5	A-D-B-E-A
6	A-G-E-A

Tabla 3.1.3-1: Secuencias de producción para el caso de la empresa de fabricación de conectores.

Las secuencias de producción expuestas en la Tabla 3.1.3-1 no exhiben una complejidad en la determinación del patrón del flujo de materiales dado que se conoce el camino que cada producto sigue dentro de la planta. En el marco real, y en especial en los esquemas del tipo taller de labores, las secuencias de producción no son tan rígidas. A efectos de lograr una mayor semejanza a problemas del ámbito real, se agregan las siguientes consideraciones en cuanto al procesamiento de los productos:



- Entre un 25% y un 35% del volumen de producción del producto 1 requiere un reprocesamiento luego del proceso D (Tratamiento Térmico), por lo que se mantiene en el Almacén (A) hasta su ingreso al área de Maquinado (C). La secuencia resultante en este caso es: A-B-C-D-A-C-E-F-A.
- Entre un 15% y un 20% del volumen de producción del producto 3 debe ingresar al Maquinado (C) y luego al Acabado (E); al de salir del sector de Ensamble y Pruebas (F). La secuencia de producción en este caso resulta: A-C-F-C-E-A.
- El producto 4 se fabrica en volúmenes pequeños ya que corresponde a pedidos especiales que se presentan un 45% de las veces.

A los efectos de modelar los porcentajes de producción de los productos 1 y 3 se emplean variables de distribución Uniforme, ya que no se establecen valores de porcentaje más probables. El tercer punto, referido al producto 4, expresa que este producto se fabrica un 45% de las veces, por lo que se asume este porcentaje como probabilidad de que se fabrique el producto; esto implica que el flujo de materiales debido al producto 4 es nulo en determinados casos.

A modo de tener una representación esquemática del flujo de materiales entre departamentos para el caso de niveles de producción más probables, con los porcentajes de reproceso mínimos para los productos 1 y 3, e incluyendo en la producción al producto 4; se confecciona la Matriz de Flujos entre departamentos (Tabla 3.1.3-2). A medida que varían los volúmenes de producción y las secuencias, los elementos de la Matriz de Flujo cambian, esto da lugar a que una distribución en planta dada exhiba un comportamiento estocástico, en términos de Manejo de Material Total (ecuación 11).

Dpto.	A	B	C	D	E	F	G
A		475,00	1512,50	190,00		390,00	3875,00
B			475,00		190,00		
C				450,00	347,50	1400,00	
D	112,50	190,00			337,50		
E	4300,00					450,00	
F	2030,00		210,00				
G					3875,00		

Tabla 3.1.3-2: Matriz de Flujo de material con valores más probables de flujo para el caso de la planta de fabricación de conectores.

3.2. Simulación y análisis de una alternativa de *layout*

Como se expone en 2.5, una forma práctica de evaluación de alternativas de *layout* en un contexto de incertidumbre, bajo el modelo planteado en 2.4, es el



empleo de técnicas de simulación de escenarios estáticos. Existe una diversidad de herramientas dedicadas a la simulación estática; algunas de ellas se complementan con el uso de planillas de cálculo como MS-Excel. Estas últimas tienen la ventaja de permitir un alto grado de flexibilidad en el modelado de problemas, reteniendo a la vez características de sencillez en su uso y aplicación.

En la sección 3.1 se presenta la información necesaria para modelar el problema en el caso de la empresa de fabricación de conectores. Las variables de decisión del modelo son las asignaciones de departamentos a ubicaciones: la distribución en planta. La variable a observar es el Manejo de Materiales Total (Z), cuya expresión en función de los flujos, las distancias, y las variables de decisión está dada por la ecuación 11. El modelo se traduce a una planilla de cálculo, y empleando una herramienta de simulación estática se analiza la variable objetivo del problema (Z - Manejo de Material Total).

A modo de observar la distribución de Z , se hace una primera simulación para una distribución en planta cualquiera L . Se considera para este primer análisis la distribución dada por la Tabla 3.2-1. En ella, el departamento A se ubica en el sector 1, el B en el sector 2 y así sucesivamente.

Dpto.	A	B	C	D	E	F	G
Ubic.	1	2	3	4	5	6	7

Tabla 3.2-1: Distribución en planta del análisis inicial.

La Figura 3.2-1 muestra la distribución del Manejo de Materiales Total (Z) para una simulación de 5000 iteraciones.

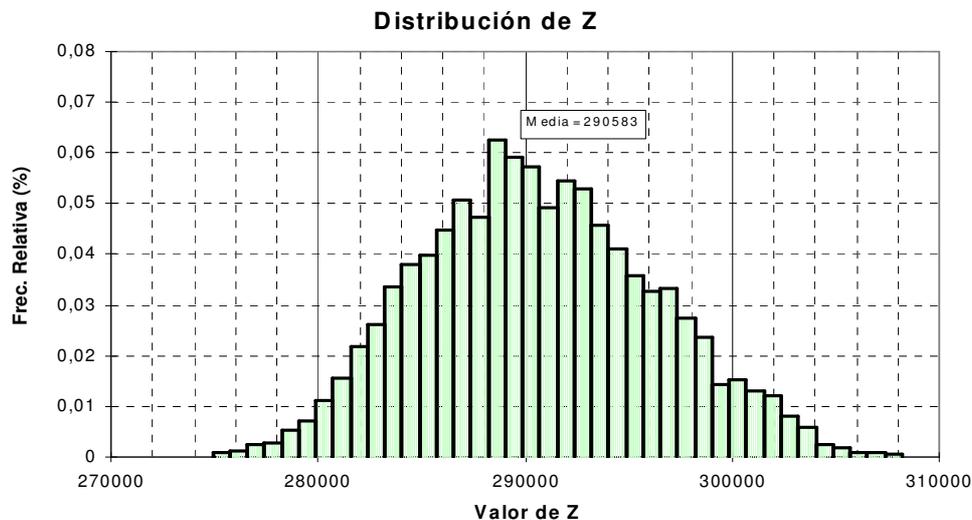


Figura 3.2-1: Distribución del Manejo de Materiales Total para la distribución en planta dada por la Tabla 3.2-1.



Al observar la Figura 3.2-1, se percibe que la distribución de Z se asemeja a una distribución Normal. Si se analiza la naturaleza del modelo, la aproximación por medio de la distribución Normal es un supuesto válido. Z se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N f_{ij} d_{kl} x_{ik} x_{jl} \quad (12)$$

Para un *layout* determinado, las variables x_{ij} de decisión quedan determinadas, y las distancias entre ubicaciones d_{ij} son parámetros estimados. Lo que agrega aleatoriedad al problema son los flujos de material f_{ij} ; Z es entonces una suma de variables aleatorias. Por el Teorema Central del Límite, el cuál establece que la suma de variables aleatorias se aproxima a una distribución Normal, la forma de Z se asemeja a la de una curva Normal. Se debe resaltar que la relación es sólo de semejanza; Z no puede ser una variable aleatoria de distribución Normal, ya que de ser así, podría asumir cualquier valor. Esto no es cierto, dado que los flujos están acotados en intervalos de valores posibles.

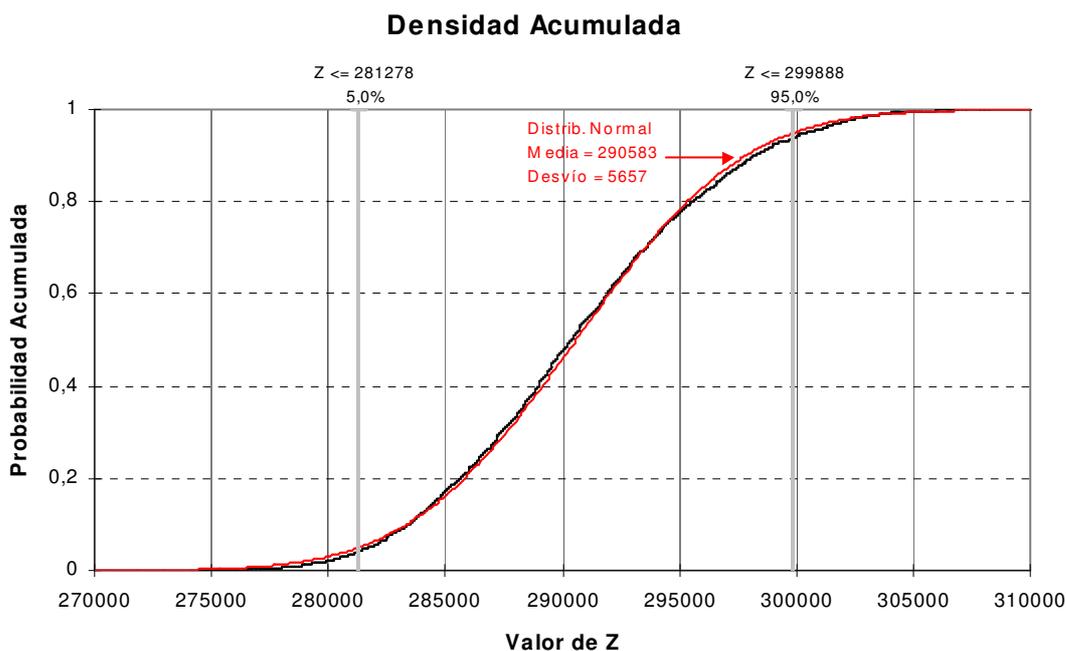


Figura 3.2-2: Gráfico de la densidad acumulada real de Z (en negro), y ajuste de curva Normal (media = 290583; desvío = 5657).

De los posibles ajustes a la distribución de Z mediante distribuciones conocidas, la distribución Normal es un ajuste razonable (Figura 3.2-2), pero no es el mejor ajuste. Este trabajo no contempla la determinación precisa de la distribución de Z , dado que esto está sujeto a los supuestos de aleatoriedad de



los parámetros que definen el modelo (estimaciones sobre los volúmenes de producción y las secuencias).

La flexibilidad del *layout*, evaluada en términos de flexibilidad en base al flujo no es más que el valor esperado de Z . Para la distribución en planta analizada (L), la flexibilidad en base al flujo se estima con la media muestral de Z de la simulación:

$$\phi_4(L) = \mu = E(Z) \approx \bar{Z} = 290583 \quad (13)$$

La técnica de simulación estática provee una herramienta útil para analizar alternativas de *layout*. Sin embargo, para obtener estimaciones valederas y precisas, se debe evaluar la *performance* bajo una gran cantidad de escenarios (gran longitud de la corrida de simulación). En el caso en que se analizan unas pocas alternativas, esto es posible. El problema surge con la necesidad de evaluar una gran cantidad de alternativas, para poder encontrar aquellas que sean óptimas bajo el criterio de flexibilidad.

3.3. Aplicación de un procedimiento de Comparaciones Múltiples

El objetivo es encontrar la distribución en planta óptima en cuanto a su flexibilidad. La evaluación de cada alternativa mediante la simulación de una gran cantidad de escenarios, como se expone en 3.2, no es un procedimiento eficiente, debido al tiempo que insume un análisis de esta naturaleza.

El método propuesto se basa en el empleo de una técnica de comparación estadística que permita discernir diferencias entre alternativas de distribución en planta en lo que a la flexibilidad respecta; evaluando cada alternativa en una cantidad reducida de escenarios. Si se evaluase de manera exhaustiva cada alternativa por medio de la simulación de una gran cantidad de escenarios, tal procedimiento estadístico de comparación no sería necesario, debido a que por medio de la simulación se obtendría una representación lo suficientemente fiel de la flexibilidad del *layout*.

La base del procedimiento deja en claro la ganancia en la rapidez y eficiencia del método, a costa de la pérdida de información que resulta en la necesidad de tener que hacer uso de la inferencia estadística para sacar conclusiones y seleccionar aquellos *layouts* de mayor robustez.

El procedimiento consiste en evaluar en primera instancia todas las alternativas de *layout* para una cantidad de escenarios reducida, y aplicar posteriormente



un procedimiento estadístico de Comparaciones Múltiples para determinar un grupo de alternativas óptimas.

Los procedimientos de Comparaciones Múltiples son métodos de inferencia estadística mediante los cuales se busca determinar diferencias entre medias poblacionales a través de la información de muestras de dichas poblaciones [13]. En el caso del problema de distribución en planta, las muestras se toman sobre cada alternativa de *layout*, para efectuar las comparaciones entre las medias poblacionales de la variable objetivo Z- Manejo de Material Total para cada alternativa. Para una descripción de los diversos métodos de Comparaciones Múltiples, referirse a [14].

Frecuentemente, previo a la aplicación de un método de Comparaciones Múltiples, se debe efectuar un ensayo para determinar si hay o no diferencias entre las alternativas, más allá de cuáles alternativas sean diferentes y cuáles no. A este tipo de ensayo se lo conoce como Análisis de la Varianza, o ANOVA. En el análisis del problema de distribución en planta, el ANOVA se considera como paso previo a efectuar las Comparaciones Múltiples.

3.3.1. Análisis de la Varianza (ANOVA)

El paso previo a la comparación entre alternativas de layout es el Análisis de la Varianza. A través de este ensayo se evalúa la existencia de una diferencia entre todas las medias. Para un desarrollo completo del método referirse a [14].

Retomando el caso de la empresa de fabricación de conectores. Se contemplan todas las alternativas posibles de *layout* lo que equivale a 5040 alternativas. Se efectúa una simulación de 20 iteraciones para cada alternativa. Se denomina $n = 20$, el tamaño de la muestra; y $k = 5040$, la cantidad de alternativas total.

Al tener una gran cantidad de alternativas, es esperable encontrar diferencias entre algunas de ellas, para ello, se recomienda efectuar un filtro inicial de la simple observación de las medias muestrales. En el caso de la planta productora de conectores, se retienen sólo las primeras 20 alternativas que surgen de ordenar las mismas de forma ascendente respecto a su flexibilidad estimada (media muestral de Z – Manejo de Materiales Total), y se denomina $p = 20$ a la cantidad de alternativas a comparar. La Tabla 3.3.1-1 muestra las medias muestrales y desvíos muestrales para las 20 primeras alternativas ordenadas en base a la media de forma ascendente.



L_i	Ubicación							Manejo de Materiales	
	1	2	3	4	5	6	7	Media Muestral	Desvío Muestral
L_1	D	E	G	B	C	A	F	192639,03	3908,55
L_2	B	E	G	D	C	A	F	193132,96	4174,40
L_3	B	C	F	D	E	A	G	199447,85	3864,68
L_4	B	C	F	D	G	A	E	199739,68	3607,54
L_5	D	C	F	B	E	A	G	199891,08	4690,18
L_6	D	C	F	B	G	A	E	200168,43	3293,54
L_7	B	F	G	D	C	A	E	200375,08	3327,68
L_8	D	F	G	B	C	A	E	200678,12	4069,10
L_9	D	G	E	B	C	A	F	201058,65	4310,29
L_{10}	B	G	E	D	C	A	F	201299,06	4949,14
L_{11}	C	B	D	F	A	E	G	201676,76	4371,48
L_{12}	C	D	B	F	A	E	G	202587,79	3326,85
L_{13}	E	D	B	G	A	C	F	204660,24	5027,87
L_{14}	C	B	D	F	A	G	E	204693,03	3886,75
L_{15}	E	B	D	G	A	C	F	204872,19	3317,54
L_{16}	D	E	G	B	F	A	C	205197,13	4252,44
L_{17}	G	D	B	E	A	C	F	205327,01	3677,44
L_{18}	G	B	D	E	A	C	F	205466,16	2962,32
L_{19}	B	E	G	D	F	A	C	205593,00	4546,85
L_{20}	B	A	G	D	C	E	F	205822,58	4093,40

Tabla 3.3.1-1: Las 20 primeras alternativas de distribución en planta L_i , con sus respectivas asignaciones a cada ubicación, y el valor medio y desvío muestral del Manejo de Material Total Z para el caso de la planta de fabricación de conectores.

El Análisis de la Varianza ensaya la siguiente hipótesis nula, de igualdad medias (μ_i) para todas las alternativas p .

$$H_0) \mu_1 = \mu_2 = \mu_3 = \dots = \mu_p$$

La condición de rechazo de H_0 con un nivel de significación α es:

$$F = \frac{S^2}{S^2} > F_{p-1; p(n-1); 1-\alpha} \quad (14)$$

donde $F_{p-1; p(n-1); 1-\alpha}$ es el fractil de área $1-\alpha$ de la distribución de Fisher-Snedecor con $p-1$ grados de libertad del numerador y $n(p-1)$ grados de libertad del denominador; S^2 corresponde a la componente de variación entre alternativas, y S^2 es la componente de variación residual, o debida al error. Las mismas se obtienen a través de las siguientes expresiones:



$$S'^2 = \frac{n \sum_{i=1}^p (\bar{Z}_i - \bar{Z})^2}{p-1} \quad (15)$$

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^p \sum_{t=1}^n (Z_{it} - \bar{Z})^2}{p(n-1)} \quad (16)$$

\bar{Z} es la media global (promediando todos los datos de todas las alternativas), y \bar{Z}_i es la media muestral de la alternativa i .

La condición de rechazo (14) establece que al haber una gran variación entre las alternativas, el cociente S'^2/S^2 será elevado, por lo que se rechaza la hipótesis de que las alternativas tienen medias iguales.

Frecuentemente, la información del ensayo se sintetiza en un cuadro denominado cuadro ANOVA. La Tabla 3.3.1-2 expone el cuadro de ANOVA para el caso de la empresa productora de conectores.

Efecto	Estimador	Suma de cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrado medio	F
Alternativas	S'^2	5473751859,8	19	288092203	17,806
Residual	S^2	6148081482,2	380	16179161,8	
Total		11621833342,0	399		

Tabla 3.3.1-2: Cuadro de ANOVA para el caso de la planta de fabricación de conectores.

El valor alto del estadístico F indica el claro rechazo de la hipótesis de igualdad de medias; considerando un nivel de significación $\alpha = 1\%$ (nivel de error al rechazar la hipótesis nula), resulta $F_{19,380,0.99} = 1,953$; muy por debajo del valor obtenido. De haber considerado una mayor cantidad de alternativas de *layout*, el rechazo sería seguramente, más potente, dado que al incluir nuevas alternativas, se incrementan las diferencias entre medias, haciendo que el cociente F sea cada vez mayor.

Se concluye, para el caso de análisis de la empresa de fabricación de conectores, que existen diferencias entre las alternativas en lo que respecta a su flexibilidad. Ahora el análisis se centra en la búsqueda de aquellas alternativas óptimas. Para ello se hace uso de un método de Comparaciones Múltiples, el Test de Tukey.



3.3.2. El Test de Tukey para comparaciones de a pares

El método de Comparaciones Múltiples propuesto para el análisis del problema de distribución en planta es el denominado Test de Tukey. Este método desarrollado por J. W. Tukey (1949), es de gran utilidad, y de uso frecuente en la comparación de pares de medias. El mismo corresponde a los métodos denominados *post hoc* o *a posteriori*. Esto implica que las comparaciones se formulan luego de la observación de los datos, hecho que se corresponde al análisis del problema de distribución en planta.

El Test de Tukey, al igual que otros métodos de Comparaciones Múltiples, y el Análisis de la Varianza (ANOVA), se basa en tres supuestos sobre las muestras y las poblaciones:

1. Las muestras son seleccionadas de manera aleatoria e independiente.
2. Las poblaciones tienen distribución Normal.
3. Las varianzas de las poblaciones son iguales (homocedasticidad).

Si bien los supuestos pueden no cumplirse, como el de Normalidad de las poblaciones, algunos métodos, como el Test de Tukey, son robustos frente a desviaciones de dichos supuestos.

Según el método, se consideran significativas al nivel α todas las diferencias $|\bar{Z}_i - \bar{Z}_j|$ entre alternativas, superiores a la diferencia crítica D_c :

$$D_c = q_{p;p(n-1);1-\alpha} \sqrt{\frac{S^2}{n}} \quad (17)$$

donde $q_{p;p(n-1);1-\alpha}$ es el fractil de área $1-\alpha$ de la distribución Recorrido Studentizado. El nivel de significación α para el Test de Tukey representa el nivel de error global para el ensayo de todas las comparaciones de a pares, o sea, es la probabilidad de cometer al menos un error de decretar como significativa una diferencia que realmente no lo es. S^2 es la varianza residual, que se obtiene de (16).

Continuando el análisis para el caso de la empresa de fabricación de conectores, a partir de la Tabla 3.3.2-1 se computan las diferencias D_{ij} entre las medias muestrales de Z – Manejo de Materiales Total, \bar{Z}_i y \bar{Z}_j para las alternativas L_i y L_j . La Tabla 3.3.2-1 presenta estas diferencias en forma matricial.



D_{ij}	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	-494	-6809	-7101	-7252	-7529	-7736	-8039	-8420	-8660	-9038	-9949	-12021	-12054	-12233	-12558	-12688	-12827	-12954	-13184
2	493,9	0	-6315	-6607	-6758	-7035	-7242	-7545	-7926	-8166	-8544	-9455	-11527	-11560	-11739	-12064	-12194	-12333	-12460	-12690
3	6809	6315	0	-292	-443	-721	-927	-1230	-1611	-1851	-2229	-3140	-5212	-5245	-5424	-5749	-5879	-6018	-6145	-6375
4	7101	6607	291,8	0	-151	-429	-635	-938	-1319	-1559	-1937	-2848	-4921	-4953	-5133	-5457	-5587	-5726	-5853	-6083
5	7252	6758	443,2	151,4	0	-277	-484	-787	-1168	-1408	-1786	-2697	-4769	-4802	-4981	-5306	-5436	-5575	-5702	-5931
6	7529	7035	720,6	428,8	277,4	0	-207	-510	-890	-1131	-1508	-2419	-4492	-4525	-4704	-5029	-5159	-5298	-5425	-5654
7	7736	7242	927,2	635,4	484	206,6	0	-303	-684	-924	-1302	-2213	-4285	-4318	-4497	-4822	-4952	-5091	-5218	-5447
8	8039	7545	1230	938,4	787	509,7	303	0	-381	-621	-999	-1910	-3982	-4015	-4194	-4519	-4649	-4788	-4915	-5144
9	8420	7926	1611	1319	1168	890,2	683,6	380,5	0	-240	-618	-1529	-3602	-3634	-3814	-4138	-4268	-4408	-4534	-4764
10	8660	8166	1851	1559	1408	1131	924	620,9	240,4	0	-378	-1289	-3361	-3394	-3573	-3898	-4028	-4167	-4294	-4524
11	9038	8544	2229	1937	1786	1508	1302	998,6	618,1	377,7	0	-911	-2983	-3016	-3195	-3520	-3650	-3789	-3916	-4146
12	9949	9455	3140	2848	2697	2419	2213	1910	1529	1289	911	0	-2072	-2105	-2284	-2609	-2739	-2878	-3005	-3235
13	12021	11527	5212	4921	4769	4492	4285	3982	3602	3361	2983	2072	0	-32,79	-211,9	-536,9	-666,8	-805,9	-932,8	-1162
14	12054	11560	5245	4953	4802	4525	4318	4015	3634	3394	3016	2105	32,79	0	-179,2	-504,1	-634	-773,1	-900	-1130
15	12233	11739	5424	5133	4981	4704	4497	4194	3814	3573	3195	2284	211,9	179,2	0	-324,9	-454,8	-594	-720,8	-950,4
16	12558	12064	5749	5457	5306	5029	4822	4519	4138	3898	3520	2609	536,9	504,1	324,9	0	-129,9	-269	-395,9	-625,4
17	12688	12194	5879	5587	5436	5159	4952	4649	4268	4028	3650	2739	666,8	634	454,8	129,9	0	-139,1	-266	-495,6
18	12827	12333	6018	5726	5575	5298	5091	4788	4408	4167	3789	2878	805,9	773,1	594	269	139,1	0	-126,8	-356,4
19	12954	12460	6145	5853	5702	5425	5218	4915	4534	4294	3916	3005	932,8	900	720,8	395,9	266	126,8	0	-229,6
20	13184	12690	6375	6083	5931	5654	5447	5144	4764	4524	4146	3235	1162	1130	950,4	625,4	495,6	356,4	229,6	0

Tabla 3.3.2-1: Diferencias D_{ij} entre las alternativas de *layout* a analizar para el caso de la planta de fabricación de conectores.

La Tabla 3.3.2-1 permite observar el patrón en las diferencias entre alternativas. Debido a que las alternativas se ordenaron de forma ascendente en base a las medias muestrales de Z , las diferencias entre alternativas cada vez más alejadas son las que seguramente superen la diferencia crítica del Test de Tukey. La Tabla 3.3.2-2 muestra los valores obtenidos de $q_{20,380,1-\alpha}$, así como las diferencias críticas D_c para tres valores de α .

α	q_α	D_c
10%	4,694	4221,882
5%	5,012	4507,898
1%	5,645	5077,231

Tabla 3.3.2-2: Valores tabulados de la distribución Recorrido Studentizado y diferencias críticas para el caso de la planta de fabricación de conectores.

Los resultados que se obtienen empleando los tres niveles de significación son similares. Hay claramente dos alternativas de *layout* cuyos valores medios de Manejo de Material Total son inferiores al resto de las alternativas. Estas dos alternativas son L_1 y L_2 , las cuales no presentan diferencias significativas entre sí (493,9; frente a los valores en la Tabla 3.3.2-2). La Tabla 3.3.2-3 muestra las relaciones entre cada par de alternativas para el caso de $\alpha = 1\%$. El signo “>” indica que la media de la alternativa correspondiente a la fila i es significativamente mayor a la de la columna j ; el signo “<” indica la relación opuesta, y el signo “=” implica que no es posible establecer una diferencia entre las medias con la información disponible, ausencia de significatividad al ensayar la diferencia entre medias.



L_i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	-	=	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
2	=	-	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<	<
3	>	>	-	=	=	=	=	=	=	=	=	=	<	<	<	<	<	<	<	<
4	>	>	=	-	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	<	<	<	<	<	<
5	>	>	=	=	-	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	<	<	<	<	<
6	>	>	=	=	=	-	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	<	<	<	<
7	>	>	=	=	=	=	-	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	<	<	<
8	>	>	=	=	=	=	=	-	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	<
9	>	>	=	=	=	=	=	=	-	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
10	>	>	=	=	=	=	=	=	=	-	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=
11	>	>	=	=	=	=	=	=	=	=	-	=	=	=	=	=	=	=	=	=
12	>	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	-	=	=	=	=	=	=	=	=
13	>	>	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	-	=	=	=	=	=	=	=
14	>	>	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	-	=	=	=	=	=	=
15	>	>	>	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	-	=	=	=	=	=
16	>	>	>	>	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	-	=	=	=	=
17	>	>	>	>	>	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	-	=	=	=
18	>	>	>	>	>	>	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	-	=	=
19	>	>	>	>	>	>	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	-	=
20	>	>	>	>	>	>	>	>	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	=	-

Tabla 3.3.2-3: Relaciones en base al Test de Tukey entre las distintas alternativas de *layout*, en el caso de la planta de fabricación de conectores.

La aplicación del Test de Tukey al caso del diseño de una planta para una empresa productora de conectores arroja como resultado que las distribuciones en planta más flexibles, son las denominadas L_1 y L_2 (Tablas 3.3.2-4 y 3.3.2-5) Si se observa la Tabla 3.3.2-3 se percibe que estas dos alternativas no presentan diferencias significativas entre sí, pero ambas son diferentes al resto de las alternativas, en particular, son menores al resto; esto no sucede con otras distribuciones en planta.

Dpto.	D	E	G	B	C	A	F
Ubic.	1	2	3	4	5	6	7

Tabla 3.3.2-4: Distribución en planta L_1 .

Dpto.	B	E	G	D	C	A	F
Ubic.	1	2	3	4	5	6	7

Tabla 3.3.2-5: Distribución en planta L_2 .

Si bien en este caso el problema se reduce a dos alternativas muy superiores al resto, podría ocurrir que las diferencias no sean tan marcadas, y no pueda extraerse un conjunto reducido de alternativas mejores. Una posibilidad es incrementar el tamaño de las muestras artificiales sobre las que se efectúa la inferencia, de ese modo obteniendo estimaciones más precisas de las medias y



reduciendo la diferencia crítica; o aplicar un procedimiento de comparaciones en forma secuencial, como el procedimiento de Newman-Keuls [14].

3.4. Análisis de las mejores alternativas de distribución en planta

El análisis de comparación estadística que se expone en 3.3 permite extraer un conjunto de soluciones, que en base a la inferencia sobre una gran cantidad de muestras pequeñas hace posible la reducción del espacio de búsqueda de la mejor/es distribuciones en planta, bajo el criterio de flexibilidad.

El siguiente paso es el análisis de las alternativas que en un primer estudio se establecieron como mejores. Tomando de base el caso desarrollado para la planta de fabricación de conectores, cabe analizar las alternativas L_1 y L_2 . Para ello se efectúa la simulación de cada alternativa sobre una gran cantidad de escenarios (5000 iteraciones), obteniéndose las distribuciones para el Manejo de Materiales Total (Z) (Figura 3.4-1 y 3.4-2).

Las dos alternativas de distribución en planta exhiben distribuciones muy similares en lo que respecta a Z . La alternativa L_1 presenta un valor medio de 192600, con un desvío estándar de 3992; por otro lado L_2 presenta una media de 193110 con un desvío de 3960. La observación las Tablas 3.3.2-4 y 3.3.2-5 permite ver que ambas alternativas de *layout* difieren sólo en la ubicación de los departamentos D (Tratamiento Térmico) y B (Formación). Sin embargo esto no altera cuantiosamente la *performance* de la distribución en planta.

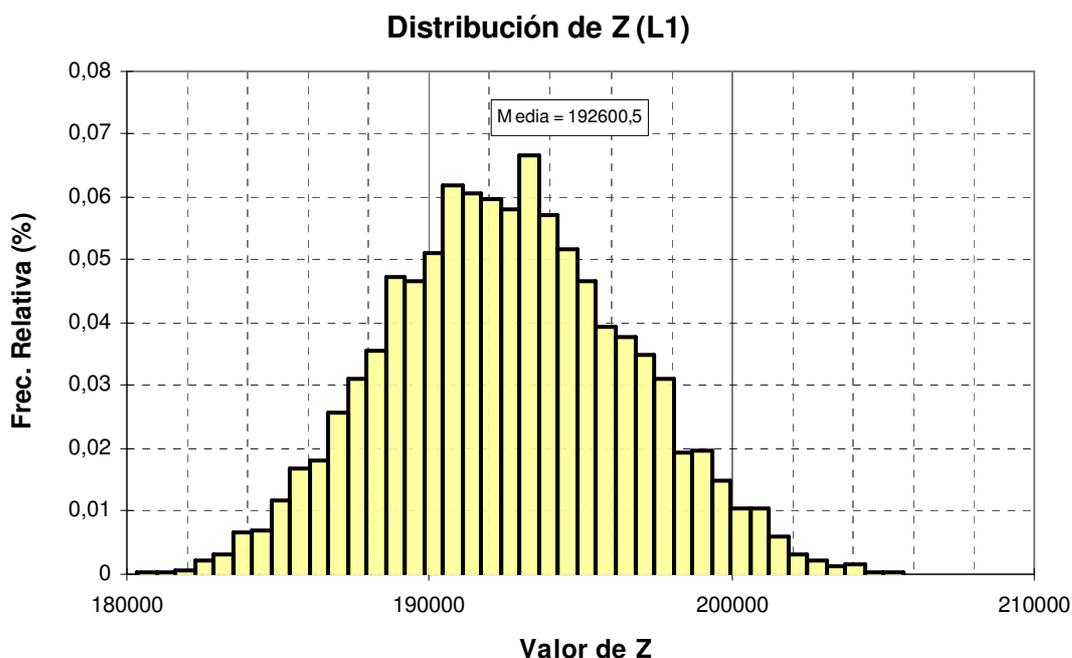


Figura 3.4-1: Distribución del Manejo de Materiales Total para la alternativa L_1 .

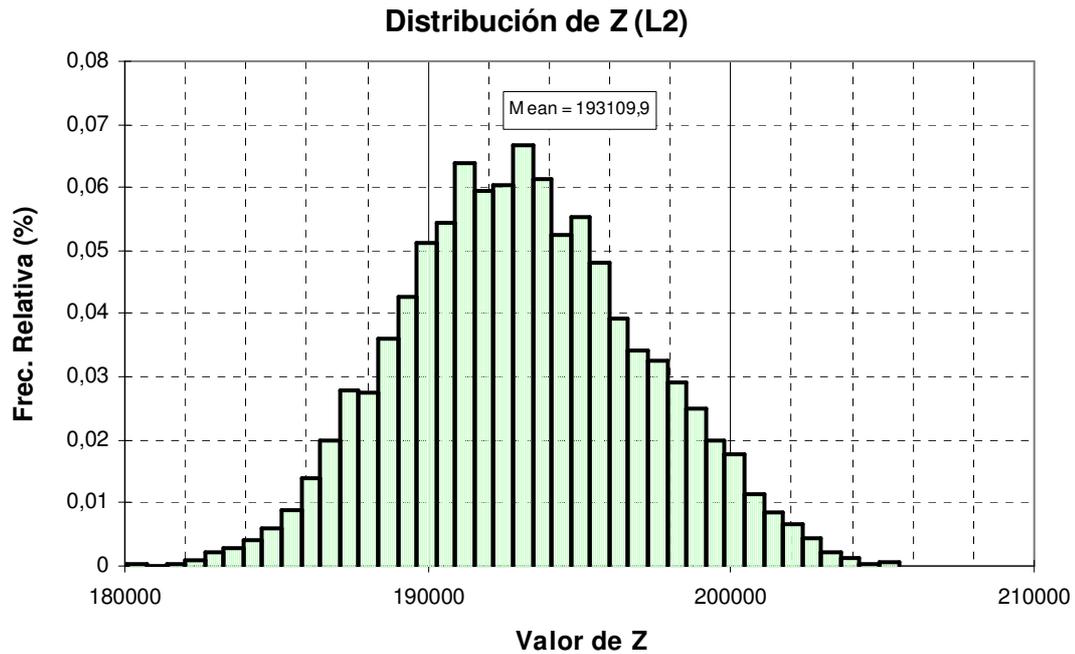


Figura 3.4-2: Distribución del Manejo de Materiales Total para la alternativa L_2 .

El análisis en busca de una distribución en planta óptima bajo el punto de vista de la flexibilidad, tal como la expresa la ecuación (10), culmina con dos alternativas posibles, que no presentan diferencias marcadas entre sí.

La aplicación de una metodología de resolución al problema de distribución en planta para plantas de pequeño tamaño como la analizada en el caso de la empresa de fabricación de conectores, demuestra ser útil en los casos donde una evaluación exhaustiva de todas las alternativas posibles es un proceso inviable. En estos casos, sin embargo, es posible evaluar todas las alternativas con información limitada sobre el comportamiento de las mismas. Esto da lugar al uso de técnicas de inferencia como el Análisis de la Varianza y el Test de Tukey para tener un fundamento estadístico que permita extraer conclusiones valederas al comparar las diversas alternativas.

El análisis de problemas que requieran la ubicación de una mayor cantidad de departamentos en la planta se dificulta empleando las técnicas estadísticas desarrolladas en este capítulo, dado que entra en juego la dificultad de tener que analizar cientos de miles o millones de soluciones posibles, para lo cuál ya no alcanza con realizar una inferencia con conocimiento parcial de las alternativas. En este caso, se requiere de un procedimiento especial de búsqueda de soluciones óptimas o razonablemente buenas (subóptimas), que involucre a la vez la correcta evaluación de las alternativas considerando la incertidumbre inherente al problema.





4. ANÁLISIS DEL PROBLEMA EN PLANTAS DE MEDIANO Y GRAN TAMAÑO

4.1. Introducción

En el caso en que el tamaño de la planta, en términos de la cantidad de departamentos a ubicar dentro de la misma, sea grande, la evaluación de todo el espacio de soluciones representa un esfuerzo prácticamente imposible. Una planta de 10 departamentos implica el análisis de millones de alternativas. En la realidad, los tamaños de plantas pueden llegar a ser aún mayores, para algunos sistemas del tipo taller de labores, se puede requerir la ubicación de 30 departamentos o más.

Los métodos analizados en el capítulo 3 no son útiles en estos casos, y es debido a ello que se pretende estudiar el empleo de un procedimiento de búsqueda en el espacio de soluciones, que retenga las características de rigurosidad estadística en la comparación de alternativas. A los fines de este trabajo, el método propuesto es el conocido como Temple Simulado. Este corresponde a una técnica denominada meta-heurística, empleada en la resolución de algunos problemas de optimización.

El resto del capítulo se centra, en primera instancia, en el marco teórico del Temple Simulado, haciendo hincapié en la estructura del algoritmo y el procedimiento estadístico para comparar alternativas. Posteriormente, se analiza la aplicación de un algoritmo de Temple Simulado a un caso de una planta de 12 departamentos.

4.2. El método de Temple Simulado

La técnica de Temple Simulado, o también denominada Recocido Simulado corresponde a un procedimiento iterativo de búsqueda,, meta-heurístico desarrollado por Kirkpatrick *et al.* [15] para la resolución de problemas de optimización combinatoria de gran complejidad. Los procedimientos meta-heurísticos son técnicas heurísticas que se aplican a una diversidad de problemas. Esto representa la diferencia básica con las heurísticas, fuertemente dependientes del problema a resolver; las meta-heurísticas favorecen la aplicación a una variedad de problemas mediante el ajuste de parámetros.

El Temple Simulado (TS) se construye en base a una analogía con el proceso termodinámico de enfriamiento de líquidos o sólidos en estado líquido. Se fundamenta en el proceso de enfriar la materia hasta que alcance el estado de



equilibrio (mínima energía), mediante el control de la temperatura. Si un metal en estado líquido se enfría lentamente, el proceso natural tiende a la formación de una estructura cristalina pura, donde las distancias entre átomos son elevadas, este es el estado de mínima energía. Por otro lado, el rápido enfriamiento hará que se forme una estructura policristalina, amorfa, con una energía un poco mayor. La clave del proceso es el enfriamiento *lento*.

El proceso natural, a través del cuál se alcanza la mínima energía queda caracterizado por la distribución de Boltzmann:

$$P(E) \propto e^{-E/kT} \quad (18)$$

La distribución establece que un sistema en equilibrio térmico a la temperatura T tiene su energía E distribuida según (18). El parámetro k es la constante de Boltzmann. Inclusive a bajas temperaturas, existe una probabilidad, aunque sea pequeña, de que el sistema se encuentre en un estado donde su energía es elevada. Esta característica es la que permite que a largo plazo el sistema acabe en el estado de mínima energía, evitando quedar atrapado en mínimos locales. El sistema puede moverse en dirección creciente o decreciente respecto a la energía, pero a medida que la temperatura disminuye, la probabilidad de moverse a estados de menor energía aumenta respecto a la de los estados de mayor energía.

Metropolis *et al*, en el marco del desarrollo de técnicas computacionales de muestreo para su aplicación en la mecánica estadística, basadas en métodos de Monte Carlo con cadenas de Markov [16], consideran la transición de un estado con energía E_k a uno con energía E_{k+1} , esta transición tiene asociada la siguiente probabilidad:

$$P(E_k \rightarrow E_{k+1}) = \frac{e^{-E_{k+1}/kT}}{e^{-E_k/kT} + e^{-E_{k+1}/kT}} = \frac{1}{1 + e^{-\Delta E/kT}} \approx e^{-\Delta E/kT} \quad (19)$$

Donde $\Delta E = E_{k+1} - E_k$ es la diferencia de energía entre los estados. De esta manera, H representa la probabilidad de que el sistema transite del estado k al estado $k+1$, pero esto es cierto únicamente en el caso en que la energía del estado siguiente ($k+1$) es superior a la del estado actual (k), en el caso contrario, P es mayor a 1, y se establece que la probabilidad de transición de k a $k+1$ es 1. Así, la distribución de probabilidades de transición entre estados consecutivos o vecinos es:

$$G(\Delta E) = \begin{cases} e^{-\Delta E/kT} & \text{si } \Delta E > 0 \\ 1 & \text{de otro modo} \end{cases} \quad (20)$$



Si la energía del nuevo estado es menor a la del estado actual, entonces el sistema pasa al nuevo estado, en caso contrario, pasa al nuevo estado con probabilidad $e^{-\Delta E/kT}$. Esto constituye la esencia del método de Temple Simulado, el cuál garantiza la convergencia al estado de mínima energía, ya que permite la exploración de todo el espacio de estados. Sin embargo, si se reduce la temperatura T en el tiempo, como parámetro de control, la probabilidad de acceder a estados de mayor energía se reduce, y el sistema permanece más tiempo en aquellos estados de menor energía. Para que un esquema de enfriamiento (variación de la temperatura en el tiempo) permita la convergencia al estado de mínima energía, el enfriamiento debe ser *lento*, matemáticamente, el esquema de enfriamiento debe permitir que se cumpla la propiedad de *ergodicidad*, ver [17].

Para demostrar la convergencia se comienza estableciendo la función que rige la probabilidad de transición: distribución de Boltzmann:

$$P(\mathbf{s}) = \frac{e^{-E(\mathbf{s})/kT}}{\sum_{\mathbf{s} \in A} e^{-E(\mathbf{s})/kT}} \quad (21)$$

Donde el denominador se conoce como Función de Partición. Si existe una energía mínima E^* , a la que le corresponde un único estado \mathbf{s}^* , multiplicando numerador y denominador por $e^{-E^*/kT}$, se obtiene:

$$P(\mathbf{s}) = \frac{e^{-(E(\mathbf{s})-E^*)/kT}}{1 + \sum_{\mathbf{s} \neq \mathbf{s}^*} e^{-(E(\mathbf{s})-E^*)/kT}} \quad (22)$$

Como $E(\mathbf{s}) > E^*$, cuando la temperatura T tiende a 0:

$$P(\mathbf{s}) \rightarrow \delta(\mathbf{s}), \text{ con } \delta(\mathbf{s}) = \begin{cases} 1 & \text{si } \mathbf{s} = \mathbf{s}^* \\ 0 & \text{si } \mathbf{s} \neq \mathbf{s}^* \end{cases} \quad (23)$$

Esto es, cuando se alcanza el equilibrio térmico a la temperatura más baja, el sistema alcanza su estado de mínima energía.

El procedimiento básico del método de Temple Simulado descrito se esquematiza de la siguiente manera:

Paso 1: Definición del estado inicial del sistema $\mathbf{s} = \mathbf{s}_0$, $T = T_0$ temperatura inicial, evaluar la energía en el estado actual $E = E(\mathbf{s})$.



Paso 2: Generar un estado vecino \mathbf{s}_1 , evaluar la energía en el estado vecino $E(\mathbf{s}_1)$. Si $E(\mathbf{s}_1) - E(\mathbf{s}) < 0$, entonces redefinir el estado actual $\mathbf{s} = \mathbf{s}_1$. Si $E(\mathbf{s}_1) - E(\mathbf{s}) > 0$, entonces si $G(\Delta E) > U(0,1)$, donde $U(0,1)$ es un número aleatorio, redefinir el estado actual $\mathbf{s} = \mathbf{s}_1$; de otro modo se descarta el estado vecino. Recalcular la temperatura, $T = T_1$.

Paso 3: Repetir el Paso 2 hasta que se cumpla alguna condición. Puede ser hasta que se alcance un determinado valor de la función E o de T o hasta que se cumpla el período establecido de evaluación del método.

4.2.1. Relación con el problema de Distribución en Planta

En una analogía con el proceso termodinámico, en problemas de optimización combinatoria como el problema de distribución en planta, bajo la formulación que sigue este trabajo, es posible relacionar las variables y funciones involucradas en el método con las del problema de la siguiente manera:

- *Energía:* Está representada por la flexibilidad, o la media del Manejo de Materiales Total (μ), dada por la ecuación (10). Es la función objetivo a minimizar.
- *Estado:* Se define al estado \mathbf{s} como la disposición de los departamentos en la planta, o la distribución en planta propiamente dicha, la cuál se puede representar como vector de permutación de N departamentos (x_1, x_2, \dots, x_N). Por ejemplo, en un problema de 5 departamentos y 5 ubicaciones, un estado del sistema puede ser $\mathbf{s}_1 = (1, 3, 4, 2, 5)$, el cuál implica que el departamento 1 está en la ubicación 1, el departamento 3 en la ubicación 2 y así sucesivamente. Cada estado está asociado a una energía.

En el método clásico de Temple Simulado, la transición entre estados sigue la distribución (20), el método bajo este supuesto se conoce como Temple de Boltzmann. Si bien esta distribución no guarda relación con el problema de optimización (problema de distribución en planta), su empleo se sustenta en la capacidad de garantizar la convergencia a los estados de mínima energía (mínimo manejo de materiales total). En la práctica, esta distribución es de uso casi exclusivo, a pesar de que el método permite el empleo de otras distribuciones, siempre que se cumpla la condición de que el sistema pueda evolucionar a estados peores, aunque sea con una pequeña probabilidad. En este trabajo se emplea la distribución de probabilidades de transición (20).

Resta definir el concepto de estados vecinos, o consecutivos. Se entienden como vecinos a aquellos estados que difieren, únicamente, en la ubicación de dos departamentos, los cuales intercambian lugares. Por ejemplo, si $\mathbf{s}_1 = (1, 3,$



4, 2, 5), un estado vecino s_2 , puede ser: $s_2 = (4, 3, 1, 2, 5)$, donde se intercambiaron los departamentos 1 y 4. De esta manera, en un problema con N departamentos y ubicaciones, cada transición puede hacerse a uno de los $N(N-1)/2$ vecinos. Un criterio de uso común consiste en seleccionar de manera aleatoria el siguiente estado vecino en la evolución, se asigna así la misma probabilidad de elección para cada vecino.

4.2.2. Incertidumbre y la comparación de estados vecinos (Test de Welch)

En el problema de Distribución en Planta, la incertidumbre juega un papel limitante a la hora de poder comparar dos alternativas de *layout*. En el capítulo 3 se evalúa una técnica de comparación de un grupo de alternativas, para poder determinar aquellas que exhiban el mejor comportamiento en cuanto al criterio de flexibilidad (media del manejo de materiales total). En el marco de este capítulo, el método de Temple Simulado exige la comparación de las alternativas en el proceso de determinar si un estado es mejor o no que otro estado vecino, y así poder evaluar la evolución del sistema de acuerdo a la distribución de probabilidades (20).

Si se conocen con certeza los parámetros de la distribución de Z , carece de sentido el empleo de una técnica de comparación estadística entre estados vecinos, pero debido a la complejidad del manejo de materiales, y a las limitaciones que implica una evaluación exhaustiva de la distribución de Z para cada alternativa de distribución en planta, se recurre a un método de comparación entre estados vecinos a través de la simulación de un número limitado de escenarios para cada uno, y luego la inferencia sobre las medias de cada alternativa. De esta manera, se hace eficiente el Paso 2 del método de Temple Simulado en el que se requiere determinar cómo es la función a optimizar en una alternativa (estado), respecto a otra (estado vecino)

La comparación entre pares de estados vecinos se lleva a cabo mediante el Test de Welch de comparación de poblaciones con desvíos distintos y desconocidos. Este método debido a B. L. Welch corresponde a un procedimiento de comparación de dos medias (μ_1 y μ_2) [14], y se basa en que la siguiente variable:

$$t = \frac{\bar{Z}_2 - \bar{Z}_1}{\sqrt{\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}}} \quad (24)$$

Tiene distribución t de Student con ν grados de libertad:



$$v = \frac{\left(\frac{S_1^2}{n_1} + \frac{S_2^2}{n_2}\right)^2}{\frac{1}{n_1-1}\left(\frac{S_1^2}{n_1}\right)^2 + \frac{1}{n_2-1}\left(\frac{S_2^2}{n_2}\right)^2} \quad (25)$$

Análogamente a la convención del capítulo 3: \bar{Z}_1 es la media muestral de 1 y \bar{Z}_2 la media muestral de 2; S_1 y S_2 son los desvíos muestrales de cada estado, y n_1 y n_2 son los tamaños muestrales de cada estado. Si se consideran tamaños muestrales iguales para ambos estados, considerando que se efectúan simulaciones de n iteraciones en cada uno (tamaño muestral n), resulta:

$$v = (n-1) \frac{(S_1^2 + S_2^2)^2}{(S_1^2)^2 + (S_2^2)^2} \quad (26)$$

Estableciendo un nivel de significación α para la comparación, entonces la diferencia entre estados será cierta cuando se cumpla la siguiente condición:

$$\bar{Z}_2 - \bar{Z}_1 > t_{v,1-\alpha} \cdot \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2}{n}} \quad (27)$$

Si la diferencia entre estados/alternativas $\bar{Z}_2 - \bar{Z}_1$ es positiva y mayor al segundo miembro de (27), entonces se infiere con un $(1-\alpha)$ % de confianza que la media μ_2 es mayor que μ_1 ; de otro modo, a lo sumo pueden ser iguales, o μ_2 es menor que μ_1 (Figura 4.2.2-1).

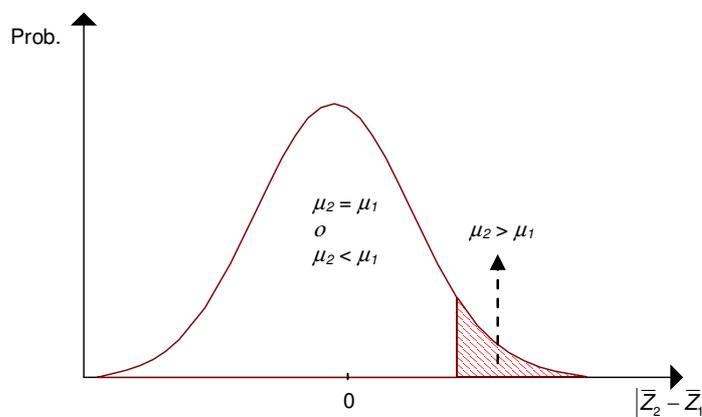


Figura 4.2.2-1: Inferencia a través del Test de Welch para establecer diferencias entre estados/alternativas.



La comparación entre el par de estados permite luego determinar la evolución del sistema; esto es, cuál será el siguiente estado en la búsqueda del óptimo. Para ello, se requiere estimar la probabilidad de transición hacia el nuevo estado, la cuál depende de la diferencia de la función objetivo, evaluada en ambos estados, como se observa de la ecuación (20). Al no conocerse con certeza las medias, la probabilidad de transición al nuevo estado (estado 2) se estima con las medias muestrales de la siguiente manera:

$$G(\Delta\bar{Z}) = \begin{cases} e^{-(\bar{Z}_2 - \bar{Z}_1)/T} & \text{si } \mu_2 > \mu_1 \\ 1 & \text{de otro modo} \end{cases} \quad (28)$$

En (28) se excluye en el exponente a la constante k de Boltzmann, ya que ésta relaciona calor con temperatura, variables ajenas al problema de optimización. En este caso, se llama temperatura T al denominador del exponente, sin que necesariamente guarde relación con la variable termodinámica.

Un aspecto importante que surge del empleo del método de comparación estadística en conjunto con el Temple Simulado es que, inclusive con la potencia estadística de considerar que el nuevo estado es peor que el actual ($\mu_2 > \mu_1$), es posible adoptar al nuevo estado, aunque se asigna para ello una probabilidad regida por la distribución de Boltzmann. El método se vale de este criterio de aceptar soluciones peores para buscar en el espacio de estados sin quedar atrapado en mínimos locales.

Con la adición del Test de Welch en la comparación entre estados, el método de Temple Simulado, para su aplicación al problema de Distribución en Planta, presenta el siguiente esquema:

Paso 1: Definición del estado inicial del sistema $\mathbf{s} = \mathbf{s}_0$, $T = T_0$ temperatura inicial, simulación de Z en el estado inicial y evaluación de \bar{Z}_0 y S_0 .

Paso 2: Generar de manera aleatoria un estado vecino \mathbf{s}_1 , simulación y evaluación en el estado vecino: \bar{Z}_1 y S_1 . Comparación por medio del Test de Welch: $(\bar{Z}_0; S_0)$ con $(\bar{Z}_1; S_1)$. Si $\mu_1 > \mu_0$, entonces si $G(\Delta\bar{Z}) > U(0,1)$, donde $U(0,1)$ es un número aleatorio, redefinir el estado actual $\mathbf{s} = \mathbf{s}_1$, si $G(\Delta\bar{Z}) < U(0,1)$ se descarta el estado vecino. Si $\mu_1 < \mu_0$ o $\mu_1 = \mu_0$, entonces redefinir el estado actual $\mathbf{s} = \mathbf{s}_1$; Recalcular la temperatura, $T = T_1$.

Paso 3: Repetir el Paso 2 hasta que se cumpla alguna condición. Puede ser hasta que se alcance un determinado valor de la función E , o de T o hasta que se cumpla el período establecido de evaluación del método.



4.2.3. El esquema o plan de enfriamiento

Un factor determinante en la aplicación efectiva del método de Temple Simulado es la elección correcta del esquema o plan de enfriamiento. El esquema de enfriamiento es la forma en que el parámetro de control T (temperatura) disminuye a medida que transcurre la evolución del sistema. El impacto de la variación de la temperatura en el procedimiento se ve reflejado en la probabilidad de transición G . A medida que la temperatura disminuye, también lo hace la probabilidad de acceder a estados peores, o más lejanos al óptimo.

Si la temperatura se reduce rápidamente, seleccionando casi exclusivamente a estados superiores en cada paso del método, se corre el riesgo de que el método no converja, quedando atrapado en mínimos locales, o estados en los cuales sus estados vecinos son peores. Si el esquema o plan de enfriamiento es demasiado lento, entonces la búsqueda del óptimo está sujeto a un gran tiempo de evaluación, lo cual puede no resultar práctico en ciertos casos. La ingeniería del método consiste en seleccionar un esquema apropiado para el problema. Esto no implica que el esquema debe permitir obtener la solución óptima en un tiempo corto, sino, que la solución sea razonable, en un tiempo también razonable.

Dependiendo del tipo de problema, se puede definir un plan de enfriamiento que resulte apropiado. Sin embargo, por lo general, se requiere de cierto grado de experimentación con el problema. En general, el plan de enfriamiento tiene en cuenta dos aspectos:

- Cuál es el salto de temperatura entre evaluaciones del método.
- Durante cuánto tiempo (o cuántas iteraciones) se consideran en cada evaluación.

El esquema de enfriamiento de uso más frecuente en una gran variedad de problemas de índole industrial, biológicos, de teoría de grafos, etc. es el Exponencial. En este plan de enfriamiento, la temperatura disminuye en un porcentaje de su valor anterior, k es el subíndice de “tiempo”, creciente con la evolución del sistema, representa los pasos o iteraciones del método:

$$T_{k+1} = \gamma \cdot T_k \quad (29)$$

Donde $0 < \gamma < 1$. Este parámetro es fuertemente dependiente del problema, y su determinación queda sujeta al criterio del usuario del método, generalmente se



trata de un número más cercano al 1 que al 0, para evitar el enfriamiento rápido.

Otro plan de enfriamiento utilizado con frecuencia es el siguiente:

$$T_{k+1} = \frac{T_k}{1 + \beta \cdot T_k} \quad (30)$$

Siendo β el parámetro de ajuste, a determinar por el usuario.

Un problema que surge con el empleo de un esquema de enfriamiento según (29) o (30) es que no son consistentes con la propiedad de *ergodicidad*, esto es, a pesar de que su uso pueda ser muy eficiente, no hay prueba fehaciente de garantizar la convergencia a un óptimo global en todos los casos en que se utilicen. Ingber [17], remarca la característica esencial del Temple Simulado como su capacidad para garantizar la convergencia a un óptimo, pero deja en claro que, de no cumplirse exactamente esta propiedad, no hay razón para descartar métodos eficientes cuando la eficiencia es un factor preponderante. Un esquema de enfriamiento consistente con la distribución de Boltzmann y la propiedad de ergodicidad es el esquema de enfriamiento Logarítmico:

$$T_k = T_0 \cdot \left(\frac{\ln k_0}{\ln k} \right) \quad (31)$$

Donde T_0 es el valor de temperatura en el instante en que se inicia el método (k_0). Este plan de enfriamiento es más lento que el Exponencial, pero garantiza matemáticamente la convergencia exacta.

Definido el esquema de enfriamiento, se debe analizar cuánto tiempo el sistema permanece en cada temperatura. En el proceso natural de enfriamiento, a medida que la temperatura disminuye, el sistema permanece cada vez más tiempo a una temperatura, permitiendo que se alcance el equilibrio térmico. En el método de Temple Simulado, el procedimiento es análogo, algunos autores emplean un factor proporcional al tamaño del problema. Es común también considerar el tiempo en el que se acepten una cantidad preestablecida de estados vecinos, como tiempo en el que la temperatura permanece constante. Este es también un aspecto relegado al criterio del usuario del método, quién lo considera en base a la eficiencia resultante del método.



4.3. Aplicación al caso de una planta de 12 departamentos

El método de resolución al problema de Distribución en Planta expuesto en el capítulo 3, sólo provee una base útil para el análisis si la cantidad de alternativas a evaluar no es elevada. Se considera en este caso que la utilidad del uso de Comparaciones Múltiples para encontrar la mejor alternativa de *layout* surge cuando es posible evaluar todas las alternativas, cada una de manera limitada, para luego efectuar la comparación estadística entre un grupo de ellas.

El caso más complicado de análisis implica encontrar soluciones razonablemente buenas a problemas donde se deben ubicar una cantidad mayor de departamentos en la planta. Esta sección desarrolla la aplicación del método de Temple Simulado a un problema donde se requieren ubicar 12 departamentos en una planta con 12 ubicaciones candidatas. Como se expone en 2.6, evaluar todas las alternativas posibles de *layout* de este problema implica analizar casi 500 millones de *layouts* posibles. Si evaluar cada alternativa llevase una décima de segundo, el análisis exhaustivo llevaría casi dos años.

4.3.1. Información previa y datos de entrada

El caso corresponde al de una planta para la fabricación de 7 productos, los cuáles se elaboran en 12 departamentos funcionales. En la sectorización inicial de la planta, se determinan las 12 áreas o ubicaciones candidatas para los departamentos, y se confecciona la Matriz de Distancias (Tabla 4.3.1-1):

Ubic.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,00	5,00	6,00	9,00	11,00	8,00	9,00	8,00	2,00	2,00	6,00	9,00
2	5,00	0,00	9,00	5,00	10,00	12,00	12,00	3,00	3,00	10,00	6,00	10,00
3	6,00	9,00	0,00	3,00	9,00	6,00	6,00	6,00	3,00	9,00	5,00	9,00
4	9,00	5,00	3,00	0,00	8,00	8,00	5,00	5,00	12,00	6,00	5,00	9,00
5	11,00	10,00	9,00	8,00	0,00	6,00	4,00	6,00	8,00	10,00	9,00	10,00
6	8,00	12,00	6,00	8,00	6,00	0,00	11,00	8,00	8,00	8,00	10,00	8,00
7	9,00	12,00	6,00	5,00	4,00	11,00	0,00	9,00	11,00	6,00	9,00	10,00
8	8,00	3,00	6,00	5,00	6,00	8,00	9,00	0,00	2,00	8,00	8,00	5,00
9	2,00	3,00	3,00	12,00	8,00	8,00	11,00	2,00	0,00	6,00	8,00	3,00
10	2,00	10,00	9,00	6,00	10,00	8,00	6,00	8,00	6,00	0,00	10,00	10,00
11	6,00	6,00	5,00	5,00	9,00	10,00	9,00	8,00	8,00	10,00	0,00	12,00
12	9,00	10,00	9,00	9,00	10,00	8,00	10,00	5,00	3,00	10,00	12,00	0,00

Tabla 4.3.1-1: Matriz de Distancias inter-departamentales para el caso de la planta de 12 departamentos.

El Plan de Producción para los 7 productos, en forma tabular se encuentra en la Tabla 4.3.1-2:



Producto	Producción Semanal		
	Mínima	Más Prob.	Máxima
1	300	350	400
2	195	240	276
3	142	160	225
4 y 7	485	565	675
5 y 6	550	640	838

Tabla 4.3.1-2: Plan de producción semanal para el caso de una planta de 12 departamentos.

La tabla muestra los valores mínimo, más probable y máximo del volumen de producción de los siete productos. La estimación subjetiva de la producción de cada producto sigue una distribución Triangular, al igual que en el caso expuesto en el capítulo 3. Para los volúmenes de producción de los productos 4 y 7, al igual que para 5 y 6, se tienen estimaciones de ambos en conjunto. Este es el caso de productos de una misma línea, para los cuáles se conoce su demanda y producción conjunta, y cada producto tiene una incidencia sobre el total, la cuál se conoce, asimismo, de manera estimada. La estimación de las incidencias de los productos sobre las líneas establece:

- El producto 6 representa entre un 20% y un 40% de la producción total correspondiente de la línea de productos: 5 y 6.
- Entre un 25% y un 35% del volumen de producción de la línea que contiene a los productos 4 y 7, corresponde al producto 7.

La Tabla 4.3.1-3 muestra los patrones de flujo o secuencias de producción que siguen frecuentemente los productos dentro de la planta.

Producto	Secuencia de Producción
1	A-B-C-E-H-K-L
2	A-C-D-E-F-H-L
3	A-C-E-G-F-H-I-J-L
4	A-B-D-H-I-J-K-L
5	A-C-E-F-G-I-K-L
6	A-C-E-F-L-H-G-I-K-L
7	A-C-B-H-L-I-J-K-F-L

Tabla 4.3.1-3: Secuencias de producción para el caso de una planta de 12 departamentos.

Los factores que agregan incertidumbre en el flujo de materiales provienen del producto 1 y 3:

- Entre un 15% y un 25% de los casos, el producto 1 sigue la siguiente secuencia de producción, debido a la necesidad de reprocesamiento en la planta: A-B-C-E-D-B-C-E-H-K-L.



- El producto 3, con volúmenes de producción inferiores a los otros productos, se fabrica bajo pedido en un 60% de los casos.

A los fines del modelado del esquema productivo, tanto los requerimientos de reproceso del producto 1, como las incidencias de los productos 6 y 7, se consideran distribuidos acorde a la distribución de probabilidades Uniforme. Consecuentemente, se designa una probabilidad estimada de producir el producto 3, de acuerdo a la información disponible.

La Tabla 4.3.1-4 muestra una Matriz de Flujos representativa de las relaciones entre los departamentos de la planta, donde se consideran niveles de producción más probables:

Dpto.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
A		745,50	1209,50									
B			411,25	395,50								
C		169,50		240,00	1211,25							
D		61,25			240,00			395,50				
E				61,25		880,00	160,00	350,00				
F							448,00	400,00				361,50
G						160,00			640,00			
H							192,00		555,50		350,00	409,50
I										725,00	640,00	
J											565,00	160,00
K						169,50						1385,50
L								192,00	169,50			

Tabla 4.3.1-4: Matriz de Flujos para el caso de una planta de 12 departamentos.

4.3.2. Selección del esquema de enfriamiento y significación de los ensayos de comparación

La selección del plan de enfriamiento apropiado es un factor determinante en la aplicación del método de Temple Simulado. Se emplea el esquema de enfriamiento Exponencial, siendo este esquema de aplicación generalizada por su eficiencia en algunos problemas de optimización.

Se establece, previo a la implementación, un valor del parámetro $\gamma= 0,8$. Esto es, cada salto de temperatura, insume una reducción del 20% respecto a la temperatura anterior. Convencionalmente, se sugiere mantener este parámetro en valores altos (cercaos a 1), para evitar el enfriamiento rápido. El rango sugerido normalmente está entre 0,7 y 0,95. La selección de 0,8 tiene como propósito no hacer tan lento al método.



La determinación de la temperatura inicial para comenzar el método (T_0) requiere de cierto grado de experimentación previa, ya que al apartarse del problema termodinámico, T no tiene sentido físico. Para su determinación, se lleva a cabo la generación de estados vecinos a un estado inicial cualquiera. En particular, se considera el estado inicial dado por la siguiente distribución en planta o *layout* (Tabla 4.3.2-1):

Dpto.	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
Ubic.	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

Tabla 4.3.2-1: Distribución en planta inicial para el caso de la planta de 12 departamentos.

Se generan 150 estados vecinos, lo que implica obtener las medias y desvíos muestrales de cada uno de estos *layouts*, empleando para ello simulaciones cortas, de 20 iteraciones (tamaño muestral). Para determinar la temperatura inicial, se tiene en cuenta que ésta debiera ser alta. Esta característica es lo que hace que en los primeros pasos, el método de Temple Simulado se comporte como un procedimiento de *Random Walk* (Caminata Aleatoria); esto es, que al comienzo, el método acepte casi cualquier estado (alternativa de *layout*). Una forma de hacerlo es fijar un porcentaje de los estados vecinos peores en términos de la función objetivo, que se desee aceptar al principio. Se fija para el caso de la planta de 12 departamentos, un porcentaje del 80% de aceptación de estos estados vecinos peores al estado inicial dado por la Tabla 4.3.2-1. T_0 se determina de la siguiente manera, sabiendo que los estados peores se aceptan bajo la distribución de Boltzmann:

$$e^{-(\Delta\bar{Z}^+)/T_0} = P_0 \quad (32)$$

$$-\frac{(\Delta\bar{Z}^+)}{T_0} = \ln P_0 \quad (33)$$

$$T_0 = -\frac{(\Delta\bar{Z}^+)}{\ln P_0} \quad (34)$$

Donde $\Delta\bar{Z}^+$ es la variación promedio respecto a la alternativa inicial, de todas las alternativas peores generadas, y $P_0 = 80\%$. De este modo, la temperatura inicial T_0 resultante es de 15000.

La determinación de la longitud de tiempo en la que una temperatura se mantiene constante está dada por tres factores, el cumplimiento de cualquiera de ellos indica el alcance del equilibrio a esa temperatura. En primer lugar, se estima que el sistema debe permanecer a una dada temperatura hasta que se efectúen 60 ($5N = 5(12)$) cambios de estado exitosos (que mejoren Z en su



valor medio). La segunda condición es que se produzcan 240 ($20N = 20(12)$) cambios de estados. Finalmente, de no cumplirse las condiciones nombradas anteriormente, se limita en 1000 a la cantidad de evaluaciones totales por temperatura. Este último criterio da por terminada la evaluación del método, ya que el mismo tiene dificultades en encontrar estados mejores.

Al momento de comparar entre dos estados vecinos, se desea procurar que el error posible de controlar, el nivel de significación α , sea adecuado para no favorecer el rechazo de alternativas que pueden ser buenas o que favorezcan el proceso de búsqueda. Al no poder conocerse con certeza absoluta si una alternativa es mejor que otra, el criterio de elección del nivel de significación es permisivo a la aceptación de alternativas, por lo que se elige un valor bajo. El nivel α que se adopta es del 10%. De esta manera, se fija un error del 10% de considerar como peor (en cuanto al valor medio de Z - Manejo de Materiales Total) a una alternativa que en efecto es mejor.

4.3.3. Resultados de la aplicación del Temple Simulado

Definido el estado inicial (Tabla 4.3.2-1); el esquema de enfriamiento o variación de la temperatura, junto con los criterios para determinar el tiempo necesario para que se alcance el equilibrio a cada temperatura; y el nivel de significación de las comparaciones estadísticas entre estados (alternativas de *layout*) vecinos; se ejecuta el procedimiento de Temple Simulado como se expone en la sección 4.2.2. La Figura 4.3.3-1 muestra la tendencia de convergencia inicial, luego de que se efectúan 2500 evaluaciones del método:

Resultado para 2500 evaluaciones

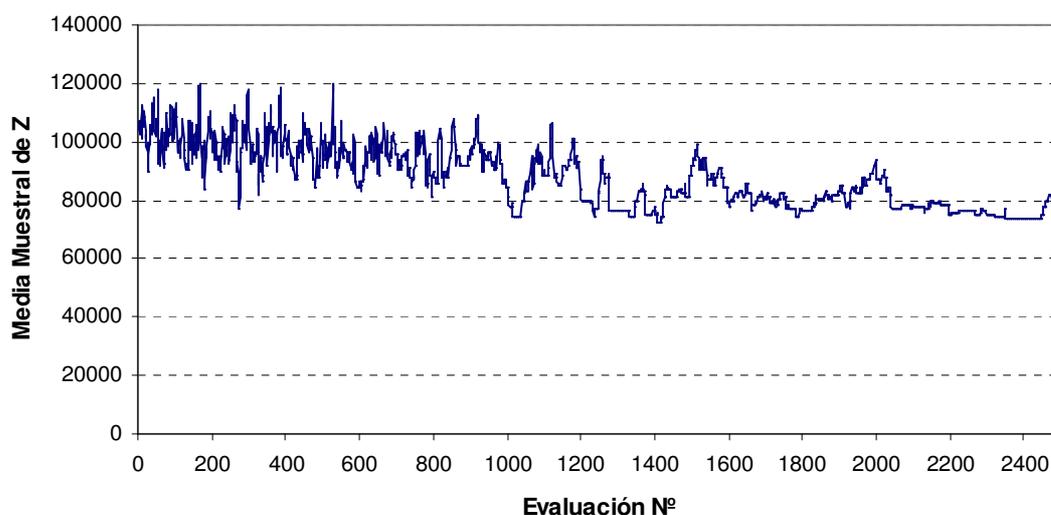


Figura 4.3.3-1: Resultado luego de 2500 evaluaciones (esquema de enfriamiento con $\gamma = 0,80$).



En las primeras 2500 evaluaciones, ya se encuentran alternativas considerablemente mejores a la configuración o layout inicial, llegando a alcanzar reducciones en el Manejo de Materiales Total, del orden del 30%. No obstante, la Figura 4.3.3.1 es de gran utilidad en la observación de la naturaleza del método. La gran variabilidad en la media de Z al comienzo, en las temperaturas altas, denota el comportamiento del tipo *Random Walk*. En esta primera instancia, se aceptan prácticamente todas las alternativas, sin que sea determinante la comparación estadística desde el punto de vista de la media Z , por este motivo, las primeras evaluaciones presentan una gran variabilidad en cuánto a las medias.

Resultado para 2500 evaluaciones

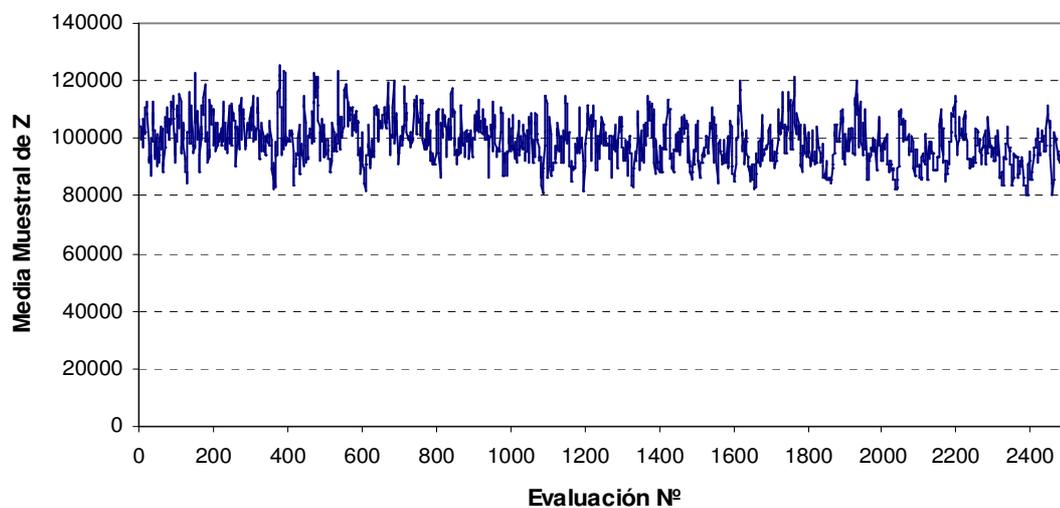


Figura 4.3.3-2: Resultado luego de 2500 evaluaciones (esquema de enfriamiento con $\gamma = 0,95$).

A medida que la temperatura baja, consigo baja la probabilidad de que se acepten aquellas alternativas de *layout* menos eficientes en cuanto a su Manejo de Materiales Total; por este motivo, la variabilidad se ve reducida, y la aceptación de alternativas mejores potencia la reducción en la media de Z . A modo de comparación, la Figura 4.3.3-2 muestra las primeras 2500 evaluaciones para el mismo problema, donde se emplea un esquema de enfriamiento más lento con un factor $\gamma = 0,95$, en este caso la convergencia no es tan marcada.

Una ventaja adicional del método de Temple Simulado es que permite continuar la búsqueda a partir de los últimos valores registrados, ya que la generación de estados/alternativas nuevas es un proceso aleatorio e independiente de evaluaciones anteriores (no así la aceptación de nuevos estados). La Figura 4.3.3-3 muestra la convergencia final del método, en casi 6000 evaluaciones.



Resultados (Medias Muestrales)

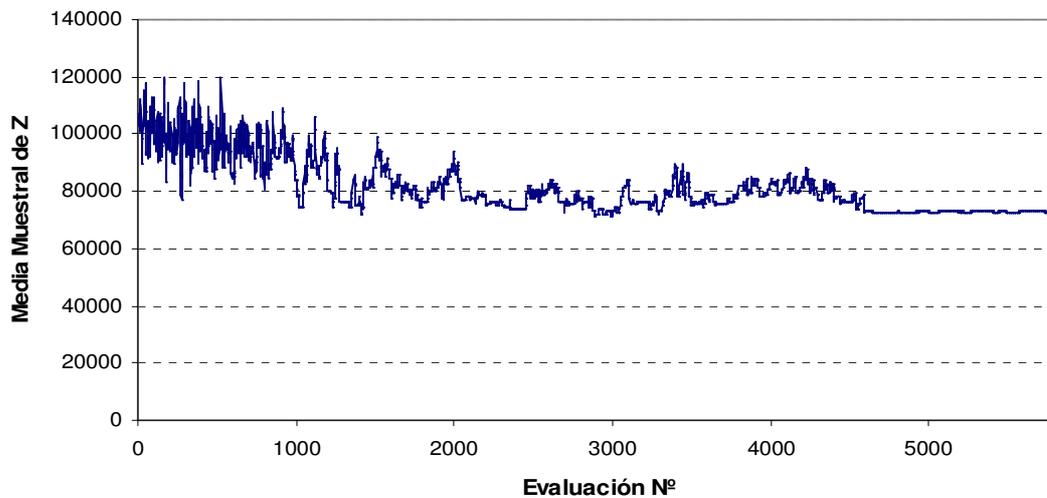


Figura 4.3.3-3: Resultado luego de 5821 evaluaciones (esquema de enfriamiento con $\gamma = 0,80$).

Se percibe de la Figura 4.3.3-3 que luego de las 2500 evaluaciones iniciales del método, no se obtienen ganancias substanciales en lo que hace a la variable de interés \bar{Z} . Luego del período inicial de cambios abruptos, el método parece estabilizarse en un grupo de estados o alternativas similares. Finalmente, junto con el último salto de temperatura, el método prácticamente no adopta estados peores, estabilizándose la búsqueda casi por completo. Este comportamiento proviene de la elección previa de un esquema de enfriamiento del tipo exponencial. La Figura 4.3.3-4 muestra el esquema de enfriamiento para el caso de aplicación.

Esquema de Enfriamiento

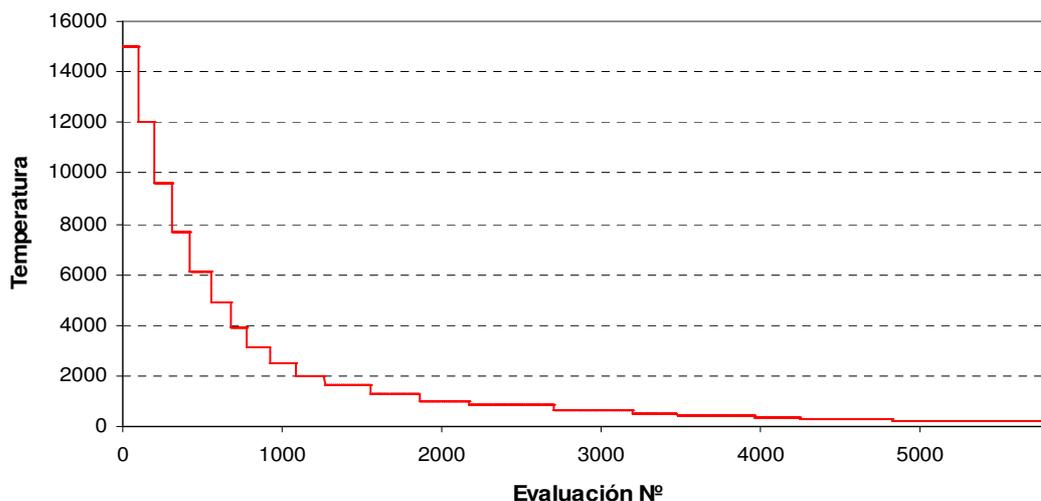


Figura 4.3.3-4: Esquema de enfriamiento con $\gamma = 0,80$ para el caso de la planta de 12 departamentos.



A medida que transcurren las evaluaciones, los saltos son cada vez menores, pero cada temperatura permanece durante más tiempo. En el proceso físico, el mantener la temperatura durante un tiempo mayor, tiene por objetivo permitir que los átomos tengan más tiempo para reacomodarse debido a la pérdida de movilidad de los mismos a bajas temperaturas. Paralelamente, en el problema de Distribución en Planta, a bajas temperaturas se está acotando el espacio de búsqueda dado que no se aceptan alternativas peores, por lo tanto, de encontrarse cercano a un óptimo, el procedimiento no encuentra nuevas configuraciones efectivas. En el caso de la planta de 12 departamentos, se considera necesario para que se produzca el salto de temperatura que se efectúen 60 cambios efectivos o 240 cambios de estado (aceptación de nuevas alternativas de *layout*).

4.3.4. Elección de una alternativa de *layout*

El método de Temple Simulado es una herramienta eficiente de búsqueda de soluciones. Sin embargo, considerando que el procedimiento está regido por un proceso de búsqueda estocástica, no necesariamente, la mejor alternativa es a la que converge el método.

A diferencia del proceso termodinámico de enfriamiento, en el Temple Simulado, el usuario del método tiene control sobre los estados. De esta manera, la elección de la alternativa puede llevarse a la historia de la evolución del sistema, analizando las alternativas en base a su *performance* en términos de flexibilidad (media de Z). Las 10 mejores alternativas de *layout* generadas por el método de Temple Simulado, ordenadas de manera ascendente respecto a la media muestral de Z , se muestran en la Tabla 4.3.4-1.

L_i	Ubicación												Manejo de Materiales	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	Media	Desvío
L_1	L	G	E	C	B	D	A	I	K	H	F	J	71087,54	5613,49
L_2	K	G	E	C	B	D	A	H	I	L	F	J	71296,72	4825,39
L_3	K	G	E	C	B	D	A	H	I	L	F	J	71394,25	4812,80
L_4	L	G	E	C	B	D	A	I	H	K	F	J	71601,74	4630,05
L_5	L	G	E	C	B	D	A	I	H	K	F	J	71666,77	4507,10
L_6	K	J	E	C	B	F	A	H	I	L	D	G	71737,85	5190,29
L_7	L	G	E	C	B	D	A	I	H	K	F	J	71814,25	6079,13
L_8	E	D	L	K	I	H	G	B	C	F	J	A	72027,31	5282,30
L_9	E	D	L	K	I	G	H	B	C	F	J	A	72127,31	4927,83
L_{10}	K	D	E	H	G	F	I	B	C	L	J	A	72233,38	6096,15

Tabla 4.3.4-1: Las 10 mejores alternativas de *layout* para el caso de la planta de 12 departamentos.



Resulta interesante resaltar la estructura de las primeras 5 alternativas. Entre estas alternativas hay muy pocas variaciones: los departamentos G, E, C, B, D, A permanecen inalterados. Del mismo modo, las variaciones en las medias son pequeñas. Es posible efectuar un ensayo de Comparaciones Múltiples de manera similar al capítulo 3, sin embargo, en este problema, el espacio de soluciones es considerablemente más vasto, lo que hace que las diferencias entre las mejores alternativas sean más leves que en el caso de la planta pequeña. El ahorro en Manejo de Material Total que permite la primera alternativa, respecto a la inicial (Tabla 4.3.2-1) es del orden del 33%, mientras que entre las 10 mejores alternativas la diferencia no supera el 1,5%.

Al igual que en el caso de análisis de una planta pequeña, al estudiar la distribución en planta en plantas de mayor tamaño, por lo general, el análisis no se centra en buscar la mejor alternativa, sino alguna alternativa razonablemente buena. Una forma de buscar estas alternativas, evitando la enumeración exhaustiva impráctica, es a través del empleo del método de Temple Simulado, cuyo fundamento heurístico no le da validez analítica en su aplicación ni a sus resultados; pero su aplicación suele dar resultados razonablemente buenos.

5. EL DISEÑO DEL PLANO DEL LAYOUT

5.1. Efecto de las áreas y formas de los departamentos sobre la distribución en planta

En los capítulos 3 y 4 se analizan dos metodologías de resolución del problema de distribución en planta que contemplan las relaciones entre departamentos desde el punto de vista productivo, excluyendo las restricciones geométricas y estructurales. Al momento de diseñar una planta de manufactura, este tipo de restricciones debe tenerse en cuenta, ya que la disposición física de los departamentos en la planta impacta directamente sobre las distancias entre los mismos, lo que a la vez impacta sobre la eficiencia de la distribución en planta desde el punto de vista productivo: el manejo de materiales.

Luego del análisis de la distribución en planta bajo un criterio de efectividad productiva, la segunda etapa contempla el diseño físico del *layout* en un plano básico de la planta. En esta instancia, entran en juego las características propias de cada departamento que provienen del diseño del trabajo de cada puesto o estación de trabajo. La información adicional requerida por el diseñador corresponde a las áreas, dimensiones y las posibles configuraciones internas de cada departamento.

Tanto las formas como las áreas de los departamentos afectan las distancias y adyacencias. En la Figura 5.1-1 se observa el efecto del cambio de forma y área de un departamento sobre la distancia entre dos departamentos, considerando la distancia entre centros como estimación de la distancia entre departamentos.

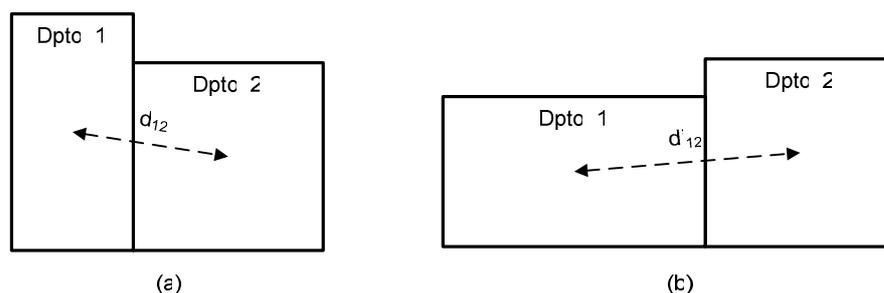


Figura 5.1-1: Efecto del cambio de forma y área del Dpto. 1 sobre la distancia inter-departamental, $d'_{12} > d_{12}$.

La disposición de las máquinas y el equipamiento de trabajo dentro de cada departamento, tiene efecto sobre la efectividad general de la distribución en planta. Así mismo, la forma en que se contemplan las distancias inter-departamentales da lugar a que el problema de encontrar una disposición óptima sea de alta dificultad. Es por ello que en esta segunda etapa de análisis,



el diseñador debe hacer uso de su criterio, haciendo las modificaciones y ajustes manuales a la distribución en planta, para arribar a un plano básico del *layout*.

5.2. Diseño del plano básico del *layout*

A modo de ejemplificar las implicancias detrás del diseño del plano de un *layout*, se retoma el caso de la planta de manufactura de conectores (capítulo 3). La conformación inicial de sectores en el área productiva está dada por la Figura 5.2-1, donde se indican las 7 ubicaciones candidatas para localizar los departamentos, así como sus respectivas áreas.

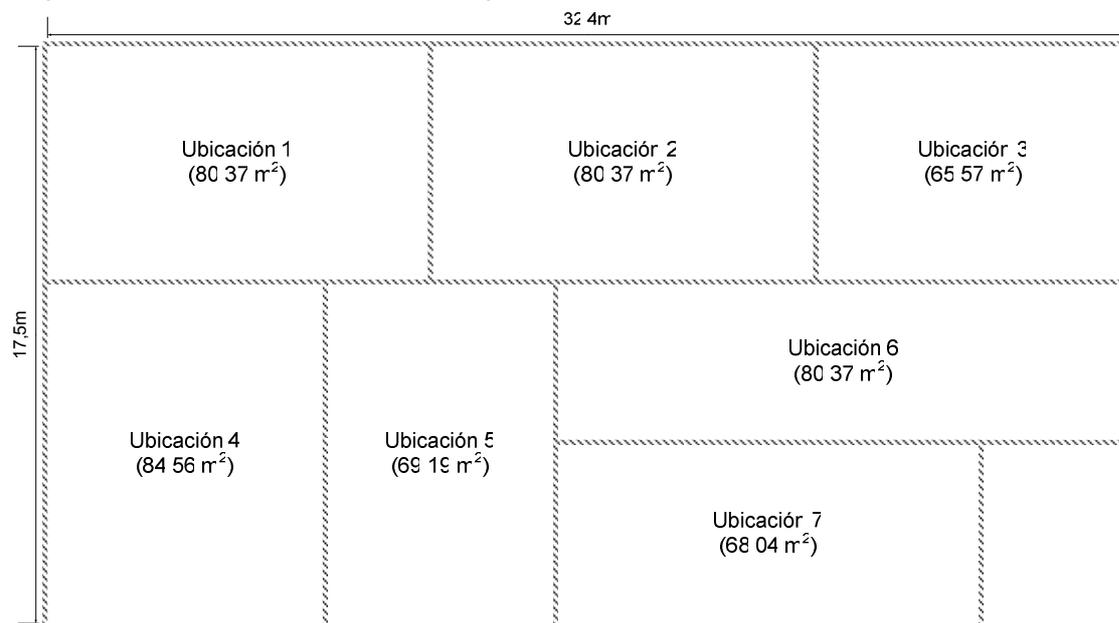


Figura 5.2-1: Plano básico de la planta sectorizada para el caso de la empresa productora de conectores.

La Matriz de Distancias (Tabla 3.1.1-1) presenta las distancias estimadas iniciales; previas al análisis de la distribución en planta. Estas distancias se computan entre centros de las ubicaciones, considerando para el cálculo la fórmula de Distancia Euclídea:

$$d(c_1; c_2) = \sqrt{(x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2} \quad (35)$$

Donde c_1 y c_2 son los centros de dos ubicaciones 1 y 2. Comúnmente, en el cómputo de las distancias inter-departamentales se emplea la fórmula de Distancia Rectilínea:

$$d(c_1; c_2) = |x_1 - x_2| + |y_1 - y_2| \quad (36)$$



La Distancia Rectilínea puede resultar en un mejor ajuste a la distancia real entre departamentos, dado que, generalmente, los recorridos se hacen en pasillos o caminos que circulan de manera periférica a los sectores productivos, paralelos a los cerramientos laterales de la planta.

Cualquiera sea la forma de estimación de las distancias inter-departamentales, los verdaderos recorridos entre departamentos suelen ser complicados, y están fuertemente sujetos al diseño del Sistema de Manejo de Materiales. El objetivo de un método diferenciado para el análisis de la eficiencia productiva de la distribución en planta es establecer adyacencias entre departamentos. La gran complejidad del problema parte de que las distancias están fuertemente relacionadas al *layout*, y esto hace que la intervención del diseñador juegue un papel crucial para poder arribar a la distribución en planta final.

En el capítulo 3, se determinan dos alternativas de *layout* (Tablas 5.2-2 y 5.2-3) que ofrecen las mejores *performances* en términos de flexibilidad de la distribución en planta en un gran número de escenarios de producción posibles. En esta instancia, el objetivo es llevarlas a un plano básico de la planta. Para la distribución en planta dada por la Tabla 5.2-2, el plano básico del *layout* queda determinado por la Figura 5.2-2. La segunda alternativa (Tabla 5.2-3) queda representada en el plano de la planta según la Figura 5.2-3.

Dpto.	D	E	G	B	C	A	F
Ubic.	1	2	3	4	5	6	7

Tabla 5.2-2: Distribución en planta L_1 .

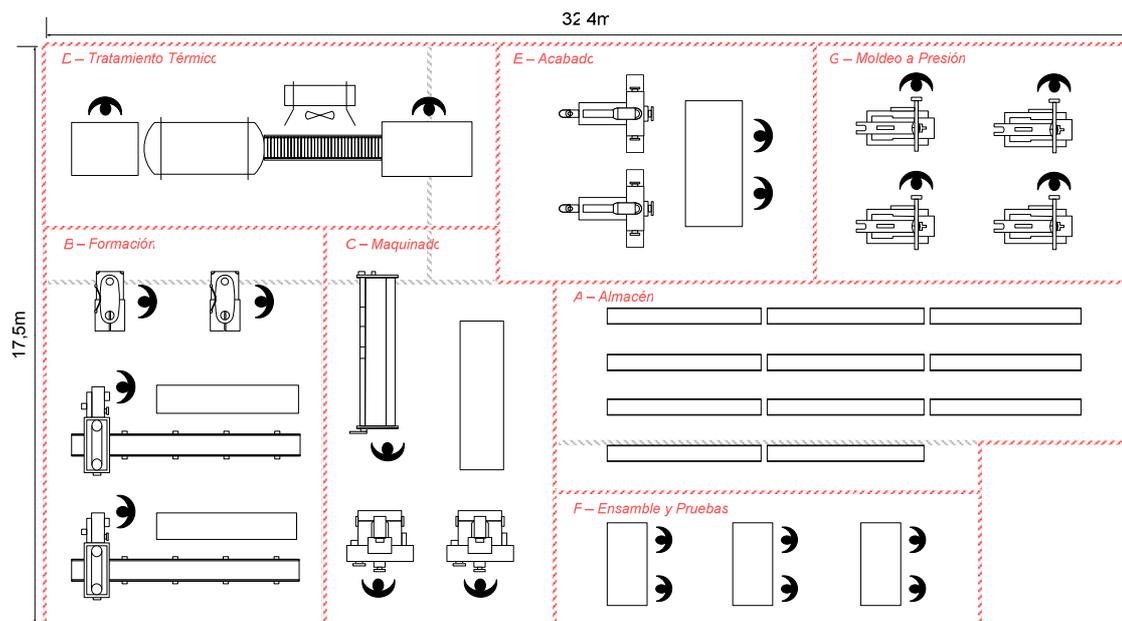


Figura 5.2-2: Plano básico del *layout* L_1 , dado por la Tabla 5.2-2.



Dpto.	B	E	G	D	C	A	F
Ubic.	1	2	3	4	5	6	7

Tabla 5.2-3: Distribución en planta L_2 .

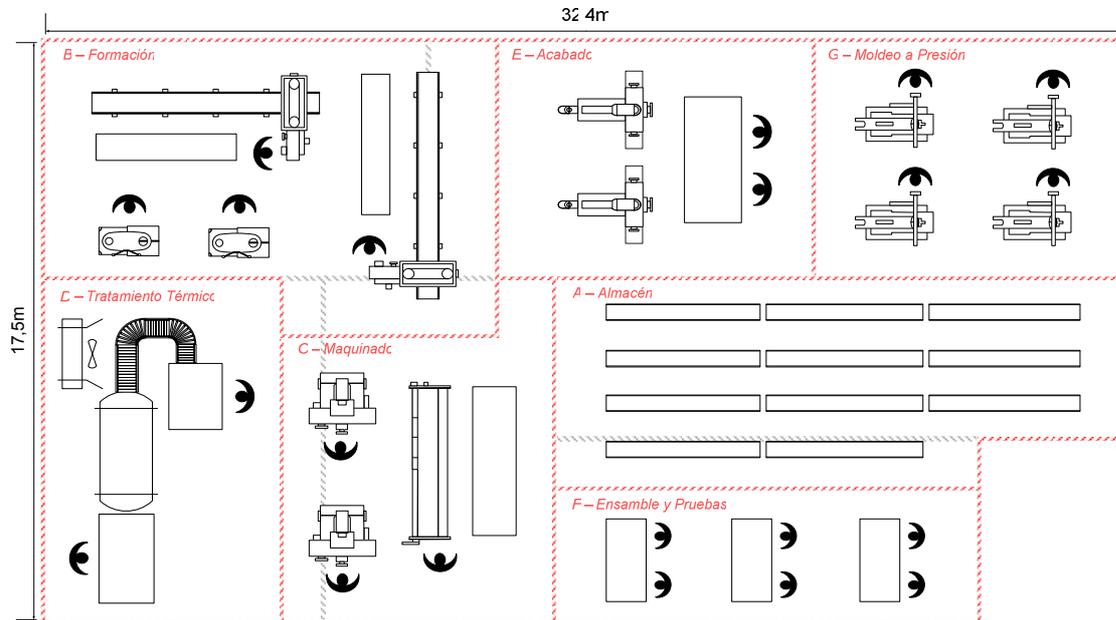


Figura 5.2-3: Plano básico del *layout* L_2 , dado por la Tabla 5.2-3.

En las distribuciones en planta de las Figuras 5.2-2 y 5.2-3 se perciben las discrepancias entre el tamaño de los departamentos y el de las ubicaciones asignadas previo al análisis. Las líneas de color rojo representan los límites de los departamentos, mientras que las líneas de color gris indican los límites de las ubicaciones en el plano de la planta sectorizada (Figura 5.2-1). Esta discrepancia entre las dimensiones de los departamentos y las ubicaciones da lugar a que las distancias inter-departamentales dependan de la configuración en planta.

A modo de comparación entre alternativas, las distribuciones L_1 y L_2 difieren en las ubicaciones y el diseño de los departamentos de Formación (B) y Tratamiento Térmico (D); los cuáles intercambian ubicaciones. Para poder acomodar ambas alternativas de *layout*, se debe modificar también el diseño del departamento de Maquinado (C), adyacente a B y D.

Los cambios en el diseño y forma de cada departamento se efectúan en base al conocimiento de la maquinaria y puestos de trabajo. En esta etapa de análisis, el diseñador debe conocer las posibles configuraciones de cada máquina dentro del departamento para arribar a un arreglo que respete la eficiencia del Manejo de Materiales de la distribución en planta. Como se percibe, tanto la alternativa L_1 como L_2 respetan en mayor grado las asignaciones de los departamentos a ubicaciones. Si el plano del *layout* no



respetar las asignaciones, puede ocurrir que la distribución en planta no sea la adecuada, forzando a efectuar nuevamente el análisis en búsqueda de las distribuciones más eficientes.

El diseño del plano de la distribución en planta es una tarea que requiere de la intervención del diseñador. Las herramientas para el análisis de la distribución en planta desde el punto de vista productivo, tienen limitaciones inherentes a la generalidad de su uso; son herramientas de soporte que no contemplan las características especiales de cada distribución en planta como las restricciones estructurales y geométricas que surgen del diseño intra-departamental. El uso de un método para análisis del *layout* tiene como propósito orientar al diseñador en la elección de una distribución en planta adecuada. Sin embargo, para llevar los resultados del primer análisis a un plano básico de la planta se requiere del conocimiento sobre los aspectos ajenos a lo productivo, así como del criterio al momento de arreglar los departamentos dentro de la planta.



6. PROCEDIMIENTO GENERAL PARA EL ANÁLISIS DE LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA

6.1. Esquema general del procedimiento

Este trabajo desarrolla la temática de distribución en planta desde el punto de vista de la flexibilidad. Bajo este enfoque, el problema se formula en un marco de incertidumbre en las principales variables involucradas; concretamente, en los volúmenes de producción y los patrones de flujo de material dentro de la planta.

En una primera etapa de análisis, se considera la información sobre el marco productivo de la planta (estimaciones sobre los volúmenes y los caminos de flujo de material), y las distancias estimadas entre ubicaciones candidatas a utilizar para conformar la distribución en planta. Como resultado de la primera etapa de análisis, se obtienen las distribuciones en planta más flexibles en relación al criterio de flexibilidad basada en el flujo. Estas distribuciones son las más eficientes desde un punto de vista productivo, dejando de lado las características geométricas y estructurales involucradas en el diseño.

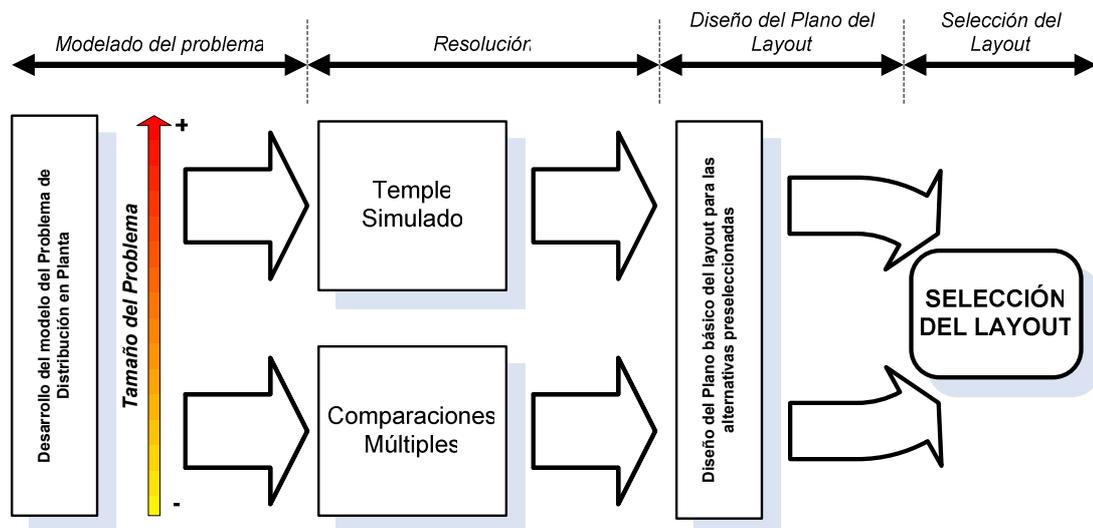


Figura 6.1-1: Procedimiento general para el análisis de la distribución en planta.

La segunda etapa de análisis contempla el diseño del plano de la distribución en planta, llevando el problema a un ámbito más realista, donde los resultados de la primera etapa de análisis se plasman en una disposición de los departamentos en un plano básico del *layout*. El criterio del diseñador y el conocimiento de la conformación de los departamentos y las limitaciones estructurales que pueda tener la planta juegan un papel crucial en esta etapa. La distribución en planta resultante debe mantener las características de efectividad en el aspecto operacional y de factibilidad en el aspecto geométrico



y estructural. La Figura 6.1-1 es una representación del procedimiento para el análisis de la distribución en planta.

Resulta interesante destacar que las técnicas empleadas (Comparaciones Múltiples y Temple Simulado) no se superponen en su aplicación. La efectividad del método de Comparaciones Múltiples queda acotada a problemas de un tamaño reducido, debido a que el creciente tamaño de la planta trae consigo un fuerte incremento en la cantidad de alternativas de *layout* posibles. Por otro lado, el método de Temple Simulado aplicado a problemas pequeños, al ser el mismo de naturaleza estocástica, puede resultar menos efectivo que la evaluación de las alternativas y la comparación de las mejores. Sobre esto, cabe resaltar que el Temple Simulado garantiza la convergencia, a largo plazo, esto es luego de evaluar una gran cantidad de alternativas posibles, pudiendo ser más efectivo en este caso la enumeración y comparación estadística de todas las alternativas posibles.

6.2. Aplicación del procedimiento a otros modelos del problema

El desarrollo de este trabajo se efectúa en base a un modelo específico del problema de distribución en planta. Sin embargo, las herramientas de análisis empleadas: el método estadístico de Comparaciones Múltiples y el método de Temple Simulado tienen la ventaja de ser independientes del problema.

El empleo de un método como el Test de Tukey para Comparaciones Múltiples demanda que la variable a optimizar se distribuya según una Normal, que el muestreo de cada alternativa se haga de manera independiente, y que las varianzas sean iguales; siendo, inclusive, robusto frente a variaciones de estos supuestos. El método no está sujeto a las características especiales del modelo bajo el cuál se formula el problema. Del mismo modo, una característica a destacar del Temple Simulado es su independencia de los parámetros propios del modelo. Su relación con la formulación del problema se presenta únicamente en la forma de generar soluciones del espacio de estados posibles.

La independencia de las herramientas aplicadas con el modelo específico del problema permite extender el uso de las mismas a otros modelos. Una característica común a estos modelos es la presencia de incertidumbres y variables estocásticas que hacen de la evaluación de la *performance* del *layout* una tarea científicamente incierta, por lo que deba recurrirse a métodos estadísticos. Consecuentemente, el análisis no necesariamente debe efectuarse sobre la base de un parámetro de flexibilidad, el enfoque permite la aplicación a otras mediadas de efectividad, como la económica.



Una formulación alternativa que contempla los costos operativos de Manejo de Materiales entre departamentos es la siguiente:

$$\min Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N c_{ij} f_{ij} d_{kl} x_{ik} x_{jl} \quad (37)$$

Donde los elementos c_{ij} son los costos de operación de los equipos de manejo de material entre los departamentos i y j . Los costos operativos podrían incluso considerarse como variables estocásticas. La inclusión de los mismos en el modelo trae consigo una suposición sobre el Sistema de Manejo de Materiales, ya que los costos dependen de los equipos que operan dentro de la planta. El modelo dado por (37) se puede generalizar incluyendo los costos fijos de ubicación de cada departamento:

$$\min Z = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{k=1}^N \sum_{l=1}^N c_{ij} f_{ij} d_{kl} x_{ik} x_{jl} + \sum_{i=1}^N \sum_{i=1}^N F_{ij} x_{ij} \quad (38)$$

Tanto el modelo que se expone en (37) como el modelo dado por (38) son muy similares al desarrollado en este trabajo, teniendo, inclusive, las mismas variables de decisión. La optimización en el caso de (37) y (38) se lleva a cabo sobre una variable económica. El término cuadrático es lo que se apunta en el capítulo 1 como el Costo de Manejo de Material, el cuál es la variable económica determinante de la efectividad de la Distribución en Planta y el Sistema de Manejo de Materiales.

Existen otros modelos y formulaciones del problema de distribución en planta, como los expuestos por Kusiak y Heragu [3].

El advenimiento de técnicas avanzadas de modelado de sistemas productivos por medio de modelos avanzados de simulación dinámica, o simulación de eventos discretos, trae apareado un nuevo enfoque en el análisis de la distribución en planta. La problemática de distribución en planta se suele enmarcar en estos modelos para llevarlos a un contexto que se asemeje lo más posible al verdadero ámbito de la planta. Un tópico de discusión frecuente refiere a la comparación entre la aplicación de modelos de optimización de *layout*, previo al análisis por medio de técnicas de simulación dinámica; o a efectuar el análisis de simulación como primer estudio.

En [18], Aleisa y Lin analizan ambos puntos de vista en el análisis de la distribución en planta. El argumento principal de quienes prefieren el empleo de técnicas de optimización de *layout* en primer lugar se basa en que las técnicas



de simulación dinámica son de un nivel operacional, mientras que la optimización del *layout* conlleva un análisis del tipo estratégico, más global, un ejemplo de este punto de vista puede encontrarse en [19]. Por otro lado, quienes abogan por el empleo de técnicas de simulación como primer análisis sugieren que la optimización del proceso productivo, en referencia a niveles de utilización de equipos, producción en proceso y *throughput*, conduce a un *layout* eficiente, y la optimización del *layout* debe efectuarse posterior a dicho análisis.

Algunas investigaciones sugieren que hay un alto grado de relación entre variables como los niveles de utilización y la producción en proceso propias de modelos de simulación dinámica, y los modelos de optimización de *layout*. En particular Fu y Kaku [20] analizan un modelo de simulación empleando redes de colas, y muestran que bajo ciertos supuestos, el problema de minimización de la producción en proceso (WIP – *Work in Progress*) se reduce al Problema de Asignación Cuadrática, el modelo clásico para la optimización de *layouts*. El modelo básico planteado conduce a que la producción en proceso puede formularse como una suma de producciones en proceso de transporte entre dos departamentos (L_{ij} , entre el departamento i y j):

$$WIP = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N L_{ij} = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_{ij} \tau_{ij} = \frac{1}{v} \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \lambda_{ij} d_{i'j'} \quad (39)$$

τ_{ij} es el tiempo promedio de transporte entre i y j , λ_{ij} es la tasa o flujo de material transportado entre i y j , v es la velocidad promedio del vehículo de transporte de material, y $d_{i'j'}$ es la distancia entre i y j (i' denota la ubicación a la cuál fue asignado el departamento i). El último término de (39) muestra que bajo el modelo de redes de colas, la minimización de la producción en proceso se reduce al Problema de Asignación Cuadrática.

Más allá de que se emplee un modelo analítico de optimización, o una técnica de simulación dinámica para modelar el problema de distribución en planta. El proceso de búsqueda de las distribuciones en planta puede enmarcarse bajo el procedimiento general descrito en la sección 6.1. Esto no implica que el procedimiento sea el mejor para el problema en cuestión. Sin embargo, este trabajo comprueba la efectividad del método para un modelo determinado del problema.



7. CONCLUSIONES

La problemática de distribución en planta es uno de los aspectos más importantes a las que se liga el futuro de una empresa manufacturera. La selección de la distribución en planta se encuentra en el marco de las decisiones de índole estratégico, cuyo peso es suficiente para sentenciar la existencia de la planta, o fomentar un ámbito de producción eficiente y concordante con los objetivos de la alta gerencia. Así mismo, la elección de una alternativa de distribución en planta es, frecuentemente, altamente costoso y difícil de revertir, una vez implementada. Por estos motivos, se han enfocado esfuerzos investigativos al análisis de la distribución en planta, y las implicancias detrás del mismo.

El problema de distribución en planta es una temática de fuerte interés por parte de las empresas manufactureras, en especial, en la actualidad, donde las demandas crecientes, así como los cortos ciclos de vida de productos enfrentan a las empresas con el problema de la incertidumbre sobre el contexto productivo. En este marco, se torna favorable el enfoque de análisis a través de modelos que contemplen el aspecto estocástico y la incertidumbre en las variables involucradas en la problemática de distribución en planta.

A modo de poder evaluar alternativas de *layout* bajo un marco de incertidumbre, se considera un criterio de evaluación denominado flexibilidad de la distribución en planta. La flexibilidad se basa en la capacidad de una distribución en planta de responder eficientemente a diversos escenarios productivos. De las diversas medidas de flexibilidad de una distribución en planta, se toma en cuenta la medida de flexibilidad basada en el flujo

Este trabajo desarrolla el empleo de dos herramientas para el análisis de la distribución en planta: un método de Comparaciones Múltiples (Test de Tukey) y el método heurístico de Temple Simulado. Para el método de Comparaciones Múltiples se comprueba su eficiencia y las implicancias detrás del mismo en la aplicación a problemas en los que las plantas a diseñar son pequeñas (8 departamentos o menos).

Con respecto al método de Temple Simulado, se analiza la aplicación al caso de una planta de 12 departamentos, con una descripción sobre el funcionamiento del método y los parámetros que definen la convergencia del mismo, acentuando la conveniencia de su uso en problemas donde el tamaño de la planta es grande.



El enfoque que se asigna al problema de distribución en planta es meramente productivo, excluyendo los aspectos relacionados al diseño de un plano de la distribución en planta. Estos aspectos están relacionados a las características estructurales de los departamentos que componen la planta. En un análisis posterior, se contempla el diseño de un plano básico de las alternativas de *layout*, que surgen del análisis previo. En esta instancia, entran en juego las características internas de cada departamento, como la conformación de los puestos de trabajo y la maquinaria empleada.

Los resultados quedan plasmados en una metodología para el enfoque del análisis de la distribución en planta en un marco de incertidumbre. En el procedimiento de análisis se separan las etapas en: a) una etapa de búsqueda de las mejores alternativas desde el punto de vista productivo; b) una etapa de diseño del plano del *layout*, donde juega un papel crucial el criterio del diseñador. Dadas las características de las herramientas empleadas en el análisis de la etapa a), se sugiere su aplicabilidad a otros modelos del problema de distribución en planta, como los modelos de simulación de eventos discretos.

Una futura línea de estudio contempla un análisis de la efectividad de las herramientas que se exponen en este trabajo frente a otros métodos de optimización, y con el empleo de otros modelos del problema de distribución en planta. En particular, dada la fuerte relación entre el diseño del Sistema de Manejo de Materiales y el problema de Distribución en Planta, cabe analizar modelos que contemplen tanto variables de decisión relacionadas a la distribución en planta, como al diseño del Sistema de Manejo de Materiales, con el objetivo de vincular ambas problemáticas en un único problema de optimización.



8. BIBLIOGRAFÍA

- [1]: Sule, D. R. 1994. Instalaciones de Manufactura. Ubicación, planeación y diseño. 726 páginas. Thomson Learning. ISBN 970-686-068-1.
- [2]: Muther, R. 1973. Systematic Layout Planning. Cahners Books.
- [3]: Kusiak, Andrew; Heragu, Sunderesh. The facility layout problem. European Journal of Operational Research. Año 1987. Número 29. Páginas 229-251.
- [4]: Liggett, Robin S. Automated facilities layout: past, present and future. Automation in Construction. Año 2000. Número 9. Páginas 197-215.
- [5]: Wang, Rong-Long; Okazaki, Kozo. Solving Facility Layout Problem Using an Improved Genetic Algorithm. IEICE Trans. Fundamentals. Año 2005. Número 2. Páginas 606-610.
- [6]: Lee, Kyu-Yeul; Roh Myung Il; Jeong, Hyuk-Su. An improved genetic algorithm for multi-floor facility layout problems having inner structure walls and passages. Computers & Operations Research. Año 2005. Número 32. Páginas 879-899.
- [7]: Gambardella, L.M., Taillard, E.D., Dorigo M.. Ant colonies for the quadratic assignment problem. J. Oper. Res. Soc. Año 1999. Número 50, Páginas 167–176.
- [8]: Azim, Gamil A. Neural Networks for solving Quadratic Assignment Problems. Neural Information Processing – Letters and Review. Año 2006. Vol. 10. Número 3, Páginas 51–57.
- [9]: R.E. Burkard; F. Rendl. A thermodynamically motivated simulation procedure for combinatorial optimization problems. European Journal of Operational Research. Año 1984. Número 17. Páginas 169–174.
- [10]: D.T. Connolly. An improved annealing scheme for the QAP. European Journal of Operational Research. Año 1990. Número 46. Páginas 93–100.
- [11]: Burkard, R. E., Celis, E., Klinz, B. On the Biquadratic Assignment Problems. DIMACS. Año 1994. Número 16. Páginas 117–146.
- [12]: Leondes, Cornelius. 2001. Computer-Aided Design, Engineering and Manufacturing. Systems, Techniques and Applications: The Design of Manufacturing Systems. 292 páginas. CRC Press LCL.
- [13]: Rafter, John A., Abell, Martha L., Braselton, James P. Multiple Comparison Methods for Means. SIAM Review. Año 2002. Vol. 44. Número 02. Páginas 258-278.



- [14]: García, Roberto M. 2004. Inferencia Estadística y Diseño de Experimentos. 734 páginas. Editorial Eudeba. ISBN 950-23-1295-3.
- [15]: Kirkpatrick, S., Gellat, C. D., Vecchi, M. P. Optimization by Simulated Annealing. Science. Año 1983. Vol. 220. Número 4598. Páginas 671-680.
- [16]: Ross, Sheldon M. 2004. Simulación. 283 páginas. Editorial Prentice Hall. ISBN 970-17-0259-X.
- [17]: Ingber, L. Simulated Annealing: Practice vs. Theory. Journal of Mathematical Computer Modelling. Vol. 18. Número 11. Páginas 29-57.
- [18]: Aleisa, Esra E., Lin, Li. For effective facilities planning: layout optimization then simulation, or viceversa?. Proceedings of the 2005 Winter Simulation Conference. Páginas 1381-1385. Orlando (FL). E.E.U.U.
- [19]: Sly, David P. Before dynamic simulation: Systematic Layout Design from scratch. Proceedings of the 1997 Winter Simulation Conference. Páginas 645-648. Atlanta (GA). E.E.U.U.
- [20]: Fu, M. C., Ku, B.K. Minimizing Work-in-Progress and Material Handling in the Facilities Layout Problem.
<http://www.informs.org/informsarchive/papers.html>. Página vigente a Agosto 2006.