

UNIVERSIDAD DE SONORA

DIVISIÓN DE INGENIERÍA



POSGRADO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

DISEÑO DE LA DISTRIBUCIÓN EN PLANTA DE LA EMPRESA MASTER LOCK UTILIZANDO EL ALGORITMO DE OPTIMIZACIÓN DE COLONIA DE HORMIGAS

T E S I S

PRESENTADA POR

JOSÉ ALBERTO GONZÁLEZ ANAYA

Desarrollada para cumplir con uno de los
requerimientos parciales para obtener
el grado de Maestro en Ingeniería

DIRECTOR DE TESIS: DR. OSCAR RUBÉN GÓMEZ ALDAMA
CODIRECTOR DE TESIS: DR. LUIS FELIPE ROMERO DESSENS

HERMOSILLO, SONORA, MEXICO.

DICIEMBRE 2012

Universidad de Sonora

Repositorio Institucional UNISON



“El saber de mis hijos
hará mi grandeza”



Excepto si se señala otra cosa, la licencia del ítem se describe como openAccess

RESUMEN

La existencia de continuos cambios en la demanda de producción en el departamento 541 de la empresa Master Lock, genera el problema de determinar la distribución en planta que minimice el costo total del flujo de materiales con respecto a los materialistas que realizan dicha labor.

En el presente trabajo se aplicó el algoritmo de optimización de colonia de hormigas en el departamento 541 de la empresa Master Lock para proponer una nueva distribución en planta que satisfaga la demanda de producción eficientemente.

En el primer capítulo se explica la situación actual de la empresa Master Lock, se plantea el problema y el objetivo, además de los alcances y delimitaciones, justificación e hipótesis. En el segundo capítulo se dan a conocer las definiciones y características de distribución en planta, el algoritmo de optimización de colonia de hormigas y de simulación, así como de dieciséis paquete computacional tanto del algoritmo de optimización de colonias de hormigas como de simulación. En el tercer capítulo se describe detalladamente la implementación del algoritmo de optimización de colonia de hormigas. En el cuarto capítulo se utiliza el algoritmo de optimización de colonia de hormigas para generar propuestas de distribución en planta del departamento 541 y, posteriormente se selecciona la mejor propuesta y se simula en ProModel 4.22 al igual que la distribución en planta actual, analizando los resultados obtenidos. En el quinto capítulo se concluye que el objetivo y la hipótesis de este trabajo se cumplen ya que los costos de transporte con respecto a los materialistas obtenidos con la distribución en planta propuesta por el algoritmo de optimización de colonia de hormigas son menores que los costos de transporte actuales, además se hacen algunas recomendaciones y observaciones.

ABSTRACT

The existence of continuous changes in production demand in the department 541 of the Master Lock company generates the problem of determining the distribution plan that minimizes the total cost of material flow with respect to the materialists who perform such work.

In this paper we apply the algorithm of ant colony optimization in department 541 of the Master Lock company to propose a new distribution plan that satisfies the demand for efficient production.

In the first chapter explains the current situation of Master Lock Company, is the problem and the goal, and the scope and boundaries, justification and assumptions. In the second chapter discloses the definition and characteristics of plant layout, the algorithm of ant colony optimization and simulation, and software sixteen both optimization algorithm and ant colony simulation. In the third chapter describes in detail the implementation of the algorithm of ant colony optimization. In the fourth chapter uses the algorithm of ant colony optimization to generate plant layout proposals department 541 and then select the best proposal and is simulated in ProModel 4.22 like the current plant layout, analyzing the results. In the fifth chapter concludes that the purpose and hypothesis of this paper are true because the costs of transport for materialists distribution obtained with the plant proposed by the optimization algorithm of ant colony are less than the costs of current transport also makes some recommendations and observations.

DEDICATORIA

A mi madre Edna Gloria Anaya Anduaga que tanto amor, cuidado, entrega y protección nos ha brindado siempre, sembrando en cada uno de sus tres hijos el amor y gratitud a la vida por la dicha de tenerla como madre.

A mi hermano Jorge Antonio González Anaya que hemos compartido infinidad de momentos alegres e inolvidables, creciendo y evolucionando juntos. Siempre teniendo la capacidad de soportar con serenidad y madurez mis actitudes y comportamientos infantiles.

A mi hermana Laura Quetzali Gómez Anaya que desde que nació ha sido la mayor bendición de la familia, siempre alegre y con un brillo único, llena de virtudes y habilidades muy especiales que le aportan en exceso todo lo necesario para realizar todo lo que se proponga.

AGRADECIMIENTOS

A mi familia y amigos que siempre me animaron a seguir adelante para concluir este trabajo.

Principalmente a mi director de tesis el Dr. Oscar Rubén Gómez que gracias a su confianza, tiempo, dedicación y tolerancia este logro fue posible.

A mi codirector de tesis el Dr. Luis Felipe Romero por apoyarme desde el principio con su tiempo y dedicación hasta la culminación de este trabajo.

Al comité revisor por su tiempo dedicado en la revisión y observaciones sugeridas para mejorar este trabajo.

A todos los maestros del posgrado en Ingeniería Industrial que de una u otra manera contribuyeron en mi nueva formación aportando sus valiosos conocimientos y experiencias.

A la empresa Master Lock, especialmente a los ingenieros Guillermo Alvarez y Ricardo Valenzuela por su disponibilidad y apoyo para brindar la información necesaria para la realización de este trabajo.

Al consejo de Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por proveer los recursos económicos necesarios para la realización de mis estudios de Posgrado en la Universidad de Sonora.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	i
ABSTRACT	ii
DEDICATORIA.....	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE GENERAL	v
LISTA DE TABLAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE ECUACIONES.....	xi
1. INTRODUCCIÓN.....	1
1.1. Antecedentes	1
1.1.1. Antecedentes Teóricos	1
1.1.2. Entorno del Problema	4
1.2. Planteamiento del Problema	5
1.3. Objetivo.....	6
1.4. Alcances y Delimitaciones.....	6
1.5. Justificación.....	6
1.6. Hipótesis	7
2. MARCO DE REFERENCIA	8
2.1. Distribución en Planta	8
2.1.1. Objetivo de la Distribución en Planta	10
2.1.2. Principios de Distribución en Planta.....	12
2.1.3. Tipos de Distribución en Planta	13
2.1.4. Factores que Influyen en la Distribución en Planta.....	16
2.1.5. Diseño de una Distribución en Planta	18
2.1.6. Función Objetivo.....	22
2.1.7. Distancias	23
2.1.8. Como Resolver el Problema de Optimización	24
2.1.9. Métodos para la Generación de la Distribución en Planta	25

2.1.10. Distribución en Planta y Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas.....	28
2.1.11. Distribución de Planta Apoyada por Computadora	29
2.2. Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas	29
2.2.1. Proceso de Optimización Mediante el Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas.....	35
2.2.2. Diferentes Modelos del Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas.....	37
2.3. Paquete computacional para Simular el Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas	38
2.3.1. Simulación	39
2.3.2. Procedimiento de Simulación.....	40
2.3.3. Paquetes Computacionales de Simulación.....	41
2.3.4. Paquetes Computacionales Utilizados en el Algoritmo de Colonia de Hormigas.....	42
3. METODOLOGÍA.....	43
3.1. Descripción de la Metodología del Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas	43
3.2. Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormiga.....	44
3.2.1. Función Objetivo.....	45
3.2.2. Representación de las Soluciones del Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas.....	46
3.2.3. Información Heurística y Rastros de Feromona.....	46
3.2.4. Construcción de una Solución por una Hormiga.....	47
3.3. Algoritmo Sistema de Hormiga Mín-Máx.....	49
3.4. Uso del Paquete Computacional Excel 2007	49
3.5. Uso de ProModel 4.22.....	49
4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA.....	51
4.1. Algoritmo Sistema de Hormiga Mín-Máx.....	51
4.1.1. Restricciones de Ubicación de las Secciones.....	56

4.2. Aplicación del Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas	56
4.3. Simulación en ProModel 4.22	64
4.3.1. Distribución en Planta Actual	64
5. RESULTADOS	69
5.1. Resultados obtenidos con el algoritmo de optimización de colonia de hormigas	69
5.2. Resultados Obtenidos con la Simulación en ProModel 4.22.....	74
6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES	76
6.1. Conclusiones.....	76
6.2. Recomendaciones.....	77
6.3. Observaciones	78

LISTA DE TABLAS

Tabla	Descripción	Página
2.1.	Factores que influyen en la distribución en planta.....	17
2.2.	Clasificación de la función objetivo según su naturaleza	23
2.3.	Clasificación de la distancia	24
2.4.	Características entre la hormiga artificial y la real	32
2.5.	Aplicaciones del algoritmo OCH.....	35
4.1.	Matriz de distancias (en metros)	52
4.2.	Matriz de flujo de materiales.....	52
4.3.	Matriz de información heurística.....	53
4.4.	Segunda operación en el Algoritmo Mín-Máx.....	53
4.5.	Solución con el algoritmo de sistema de hormiga Mín-Máx	54
4.6.	Costo total de la distribución en planta actual	55
4.7.	Costo total de la distribución en planta actual y de la propuesta.....	55
4.8.	Cálculos en la primera corrida con OCH.	59
4.9.	Selección de los costos de asignación de la primera solución.....	60
4.10.	Costos totales y aportes de las primeras seis soluciones de la primera corrida.....	61
4.11.	Matriz de feromona actualizada para la segunda corrida de la primera combinación.....	62

LISTA DE FIGURAS

Figura	Descripción	Página
2.1.	Planeación sistemática de la distribución en planta	19
2.2.	Comportamiento de las hormigas.....	30
2.3.	Metodología metaheurística OCH	35
3.1.	Modelo propuesto para la determinación de la distribución en planta.....	44
4.1.	Primeras 2 iteraciones de la segunda corrida de la primera combinación	63
4.2.	Área de producción, materia prima y producto terminado de Master Lock	65
4.3.	Departamento 541 y celdas de manufactura vecinas.....	66
4.4.	Ruta del carrito de Master Lock.....	66
4.5.	Imagen de simulación de la distribución en planta actual	67
4.6.	Imagen instantánea de simulación de la distribución en planta propuesta.....	68
5.1.	Soluciones factibles de las tres combinaciones.	69
5.2.	Las mejores 5 soluciones de cada combinación	70
5.3.	Soluciones de las tres combinaciones	71
5.4.	Gráficas del número de soluciones en las 40 corridas de cada combinación.....	73
5.5.	Imagen de los resultados arrojados de la distribución en planta actual por ProModel 4.22	74
5.6.	Imagen de los resultados arrojados de la distribución en planta propuesta por ProModel 4.22	74
8.1.	Imagen de la segunda corrida de la primera combinación	79
8.2.	Imagen de la tercera corrida de la primera combinación.....	79
8.3.	Imagen de la segunda corrida de la segunda combinación	79
8.4.	Imagen de la tercera corrida de la segunda combinación	79
8.5.	Imagen de la segunda corrida de la tercera combinación	79
8.6.	Imagen de la tercera corrida de la tercera combinación.....	79
8.7.	Todas las soluciones de la primera combinación	79
8.8.	Todas las soluciones de la segunda combinación	79

Figura	Descripción (continuación)	Página
8.9.	Todas las soluciones de la tercera combinación.....	79
8.10.	Locaciones de la distribución en planta actual	79
8.11.	Entidades de la distribución en planta actual	79
8.12.	Rutas de la distribución en planta actual	79
8.13.	Recursos de la distribución en planta actual	79
8.14.	Arribos de la distribución en planta actual	79
8.15.	Proceso de la distribución en planta actual	79

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación	Descripción	Página
3.1.	Costo total del flujo de materiales	45
3.2.	Costo total del flujo de materiales para el departamento 541	46
3.3.	Matriz con información	47
3.4.	Probabilidad de transición	47
3.5.	Actualización de la feromona	48
4.1.	Total de soluciones	57
4.2.	Probabilidad de transición en la primera corrida	57
4.3.	Costo total a partir de la matriz de información heurística	60
4.4.	Aporte de cada solución	61
4.5.	Actualización de feromona	61
4.6.	Total de soluciones factibles	63

1. INTRODUCCIÓN

La cantidad de retos que las empresas enfrentan día a día para sobresalir y triunfar ante una economía globalizada, son cada vez más difíciles, aunado a que las organizaciones siempre tienen la necesidad y finalidad de encontrar mejores soluciones a sus problemas. Por lo anterior, es de suma importancia la aplicación de técnicas eficientes y flexibles para implementar una solución factible.

1.1. Antecedentes

La problemática para diseñar una distribución en planta eficiente es cada vez más compleja y ésta conlleva a una búsqueda continua de técnicas orientadas a tratar con problemas sumamente difíciles para aproximarse a la solución óptima.

1.1.1. Antecedentes Teóricos

Hoy en día las ventajas competitivas son obtenidas y superadas cada vez con mayor prontitud, debido a factores como el acelerado cambio tecnológico, el crecimiento súbito de empresas, el desarrollo de nuevos sistemas de información y comunicación, sin omitir el proceso de globalización. Surge una gran cantidad de nuevos retos, los cuales se encuentran en varias y diversas áreas, tales como; la economía, las ciencias, la tecnología, la ingeniería, la informática, la medicina, entre otros, (Cobo y Serrano, 2005). A consecuencia de la naturaleza y dificultad inherente de dichos problemas, en muchos de éstos no se han ideado soluciones eficientes, por lo que algunos de ellos se clasifican como NP-duros, llamados así porque son problemas que no pueden ser resueltos en un tiempo polinomial lo que conlleva a que día a día sea más difícil sobresalir en el ámbito empresarial (Garey y Jonson, 1979).

Uno de los retos derivados de las características del mercado contemporáneo es la distribución en planta, en donde una mala distribución de ésta genera movimientos innecesarios que afectan directamente la eficiencia del sistema de producción y al flujo de los materiales durante el proceso productivo. Tompkins (1982) explica que: “El problema de distribución en planta pretende conseguir el objetivo de ubicar distintos recursos o departamentos dentro de una superficie, a fin de facilitar la mayor eficiencia en la producción de un bien o servicio”.

Por consiguiente, las empresas se deben de diseñar de una manera tal que se optimice el flujo de materiales desde la materia prima hasta el producto terminado, haciendo un uso más efectivo de los recursos disponibles. De igual manera, el tipo de distribución en planta dependerá de las necesidades y capacidades de la empresa, ya que en muchas ocasiones no será posible adaptar una distribución por producto debido a los gastos económicos que implique efectuarla, o bien, si el balance de costo/beneficio es desfavorable.

Años atrás, prevalecía la producción por producto, en la cual se tienen métodos productivos de flujo en línea, un uso extensivo de la automatización y máquinas de propósito especial logrando una elevada productividad. Pero últimamente, las empresas de fabricación están dirigiendo sus pasos hacia la adopción de una producción multi-producto y tamaño pequeño de lote para adaptarse a un movimiento del mercado caracterizado por una sociedad diversificada y especializada, así como a unos más cortos ciclos de vida de los productos (De la Fuente, Pino y Parreño, 1995).

En una empresa cuya variedad de productos y de máquinas necesarias en el sistema productivo para cumplir con la demanda es considerable, su distribución en planta ideal (sin tomar en cuenta la producción por productos debido al desfavorable balance de costo/beneficio) es sumamente complicada, ya que ésta es de clase NP-duro, porque no tiene un algoritmo conocido que lo resuelva en un tiempo polinomial, por lo que para encontrar su solución se requiere del soporte de la ciencia

computacional (Alonso, Cordón, Fernández de Vianay Herrera, 2004). Dada la complejidad y la limitación en cuanto al tiempo de ejecución de los mismos, los resultados obtenidos por los métodos de optimización y heurísticos se mejoran con las metaheurísticas (Dorzán, Gagliardi, Leguizamón y Taranilla, 2009).

En Riojas (2005) un método heurístico es un procedimiento para resolver un problema de optimización bien definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución.

Según Osman y Laporte (1996), una metaheurística es un proceso iterativo de generación que guía a una heurística subordinada combinando de forma inteligente diferentes conceptos para la exploración del espacio de búsqueda y usando estrategias de aprendizaje para estructurar la información con objeto de encontrar eficientemente soluciones cercanas al óptimo.

Un enfoque relativamente nuevo para resolver problemas de diversa índole es el uso de los bio-algoritmos, los cuales están inspirados en el comportamiento social de seres vivos. En particular, las hormigas han inspirado una serie de métodos y técnicas metaheurísticas entre los cuales el más estudiado y el más exitoso es la técnica conocida como optimización de colonia de hormigas (OCH) o (ACO, Ant Colony Optimization). La OCH (como se nombrará de aquí en adelante) es una metaheurística inspirada en el comportamiento que siguen las hormigas para encontrar los caminos más cortos entre las fuentes de comida y el hormiguero, surgida a partir del trabajo inicial de Dorigo, Maniezzo y Colorni sobre Sistema de Hormigas (*Ant System, 1992*), siendo aplicada con éxito a un amplia variedad de problemas de optimización combinatoria (Cobo y Serrano, 2005); el primero de ellos conocido como el problema del viajante de Dorigo en 1992, obtuvo resultados muy favorables.

1.1.2. Entorno del Problema

La empresa Master Lock inició como un centro de distribución en el año 1998, pero en el año 2009 se transformó en una industria manufacturera y de distribución, y ésta se ubica en Av. Fortune Brands S/N, Parque Industrial Nuevo Nogales, en Nogales, Sonora, México. La información que proporcionó la empresa es limitada debido a las políticas de la misma.

Actualmente trabaja con dos turnos (de 8 horas cada uno) y cuenta con alrededor de 700 empleados, dedicándose a la fabricación y distribución de una gran variedad de productos para todas las necesidades de seguridad, entre los cuales se encuentran: antirrobo de todas las clases, cadenas, cables, candados, llaves blancas, mini cajas fuertes, mosquetones, entre otros.

Debido a la creciente demanda de nuevos productos, la empresa se ve en la necesidad de realizar continuos cambios en su distribución en planta y, en la cantidad y diseño de las estaciones de trabajo, además de que los cambios no deben de afectar el cumplimiento con la demanda de los productos ya establecidos.

Para que la empresa alcance los objetivos de fabricación es necesario mantener una buena distribución en planta, la cual precisa agilizar el flujo de materiales, tener bien ubicadas las estaciones de trabajo y que las distancias recorridas entre cada celda, del almacén hacia el piso, y de éste hacia el envío sean las más mínimas posibles, por lo que para alcanzar todo ello es necesario que cuente con una metodología o herramienta que sea flexible y robusta que le ayude a obtener la distribución en planta adecuada.

Muchos de los productos de la empresa tienen procesos similares o incluso iguales, por lo que tienen que pasar por las mismas estaciones de trabajo o llevar las mismas operaciones, es decir, agrupados por familia de productos, lo que también tiene que ser considerado al momento de diseñar la distribución en planta, haciendo que el diseñar una distribución eficiente se vuelva cada vez más difícil.

La empresa cuenta con 120 celdas de manufactura con diferentes niveles de producción y diferentes problemas de distribución y ubicación. Este trabajo se enfocará en analizar únicamente el departamento 541 el cual consta de 6 celdas de manufactura. En dicho departamento se producen diferentes tipos de candados y además se tiene un índice superior de elaboración de productos nuevos, por lo que la distribución en planta tiene cambios continuos y, si estos cambios no son eficientes se perjudica el área de producción y como consecuencia aumentan los costos para la empresa.

1.2. Planteamiento del Problema

La empresa Master Lock tiene en el área de producción varias celdas de manufactura, en donde cada una de ellas cuenta con tres o más estaciones de trabajo y maquinaria especializada para fabricar diferentes tipos de productos. Todas las celdas de manufactura se encuentran agrupadas en un área rectangular, en donde, por un lado se ubica el almacén de materia prima y por el otro el almacén de producto terminado, por lo que el flujo de materiales va de un lado a otro.

Por la constante fabricación de nuevos productos, cambios continuos en la maquinaria, equipo y métodos de producción cada vez es más difícil para la empresa mantener un eficiente flujo de materiales y distancias recorridas por los materialistas, por lo que es importante para ésta, contar con una nueva distribución en planta que ayude a eficientar el flujo de materiales y mejore el sistema productivo.

A causa de la cantidad de actividades (para implementar el algoritmo de optimización de colonia de hormigas), al tiempo requerido para realizarlas y a la política de la empresa, el estudio sólo se enfocará a las celdas de manufactura del departamento 541 de la empresa Master Lock.

1.3. Objetivo

Diseñar la distribución en planta del departamento 541 de la empresa Master Lock utilizando el algoritmo de optimización de colonia de hormigas para eficientar el flujo de materiales y distancias recorridas por los materialistas.

1.4. Alcances y Delimitaciones

Debido al interés de la empresa Master Lock sólo se aplicará el algoritmo de optimización de colonia de hormigas al departamento 541 para mejorar el flujo de materiales. Lo anterior permitirá que la fábrica cuente con una herramienta fundamental para obtener un diseño de distribución de línea más eficiente, mediante el cual logrará minimizar los problemas atribuidos a la distribución en planta. Algunos de los beneficios potenciales que se podrían obtener en la empresa son: menores ciclos de tiempo de producción, menores inventarios en proceso, menores tiempos en manejo de materiales, disminución de cuellos de botella y de costos por manejo de materiales, además de un sistema de producción mejor organizado y más espacio para el tránsito del personal.

1.5. Justificación

Para poder establecer la eficiencia de la distribución en planta actual es necesario compararla con una distribución por producto y como no es viable hacer cambios reales a las células de producción, se requiere de simularlas. Por otro lado, para poder determinar si la adaptación del algoritmo OCH para diseñar la distribución en planta es mejor que la distribución en planta actual, es imprescindible compararlas mediante una simulación. Además, para la reducción de los costos de producción, es necesario diseñar la ordenación (distribución en planta) que permita el flujo de materiales y el desarrollo eficiente del proceso. Esto se traduce en el hecho de

diseñar un recorrido eficiente para las materias primas o productos semi-acabados, y así generar un gasto mínimo asociado a su desplazamiento (Muther, 1981).

1.6. Hipótesis

Con la aplicación del algoritmo de optimización de colonia de hormigas en el diseño de la distribución en planta del departamento 541 de la empresa Master Lock se eficientará el flujo de materiales y distancias recorridas por los materialistas.

2. MARCO DE REFERENCIA

Para que una empresa contemporánea sobresalga ante una economía globalizada es necesario que cuente con una ventaja tecnológica, económica o informática que le ayude a generar mejores diseños de sistemas de producción y lograr obtener una gran variedad de productos de buena calidad a un costo mínimo. Para alcanzar lo anterior, se debe mantener un flujo de materiales lo más eficientemente posible, con recorridos más cortos y espacios mínimos. Con los cambios en la demanda de productos a través de los años, con la aparición de nuevas tecnologías y requerimientos ambientales y de seguridad industrial, han surgido diversas técnicas o metodologías para acercarse o incluso lograr un diseño óptimo del flujo de materiales, que en varias ocasiones son ayudados por el uso de computadoras ya que la solución del problema de configuración se torna demasiado complejo.

2.1. Distribución en Planta

Cuando se habla de distribución en planta, se refiere a una disposición física existente o a una distribución proyectada, es decir, orientada al área de estudio o al trabajo de realizar una distribución en planta. Sin tomar en cuenta la orientación al utilizar el término distribución en planta, algunas definiciones son:

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

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

Bajo la perspectiva de Ramírez (2006), la distribución en planta es el proceso de ordenación física de los elementos industriales de modo que constituyan un sistema productivo capaz de alcanzar los objetivos fijados de la forma más adecuada y eficiente posible.

Contreras (2010), plantea que la distribución en planta se basa en la integración u ordenación de los espacios físicos que posee la empresa, buscando la optimización de los recursos con que dispone, tanto humano como material, maquinaria y equipo, en función de ciertos criterios u objetivos planteados por la empresa. Para un desarrollo eficiente será necesario también tener presente todos los requerimientos (necesidades de espacio, seguridad, movilidad, entre otros), así como las posibles discrepancias que se puedan originar a partir de ellos, incluyendo los espacios necesarios para el movimiento del material, almacenamiento, trabajadores y todas las actividades o servicios.

La distribución en planta es aplicable a todos aquellos eventos en donde es necesaria la disposición de unos medios físicos en un espacio determinado, esté prefijado o no, sea de procesos industriales o de servicios, por lo que la distribución en planta en muchas ocasiones representa un problema complejo, ya que es preciso conocer las características principales y determinadas del proceso, de los equipos y de los materiales, además de la aplicación de las metodologías de distribución y optimización (Contreras, 2010).

Algunos de los beneficios de una buena distribución en planta acorde a la forma de trabajo de la empresa, permite que los empleados y equipos trabajen con mayor comodidad, evitando el manejo y transporte innecesario del material, se reducen riesgos de enfermedades profesionales y de accidentes en el trabajo, se mejora la moral y la satisfacción del trabajador, se reducen los retrasos, se reduce el manejo de materiales, se utiliza mejor la maquinaria, se ahorra en espacio, se reducen los riesgos de deterioro de material, se facilita el ajuste al variar las condiciones, se obtienen mejores condiciones sanitarias y se mejora y facilita el control de costos

(Muñoz, 2004). Por otro lado, una mala distribución en planta genera movimientos innecesarios, provocando retrasos y gastos de energía, de tiempo y espacio. Dicho de otra manera, la distribución en planta determina en gran medida la eficiencia de una empresa, siendo vital en algunas ocasiones para la supervivencia de la empresa.

2.1.1. Objetivo de la Distribución en Planta

Según Riojas (2005) la distribución en planta busca encontrar la ordenación de los equipos y de las áreas de trabajo más económica y eficiente, así como segura y satisfactoria para los trabajadores y, que además cumpla con los objetivos de localización, diseño y necesidades de la empresa, todo ello para optimizar el flujo de materiales y obtener un sistema productivo más eficiente. Una eficiente distribución en planta permite alcanzar los siguientes aspectos:

- Disminución de la congestión del flujo de materiales.
- Supresión de áreas ocupadas innecesariamente.
- Reducción del trabajo administrativo e indirecto.
- Mejora de la supervisión y el control.
- Mayor facilidad y mejor utilización de la mano de obra, la maquinaria y los servicios.
- Reducción de las mantenciones y del material en proceso.
- Disminución del riesgo de daños material o de su calidad.
- Reducción del riesgo para la salud y aumento de la seguridad de los trabajadores.
- Ayuda a mejorar las condiciones de higiene y seguridad en el lugar de empleo.
- Disminución de los retrasos y del tiempo de fabricación e incremento de la producción.

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

- Acortamiento del tiempo de producción.
- Ahorro de espacio.
- Disminución del riesgo para el material y su calidad.
- Disminución de la congestión y confusión.
- Disminución en los retrasos de producción.
- Elevación de la moral y satisfacción de los trabajadores.
- Mayor empleo de la mano de obra y de los servicios.
- Mejora y facilidad en la supervisión.
- Incremento de la producción.
- Reducción del manejo de materiales.
- Reducción del material en proceso.
- Reducción del trabajo administrativo y del trabajo indirecto en general.
- Reducción de riesgos para la salud y aumento de la seguridad de los trabajadores.

Desde el punto de vista de Apple (1977), los principales objetivos de una distribución en planta son:

- Facilitar la manufactura de procesos.

- Hacer un uso económico y eficiente del edificio.
- Mantener el volumen de ventas y tener flexibilidad para los cambios constantes.
- Mantener la flexibilidad de las operaciones de producción.
- Mantener la inversión y amortización de los equipos.
- Minimizar el recorrido del material.
- Promover el uso eficiente de la mano de obra.
- Proporcionar satisfacción a los empleados en aspectos como la seguridad y el confort.

Con todo lo anterior y desde el punto de vista de (Luna, 2005) se llega a generalizar que la distribución en planta persigue los siguientes beneficios:

- a) Económico. Se busca reducir costos o realizar aquellas actividades que adicionan valor ante los ojos del cliente.
- b) Social. Se busca darle al trabajador satisfacción por el trabajo que realiza.

2.1.2. Principios de Distribución en Planta

Como todo buen método para cumplir con un objetivo en particular, la distribución en planta cuenta con una base formada por distintos principios, los cuales pretenden obtener beneficios plenos para las partes que se ven afectadas, ya sean accionistas o empleados; y lograr un tratamiento adecuado de los materiales y equipos, así como cumplir con el papel de auxiliar a las técnicas existentes para determinar una distribución en planta. Estos principios según Rojas (2005) son:

- 1) Principio de la Integración de conjunto. La mejor distribución en planta es la que integra las actividades auxiliares, así como cualquier otro factor, de modo que resulte el compromiso mejor entre todas las partes.

- 2) Principio de la mínima distancia recorrida a igual de condiciones. Es siempre mejor la distribución en planta que permite que la distancia a recorrer por el material entre operaciones sea más corta.
- 3) Principio de la circulación o flujo de materiales. Es mejor aquella distribución en planta o proceso que este en el mismo orden de secuencia en que se transforma, tratan o montan los materiales.
- 4) Principio de espacio cúbico. La economía se obtiene utilizando de un modo efectivo todo el espacio disponible, tanto vertical como horizontal.
- 5) Principio de la satisfacción y de la seguridad. Es más efectiva la distribución en planta que haga el trabajo más satisfactorio y seguro para los productores.
- 6) Principio de la flexibilidad. Siempre será mejor la distribución en planta que pueda ser ajustada o reordenada con menor costo o inconvenientes.

2.1.3. Tipos de Distribución en Planta

Desde la perspectiva de Muñoz (2004) existen diferentes tipos de distribución en planta, agrupados por el tipo de industria o por el tipo de organización de la producción.

2.1.3.1. Distribución en Planta por el Tipo de Industria

La distribución en planta por el tipo de industria, se enfoca en el orden, secuencia o rutas que lleva la materia prima o producto semi-acabado para su elaboración final, debido a lo cual se clasifican en:

- Industria monolineal: el producto se desplaza continuamente en un único recorrido para su elaboración.

- Industria sintética o convergente: la materia prima o el producto semi-acabado circula por diferentes trayectos que convergen en una sola línea de producción final.
- Industria analítica y divergente: contrario a la clasificación anterior, la materia prima parte de una sola ruta y después se divide en varios rumbos para generar diversos productos.
- Industria convergente y divergente: mezcla de los dos anteriores, las materias primas convergen en una sola línea y después divergen en otras para la creación de diferentes productos.

2.1.3.2. Distribución en Planta según la Organización de la Producción

Siendo el más utilizado y comúnmente llamado tipos básicos de distribución en planta, este se basa en la organización de la producción, por lo que analiza la interacción entre el material, el equipo y el trabajador para su categorización, los cuales son (Riojas, 2005):

- Movimiento del personal: Los trabajadores se mueven de una estación de trabajo a la siguiente, según el orden del sistema de producción, realizando las operaciones correspondientes a la parte del producto o al producto mismo.
- Movimiento de material: El material se traslada de un lugar de trabajo a otro, llevando el modo en el que deben de realizarse cada una de las operaciones.
- Movimiento de equipo: El operario mueve herramientas o máquinas en un área de trabajo para operar sobre una pieza.
- Movimiento de personal y material: El operario se traslada con el material a cada estación de trabajo para realizar una operación.

- Movimiento de personal y equipo: El operario se mueve junto con las herramientas y equipo hacia el elemento o pieza en la que trabajan.
- Movimiento de material y equipo: El material y la maquinaria se desplazan hacia los trabajadores que están laborando.
- Movimiento de personal, material y equipo: Todos los elementos se mueven, lo que generalmente es demasiado caro e innecesario.

Los tipos de distribución en planta según el criterio de Muñoz (2004) son:

- Distribución por posición fija: el material permanece en un lugar fijo, siendo este su ubicación definitiva desde el comienzo del proceso, en donde todos los operarios, equipos y materiales auxiliares necesarios se dirigen hacia él. Este tipo de distribución en planta se maneja cuando el producto es de grandes dimensiones y muy pesado, produciéndose pocas unidades al mismo tiempo.
- Distribución por proceso: este sistema se adopta generalmente cuando se produce una gran variedad de productos, en lotes pequeños y cuando la demanda es discontinua, y consiste en agrupar las máquinas (permaneciendo fijas) o procesos de la misma naturaleza dentro de un mismo sector, acudiendo los operarios con los materiales.
- Distribución por producto: también conocida como producción en cadena o producción en línea, aquí, las máquinas, equipo o entidades que interfieren en la elaboración del producto se aglomeran en una misma zona y se ordenan de acuerdo al proceso de elaboración. Esta distribución en planta se utiliza cuando la demanda es continua, el suministro de materiales es fácil y continuo, y, cuando la producción es muy elevada, la variedad de productos es pequeña y estandarizada.

- **Distribución celular:** esta distribución en planta no se considera básica ya que nace de la combinación de las distribuciones citadas con anterioridad. Aquí, se agrupan las máquinas necesarias para la producción, los operarios y, el material y equipo, todo con el fin de que el trabajador pueda operar las máquinas simultáneamente y sin necesidad de desplazarse, además de disponer todo al alcance de su mano. Dicho sistema es especialmente adecuado para grandes volúmenes de producción y poca variedad de productos.

2.1.4. Factores que Influyen en la Distribución en Planta

Es primordial que para poder realizar un buen diseño de distribución en planta se tomen en cuenta todos los factores involucrados y las interacciones entre los mismos. Asimismo, el hecho de que se busca proporcionar cada uno de los factores, los cuales dependen de la situación y de las características de la organización para poder así, optimizar el resultado.

Los mencionados factores se clasifican en ocho grupos: mano de obra, maquinaria, materiales, edificio, cambio, movimiento, servicio y espera. La Tabla 2.1 muestra las características más importantes de los factores mencionados con anterioridad según Contreras (2010) y Ramírez (2006).

Factor	Relevancia	Consideraciones
Mano de Obra	Primordial mantener una organización adecuada para cumplir con el confort y seguridad del trabajador, así como de su movimiento continuo sin obstrucciones.	<ul style="list-style-type: none"> - Seguridad para los trabajadores. - Sincronización. - Cantidad para cada proceso.
Maquinaria	Su establecimiento depende de sus especificaciones y requerimientos, además de las necesidades de la producción.	<ul style="list-style-type: none"> - Características físicas y espacio requerido. - Manera apropiada de uso. - Equipo, accesorios y personal necesario. - Necesidades relativas para su buen funcionamiento.
Materiales	Fuente vital para la producción.	<ul style="list-style-type: none"> - Cantidad y gama de productos. - Especificaciones del producto. - Secuencia de operaciones.
Edificio	Constituye la disposición física en donde se ubicará la planta.	<ul style="list-style-type: none"> - Si ya existe obstaculiza el diseño.
Cambio	Precisar una buena adaptación a cambios continuos y/o intermitentes.	<ul style="list-style-type: none"> - Flexibilidad y adaptación.
Movimiento	Es vital para la producción y necesario que se minimicen las distancias a transitar y los movimientos.	<ul style="list-style-type: none"> - Optimización del flujo. - Espacio para el movimiento. - Retrocesos y rutas cruzadas.
Servicio	Actividades de apoyo para facilitar el proceso productivo.	<ul style="list-style-type: none"> - Labores adicionales realmente necesarias.
Espera	Área en producción donde el material debe esperar para continuar con el proceso, también conocido como demora.	<ul style="list-style-type: none"> - Espacio y condiciones del área de espera. - Fluidez en la circulación de los materiales.

Tabla 2.1. Factores que influyen en la distribución en planta (Contreras, 2010 y Ramírez, 2006).

2.1.5. Diseño de una Distribución en Planta

Según Contreras (2010), para poder realizar un buen diseño de una distribución en planta es necesario considerar los factores que influyen en ella y conocer detalladamente el problema a solucionar para poder satisfacer todas las necesidades, por lo que es natural que no impere un método o procedimiento automático, por lo que el proceso de diseño se vuelve muy complejo. Además, es sustancialmente importante el análisis de aspectos como:

- Cambios trascendentales para la distribución en planta (en las herramientas, equipos, maquinarias, líneas de producción, productos y procesos).
- Requerimientos de seguridad, medio ambiente y en algunas ocasiones estéticas.

Además, un aspecto que suele implicar consideraciones espaciales adicionales en el diseño de la distribución en planta es la redundancia, según Contreras (2010) se define como la existencia de caminos alternativos, o la capacidad en exceso sobre las que se requieren en condiciones normales de operación, que se utiliza cuando un componente o sistema falla, en condiciones normales de trabajo.

2.1.5.1. Métodos para el Diseño de una Distribución en Planta

Como se ha puntualizado anteriormente, no existe un método exclusivo para el diseño de una distribución en planta, lo que a su vez hace posible que al utilizar una técnica determinada, esta se pueda modificar o combinar con otra(as) técnica(s) según las necesidades lo requieran y así obtener mejores resultados. Lo que sí es necesario es de disponer de un camino base a seguir, en donde sin duda alguna el más conocido y empleado es el SLP (Systematic Layout Planning) propuesto por Richard Muther (1968), el cual fue escrito en varias publicaciones, aunque también se tienen otros procedimientos relevantes, como son: el de Apple, Reed, Immer y Buffa.

2.1.5.2. Planeación Sistemática de la Distribución en Planta (SLP)

Dependiendo del autor el procedimiento SLP es dividido desde 3 hasta 6 fases, en particular, dicho procedimiento constará de 5 fases como se muestra en la Figura 2.1 (Vallhonrat y Corominas, 1991). Ya que es substancial la identificación de algunas actividades en específico que serán de utilidad para el presente trabajo.

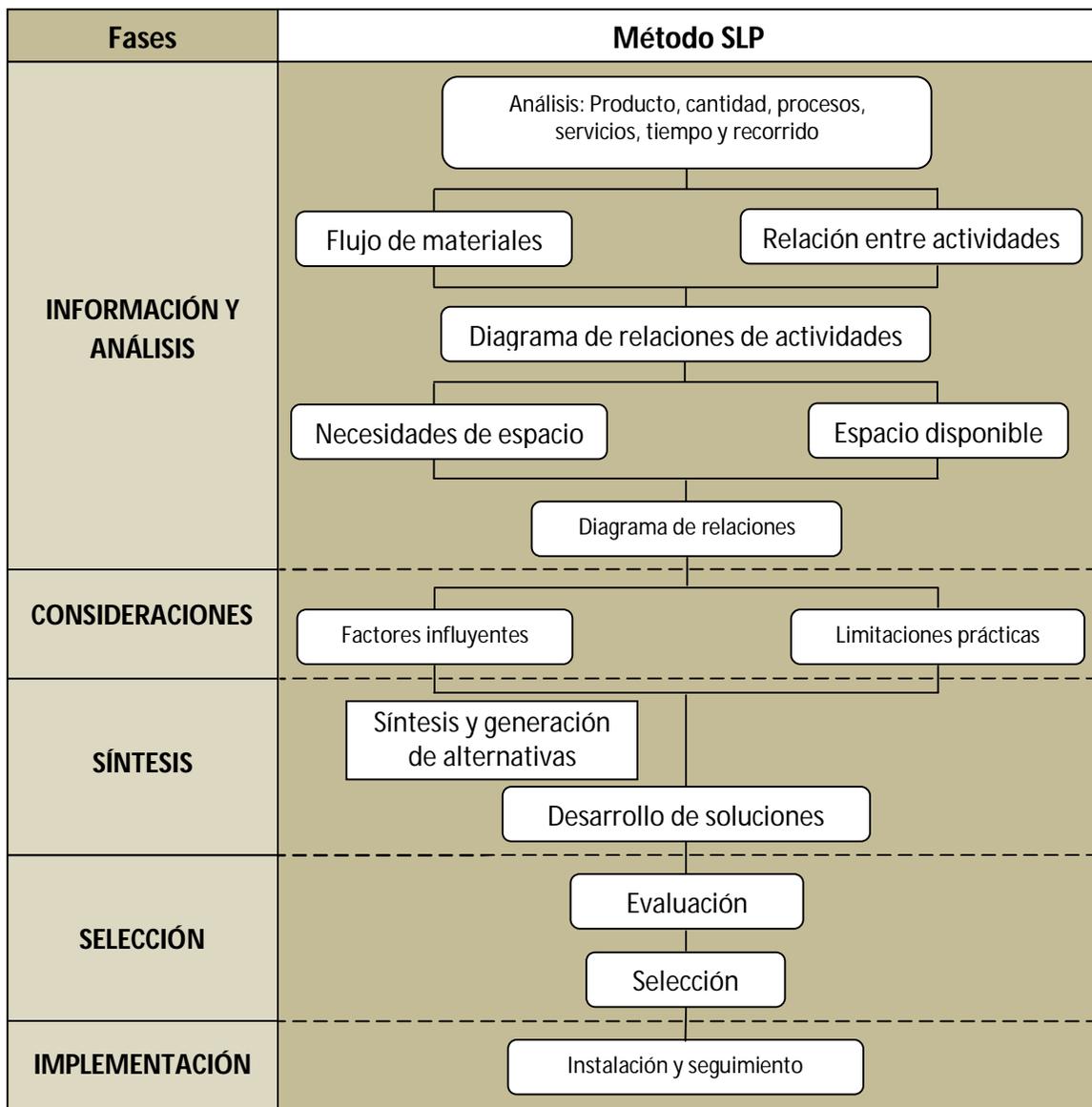


Figura 2.1. Planeación sistemática de la distribución en planta (Vallhonrat J. M. y Corominas A., 1991).

2.1.5.3. Las 5 Fases del Procedimiento SLP

1. Información y análisis. Información referente al o a los productos, cantidades, servicios, procesos, tiempo y recorrido.
 - Flujo de materiales: es una propiedad clave para el desarrollo del problema, la cual comienza con una descripción del flujo de materiales del proceso. Aquí, es posible utilizar alguna de las siguientes herramientas:
 - Diagrama de acoplamiento.
 - Diagrama analítico de operaciones del proceso.
 - Diagrama multi-producto.
 - Diagrama de hilos.
 - Diagrama de recorrido.
 - Matrices.
 - Relación entre actividades: se trata de estudiar las relaciones de cada una de las unidades que se ajustarán en la distribución en planta, sean directos, indirectos y/o auxiliares.
 - Diagrama de relaciones de actividades: con la información recolectada, se procede a realizar un diagrama de relación de actividades, el cual consiste en un grafo en el que se observan las relaciones entre cada centro de actividad existente en el sistema productivo.
 - Necesidades de espacio: es preciso conocer toda la superficie requerida para la planta en general, por cada uno de los departamentos y centros de actividades.
 - Espacio disponible: comparar y si es necesario ajustar el área que se requiere con la que se tiene disponible.
 - Diagrama de relación de espacios: grafo en el que se observan las relaciones entre cada área designada a cada centro de actividad y departamento existentes en el sistema productivo.

2. Consideraciones. Disponer de todos los elementos influyentes y de las limitaciones prácticas, en donde es importante distinguir todos los medios principales y auxiliares de producción, tales como: oficinas, laboratorios, edificios, almacenes, talleres, sistemas de mantenimiento, entre otros.
3. Síntesis. Es imprescindible que al llegar a esta fase la información disponible y los parámetros sean los adecuados, además de que las herramientas con las que se pretenda trabajar se implementen de manera correcta.
4. Selección. Ya obtenidas las posibles soluciones, solo es cuestión de hacer un análisis de evaluación tanto cualitativa como cuantitativa y obviamente seleccionar la solución que más se adecue a los objetivos o propósitos de la empresa.
5. Implementación. Siempre es conveniente que al momento de implantar la opción escogida esta se efectúe tal como lo indicó el método y que después de ello se realice un seguimiento de su comportamiento a través del tiempo y de cada uno de los pequeños y/o grandes cambios que se van presentando.

2.1.5.4. Metodologías para la Elaboración de la Distribución en Planta a partir del Procedimiento SLP

Existen ciertas metodologías que sirven para realizar las actividades de síntesis, evaluación y selección del procedimiento SLP, con mayor premura, facilidad y, en general, mejores resultados que la mayoría de las metodologías dirigidas a la distribución en planta.

Una clasificación de las metodologías desde diversos enfoques, según Santamarina (1995) son:

- Por la forma de generar la solución:
 - Métodos de construcción.

- Métodos de mejora.
- Métodos híbridos.
- Por la técnica utilizada en la ubicación de las actividades:
 - Métodos basados en las técnicas discretas.
 - Métodos basados en las técnicas corte.
 - Métodos basados en técnicas analíticas.
- Por la naturaleza de la función objetivo:
 - Métodos cuantitativos.
 - Métodos cualitativos.
 - Métodos multi-criterios.
- Por la técnica empleada en resolver el problema.
 - Métodos óptimos o exactos.
 - Métodos heurísticos y metaheurísticas.

2.1.6. Función Objetivo

Para empezar a diseñar una distribución en planta, es primordial conocer lo que se va a producir, en que cantidades y en que lapso de tiempo, en otras palabras la función objetivo, y con ello, poder determinar qué tipo de distribución es la más adecuada para cada proceso productivo en particular.

Contreras (2010) clasifica los modelos de la función objetivo según su naturaleza como se muestra en la Tabla 2.2.

Formulación del problema	Se basa en	Herramientas	Inconvenientes	Objetivo
Cuantitativa	Costo asociado al transporte de materiales entre cada una de las actividades.	<ul style="list-style-type: none"> • Intensidad relacional. • Distancia relacional. 	No poder agregar elementos como servicios auxiliares, al personal y de mantenimiento.	Minimizar el costo total.
Cualitativa	Factores cualitativos evaluados mediante una escala de importancia entre dos actividades adyacentes.	<ul style="list-style-type: none"> • Tabla relacional de actividades. • Matriz de fronteras. 	Evaluación subjetiva.	Maximizar el coeficiente de relación global.
Multicriterio	Varios factores, como la seguridad, espacios, servicios, satisfacción del trabajador, ruidos, flexibilidad, mantenimiento, estética, costos, etc.	<ul style="list-style-type: none"> • Costo de localizar una actividad. • Modelo de multiplicidad. • Modelo aditivo. • Método de agregación parcial interactivo. 	Evaluación subjetiva por ser también cualitativo y utiliza varios factores.	Optimizar los costos de la producción.

Tabla 2.2. Clasificación de la función objetivo según su naturaleza (Contreras, 2010).

2.1.7. Distancias

Es muy importante la consideración de cada una de las distancias a transitar entre los lugares de trabajo, al igual que la manera en como son medidas. Como dice Ramírez (2006), siempre es mejor la distribución en planta que permite que la distancia a recorrer entre operaciones sea la más corta, en la Tabla 2.3 se muestran las distancias más utilizadas y sus características.

Distancia	Medición	Fórmula	Esquema
Euclidiana	Entre los centros de gravedad o centroides de las actividades.	$d_{ij} = \ (x_1, y_1) - (x_2, y_2)\ = \sqrt{\sum_{i=1}^2 (x_i - y_i)^2}$	
Manhattan	De ángulo recto e igual a la suma de la distancia vertical y horizontal de los centroides del área de las actividades i y j.	$d_{ij} = x_i - x_j + y_i - y_j $	
Chebyshev	La mayor distancia vertical u horizontal de los centroides de un par de actividades	$d_{ij} = \max(x_i - x_j + y_i - y_j)$	
De contorno	Semejante a la de Chebyshev, pero tomando en cuenta el traslado por pasillos.	$d_{ij} = a + b + c$	

Tabla 2.3. Clasificación de la distancia (Ramírez R., 2006).

2.1.8. Como Resolver el Problema de Optimización

Para resolver un problema de optimización se requiere de un modelo matemático en el que se manejen todas las actividades del sistema de producción y después, aplicar algún método que permita optimizar las posibles soluciones y así, obtener la mejor solución, como el algoritmo de optimización de colonia de hormigas presentado en este trabajo.

2.1.9. Métodos para la Generación de la Distribución en Planta

Los métodos para la generación de la distribución en planta se ordenan según la técnica utilizada en el tratamiento del espacio para la asignación de las actividades, incorporando una gran variedad de métodos de implantación, siendo algunos de ellos los modelos topológicos, los modelos geométricos, los modelos de manufactura flexible y los dinámicos. Para poder dar una solución al problema de distribución en planta es posible aplicar los algoritmos branch and bound, los heurísticos o las metaheurísticas (Contreras, 2010).

Ya que en el presente trabajo se planteará una solución al problema de distribución en planta utilizando una metodología metaheurística, se explicará de manera muy breve la categorización de los métodos heurísticos y metaheurísticas, empezando con las definiciones respectivas.

Un método heurístico es un procedimiento que permite resolver un problema de optimización definido mediante una aproximación intuitiva, en la que la estructura del problema se utiliza de forma inteligente para obtener una buena solución (Martí, 2003). Debido a que éstos son diseñados conforme a problemas particulares y de diferente naturaleza, es imposible generalizarlos, por lo que su categorización se vuelve muy complicada, agregando que los problemas que se cataloguen como NP-duros los resultados obtenidos son muy tardíos y en ocasiones recaen en un óptimo local, no obstante, Martí (2003) realiza el siguiente esquema con algunos de los métodos heurísticos más populares:

- Métodos de descomposición.
- Métodos inductivos.
- Métodos de reducción.
- Métodos constructivos.
- Métodos de búsqueda local.

En años contemporáneos y debido a la necesidad de resolver problemas con un elevado grado de complejidad, en poco tiempo y con una solución eficiente, han surgido ciertas estrategias para diseñar o mejorar los procedimientos heurísticos con miras a obtener un alto rendimiento, llamados metaheurísticas, cuyo sufijo “meta” significa “más allá”, es decir, a un nivel superior (Riojas, 2005).

Para Riojas (2005) las metaheurísticas son: una clase de métodos aproximados que están diseñados para resolver problemas difíciles de optimización combinatoria, en los que los heurísticos clásicos no son efectivos. Éstas proporcionan un marco general para crear nuevos algoritmos híbridos combinando diferentes conceptos derivados de la inteligencia artificial, la evolución biológica y los mecanismos estadísticos. Agregando que desde la perspectiva de Martí (2003) y Moreno (2005) son técnicas que apoyan a los métodos heurísticos para obtener mejores resultados, por lo que los primeros están sujetos a los segundos, pudiendo hacerse la siguiente clasificación para las metaheurísticas:

- Constructivas: en rasgos generales esta metodología consiste en empezar con una estructura vacía para posteriormente agregar elementos, un ejemplo es el GRASP (Greedy Randomized Adaptive Search Procedures).
- De relajación: se modifican las metodologías originales para facilitar la resolución del problema, entre estas técnicas se encuentran:
 - De relajación lagrangiana.
 - De restricciones subordinadas.
- Evolutivas: se crean estrategias para encaminar la evolución en el espacio de búsqueda para forjar un conjunto de soluciones, todo con la finalidad de minimizar la distancia de la solución obtenida con la solución óptima. Algunos ejemplos son:
 - Algoritmos genéticos.
 - Búsqueda dispersa.

- De búsqueda: realizan una investigación para encontrar una solución que suponen que existe, entre ellos se tienen a:
 - Búsqueda tabú.
 - Simulado recocido o templado simulado.
- Usando el recurso computacional:
 - Redes neuronales.
 - Programación por restricciones.
 - Colonia de hormigas.

Siendo la clasificación “usando el recurso computacional” la más relevante para resolver el problema de distribución en planta en el presente trabajo.

Resaltando que es de suma importancia recordar y hacer énfasis en que la evaluación del rendimiento de una metaheurística debe atender tanto a la eficiencia como a la eficacia de los procedimientos heurísticos obtenidos. Para validar la eficacia de ésta, debe de enfrentar con éxito una gran cantidad de problemas para los que se conozcan las soluciones. Si no se dispone de estos casos, se deben construir recurriendo a procesos de simulación que se aproximen a tales circunstancias. La eficiencia del método se contrasta experimentalmente en el empleo de un tiempo computacional moderado (o al menos razonable) para alcanzar éxito en los problemas considerados (Riojas, 2005).

2.1.10. Distribución en Planta y Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas

Como ya se ha mencionado en varias ocasiones en el texto, en algunos casos el problema de distribución en planta llega a catalogarse como del tipo NP-duro por lo que una metodología heurística no es lo suficientemente fuerte como para brindar una solución rápida y eficiente, lo que conlleva a utilizar una técnica metaheurística aunque las soluciones no sean óptimas globales, pero cuya relevancia en su empleo para la solución de problemas de optimización se refleja en publicación de libros, artículos y números especiales de revistas, así como los recursos disponibles en la red y los programas o paquetes computacionales que incluyen su aplicación (Moreno, 2005).

Según Menéndez (2010) entre los diferentes tipos de metaheurísticas que se han desarrollado para solucionar problemas de optimización, se encuentran: Búsqueda Tabú, Recocido Simulado, GRASP, Algoritmos Genéticos, Mallas Dinámicas (DMO, Dynamyc Mesh Optimization), Enjambre de Partículas (PSO, Particle Swarm Optimization) y Colonia de Hormigas (OCH) ó (ACO, Ant Colony Optimization), siendo este último un algoritmo bio-inspirado o de vida artificial e inteligencia colectiva y que se ha utilizado con éxito en problemas de optimización combinatoria, tanto estáticos como dinámicos. Algunas de sus sobresalientes aplicaciones son: Problema del viajero vendedor, Problema de asignación cuadrática, Cubrimiento de conjuntos, Secuenciación de tareas, Enrutamiento de redes de comunicaciones, Enrutamiento de vehículos, Ordenación secuencial, Secuenciación, Coloreado de grafos, Aprendizaje automático y Diseño de circuitos lógicos combinatorios. Por lo que, en el presente trabajo se plantea el uso del OCH para la solución del problema de distribución en planta.

2.1.11. Distribución de Planta Apoyada por Computadora

A causa del elevado número de parámetros que se deben de considerar al momento de diseñar una distribución en planta y al excesivo número de cálculos y posibilidades en dichos problemas, es importante el manejo de la computadora para facilitar el desarrollo de los cálculos y hallar una solución más rápidamente. El problema de distribución en planta es capaz de catalogarse como un problema NP-duro, es decir, no existen algoritmos capaces de obtener una solución en un tiempo polinomial, por lo que el empleo de la computadora generalmente es para implementar algunas técnicas desarrolladas para encontrar la solución, ya sea con programación matemática entera, continua, mixta, entre otras.

2.2. Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas

Como se ha indicado a detalle en este trabajo, en el problema de optimización de la distribución en planta se tienen varios parámetros a considerar, al igual que objetivos, haciendo que la dificultad de encontrar solución al problema aumente, aunado a que las respuestas lleguen a ser óptimos locales o parciales, por tales motivos, se manifiesta la técnica de optimización mediante el algoritmo de colonia de hormigas.

Barcos, Rodríguez y Álvarez (2002) y, Muñoz (2005) señalan: las hormigas son insectos sociales que viven en colonias cuyo comportamiento está dirigido más hacia la supervivencia de la colonia como un todo que a la de un individuo dentro de ésta. Estos insectos han capturado la atención de los científicos debido al alto nivel de estructuración que alcanzan sus colonias comparados con la simplicidad de sus individuos. Una conducta sobresaliente es la capacidad de encontrar los mejores caminos o rutas más cortas de ida y vuelta entre sus fuentes de alimento y su origen, a pesar de que son animales casi ciegos.

Las hormigas realizan un tipo de comunicación basado en agentes químicos denominados feromonas. Menéndez (2010) dice que las feromonas forman un sistema indirecto de comunicación química entre animales de una misma especie, que transmiten información acerca del estado fisiológico, reproductivo y social, así como la edad, el sexo y el parentesco del animal emisor, las cuales son recibidas en el sistema olfativo del animal receptor, quien interpreta esas señales, jugando un papel importante en la organización y la supervivencia de muchas especies.

Muñoz (2005) explica que la primer hormiga que va en busca de comida, lo hace sin ningún tipo de información o señal que la guíe, pero al ir avanzando va dejando feromona por la ruta, ejerciendo una acción sobre la decisión de las hormigas precedentes las cuales escogen el camino que posee una mayor concentración de feromona, permitiendo que las hormigas encuentren la ubicación de las fuentes de comida al igual que su hormiguero, dicho comportamiento se muestra en la Figura 2.2. Se ha demostrado que los rastros de feromona permiten lentamente la optimización distribuida en la cual cada agente sencillo realiza una pequeña contribución en la búsqueda de la mejor solución. Además, Barcos, et. al. (2002) señala que en definitiva, el proceso se caracteriza por una retroalimentación positiva, en la que la probabilidad con la que una hormiga escoge un camino aumenta con el número de hormigas que previamente hayan elegido el mismo camino.

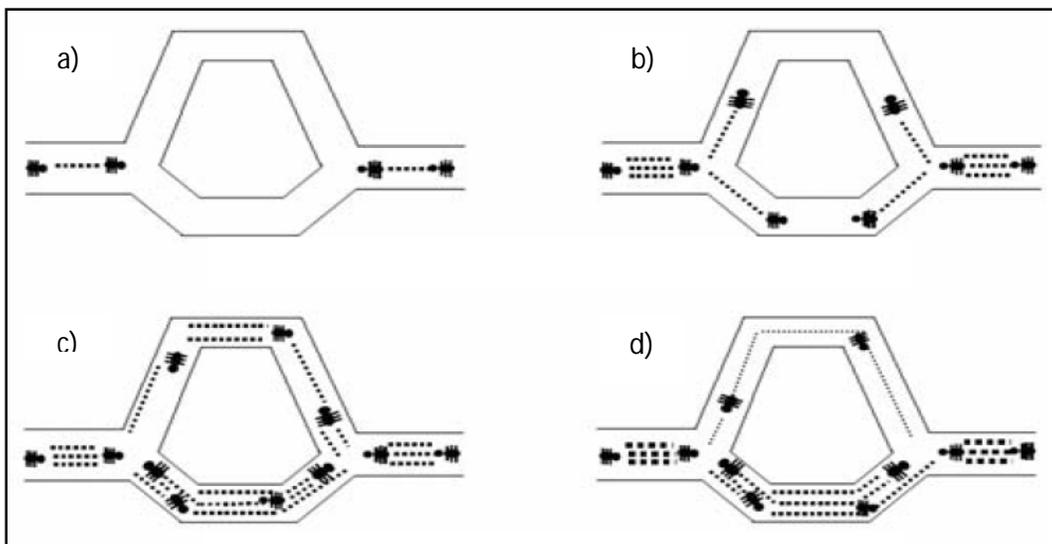


Figura 2.2. Comportamiento de las hormigas (Feitó, C. y Cespón, C., 2009).

Con base en la Figura 2.2, se observa el siguiente comportamiento aleatorio de las hormigas reales:

- a) Muestra que las hormigas llegan a un punto donde tienen que decidir por uno de los caminos que se les presenta, lo que resuelven de manera aleatoria.
- b) Refleja que en consecuencia. El 50% de las hormigas se irán por un extremo y el otro 50% por el otro extremo.
- c) Expone que debido a que las hormigas se mueven aproximadamente a una velocidad constante, las que eligieron el camino más corto alcanzarán el otro extremo más rápido que las otras, quedando depositada mayor cantidad de feromona por unidad de longitud.
- d) Revela que la mayor densidad de feromonas depositadas en el trayecto más corto hace que éste sea más deseable para las siguientes hormigas y por lo tanto, la mayoría elige transitar por él.

Considerando que la evaporación de la sustancia química hace que los caminos menos transitados sean cada vez menos deseables y la realimentación positiva en el camino con más feromona, resulta claro que al cabo de un tiempo casi todas las hormigas transiten por el camino más corto (Menéndez, 2010).

Basado en esta forma de comunicación se ha creado un modelo para un sistema artificial multi-agentes aplicado a la solución de problemas de optimización al cual se le ha denominado optimización mediante colonia de hormigas (OCH), ya mencionado con anterioridad, el cual corresponde a una colonia metaheurística de hormigas artificiales (llamados agentes), en donde se busca asignar los recursos computacionales a una serie de agentes relativamente sencillos que se comunican por medio de un auto estimulador o feromona artificial, encontrando buenas soluciones debido a la cooperación de los agentes, en otras palabras, se trata de una analogía del comportamiento natural de las hormigas reales, pero, las hormigas artificiales corresponden a una abstracción de los aspectos conductuales de las hormigas reales en la búsqueda de una ruta más corta y son modificadas con

facultades elementales para la solución de problemas que no se encuentran en las hormigas reales (Muñoz, 2005).

Para Muñoz (2005), los algoritmos OCH tienen características similares a las hormigas reales, pero también conservan otras que las reales carecen, algunas de estas características se presentan en la Tabla 2.4.

Analogía hormiga real	Exclusivo hormiga artificial
Representan una colonia de individuos cooperativos que encuentran una solución adecuada al problema en consideración.	Viven en un mundo discreto y sus acciones consisten en transiciones entre estados discretos en tiempos discretos.
Buscan soluciones aplicando una decisión probabilística para moverse a través de estados adyacentes.	Poseen un estado interno privado el cual posee la memoria de las acciones pasadas de la hormiga.
Buscan el camino de menor costo que une un origen y un destino.	Depositán una cantidad de feromona que es función de la calidad de la solución encontrada.
Las hormigas reales depositan feromona y las hormigas artificiales realizan cambios en la información numérica establecida en el estado que visitan, permitiendo la existencia de un conocimiento común.	La forma en que deposita la feromona es dependiente del problema y se actualiza la feromona únicamente hasta terminar una solución.
Las decisiones son funciones únicamente de la información a priori representada por las especificaciones del problema y la información inducida por las modificaciones locales.	Se mejora la eficiencia del algoritmo con capacidades extra como predicción, optimización local, capacidad de retroceso.

Tabla 2.4. Características entre la hormiga artificial y la real (Muñoz, 2005).

Además, en Dórzan et. al. (2009) se manifiesta que el modo de operación genérico de un algoritmo OCH incluye dos procedimientos adicionales, que son:

- Evaporación de los rastros de feromona: El entorno la lleva a cabo y se usa como mecanismo para impedir el estancamiento en la búsqueda, concediendo que las hormigas busquen y exploren nuevas regiones.
- Acciones del demonio: Son funciones opcionales, las cuales no tienen una relación con el comportamiento de las hormigas reales, para implementar tareas desde una perspectiva global.

Para finalizar, es importante destacar que en Barcos et. al. (2002) se comenta que el primer algoritmo basado en la optimización mediante colonias de hormigas fue aplicado al Problema del Viajante, obteniéndose resultados bastante alentadores, además de que según Almirón, Chaparro y Barán (2001) muchos investigadores interesados por la originalidad y el rendimiento de dicho algoritmo, aplicaron la técnica con excelentes resultados a problemas tan diversos como:

- El problema del ordenamiento secuencial (Sequential Ordering Problem).
- El problema de ruteo de vehículos (Vehicle Routing Problem).
- El problema de asignación cuadrática (Quadratic Assignment Problem).
- Partición de problemas (Partitioning Problems).
- Redes de telecomunicaciones (Telecommunications Networks).

2.3.1. Aplicaciones del Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas

En los temas anteriores se menciona el éxito de la implementación del algoritmo OCH en diversas temáticas y variedad de problemas de optimización, según Dorigo (2001) estas aplicaciones abarcan dos campos esenciales de aplicación:

- Problemas NP-duros. Para estos problemas muy a menudo los algoritmos OCH se juntan con capacidades adicionales, como las acciones hechas por el demonio, como un problema específico del optimizador local, que lleve a las soluciones de las hormigas a un óptimo local.
- Problemas de la ruta más corta. En donde las propiedades de la representación gráfica del problema cambian al mismo tiempo que el proceso de optimización tiene que adaptarse a la dinámica del problema. En este caso, el problema de la gráfica se encuentra físicamente, pero sus propiedades, como los costos de componentes o de las conexiones cambia con el tiempo. Algunas de estas aplicaciones son resumidas y presentadas por clase y en orden cronológico en la Tabla 2.5 (Dorigo, 2000).

<i>Problem name</i>	<i>Authors</i>	<i>Algorithm name</i>	<i>Year</i>	<i>Main references</i>
Traveling salesman	Dorigo, Maniezzo & Colorni	AS	1991	[29, 37, 38]
	Gambardella & Dorigo	Ant-Q	1995	[41]
	Dorigo & Gambardella	ACS & ACS-3-opt	1996	[33, 34, 42]
	Stützle & Hoos	M.MAS	1997	[84, 82, 85]
	Bullnheimer, Hartl & Strauss	AS _{rank}	1997	[14]
	Cordón, et al.	BWAS	2000	[18]
Quadratic assignment	Maniezzo, Colorni & Dorigo	AS-QAP	1994	[65]
	Gambardella, Taillard & Dorigo	HAS-QAP ^a	1997	[46]
	Stützle & Hoos	M.MAS-QAP	1997	[79, 85]
	Maniezzo	ANTS-QAP	1998	[62]
	Maniezzo & Colorni	AS-QAP ^b	1999	[64]
Scheduling problems	Colorni, Dorigo & Maniezzo	AS-JSP	1994	[17]
	Stützle	AS-FSP	1997	[80]
	Bauer et al.	ACS-SMTTP	1999	[2]
	den Besten, Stützle & Dorigo	ACS-SMTWTP	1999	[21]
	Merkle, Middendorf & Schmeck	ACO-RCPS	2000	[66]
Vehicle routing	Bullnheimer, Hartl & Strauss	AS-VRP	1997	[12, 13]
	Gambardella, Taillard & Agazzi	HAS-VRP	1999	[45]
Connection-oriented network routing	Schoonderwoerd et al.	ABC	1996	[77, 76]
	White, Pagurek & Oppacher	ASGA	1998	[89]
	Di Caro & Dorigo	AntNet-FS	1998	[26]
	Bonabeau et al.	ABC-smart ants	1998	[10]
Connection-less network routing	Di Caro & Dorigo	AntNet & AntNet-FA	1997	[23, 25, 28]
	Subramanian, Druschel & Chen	Regular ants	1997	[86]
	Housse et al.	CAF	1998	[54]
	van der Put & Rothkrantz	ABC-backward	1998	[88]
Sequential ordering	Gambardella & Dorigo	HAS-SOP	1997	[43, 44]
Graph coloring	Costa & Hertz	ANTCOL	1997	[19]
Shortest common supersequence	Michel & Middendorf	AS-SCS	1998	[67, 68]
Frequency assignment	Maniezzo & Carbonaro	ANTS-FAP	1998	[63]
Generalized assignment	Ramalhinho Lourenço & Serra	MMAS-GAP	1998	[73]
Multiple knapsack	Leguizamón & Michalewicz	AS-MKP	1999	[59]
Optical networks routing	Navarro Varela & Sinclair	ACO-VWP	1999	[71]
Redundancy allocation	Liang & Smith	ACO-RAP	1999	[60]
Constraint satisfaction	Solnon	Ant-P-solver	2000	[78]

Tabla 2.5. Aplicaciones del algoritmo OCH (Dorigo, 2000).

2.2.1. Proceso de Optimización Mediante el Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas

El comportamiento de las hormigas artificiales en el algoritmo de optimización de colonia de hormigas lleva una secuencia de instrucciones que se describe mediante una estructura de pasos fundamentales de operación como se muestra en la Figura 2.3 (Dorzán et. al., 2009).

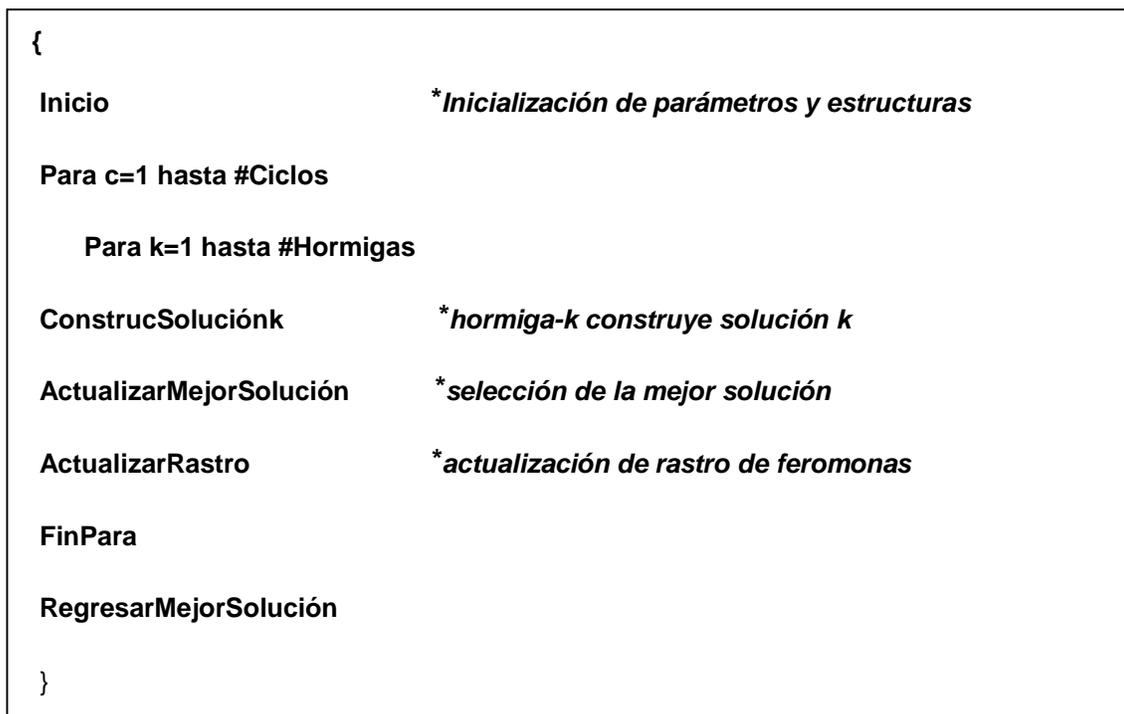


Figura 2.3. Metodología metaheurística OCH (Dorzán et. al., 2009).

Visto los pasos fundamentales de operación del algoritmo de optimización de colonia de hormigas. La metodología metaheurística OCH según Alonso et. al. (2004), Feitó y Cespón (2009), Dorzán et. al. (2009) y Menéndez (2010) es la que a continuación se describe.

2.2.1.1. Metodología Metaheurística del Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas

Las hormigas de la colonia se mueven concurrentemente y de manera asíncrona, a través de los estados adyacentes de un problema, que se representan en forma de grafo con pesos. Este movimiento se realiza siguiendo una función objetivo.

1) Inicio (función objetivo)

Es el tratamiento o inicialización de los valores de los parámetros que se van a considerar para diseñar el algoritmo OCH de la distribución en planta. Entre otros, se deben puntualizar: el rastro inicial de feromona asociado a cada arista τ_0 , que es un valor positivo pequeño, normalmente el mismo para todas las aristas, el número de hormigas en la colonia (k), y los pesos que precisen la proporción en la que afectarán la información heurística (β) y de los rastros de feromonas en la regla de transición probabilística referentes a la información memorística (α), que guiarán la búsqueda.

2) Construcción de una solución por la hormiga k

Se inicia con una solución parcial vacía, que se extiende a cada paso añadiéndole un componente de solución factible elegido entre los vecinos de la solución actual. Esto equivale a encontrar una ruta en el grafo de construcción guiada por el mecanismo que define el conjunto de vecinos factibles con respecto a la solución parcial. La elección de un vecino factible se realiza de manera probabilística en cada paso de la construcción, dependiendo de la variante OCH utilizada. Además, se controla la planificación de tres componentes: la generación y puesta en funcionamiento las hormigas artificiales; la evaporación de feromona y las acciones del demonio.

3) Actualización del rastro

Se especifica el estado inicial desde que la hormiga empieza su camino y además almacena la componente correspondiente a la memoria de la hormiga anterior (si es que hay). La decisión sobre cuál será el nodo inicial depende del objetivo del algoritmo. Cabe mencionar que la actualización del rastro de feromona se realiza al menos de dos diferentes maneras:

- Elitista: se usa la mejor solución encontrada para auxiliar a los niveles de feromona.
- No elitista: maneja las soluciones obtenidas por todas las hormigas para auxiliar a los niveles de feromona.

Tras la actualización de la feromona se comienza una nueva iteración. El resultado final es la mejor solución encontrada a lo largo de todas las iteraciones realizadas.

2.2.2. Diferentes Modelos del Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas

Previamente se han visto las diferentes aplicaciones del algoritmo OCH, pero también hay que tomar en cuenta la variedad de modelos existentes hasta el momento, de esta manera y desde la perspectiva de Capriles, Goliatt, Barbosa y Lemonge (2005) se presentan una diversidad de modelos o clasificaciones dentro de los algoritmos OCH, los cuales son:

- Sistema Colonia de Hormigas (ACS, Ant Colony System).
- Sistema de Hormigas (AS, Ant System).
- Sistema de Hormigas Máx-Mín (MMAS, Max-Min Ant System).
- Sistema de Hormigas con Ordenación (RBAS, Rank-Based Ant System).
- Sistema Mejor-Peor Hormiga (BWAS, Best-Worst Ant System).

Si se tiene un enfoque de optimización multi-objetivo el algoritmo pasa a ser Optimización Multi-Objetivo mediante Colonias de Hormigas (MOACO, Multi-Objective Ant Colony Optimization), que a su vez se divide en los algoritmos (Lezcano, Pinto y Barán, 2008):

- Colonia Múltiple de doble criterio (BIMC, Bi-criterion Multi Colony).
- Hormigas de doble criterio (BIANT, Bi-criterion Ant).
- Hormiga Q con Múltiples Objetivos (MOAQ, Multiple Objective Ant Q).
- Optimización de Colonia de Hormigas con Pareto (PACO, Pareto-Ant Colony Optimization).
- Sistema de Colonia de Hormigas Multi-Objetivo (MOACS, Multi-Objective Ant Colony System).
- Sistema de Hormigas Multi-Objetivo (MAS, Multi-objective Ant System).
- Sistema de Hormigas Multi-Objetivo con Máx-Mín (M3AS, Multi-objective Max-Min Ant System).

2.3. Paquete computacional para Simular el Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas

Para empezar el presente apartado, hay que hacer notar la importancia del uso de algún paquete computacional para simular el algoritmo de optimización mediante colonia de hormigas, donde algunas justificaciones para tal son:

Alonso et. al. (2004) menciona: A menudo los problemas de optimización combinatoria compleja son muy difíciles de resolver en la práctica, ya que muchos, como el problema de optimización de la distribución en planta, pertenecen a la clase de problemas NP-duros (es decir, no existe un algoritmo conocido que los resuelva en un tiempo polinomial), por lo que para solucionar dichos problemas es necesario entrar en el campo de la teoría de las Ciencias de la Computación.

Si no se cuenta con una gran cantidad de casos resueltos con los que se pueda comparar y fundamentar la efectividad del algoritmo de optimización de colonia de hormigas, es necesario simular los procesos para poder hacer una comparación y determinar dicha eficiencia.

2.3.1. Simulación

Según Cabrera (2009), la simulación es la disciplina del diseño y representación ficticia de situaciones reales, por medio de elementos matemáticos y tecnológicos en la cual se experimenta a través de un modelo que constituye una abstracción de la realidad; con el objetivo de comprender el comportamiento del sistema y evaluar de esta manera diferentes tipos de estrategias para su mejor operación.

Para Llican (2003) se tiene que la simulación es una técnica numérica para conducir experimentos en una computadora digital. Estos experimentos comprenden ciertos tipos de relaciones matemáticas y lógicas, las cuales son necesarias para describir el comportamiento y la estructura de sistemas complejos del mundo real a través de largos periodos de tiempo.

2.3.1.1. Tipos de Simulación

Según Llican (2003) existen diferentes categorías de simulación dependiendo de su función, las cuales a su vez, están categorizadas de acuerdo a diversos principios, entre éstas se tienen a:

En función de:

- Objetivo de estudio:
 - Análisis del sistema.
 - Educación y capacitación.
 - Adquisición y recepción de sistemas.

- Investigación.
- Entrenamiento.
- Tiempo y estado del modelo de simulación:
 - Discretos.
 - Continuos.
 - Híbridos.
- Tiempo:
 - Estáticos.
 - Dinámicos.
- Datos usados:
 - Determinísticos.
 - Estocásticos.

Igual que cualquier otra metodología, se tienen ciertas etapas para realizar un estudio de simulación, la cuales para Muretti (2001) son:

- Definición del sistema.
- Formulación del modelo.
- Colección de datos.
- Implementación del modelo en el ordenador.
- Validación.
- Experimentación.
- Documentación.

2.3.2. Procedimiento de Simulación

Para Hoeger (2006) no todos los eventos deben de abarcar las mismas actividades o procedimiento, ni tampoco en el mismo orden, pero un procedimiento representativo de una simulación consta de:

- Formulación del problema y plan de estudio: definición de objetivos, alternativas de diseño y de criterios para su evaluación, además de cubrir características específicas.
- Recolección de datos y definición del modelo: recolección de la información de interés del sistema para determinar los aspectos operativos y de distribuciones de las variables aleatorias utilizadas en el modelo.
- ¿Válido?: existen partes en donde es oportuno realizar una validación del estudio.
- Construcción del programa y verificación: decisión del lenguaje y verificación de ciertas características del programa a emplear.
- Corridas piloto: para la ratificación del modelo verificado.
- ¿Válido?: se utilizan las corridas piloto para determinar la sensibilidad del modelo.
- Diseño de experimentos: decisión con respecto a los diseños y el tiempo respectivo a simular.
- Corridas de producción: para cuantificar el desempeño de los diseños.
- Análisis de salida: con técnicas estadísticas se analizan las salidas de las corridas de producción.
- Documentación, presentación e implementación de los resultados: documentación del programa así como de los supuestos realizados.
- Verificación y validación: prácticamente una retroalimentación para consolidar si el modelo funciona correctamente y realmente es representativo.

2.3.3. Paquetes Computacionales de Simulación

Actualmente existe una inmensa variedad de paquetes computacionales enfocados hacia la simulación, entre ellos están:

- Siman.
- Gasp.

- Slam.
- **ProModel.**
- Arena.
- Gpss.
- Simscript.
- Automod.
- Ecsl.
- Slam II.
- Simula.

2.3.4. Paquetes Computacionales Utilizados en el Algoritmo de Colonia de Hormigas

Por lo anterior, existe una gran variedad de programas exclusivos para la simulación, no obstante, en el ámbito de la optimización mediante el algoritmo colonia de hormigas, son pocos los casos y a su vez los paquetes computacionales recurridos para simular el modelo obtenido con dicha técnica, aun cuando para la implementación del modelo es necesario el uso de algún paquete computacional.

Algunos de los trabajos en los que se ha empleado algún paquete computacional, ya sea para la implementación del algoritmo de optimización de colonia de hormigas o para la simulación de éste, son: Cobo y Serrano (2005), Dorzán et. al. (2009), Lezcano et. al. (2008), Feitó y Cespón (2009) y Contreras (2010).

3. METODOLOGÍA

Como se ha señalado con anterioridad, es de vital importancia la consideración de varios parámetros para poder diseñar y desarrollar un sistema productivo sólido y eficiente, y así, tener la seguridad de un funcionamiento óptimo de los equipos y del flujo de materiales que garanticen la eficiencia del proceso.

En el presente capítulo se describen las herramientas necesarias para resolver el problema planteado de distribución en planta utilizando el algoritmo de optimización de colonia de hormigas, el algoritmo sistema de hormiga Mín-Máx y la simulación en ProModel 4.22 de la distribución en planta actual y la propuesta.

3.1. Descripción de la Metodología del Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas

En forma general y muy abreviada se muestra en la Figura 3.1 el modelo propuesto para la determinación de la distribución en planta. El modelo se determina para la minimización de los costos de transporte en el aprovisionamiento de piezas, contemplando las distancias entre las celdas y de las celdas al almacén. Ya que el mantenimiento de los equipos es relativamente bajo no se considera el costo generado por los mismos, pero, en un esfuerzo por hacer más robusto el modelo, se tomará en cuenta la redundancia de equipos.

Por medio de la aplicación del algoritmo de optimización de colonia de hormigas se optimiza la distribución en planta y la redundancia, y con ello determinar la solución que genera el **mínimo costo total de manutención**. Sin olvidar que el costo total de manutención de la planta es la suma de los costos relacionados a la distribución, como lo son: el costo de operaciones de almacenaje, de manipulación y aprovisionamiento de piezas, de mercancías, entre otros.

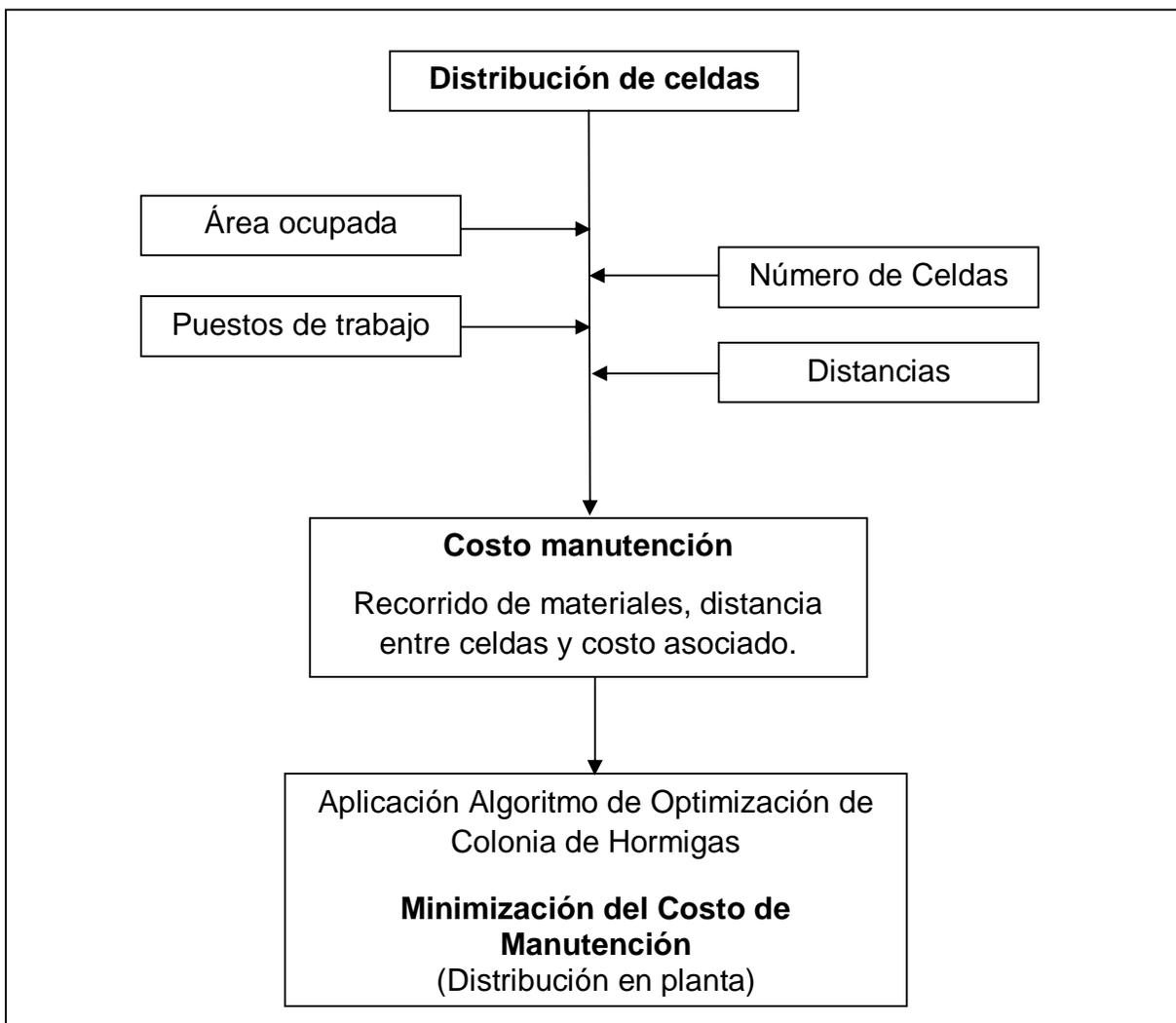


Figura 3.1. Modelo propuesto para la determinación de la distribución en planta.

3.2. Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormiga

El algoritmo de optimización de colonia de hormiga se aplica tanto en la etapa de rediseño como en la de diseño, siempre y cuando se tengan los datos necesarios para aplicarlo, tales como; el área de los puestos de trabajo, tiempo y distancia de recorridos, entre otros, y con ello obtener el costo generado por el transporte de materiales, pudiendo con ello tomar mejores decisiones para la distribución en planta.

Una de las principales consideraciones en el actual trabajo es la redundancia existente de los espacios en el sistema productivo, para lo cual, según Contreras (2010), Tam (1992), Santamarina (1995) y, Diego y Más (2006), se deberá utilizar un sistema para la consideración del criterio geométrico o espacial, criterio que considera de forma implícita, las dimensiones de la maquinaria e instalaciones y operarios.

3.2.1. Función Objetivo

Según Cobo y Serrano (2005), el primer problema que se plantea a la hora de diseñar el algoritmo OCH para el problema de distribución en planta es el tratamiento de las restricciones. El algoritmo no garantiza la factibilidad de todas las soluciones obtenidas, pero haciendo uso de una estrategia de penalización se consigue reducir notablemente la presencia de soluciones irrealizables en la población final.

Ahora bien, en el caso de una distribución en planta orientada a una fabricación multi-producto, establecer el costo total del flujo de materiales o del personal entre las diferentes secciones se expresa por la ecuación 3.1.

$$CT \text{ (mín)} = \sum_{i=1}^m \sum_{j=i}^m t_{ij} d_{ij} c_{ij} \quad (3.1)$$

Donde:

m = número de actividades.

t_{ij} = número de cargas o personas a trasladarse durante un período de tiempo.

d_{ij} = distancia manhattan entre los centros de gravedad de las actividades.

c_{ij} = costo de traslado.

Observando la función objetivo se aprecia que tiene una formulación meramente cuantitativa, ya que se basa en el costo asociado al transporte. También hay que destacar que la función no contempla el potencial de adyacencia (representa la potencialidad de dos actividades a mantener frontera común para múltiples distribuciones en un mismo árbol de cortes), esto es debido a que en este caso el área de las actividades no está limitada por el área de las celdas y no existirá ningún incumplimiento por restricciones geométricas de redundancia. Para el caso del problema de distribución en planta del departamento 541 el costo de traslado de los materialistas es unitario por lo que la función objetivo queda expresada por la ecuación 3.2.

$$CT(mín) = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m t_{ij} d_{ij} \quad (3.2)$$

3.2.2. Representación de las Soluciones del Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas

En Cobo y Serrano (2005) se dice que cada posible solución del problema se entiende como una permutación del número de secciones a ubicar, y como tal, representada como un vector de n componentes enteras, donde $P(i) = j$ significa que la sección S_i será situada en el área A_j .

3.2.3. Información Heurística y Rastros de Feromona

Como dicen Cobo y Serrano (2005), cada una de las m hormigas artificiales del algoritmo construirá una posible solución del problema realizando asignaciones parciales de secciones a áreas de la planta. La información que se usará para decidir si debe realizar o no una asignación parcial son los datos sobre distancias entre áreas y flujos entre secciones (información heurística) e información sobre la calidad

de las soluciones previamente obtenidas en las que se realizó dicha asignación (rastreo de feromona). Esta información será almacenada en matrices cuadradas de dimensión n .

La matriz con la información heurística del problema se expresa mediante la ecuación 3.3.

$$n = (n_{ij}) \quad (3.3)$$

Donde:

n_{ij} = medida de calidad de asignación parcial de la sección S_i al área A_j .

3.2.4. Construcción de una Solución por una Hormiga

Para comenzar, se escoge una sección y área de inicio en donde cada hormiga elige de forma aleatoria el orden en el que las n secciones serán establecidas considerando una regla probabilística para decidir el área a asignar a cada sección (Cobo y Serrano, 2005). La probabilidad con la que la hormiga k decidirá localizar la sección S_i en el área A_j está dada por la ecuación 3.4.

$$P_{ij}^k = \begin{cases} \frac{(\tau_{ij})^\alpha (n_{ij})^\beta}{\sum_{q \in N_k} (\tau_{iq})^\alpha (n_{iq})^\beta} & \text{Si } j \in N_k \\ 0 & \text{Si } j \notin N_k \end{cases} \quad (3.4)$$

Donde:

N_k = conjunto de índice de áreas que la hormiga k aún no ha visitado.

α, β = parámetros que determinan la influencia relativa del rastreo de feromona y la información heurística, respectivamente.

τ_{ij} = feromona de la sección S_i al área A_j .

n_{ij} = información heurística de la sección S_i al área A_j .

En la ecuación 3.4 se tiene que, si los valores de los parámetros τ_{ij} y n_{ij} entre un área y una sección son mayores que el valor de los mismos parámetros entre esa misma área y las demás secciones, mayor será su probabilidad de transición, es decir, la probabilidad de transición es directamente proporcional al valor de los parámetros τ_{ij} y n_{ij} .

También se debe de tener la precaución de seleccionar adecuadamente los valores de α y β ya que controlan el camino de las soluciones que se van obteniendo, por ejemplo, el valor de $\alpha > 1$ ocasiona que no exista una búsqueda de soluciones adecuada y a la vez se mantiene la misma solución.

Después de realizar todas las iteraciones de las m hormigas, se mide la calidad de cada solución sumando los costos que genera cada una basándose en la matriz n_{ij} , posteriormente se encuentra el aporte de cada solución con el inverso de cada uno de los costos. Ya obtenidos los costos y los aportes asociados a cada solución se actualiza la feromona, mediante la ecuación 3.5.

$$\tau_{ij}(t) = (1 - \rho) * \tau_{ij}(t - 1) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (3.5)$$

Donde:

τ_{ij} = valor del rastro de feromona de la sección S_i al área A_j .

ρ = parámetro que indica la evaporación de la feromona.

t = número de corrida.

$\Delta\tau_{ij}^k$ = valor del aporte en donde la hormiga k se asigne de la sección S_i al área A_j , en forma directa, inversa o para completar el ciclo.

Con la actualización de la feromona se obtiene una nueva matriz de feromona, lo que hace que no se use el mismo valor de feromona para todas las probabilidades de asignación y, siempre se lleva a cabo al final de cada iteración, logrando también que cada matriz de feromona sea distinta para cada una de las iteraciones.

3.3. Algoritmo Sistema de Hormiga Mín-Máx

El algoritmo sistema de hormigas Mín-Máx (Min-Max Ant System) es una extensión del algoritmo sistema de hormigas con una mayor explotación de las mejores soluciones, un mecanismo adicional para evitar el estancamiento de la búsqueda, y con un procedimiento rápido y sencillo, por lo que se utilizará en el presente trabajo para tener una solución base y comparativa con las soluciones del algoritmo de optimización de colonia de hormigas.

3.4. Uso del Paquete Computacional Excel 2007

Todos los cálculos en este trabajo se van a realizar en Excel 2007, debido a la poca cantidad de celdas de manufactura que constituyen al departamento 541 y a la dificultad de encontrar un paquete computacional especializado en el algoritmo de optimización de colonia de hormigas que estuviera hecho en el sistema operativo de Windows.

3.5. Uso de ProModel 4.22

Según García et. al. (2006) ProModel es uno de los paquetes computacionales para simulación más usados en el mercado. Tiene herramientas de análisis y diseño que, unidas a la animación de los modelos bajo estudio, permiten conocer mejor el problema y alcanzar resultados más confiables respecto de las decisiones a tomar. Sirve para simular procesos de fabricación de uno o varios productos, líneas de ensamble y de transformación, entre otros. Además, cuenta con una serie de módulos que permiten hacer un estudio más completo sobre el modelo que se simula.

Para este trabajo se utilizará ProModel 4.22 para simular el flujo de materiales de los materialistas del departamento 541, durante 16 horas (correspondientes a un día normal de trabajo en Master Lock) tanto en la distribución en planta actual como en la propuesta. Además, se analizará y comparará el comportamiento de éstos con las estadísticas de los resultados y con ello determinar cuál distribución en planta es mejor.

4. APLICACIÓN DE LA METODOLOGÍA

En este capítulo se explica el cómo y el porqué de cada uno de los datos recolectados, la implementación del algoritmo de optimización de colonia de hormigas en la generación de propuestas de la distribución en planta. El algoritmo sistema de hormiga Mín-Máx y, la simulación de la distribución en planta actual y la propuesta por el algoritmo de optimización de colonia de hormigas, realizada con el paquete computacional ProModel 4.22.

4.1. Algoritmo Sistema de Hormiga Mín-Máx

Primeramente, para tener una solución base o bien de comparación con el resultado del algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas se aplicará el algoritmo Sistema de Hormiga Mín-Máx, en donde para poder empezar es necesario construir la matriz de información heurística.

Para la construcción de la matriz de información heurística de este trabajo es necesario medir la distancia que existe desde cada una de las áreas a las otras y contabilizar las veces en que cada materialista de cada celda (sección) se dirige a las otras secciones por materia prima en un plazo de 16 horas, o bien, dos turnos de trabajo. La distancia (en metros) que se utiliza es la Manhattan ya que es la que más se adecúa al presente trabajo.

Las Tablas 4.1 y 4.2 muestran las matrices correspondientes a las distancias y al flujo de materiales, respectivamente.

Matriz de Distancias

DISTANCIAS (metros)							\sum Distancias
De/a	A1	A2	A3	A4	A5	A6	
A1	0	44.6	40.6	28.7	40.8	33.4	188.1
A2	44.6	0	10.6	12.8	11.5	19.4	98.9
A3	40.6	10.6	0	11.5	1.5	12.3	76.5
A4	28.7	12.8	11.5	0	11.7	4.9	69.6
A5	40.8	11.5	1.5	11.7	0	11.2	76.7
A6	33.4	19.4	12.3	4.9	11.2	0	81.2

Tabla 4.1. Matriz de distancias (en metros).

Flujos (materiales, hombres, idas)

FLUJOS (idas de materialista de sección a las otras secciones en 16 horas)							\sum Flujos
De/a	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	
S ₁	0	3	1	3	6	3	16
S ₂	1	0	17	3	1	2	24
S ₃	3	13	0	15	1	3	35
S ₄	11	4	2	0	9	2	28
S ₅	7	5	5	12	0	17	46
S ₆	1	18	2	1	1	0	23

Tabla 4.2. Matriz de flujo de materiales.

Luego de construir las matrices de distancias y flujos se construye una última columna en cada una de las matrices con la sumatoria de cada renglón, es decir, la distancia total de cada área a las demás y el flujo total en 16 horas del materialista de cada una de las celdas. Ya con ello, la columna de las sumatorias de la matriz de distancias se multiplica por la transpuesta de la columna de las sumatorias de la matriz de flujos consiguiendo como resultado la matriz de información heurística, la cual se muestra en la Tabla 4.3.

η_{ij}						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A1	3009.6	4514.4	6583.5	5266.8	8652.6	4326.3
A2	1582.4	2373.6	3461.5	2769.2	4549.4	2274.7
A3	1224	1836	2677.5	2142	3519	1759.5
A4	1113.6	1670.4	2436	1948.8	3201.6	1600.8
A5	1227.2	1840.8	2684.5	2147.6	3528.2	1764.1
A6	1299.2	1948.8	2842	2273.6	3735.2	1867.6

Tabla 4.3. Matriz de información heurística.

Ésta última Matriz es la que se utiliza para el empleo del algoritmo de sistema de hormiga Mín-Máx, teniendo como primer paso obtener la sumatoria de cada renglón en una última columna, el segundo paso es encontrar el valor mínimo de dicha columna y localizar el máximo valor de la matriz que se encuentre en ese renglón, seleccionando ese valor y eliminando su columna y renglón para la siguiente elección, el caso mencionado se muestra en la Tabla 4.4.

3010	4514	6584	5267	8653	4326	32353
1582	2374	3462	2769	4549	2275	17011
1224	1836	2678	2142	3519	1760	13158
1114	1670	2436	1949	3202	1601	11971
1227	1841	2685	2148	3528	1764	13192
1299	1949	2842	2274	3735	1868	13966

Tabla 4.4. Segunda operación en el Algoritmo Mín-Máx.

Para el siguiente movimiento se tiene una matriz más pequeña de orden $(n-1) \times (n-1)$ y el procedimiento para la selección del valor será el mismo, es decir, se escoge el mínimo valor de la columna de sumatorias y el máximo valor que se encuentre en ese renglón, seleccionando dicho valor y eliminando el renglón y columna del mismo, este procedimiento se realiza hasta que no quede nada que eliminar o escoger. Para el caso, la matriz de información heurística con toda la selección de valores queda plasmada en la Tabla 4.5.

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆	
A1	3009.6	4514.4	6583.5	5266.8	8652.6	4326.3	32353
A2	1582.4	2373.6	3461.5	2769.2	4549.4	2274.7	17011
A3	1224	1836	2677.5	2142	3519	1759.5	13158
A4	1113.6	1670.4	2436	1948.8	3201.6	1600.8	11971
A5	1227.2	1840.8	2684.5	2147.6	3528.2	1764.1	13192
A6	1299.2	1948.8	2842	2273.6	3735.2	1867.6	13966
	1.1	2.6	3.3	4.5	5.4	6.2	

Tabla 4.5. Solución con el algoritmo de sistema de hormiga Mín-Máx.

La selección de cada uno de los valores implica que la sección que indica se ubicará en el área indicada, es decir, el primer valor de 3009.6 significa que la sección 1 se ubicará en el área 1, luego, el valor de 1948.8 implica que la sección 2 se ubicará en el área 6, y así sucesivamente con cada uno de los valores, dichos cambios son indicados en el último renglón de la matriz.

Los cambios que sugiere el algoritmo de sistema de hormiga Mín-Máx es en realidad la distribución propuesta por el mismo, la cual se debe de comparar con la distribución actual para saber cuál de las dos es mejor. Ahora bien, la manera de realizar la comparación es calculando el costo total asociado a cada distribución, este costo se obtiene a partir de la propia matriz de información heurística. En la distribución actual se tiene que la sección 1 se encuentra en el área 1, la sección 2 en el área 2 y así sucesivamente, se observa que el costo total es la suma de los valores de la diagonal principal de la matriz de información heurística, como se muestra en la Tabla 4.6.

	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆
A1	3009.6	4514.4	6583.5	5266.8	8652.6	4326.3
A2	1582.4	2373.6	3461.5	2769.2	4549.4	2274.7
A3	1224	1836	2677.5	2142	3519	1759.5
A4	1113.6	1670.4	2436	1948.8	3201.6	1600.8
A5	1227.2	1840.8	2684.5	2147.6	3528.2	1764.1
A6	1299.2	1948.8	2842	2273.6	3735.2	1867.6
	1.1	2.2	3.3	4.4	5.5	6.6

Tabla 4.6. Costo total de la distribución en planta actual.

Los costos totales de cada distribución en planta se muestran en la Tabla 4.7.

Distribución en planta	Costos generados por la ubicación de las secciones						Costo total (pesos)	Solución
Actual	3009.6	2373.6	2677.5	1948.8	3528.2	1867.6	15405	123456
Propuesta	3009.6	1948.8	2677.5	2147.6	3201.6	2274.7	15260	163542

Tabla 4.7. Costo total de la distribución en planta actual y de la propuesta.

Con base en los resultados se observa claramente que la distribución en planta propuesta por el algoritmo sistema hormiga Mín-Máx es mejor que la distribución en planta actual, pero es preciso verificar si la solución encontrada es realmente la mejor y si además es factible para el caso.

En la columna de solución de la Tabla 4.7 cada dígito que se tiene representa la celda o sección a ubicar y la posición simboliza el área a ocupar, es decir, en la distribución propuesta se tiene que la sección 1 se ubica en el área 1, después se tiene que la sección 6 se ubica en el área 2 y así sucesivamente hasta obtener la nueva distribución en planta.

4.1.1. Restricciones de Ubicación de las Secciones

Al analizar la distribución en planta del departamento 541 y cada una de las áreas y celdas de manufactura se tiene solo una restricción, la cual consiste en que la celda 4 y 5 permanezcan juntas ya que comparten un transportador, esto significa que en los únicos lugares en donde se pueden colocar las celdas mencionadas son en las áreas 2 y 3, o bien, 4 y 5, sin importar el orden de las mismas. Es de suma importancia comentar que las celdas de manufactura dentro de los algoritmos de sistema de hormiga Mín-Máx y optimización de colonia de hormigas se manejan con el nombre de “sección”, ya que son las celdas de manufactura las que se cambiarán de su posición inicial hacia otras áreas. Con el criterio anterior se tiene que la solución 123546 es factible, en donde las secciones 4 y 5 se encuentran juntas y en las áreas 4 y 5 aunque en orden diferente y, un ejemplo de solución infactible es 123465 o 451236, en el primer caso las secciones 4 y 5 están separadas y en el segundo no se encuentran en las áreas 2 y 3 o 4 y 5.

4.2. Aplicación del Algoritmo de Optimización de Colonia de Hormigas

Para empezar a trabajar con el algoritmo de optimización de colonia de hormigas se tiene que retomar la matriz de información heurística que se utilizó en el algoritmo sistema de hormiga Mín-Máx, además, es necesario proporcionarle valores a los parámetros que se utilizan en la fórmula de probabilidad de transición y para la evaporación de la feromona, los cuales son: α , β , τ y ρ .

Para el caso en estudio y basándose en la literatura revisada, los valores de los parámetros que se recomiendan son:

$$\alpha = 0.5 \qquad \beta = 0.5 \qquad \tau = 2 \qquad \rho = 0.5$$

Antes de continuar, es fundamental recalcar la cantidad de soluciones que se obtienen a partir del problema de distribución en planta del departamento 541.

Anteriormente se mencionó que cada solución se interpreta como una permutación del número de secciones y como el departamento cuenta con 6 celdas se tiene la ecuación 4.1.

$$6 \text{ celdas} = 6! = 720 \text{ soluciones} \quad (4.1)$$

Esta cantidad de soluciones son sin considerar las restricciones del problema en particular.

Retomando el algoritmo de optimización de colonia de hormigas, ya elegidos los valores de los parámetros se sigue con colocar a cada una de las secciones en el área inicial, es decir, se coloca la sección 1 en el área 1 y se prosigue a encontrar la probabilidad de transición para la siguiente área, cuando se terminen todas las asignaciones, la segunda iteración empieza con la ubicación de la sección 2 en el área 1 y después la sección 3 en el área 1 y así sucesivamente con todas las secciones.

Para la primera iteración la sección 1 inicia en el área 1, la probabilidad de transición para que la sección 2 se ubique en el área 2, se utiliza la ecuación 3.4 de la página 55, como se muestra a continuación.

$$P_{12}^1 = \frac{(\tau_{12})^{0.5}(n_{12})^{0.5}}{(\tau_{12})^{0.5}(n_{12})^{0.5} + (\tau_{13})^{0.5}(n_{13})^{0.5} + (\tau_{14})^{0.5}(n_{14})^{0.5} + (\tau_{15})^{0.5}(n_{15})^{0.5} + (\tau_{16})^{0.5}(n_{16})^{0.5}} \quad (4.2)$$

$$P_{12}^1 = \frac{2^{0.5} * 4514.4^{0.5}}{(2^{0.5} * 4514.4^{0.5}) + (2^{0.5} * 6583.5^{0.5}) + (2^{0.5} * 5266.8^{0.5}) + (2^{0.5} * 8652.6^{0.5}) + (2^{0.5} * 436.3^{0.5})}$$

$$P_{12}^1 = \frac{95.02}{536.97} = 0.1769 \cong \mathbf{0.177}$$

De las operaciones se tiene que: el valor de 4514.4 proviene de la matriz de información heurística por la relación del área 1 y sección 2, es decir, como ya se tiene la sección seleccionada para el área 1, se debe de escoger la siguiente sección para el área que sigue, o sea, el área 2, esta relación es con todas las asignaciones posibles (2, 3, 4, 5 y 6) con sus respectivas probabilidades de transición. Ya obtenidas todas las probabilidades de transición se crea otra matriz con las probabilidades de transición acumuladas, obteniendo con ello un intervalo de valores para cada una de las secciones, luego se genera un valor aleatorio proveniente de una distribución uniforme continua, después se opta por el intervalo de la matriz de probabilidades de transición acumulada en donde se encuentre dicho valor, por ejemplo, el primer valor aleatorio es de 0.720 y dicho valor se encuentra en el intervalo de 0.582 a 0.827 que pertenece a la sección 5, por lo que se escoge la sección 5 para ubicarse en el área 2, después se vuelven a calcular las probabilidades de transición, pero en este caso como ya se seleccionó la sección 5 ahora su probabilidad de transición es 0, de la misma manera se deducen los valores de la matriz de probabilidad de transición acumulada y posteriormente se obtiene otro valor aleatorio para de ahí realizar la selección de sección y seguir con el mismo procedimiento hasta que se terminen de hacer todas las asignaciones de secciones a áreas, todos los cálculos anteriores se muestran en la Tabla 4.8.

Hormiga 1 parte de 1							Matriz Probabilidad Acumulada					Aleatorio
1	----	0.177	0.214	0.191	0.245	0.173	0.177	0.391	0.582	0.827	1.0	0.720
5	----	0.234	0.283	0.253		0.229	0.234	0.517	0.771	0.771	1.0	0.952
6	----	0.304	0.367	0.329				0.304	0.671	1.0		0.346
3	----	0.481		0.519					0.481	1.0		0.550
4	----	1.000								1.0		
Hormiga 2 parte de 1							Matriz Probabilidad Acumulada					Aleatorio
2	0.149	----	0.221	0.198	0.253	0.179	0.149	0.370	0.568	0.821	1.0	0.364
3	0.192	----		0.254	0.325	0.230		0.192	0.445	0.770	1.0	0.214
4	0.257	----			0.435	0.308			0.257	0.692	1.0	0.151
1		----			0.586	0.414				0.586	1.0	0.783
6		----			1.000						1.0	
Hormiga 3 parte de 1							Matriz Probabilidad Acumulada					Aleatorio
3	0.155	0.190	----	0.205	0.263	0.186	0.155	0.345	0.551	0.814	1.0	0.132
1		0.225	----	0.243	0.312	0.220		0.225	0.468	0.780	1.0	0.955
6		0.289	----	0.312	0.400				0.289	0.600	1.0	0.460
4		0.419	----		0.581					0.419	1.0	0.319
2			----		1.000						1.0	
Hormiga 4 parte de 1							Matriz Probabilidad Acumulada					Aleatorio
4	0.152	0.186	0.224	----	0.257	0.182	0.152	0.337	0.561	0.818	1.0	0.709
5	0.204	0.250	0.302	----		0.245		0.204	0.454	0.755	1.0	0.951
6	0.270	0.331	0.399	----					0.270	0.601	1.0	0.951
3	0.449	0.551		----						0.449	1.0	0.961
2	1.000			----							1.0	
Hormiga 5 parte de 1							Matriz Probabilidad Acumulada					Aleatorio
5	0.161	0.197	0.238	0.212	----	0.193	0.161	0.357	0.595	0.807	1.0	0.753
4	0.204	0.250	0.302		----	0.245		0.204	0.454	0.755	1.0	0.646
3	0.292	0.358			----	0.350			0.292	0.650	1.0	0.208
1		0.505			----	0.495				0.505	1.0	0.460
2					----	1.000					1.0	
Hormiga 6 parte de 1							Matriz Probabilidad Acumulada					Aleatorio
6	0.149	0.182	0.220	0.197	0.252	----	0.149	0.331	0.551	0.748	1.0	0.335
3	0.191	0.234		0.252	0.323	----		0.191	0.424	0.677	1.0	0.558
4	0.255	0.312			0.433	----			0.255	0.567	1.0	0.558
2	0.371				0.629	----				0.371	1.0	0.801
5	1.000				----						1.0	

Tabla 4.8. Cálculos en la primera corrida con OCH.

Una vez calculadas todas las probabilidades de transición y obtenidas todas las asignaciones, se procede a encontrar los costos asociados con cada una de las soluciones, este paso se realiza utilizando la matriz de información heurística. En cada solución se tiene una secuencia de valores, estos valores en sí indican la sección asignada y el puesto o lugar que ocupan representa el área en la que fueron asignadas, por ejemplo, en la primera solución (156342) se tiene que la sección 1 se encuentra en el área 1, la sección 5 en el área 2, la sección 6 en el área 3, la sección 3 en el área 4, la sección 4 en el área 5 y la sección 2 en el área 6, ahora, para calcular el costo total que la solución genera se utiliza la ecuación 4.3.

$$C(S_1) = \eta_{11} + \eta_{52} + \eta_{63} + \eta_{34} + \eta_{45} + \eta_{26} \quad (4.3)$$

Sustituyendo los valores de la matriz de información heurística que se muestran en la Tabla 4.9 en la ecuación anterior,

η_{ij}						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A1	3010	4514	6584	5267	8653	4326
A2	1582	2374	3462	2769	4549	2275
A3	1224	1836	2678	2142	3519	1760
A4	1114	1670	2436	1949	3202	1601
A5	1227	1841	2685	2148	3528	1764
A6	1299	1949	2842	2274	3735	1868

Tabla 4.9. Selección de los costos de asignación de la primera solución.

se tiene que:

$$C(S_1) = 3010 + 4549 + 1760 + 2436 + 2148 + 1949 = \$ 15,851$$

La solución anterior no es factible pero es importante calcular el costo total asociado a la misma.

Después de calcular los costos totales asociados de cada solución se valora el aporte de cada solución mediante la ecuación 4.4.

$$Aporte = \frac{1}{C(S_k)} \quad (4.4)$$

Tanto las soluciones, como sus costos totales y sus aportes respectivos, se muestran en la Tabla 4.10.

Hormiga	C(S _k)	Aporte	Solución
1	15851	0.0630879	156342
2	16731	0.05977001	234165
3	17450	0.05730593	316425
4	17152	0.05830326	456321
5	18921	0.05285049	543126
6	16428	0.06087316	634251

Tabla 4.10. Costos totales y aportes de las primeras seis soluciones de la primera corrida.

Para la segunda iteración se utiliza la ecuación 4.5 para actualizar la matriz de feromona:

$$\tau_{ij}(t) = (1 - \rho) * \tau_{ij}(t - 1) + \sum_{k=1}^m \Delta\tau_{ij}^k \quad (4.5)$$

Donde:

$$\Delta\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{1}{C(S_k)}, & \text{si la hormiga } k \text{ ha visitado la sección } S_i \text{ y la sección } S_j \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Para la actualización de la feromona se tiene que:

$$\tau_{12}(2) = (1 - 0.5) * 2 + 0.063 + 0.0583 + 0.0528 = 1.174$$

Los valores de 0.063, 0.0583 y 0.0528 se refieren a los aportes brindados por las soluciones 1, 4 y 5, en donde se observa la relación de 1 y 2. Las soluciones que se obtienen se consideran cíclicas pues de la sección final se regresa a la de inicio, por eso, a pesar de que en la primera solución no se encuentran juntas las secciones 1 y 2, se considera dicho aporte.

Ya realizado todas las operaciones en cada una de las asignaciones se obtiene la matriz de feromona actualizada, la cual se muestra en la Tabla 4.11.

0	1.174	1.110	1.118	1.124	1.178
1.174	0	1.118	1.181	1.178	1.053
1.110	1.118	0	1.237	1.057	1.182
1.118	1.181	1.237	0	1.111	1.057
1.124	1.178	1.057	1.111	0	1.234
1.178	1.053	1.182	1.057	1.234	0

Tabla 4.11. Matriz de feromona actualizada para la segunda corrida de la primera combinación.

Esta nueva matriz de feromona se utiliza para la siguiente iteración, en donde obviamente las feromonas que se manejan son diferentes para cada asignación. Es decir, para la segunda corrida y de ahí en adelante el procedimiento es el siguiente:

- Se coloca la primera sección (hormiga) en la primera área.
- Se calculan las probabilidades de transición.
- Se obtiene la matriz de probabilidades de transición acumulada.
- Se saca un valor aleatorio con origen de una distribución uniforme continua.
- Se selecciona la sección en donde se encuentre el valor aleatorio.
- Se continúa el mismo procedimiento hasta obtener todas las asignaciones.
- Se encuentran los costos totales de cada solución y sus aportes.
- Se actualizan las feromonas.
- Se vuelve a empezar todo el procedimiento para la siguiente corrida.

En la Figura 4.1 se muestran las dos primeras iteraciones de la segunda corrida con todos los cálculos realizados.

τ_{ij}						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A1	0	1.174	1.110	1.118	1.124	1.178
A2	1.174	0	1.118	1.181	1.178	1.053
A3	1.110	1.118	0	1.237	1.057	1.182
A4	1.118	1.181	1.237	0	1.111	1.0573
A5	1.124	1.178	1.057	1.111	0	1.234
A6	1.178	1.053	1.182	1.057	1.234	0

η_{ij}						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A1	3010	4514	6584	5267	8653	4326
A2	1582	2374	3462	2769	4549	2275
A3	1224	1836	2678	2142	3519	1760
A4	1114	1670	2436	1949	3202	1601
A5	1227	1841	2685	2148	3528	1764
A6	1299	1949	2842	2274	3735	1868

Hormiga 1 parte de 1							Matriz Probabilidad Acumulada					Aleatorio
1	----	0.180	0.211	0.189	0.243	0.176	0.180	0.391	0.580	0.824	1.0	0.753
5	----	0.238	0.273	0.250		0.239	0.238	0.511	0.761	0.761	1.0	0.284
3	----	0.318		0.361		0.320		0.680	0.680	1.0		0.057
2	----			0.539		0.461			0.539	1.0		0.296
4	----					1.000				1.0		

Hormiga 2 parte de 1							Matriz Probabilidad Acumulada					Aleatorio
2	0.151	----	0.219	0.201	0.257	0.172	0.151	0.370	0.571	0.828	1.0	0.986
6	0.183	----	0.271	0.229	0.317			0.183	0.454	0.683	1.0	0.364
3	0.247	----		0.345	0.408				0.247	0.592	1.0	0.166
1		----		0.438	0.562					0.438	1.0	0.588
5		----			1						1.0	

Figura 4.1. Primeras 2 iteraciones de la segunda corrida de la primera combinación.

Anteriormente se mencionó que todas las posibles soluciones para la distribución en planta del departamento 541 son 720, sin considerar restricción alguna, el número de soluciones factibles, tomando en cuenta dicha restricción se reduce a 96, según la ecuación 4.6.

$$4! \times 4 = 24 \times 4 = 96 \tag{4.6}$$

Para este problema se realizan 40 corridas para poder tener un margen considerable de soluciones. Además, para analizar la importancia de los valores que se asignan a los parámetros α , β , τ y ρ en la implementación del algoritmo de optimización de colonia de hormigas se realizan dos combinaciones más, con 40 corridas cada una y con diferentes valores de éstos, las cuales son:

Segunda combinación de parámetros: $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$, $\tau = 0.001$ y $\rho = 0.05$.

Tercera combinación de parámetros: $\alpha = 0.5$, $\beta = 0.5$, $\tau = 0.1$ y $\rho = 0.9$.

4.3. Simulación en ProModel 4.22

Para tener un mejor análisis de la mayor eficiencia de la distribución en planta propuesta por el algoritmo de optimización de colonia de hormigas que la distribución en planta actual es preciso realizar una simulación.

4.3.1. Distribución en Planta Actual

En este apartado se describe a detalle la situación actual de la empresa con respecto a la distribución en planta del departamento 541 y la dinámica del flujo de materiales y las características del mismo.

Los materialistas pueden llegar al centro de cada celda si es necesario, pero en todos los casos el materialista debe dejar el material en lugares específicos de cada celda, los cuales se encuentran en alguna de las esquinas del área ocupada por la misma.

En la Figura 4.2 se muestra la distribución en planta actual de la empresa de Master Lock, la cual incluye almacén de materia prima, área de producción y almacén de producto terminado. El departamento 541 se encuentra en la parte inferior central (indicado por los rectángulos de color azul), los cuales muestran las 6 celdas de manufactura pertenecientes a dicho departamento. Todas las Figuras de la distribución en planta de la empresa tienen las medidas a una escala de 1:1000 en centímetros de las dimensiones reales de la empresa.

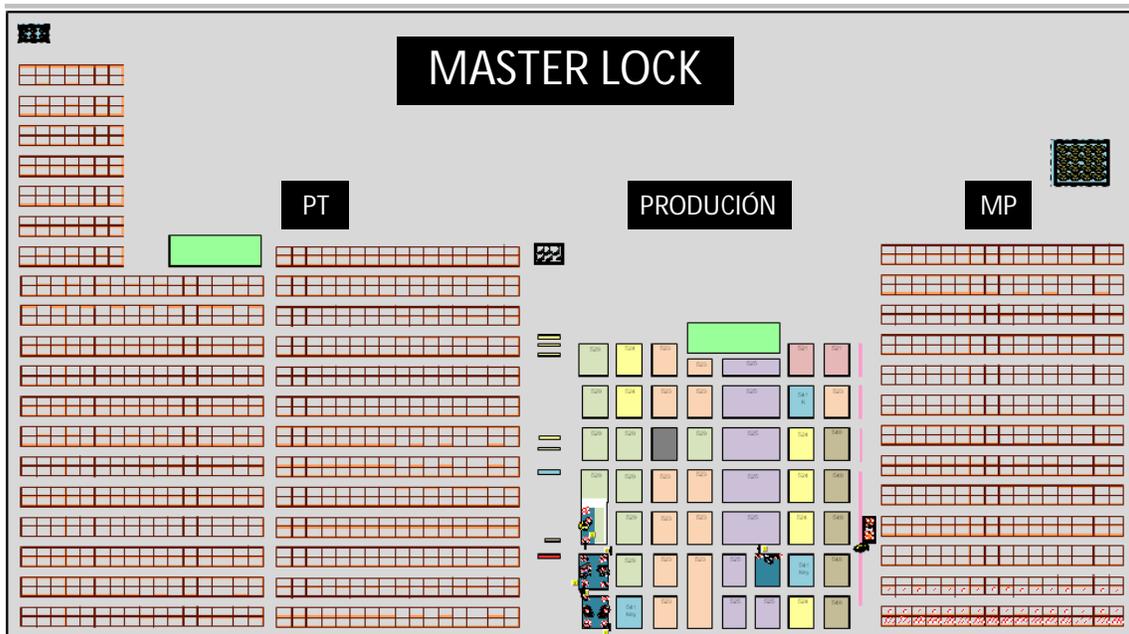


Figura 4.2. Área de producción, materia prima y producto terminado de Master Lock.

En la Figura 4.3 aparece con mayor detalle el departamento 541, donde se observan con claridad las 6 celdas de manufactura (indicadas por un recuadro amarillo con el número de la celda de manufactura) en sus 6 respectivas áreas. Cabe hacer notar que las áreas 2, 3, y 4, 5, se encuentran juntas, además, en cada una de las 6 celdas de manufactura se tiene una tarima vacía y otra llena, lo que indica el flujo del producto, empezando en la tarima vacía y terminando en la llena. El materialista deja los componentes en la tarima vacía.

También es posible distinguir que existen diferentes máquinas, las cuales sólo reflejan las diferentes celdas de manufactura, ya que cada una cuenta con alrededor de 5 ó 6 trabajadores y el proceso real no implica el uso de alguna máquina pesada. Por último, el número y color de cada uno de los rectángulos significa el departamento al que pertenece cada una de las celdas.



Figura 4.3. Departamento 541 y celdas de manufactura vecinas.

En la Figura 4.4 se observa la ruta (línea verde) del carrito, el cual avanza suministrando a las celdas de manufactura, tardando aproximadamente 30 minutos en recorrer todo el camino, y vuelve a empezar. Su ubicación de partida, es en donde se ve situado dicho carrito, ahí existe un depósito temporal en donde se va dejando el material que el carrito tiene que suministrar. Dicha ruta no es la que en realidad transita el carrito, solo es un ejemplo para ver el movimiento del mismo en la simulación.

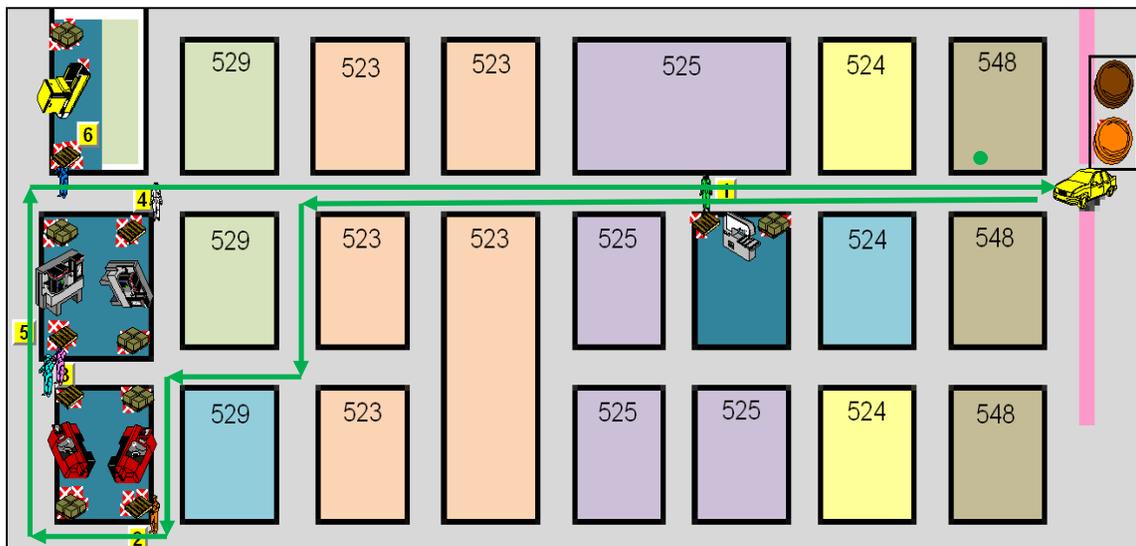


Figura 4.4. Ruta del carrito de Master Lock.

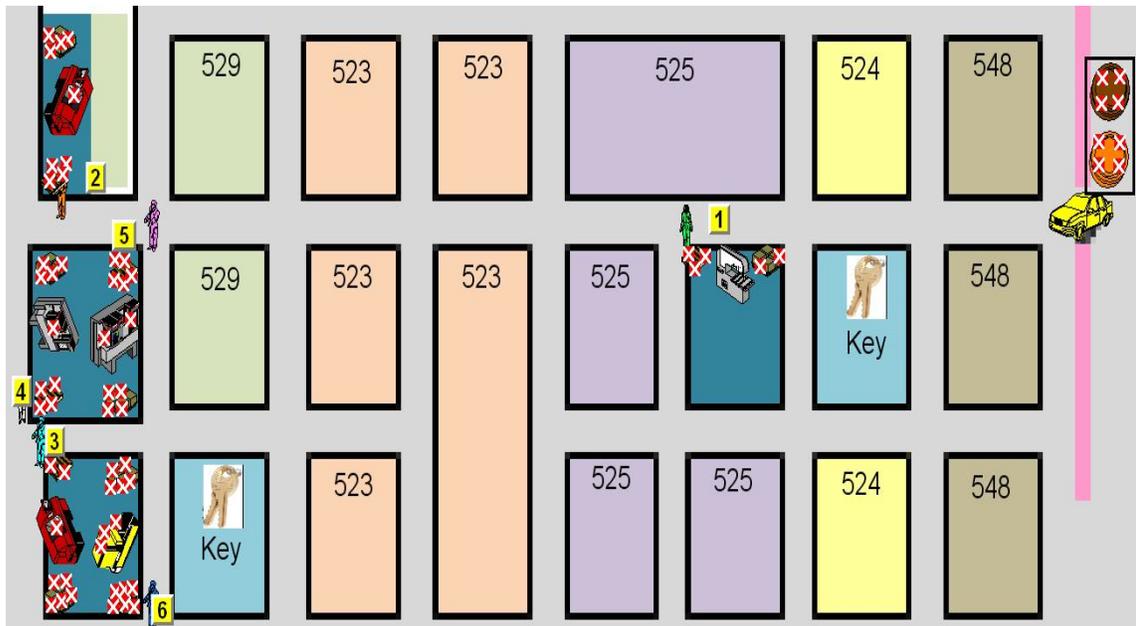


Figura 4.6. Imagen instantánea de simulación de la distribución en planta propuesta.

Una vez realizada la simulación es primordial analizar los resultados que el paquete computacional genera al final de la misma. Cabe mencionar que dicho análisis es sólo con respecto a los materialistas, ya que es en donde se enfoca el problema de distribución en planta para este caso.

Como información agregada, en el capítulo 8 de anexos se muestra una parte de la programación de la simulación de la distribución en planta actual.

5. RESULTADOS

En esta sección se muestran y se analizan los resultados obtenidos con la implementación del algoritmo sistema de hormiga Mín-Máx, con el algoritmo de optimización de colonia de hormigas y de la comparación de la distribución en planta actual y la propuesta a través de la simulación en ProModel 4.22.

5.1. Resultados obtenidos con el algoritmo de optimización de colonia de hormigas

Con las tres combinaciones, en donde cada una consta de 40 corridas y cada corrida de 6 iteraciones se tiene un total de 720 soluciones, de las cuales algunas son repetidas y las soluciones factibles que arroja cada combinación se muestran en la Figura 5.1.

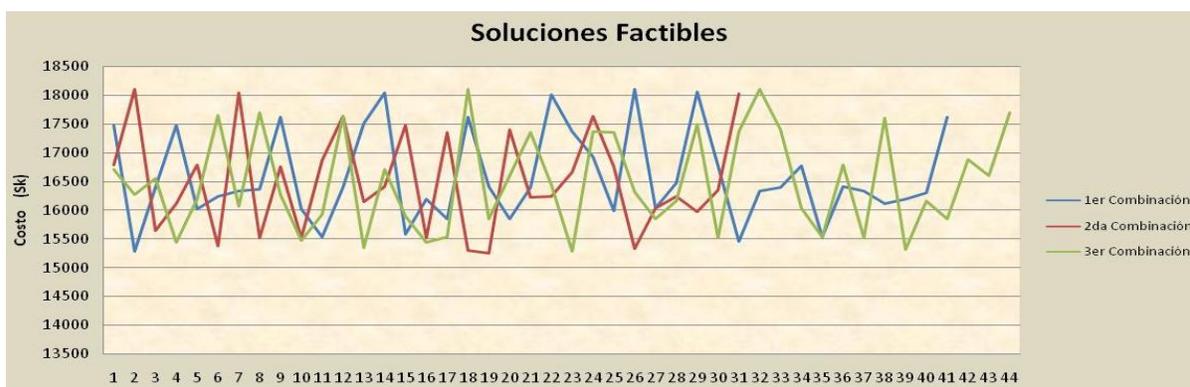


Figura 5.1. Soluciones factibles de las tres combinaciones.

Con base en la Figura 5.1 se aprecia que la mayor cantidad de soluciones factibles se encuentran en la primera y tercera combinación de parámetros, sin embargo, en un segundo análisis de resultados se tiene que la mejor solución que se adquirió con el algoritmo de optimización de colonia de hormigas se ubica en la segunda combinación. Dicho resultado es exactamente el mismo que el obtenido con el algoritmo sistema de hormiga Mín-Máx. Lo que respalda su posición de mejor

resultado para minimizar el costo asociado respecto a la distribución en planta enfocado a las distancias totales recorridas por los materialistas de cada una de las celdas.

Para tener una mejor perspectiva de los resultados obtenidos por cada combinación, en la Figura 5.2 se muestran los cinco mejores resultados de cada combinación y los valores respectivos de sus parámetros. Además, en el capítulo 8 de anexos se muestran los resultados de cada una de las iteraciones de la primera y segunda corrida de la segunda y tercera combinación, y también todos los resultados obtenidos con las 120 corridas.

		1er Combinación				2da Combinación				3er Combinación	
Parámetros		Solución	Costo	Parámetros		Solución	Costo	Parámetros		Solución	Costo
alfa	0.5	123546	15277.5	alfa	0.5	163542	15259.8	alfa	0.5	123546	15277.5
beta	0.5	145326	15442.2	beta	0.5	162543	15311.5	beta	0.5	162543	15311.5
τ_0	2	136542	15528.6	τ_0	0.001	126543	15333.9	τ_0	0.1	126543	15333.9
ρ	0.5	145632	15531.9	ρ	0.05	163452	15387.6	ρ	0.9	162453	15439.3
		145263	15574.3			145236	15520.3			145326	15442.2

Figura 5.2. Las mejores 5 soluciones de cada combinación.

Analizando la Figura 5.2 se tiene que la mejor solución generada por el algoritmo de optimización de colonia de hormigas es 163542 con un costo de \$15,259.8, implicando que solo se realicen los siguientes cambios de la distribución en planta actual: se conmutan las secciones 2-6 y 4-5.

En la Figura 5.3 se muestran todos los resultados factibles logrados por cada una de las combinaciones en orden ascendente, destacando con mucho énfasis que la segunda combinación mantiene un porcentaje mayor de soluciones factibles no repetidas.

	1er	2da	3er
1	123546	126543	123546
2	136542	136452	126453
3	145263	136542	126543
4	145326	145236	132546
5	145632	145236	145236
6	154263	154263	145236
7	154326	162543	145326
8	154326	163452	145632
9	236541	163542	154236
10	236541	213456	154326
11	236541	216543	154326
12	245316	231546	154326
13	245316	254136	162453
14	245361	254631	162543
15	245613	254631	231456
16	245631	263451	254136
17	254163	263451	254361
18	261453	312456	254361
19	263541	321546	254631
20	326541	345216	321546
21	345261	345216	326451
22	345621	354162	326541
23	345621	354216	326541
24	354126	354621	345126
25	354216	362451	345126
26	354261	623451	345216
27	354612	645213	345261
28	361452	645312	345612
29	362451	654132	354126
30	362451	654213	354162
31	613452	654231	362541
32	613452		362541
33	623541		612453
34	632451		613542
35	632451		623451
36	645132		623451
37	645312		623541
38	645321		631452
39	645321		631542
40	654132		645231
41	654132		645231
42			645321
43			654321
44			654321

Figura 5.3. Soluciones de las tres combinaciones.

Aparte de considerar el costo total calculado con la matriz de información heurística se debe de recordar que en realidad el problema va dirigido a minimizar la función objetivo planteado por la ecuación 3.2.

Por lo tanto, es necesario calcular los costos de cada solución obtenida mediante la ecuación 3.2. Suponiendo un comportamiento similar en todas las soluciones, sólo se calculan los costos de las mejores dos soluciones de cada combinación de parámetros generados por el algoritmo de optimización de colonia de hormigas, teniendo lo siguiente:

- Para los dos mejores resultados de la primera combinación:

$$1. -CT (\text{mín}) = (40.6 * 3) + (10.6 * 17) + (1.5 * 1) + (11.7 * 12) + (4.9 * 2) + (33.4 * 1) = \$ 487$$

$$2. -CT (\text{mín}) = (28.7 * 3) + (11.7 * 9) + (1.5 * 5) + (10.6 * 13) + (19.4 * 2) + (33.4 * 1) = \$ 408.9$$

- Para los dos mejores resultados de la segunda combinación:

$$1. -CT (\text{mín}) = (33.4 * 3) + (12.3 * 2) + (1.5 * 1) + (11.7 * 12) + (12.8 * 4) + (44.6 * 1) = \$ 362.5$$

$$2. -CT (\text{mín}) = (33.4 * 3) + (19.4 * 18) + (11.5 * 1) + (11.7 * 2) + (11.5 * 2) + (40.6 * 3) = \$ 746.1$$

- Para los dos mejores resultados de la tercera combinación:

$$1. -CT (\text{mín}) = (44.6 * 3) + (10.6 * 17) + (1.5 * 1) + (11.7 * 12) + (4.9 * 2) + (33.4 * 1) = \$ 487$$

$$2. -CT (\text{mín}) = (33.4 * 3) + (19.4 * 18) + (11.5 * 1) + (11.7 * 2) + (11.5 * 2) + (40.6 * 3) = \$ 746.1$$

Si se analizan los seis resultados, se observa que el menor costo total es obtenido por el mejor resultado de la segunda combinación, es decir, el mismo que tiene el menor costo total conseguido utilizando la matriz de información heurística, con lo que se comprueba y reafirma como la mejor solución posible del problema considerando la restricción del caso.

Los datos obtenidos con respecto al número de soluciones factibles en cada una de las 40 corridas de cada una de las 3 combinaciones se muestran en la Figura 5.4.

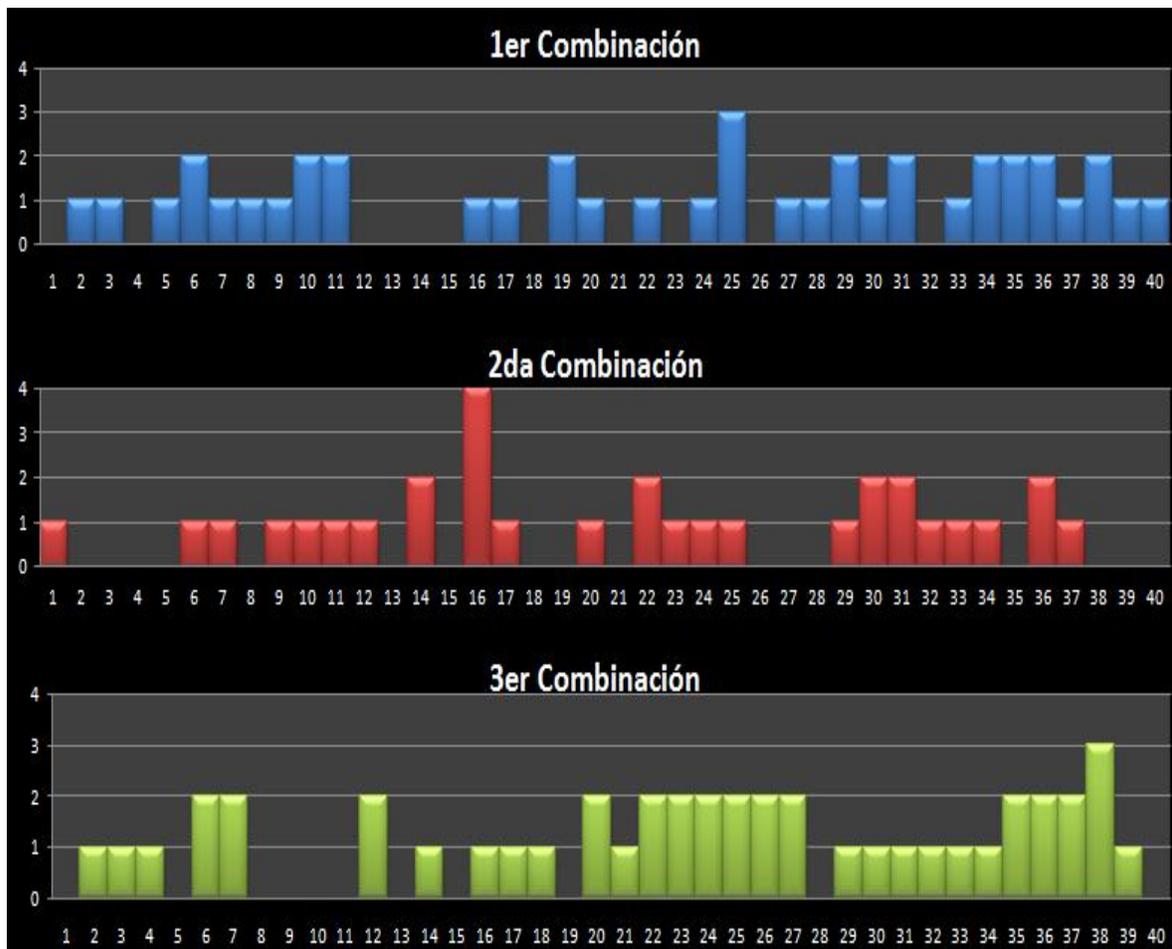


Figura 5.4. Gráficas del número de soluciones en las 40 corridas de cada combinación.

5.2. Resultados Obtenidos con la Simulación en ProModel 4.22

Los resultados de la simulación de la distribución en planta actual y propuesta se muestran en las Figuras 5.5 y 5.6, respectivamente.

Resource Name	Units	Scheduled Hours	Number Of Times Used	Average Minutes Per Usage	Average Minutes Travel To Use	Average Minutes Travel To Park	% Blocked In Travel	% Util
Carrito	1	16	30	5.10	14.68	14.30	0.00	61.85
Materialista1	1	16	16	8.12	6.77	0.00	0.00	24.83
Materialista2	1	16	24	3.06	2.55	0.00	0.00	14.05
Materialista3	1	16	35	3.10	2.58	0.00	0.00	20.75
Materialista4	1	16	28	3.93	3.27	0.00	0.00	21.04
Materialista5	1	16	46	3.17	2.64	0.00	0.00	27.85
Materialista6	1	16	23	4.04	3.36	0.00	0.00	17.76

Resource Name	Scheduled Hours	% In Use	% Travel To Use	% Travel To Park	% Idle	% Down
Carrito	16	15.95	45.90	1.49	36.66	0.00
Materialista1	16	13.54	11.28	0.00	75.17	0.00
Materialista2	16	7.66	6.38	0.00	85.95	0.00
Materialista3	16	11.32	9.43	0.00	79.25	0.00
Materialista4	16	11.47	9.56	0.00	78.96	0.00
Materialista5	16	15.19	12.66	0.00	72.15	0.00
Materialista6	16	9.69	8.07	0.00	82.24	0.00

Figura 5.5. Imagen de los resultados arrojados de la distribución en planta actual por ProModel 4.22.

Resource Name	Units	Scheduled Hours	Number Of Times Used	Average Minutes Per Usage	Average Minutes Travel To Use	Average Minutes Travel To Park	% Blocked In Travel	% Util
Carrito	1	16	30	5.10	14.68	14.30	0.00	61.85
Materialista1	1	16	16	7.44	6.20	0.00	0.00	22.73
Materialista2	1	16	24	2.45	2.04	0.00	0.00	11.24
Materialista3	1	16	35	1.91	1.59	0.00	0.00	12.80
Materialista4	1	16	28	4.72	3.93	0.00	0.00	25.27
Materialista5	1	16	46	3.12	2.60	0.00	0.00	27.43
Materialista6	1	16	23	4.26	3.55	0.00	0.00	18.73

Resource Name	Scheduled Hours	% In Use	% Travel To Use	% Travel To Park	% Idle	% Down
Carrito	16	15.95	45.90	1.49	36.66	0.00
Materialista1	16	12.40	10.33	0.00	77.27	0.00
Materialista2	16	6.13	5.11	0.00	88.76	0.00
Materialista3	16	6.98	5.82	0.00	87.20	0.00
Materialista4	16	13.78	11.49	0.00	74.73	0.00
Materialista5	16	14.96	12.47	0.00	72.57	0.00
Materialista6	16	10.22	8.52	0.00	81.27	0.00

Figura 5.6. Imagen de los resultados arrojados de la distribución en planta propuesta por ProModel 4.22.

Así como los costos totales asociados a cada solución arrojados tanto por la matriz de información heurística como por la función objetivo, en los resultados brindados por la simulación se tiene nuevamente que la mejor opción para la distribución en planta es la obtenida con el algoritmo sistema de hormiga Mín-Máx y con el algoritmo de optimización de colonia de hormigas, ya que la mayoría de los materialistas tienen más tiempo libre, esto se aprecia en cada uno de los valores en las columnas de minutos promedio de uso, minutos promedio de viaje, porcentaje útil, porcentaje de uso, porcentaje destinado a viaje y tiempo ocioso. Todo esto es debido a que recorren menor distancia y por lo tanto tardan menos tiempo en ir y regresar con el material requerido, lo que ocasiona a su vez que sea menor la probabilidad de que las celdas de manufactura se detengan por falta de material.

6. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y OBSERVACIONES

Con base en los resultados obtenidos en este trabajo, se determina lo siguiente.

6.1. Conclusiones

Al comprobar a través de la simulación con ProModel 4.22 que la distribución en planta que se obtuvo con la aplicación del algoritmo de optimización de colonia de hormigas en el departamento 541 de la empresa Master Lock es mejor que la distribución en planta actual, se cumple con el objetivo planteado en el presente trabajo. La implementación de la nueva distribución en planta en la empresa Master Lock generará mayor rendimiento, más tiempo de descanso y menos distancia de recorrido para los materialistas, lo anterior permitirá eficientar el flujo de materiales implicando que la hipótesis planteada es aceptable.

La implementación de la nueva distribución en planta en la empresa Master Lock, es decir, cambiar la celda 2 al área 6, cambiar la celda 6 al área 2 y hacer un cambio de posición entre la celda 4 y 5, le proporcionaría un ahorro \$145.00 diarios y además minimizaría el tiempo ocioso de los materialistas. Cabe resaltar que el ahorro aumentaría proporcionalmente con los días y se incrementaría éste al aplicar el algoritmo OCH a toda la empresa.

Al implementar el algoritmo de optimización de colonia de hormigas en un problema NP-duro es muy importante la selección de los valores de los parámetros α , β , τ y ρ , y la cantidad adecuada de corridas como se prueba en el presente trabajo.

Además, en este trabajo se observó que la segunda combinación generó menos resultados factibles y proporcionó las dos mejores soluciones, aunque en las otras dos combinaciones se obtuvieron más soluciones factibles.

El algoritmo de optimización de colonia de hormigas permite encontrar buenos resultados sin tener que realizar los cálculos de todas las posibles soluciones (permutaciones) de un problema planteado. La cantidad de soluciones obtenidas tiene que ser acorde a la situación, puesto que no se hacen suposiciones de que tan eficientes son éstas.

6.2. Recomendaciones

Dentro del mismo problema abarcado en este trabajo, se recomienda utilizar un paquete computacional especializado en la implementación del algoritmo de optimización de colonia de hormigas, para así comparar los resultados obtenidos por Excel y por el paquete computacional. Además, se recomienda automatizar la implementación del algoritmo de optimización de colonia de hormigas dentro de Excel, para que los resultados sean más rápidos y sin fallas que retarden la obtención de soluciones.

Al igual que en la implementación del algoritmo de optimización de colonia de hormigas, se sugiere emplear otro paquete computacional para la simulación de la distribución en planta actual y la propuesta, en donde se obtengan más características de los materialistas, y así, realizar una mejor comparación entre éstas.

Efectuar un profundo análisis del impacto de cada uno de los parámetros utilizados en el algoritmo de optimización de colonia de hormigas, para determinar el valor de cada uno de ellos que más convenga emplear para la obtención de mejores resultados.

Que la empresa Master Lock aplique el algoritmo de optimización de colonia de hormigas a toda la empresa para obtener mayores beneficios.

Aplicar el algoritmo de optimización de colonia de hormigas en otras áreas y problemas, a la vez de agregar más variables o tener diferentes objetivos. También, combinar dicho algoritmo con otra u otras metodologías compatibles y analizar los resultados obtenidos.

6.3. Observaciones

En toda la literatura a la que se recurrió, no se encontró un sólo documento en donde se implementara el algoritmo de optimización de colonia de hormigas con diferentes parámetros. Tampoco se coincidió con el uso de Excel para la implementación del algoritmo, por lo que este trabajo es el primero en hacer ambos.

Los beneficios que se obtuvieron al comparar los resultados de la simulación de la distribución en planta actual y la propuesta, es un indicio de todos los beneficios que proporcionaría a la empresa Master Lock, tanto en el área de producción como en los almacenes de materia prima y producto terminado.

7. BIBLIOGRAFÍA

Almirón, M. y Barán, B., 2001. Sistema paralelo de hormigas. Jornadas de telecomunicaciones. Congreso internacional de tecnología y aplicaciones informáticas, JIT-CITA 2001. Paraguay, pp. 1-12.

Almirón, M., Chaparro, E. y Barán, B., 1999. Sistema distribuido de hormigas para el problema del cajero viajante. XXV Conferencia Latinoamericana de Informática, CLEI'99. Paraguay, pp. 1-11.

Alonso, S., Cordón, O., Fernández de Viana, I. y Herrera, F., 2003. Análisis de distintas vertientes para la paralelización de los algoritmos de optimización basada en colonias de hormigas. Actas del II Congreso español sobre metaheurísticas, algoritmos evolutivos y bioinspirados. Departamento de ciencias de la computación e inteligencia artificial. Granada, pp. 160-167

Alonso, S., Cordón, O., Fernández de Viana, I. y Herrera, F., 2004. La metaheurística de optimización basada en colonias de hormigas: modelos y nuevos enfoques. Optimización inteligente: técnicas de inteligencia computacional para optimización. ISBN 84-9747-034-6, pp. 263-272.

Balseiro, S., Loiseau, I., y Ramonet, J., 2010. Un algoritmo de colonia de hormigas para el problema de ruteo de vehículos con dependencia temporal y ventanas de tiempo. Revista de la escuela de Perfeccionamiento en Investigación Operativa, número 31. Argentina, pp. 33-56.

Barán, B., y Almirón, M., 2002. Colonia de hormigas en un ambiente paralelo asíncrono. XXVIII Conferencia Latinoamericana de Informática CLEI. Uruguay, pp. 1-11.

Barán, B., y Chaparro, E., 1997. Algoritmos genéticos asíncronos combinados para una red heterogénea de computadoras. Centro Nacional de Computación Universidad Nacional de Asunción Campus Universitario. Casilla de correos 1439, pp. 1-10.

Barcos, L., Rodríguez, M., y Álvarez, M., 2002. Algoritmo basado en la optimización mediante colonias de hormigas para la resolución del problema del transporte de carga desde varios orígenes a varios destinos. Actas del V Congreso de Ingeniería del Transporte, 2, pp. 709-717.

Bautista, J. y Pereira, J. 2005. Algoritmos de hormigas para un problema de equilibrado de líneas de montaje con restricciones temporales y especiales. Actas del IV Congreso Español sobre Metaheurística, Algoritmos Evolutivos y Bioinspirados, MAEB, pp. 289-296.

Bueno G., Arjona E. y Arjona A., 2004. Algoritmos computacionales para animación de modelos de simulación industriales. Comunicaciones en Socioeconomía, Estadística e Informática, Vol.8, pp. 91-110.

Buor G., Henríquez F., Baesler F. y Ramírez M., 2001. Optimización en simulación vía inteligencia artificial: Aplicación a un problema de manejo de materiales. Universidad del Bío-Bío. Theoria, Vol.10, pp. 27-30.

Cabrera M., 2009. Propuesta de manual de prácticas de simulación de sistemas discretos con promodel, para el desarrollo de ejercicios aplicados en diferentes asignaturas de la carrera de ingeniería industrial en la Pontificia Universidad Javeriana. Tesis que para obtener el título de Ingeniero industrial. Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. Bogotá D.C. pp. 75-121.

Canivell J., 1988. Generación automática de distribuciones en planta: Parte 1 y 2. Revista internacional de métodos numéricos para cálculo y diseño en ingeniería. Vol. 4, 1, 1-30. pp. 16-19.

Cano, J., 2006. Modelos y algoritmos de secuenciación en líneas de ensamble de productos mixtos. Tesis para optar el título de doctor. Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya, pp.1-15.

Capriles, P., Goliatt L., Barbosa H. y Lemonge A., 2005. Ant colony algorithms applied to discrete optimization problems. XXVIII Congress Nacional de Matemática Aplicada e Computacional (CNMAC), pp. 3-6.

Carvalho E. y Vieira A., 1999. Evolucao das Técnicas de Simulacao. Escola de Engenharia de Sao Carlos. Departamento de Eng. Mecânica. Producao, Vol.9, pp.15-20.

Casillas, J., Cerdón, O., Herrera, F. y Villar, P., 2003. Aprendizaje híbrido de la base de conocimiento de un sistema basado en reglas difusas mediante algoritmos genéticos y colonia de hormigas. XII Congreso español sobre tecnologías y lógica fuzzy. España, pp. 357-362.

Centeno, M. y Salazar, H., 2008. Algoritmo para el 4AP haciendo uso de la metaheurística sistema hormiga. Revista Ingeniería Industrial, ISSN-e 0718-8307, No.3. Venezuela, pp. 73-84.

Chicano, F. y Alba, E., 2009. Búsqueda de errores en programas usando java pathfinder y acohg. VI Congreso español sobre metaheurísticas, algoritmos evolutivos y bioinspirados. Málaga, pp. 285-292.

Cobo, A. y Serrano, A. M., 2005. Un algoritmo híbrido basado en colonias de hormigas para la resolución de problemas de distribución en planta orientados a procesos. Universidad de Cantabria, pp.1-18.

Contreras, R., 2010. Modelo de optimización en la generación de plantas industriales, considerando las actividades de mantenimiento y las condiciones ambientales mediante el uso de la metodología de los algoritmos genéticos. Tesis para optar el título de doctor. Valencia. Universidad Politécnica de Valencia.

Cordón, O., 2003. Algoritmos de optimización basado en colonias de hormigas. Departamento ciencias de la computación e inteligencia artificial. Universidad de Granada. Granada, pp 1-41.

Cordón, O., Herrera, F., y Stützle, T., 2002. A review on the ant colony optimization metaheuristic: basis, models and new trend. *Mathware&Soft Computing*, pp.18.

Cordón O., Moya F. y Zarco M., 1999. Breve estudio sobre la aplicación de los algoritmos genéticos a la recuperación de información. Cuarto congreso ISKO-España (Eoconsid IV), Granada, pp. 179-186.

Cortés P., 2007. Distribución en planta: Layout. Grupo de ingeniería de organización. Universidad de Sevilla, pp. 5-7.

Cruz, H., y Viteri, B., 2007. Optimización de problemas combinatorios y multiobjetivo utilizando el método de colonia de hormigas (OCH). Proyecto previo a la obtención del título de ingeniero en electrónica y control. Escuela Politécnica Nacional. Ecuador, pp. 18-108.

De la Fuente, D., Pino, R. y Parreño, F., 1995. Formación de celdas trabajo-máquina en tecnología de grupos mediante redes neuronales artificiales. *Investigaciones europeas de dirección y economía de la empresa*, pp.51-68

Di Caro, G. y Dorigo, M., 1998. Ant Net: Distributed stigmergetic control for communications networks. IRIDIA, Université Libre de Bruxelles. *Journal of Artificial Intelligence Research* 9, pp. 317-365.

Dominguez C., López M., Martínez G., Reyes B y Vázquez M., 2008. Simulación digital. Monografía. Tecnológico de estudios superiores de Jocotitlan, pp.10-23

Dorigo, M., Birattari, M. y Stützle, T., 2006. Ant colony optimization artificial ants as a computational intelligence technique. IRIDIA Technical Report Series, Université Libre de Bruxelles, pp. 1-2.

Dorigo, M. y Stützle, T., 2006. The ant colony optimization metaheuristic: Algorithms, applications, and advances. Technical Report IRIDIA-2000-32, Université Libre de Bruxelles, pp. 2-21.

Dorzán, M., Gagliardi, E., Leguizamón, M. y Taranilla, M., 2009. Algoritmos ACO aplicados a problemas geométricos de optimización. Proyecto UPM AL09-PAC-12 y Proyecto Tecnologías Avanzadas de Bases de Datos. Universidad Nacional de San Luis, Argentina, pp. 1-2.

Franco, J., Gómez, O. y Gallego, R., 2007. Aplicación de técnicas combinatorial a la solución del sudoku. Scientia Et Technica, volumen XIII, número 037. Universidad Tecnológica de Pereira. Colombia, pp. 151-156.

Feitó, C. y Cespón, C., 2009. Selección de rutas de distribución utilizando optimización por colonia de hormigas. Vector, Volumen 4. Universidad Central "Marta Abreu" de las Villas, pp. 59-64.

Fernández B., 2005. Desarrollo de una herramienta informática basada en el algoritmo Corelap para la optimización de distribuciones en planta. Para obtener el título de Ingeniero de Organización Industrial. Universidad de Sevilla. pp. 26-33.

García, E., García, H. y Cárdenas, L., 2006. Simulación y análisis de sistemas con ProModel. Primera Edición. Editorial Pearson Educación. México. pp. 131-219.

Gento, A., Pérez M. y Redondo, A., 2003. Estudio y mejora del flujo de trabajo: Hacia la Lean Production. Valladolid. V Congreso de Ingeniería de Organización, pp. 1-5.

Grabis J. y Chandra C., 2010. Process simulation environment for case studies. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. 978-1-4244-9864-2, pp. 319-323.

Guerrero V. y López-pujalte C., 2001. Inteligencia artificial y documentación. Investigación Bibliotecológica 65-96. Clave A. pp.70.

Gutiérrez J., 2000. Introducción a la inteligencia artificial. Aplicaciones: redes probabilísticas, redes neuronales, algoritmos genéticos. Universidad de Cantabria. Dpto. de Matemática Aplicada y Ciencias de la Computación. pp.15.

Hardy T., 2001. IA: Inteligencia Artificial. Polis, Revista de la Universidad Bolivariana, año/vol.1, número 002. Universidad Bolivariana. Santiago, Chile. pp 5.

Hermosilla, A., y Barán, B., 2004. Comparación de un sistema de colonia de hormigas y una estrategia evolutiva para un problema multiobjetivo de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo. Conferencia Latinoamericana en Informática (CLEI). Perú, pp. 1-10.

Herrera, F., 2007. Soft Computing y Sistemas de Información Inteligentes. Grupo de investigación. Departamento ciencias de la computación e inteligencia artificial, Universidad de Granada, 18071. España, pp. 1-108.

Lezcano, C., Pinto, D. y Barán, B., 2008. Equipos de algoritmos de hormigas. Una nueva propuesta para optimización multiobjetivo. Santa Fe-Argentina. Conferencia Latinoamericana de Informática 2008 (CLEI'08), pp. 1-5.

Llican, C., 2003. Simulación de sistemas, caso servicentro de combustible. Universidad Nacional Mayor de San Carlos. Facultad de Ciencias Matemáticas, EAP. Perú, pp. 1-5.

López, A., 2009. Software para la selección y escalamiento de registros de movimientos sísmicos fuertes basado en el algoritmo de optimización por el algoritmo sistema de hormigas máx.-min. Ponencia concurso de computación. Universidad Central "Marta Abreu" de Las Villas, pp. 14-23.

Luna P., 2005. Proyecto de quesería industrial. Universidad de Castilla la Mancha. Ciudad Real. pp. 5-7.

Martí R., 2003. Procedimientos metaheurísticos en optimización combinatoria. Universidad de Valencia. Departament d'Estadística i Investigació Operativa. Facultat de Matemàtiques. pp. 2-9.

Mateos, A., 2004. Algoritmos evolutivos y algoritmos genéticos. Universidad Carlos III de Madrid. Inteligencia en redes de comunicaciones. Ingeniería de telecomunicación. N.I.A.: 100027597, pp.9-10.

Menéndez, E., (2010). Metaheurística de optimización mediante colonias de hormigas y aplicaciones. Universidad Central de las Villas. España, pp. 1-10.

Muñoz, M., 2005. Asignación dinámica de recursos con técnicas bio inspiradas para un sistema de control de temperatura MIMO. Tesis de grado presentada como requisito parcial para aspirar al título de Ingeniero Electrónico. Universidad del Valle, Facultad de Ingeniería. Santiago de Cali, pp. 1-151.

Muñoz, M., López, J. y Caicedo, E., 2007. Optimización por colonia de hormigas para la asignación dinámica de recursos en una plataforma de experimentación de temperatura multizona. IEEE Latin america transactions, volumen 5, Número 2. Colombia, pp. 1-6.

Muñoz, M., López, J. y Caicedo, E., 2007. Optimización y control usando colonias de hormigas. VII Congreso de la Asociación Colombiana de Automática. Colombia, pp. 1-5.

Peñuela, C., Granada, M. y Gallego, R., 2007. Optimización multiobjetivo usando colonia de hormigas para ubicar condensadores en sistemas de distribución. Colombia. Universidad Tecnológica de Pereira. Scientia Et Technica, pp.1-3.

Pidd M., Robinson S., Davies R., Hoad K. y Cheng R., 2010. PHD training in simulation: Natcor. Proceedings of the 2010 Winter Simulation Conference. 978-1-4244-9864-2, pp. 340-342.

Ramírez R., 2006. Distribución en planta para la apertura de una nueva nave de producción en una litografía. Título que para obtener el grado de Ingeniero industrial. Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de ingeniería. Guatemala. pp. 76-91.

Riojas A., 2005. Conceptos, algoritmo y aplicación al problema de la N-reinas. Monografía que para obtener el título de Licenciada de investigación operativa. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad Ciencias Matemáticas. Lima, Perú. pp. 1-4.

Rojas G., 2005. Distribución de planta para una oficina bancaria por medio de algoritmos genéticos. Título que para obtener el grado de ingeniero industrial. Universidad de los Andes. Departamento de ingeniería industrial. Santafé de Bogotá, D.C. pp. 57-63.

Serrano, A. y Suárez, A., 2004. Análisis y evaluación de los elementos generales de la teoría de manufactura esbelta que pueden generar desarrollo en una empresa del sector de transformación de plásticos. Caso: UPR Ltda. Tesis para optar el título de Ingeniería Industrial. Bogotá. Pontificia Universidad Javeriana, pp. 6-15.

Sprenger, R. y Mönch, L., 2009. An ant colony optimization approach to solve cooperative transportation planning problems. Winter Simulation Conference. Alemania. University of Hagen, pp. 2488-2491.

Stützle, T., y Hoos, H., 2000. Máx-Mín ant system. Elsevier. Future generation computer systems, 16(8): 889-914. Universidad Nacional Mayor de San Marcos. Facultad Ciencias Matemáticas. Lima, Perú. pp. 1-4.

Vergel J., 2009. Propuesta y análisis del diseño y distribución de planta de Alfering Limitada Sede II. Título que para obtener el grado de Ingeniero industrial. Universidad de Magdalena. pp. 13-19.

Villalobos A., Sempere F. y Poler R., 2002. Utilización de la Simulación para el rediseño de la sección de montado y zona de expedición de una PYME (Aux. sector calzado). II Conferencia de Ingeniería de Organización, pp. 2-7.

Yepes, V., 2002. Optimización heurística económica aplicada a las redes de transporte del tipo VRPTW. Tesis para obtener el título de doctor. Departamento de Ingeniería de la construcción y proyectos de Ingeniería Civil, Universidad politécnica de Valencia. España, pp. 14-160.

8. ANEXOS

En este apartado se muestran todas las operaciones, partes o fases que debido a su tamaño no se encuentran en el cuerpo del trabajo. Como son: imágenes de la metodología del algoritmo de optimización de colonia de hormigas, los cálculos hechos en Excel y las instrucciones empleadas para la simulación en ProModel 4.22.

En las Figuras 8.1 y 8.2 se muestran la segunda y tercera corrida de la primera combinación, cada una con sus 6 iteraciones, destacando que son 40 corridas en total, mostrándose solamente una parte de ellas.

τ_{ij}						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A1	0	1.174	1.110	1.118	1.124	1.178
A2	1.174	0	1.118	1.181	1.178	1.053
A3	1.110	1.118	0	1.237	1.057	1.182
A4	1.118	1.181	1.237	0	1.111	1.0573
A5	1.124	1.178	1.057	1.111	0	1.234
A6	1.178	1.053	1.182	1.057	1.234	0

η_{ij}						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A1	3010	4514	6584	5267	8653	4326
A2	1582	2374	3462	2769	4549	2275
A3	1224	1836	2678	2142	3519	1760
A4	1114	1670	2436	1949	3202	1601
A5	1227	1841	2685	2148	3528	1764
A6	1299	1949	2842	2274	3735	1868

alfa	0.5
beta	0.5

Hormiga 1 parte de 1							Matriz Probabilidad Acumulada					Aleatorio
1	---	0.180	0.211	0.189	0.243	0.176	0.180	0.391	0.580	0.824	1.0	0.753
5	---	0.238	0.273	0.250	---	0.239	0.238	0.511	0.761	1.0	0.284	
3	---	0.318	---	0.361	---	0.320	0.318	0.680	1.0	0.057		
2	---	---	0.539	0.461	---	---	---	0.539	1.0	0.296		
4	---	---	---	1.000	---	---	---	---	1.0	---		

Hormiga 2 parte de 1							Matriz Probabilidad Acumulada					Aleatorio
2	0.151	---	0.219	0.201	0.257	0.172	0.151	0.370	0.571	0.828	1.0	0.986
6	0.183	---	0.271	0.229	0.317	---	0.183	0.454	0.683	1.0	0.364	
3	0.247	---	---	0.345	0.408	---	0.247	0.592	1.0	0.166		
1	---	---	---	0.438	0.562	---	---	0.438	1.0	0.588		
5	---	---	---	1.000	---	---	---	---	1.0	---		

Hormiga 3 parte de 1							Matriz Probabilidad Acumulada					Aleatorio
3	0.153	0.189	---	0.214	0.254	0.190	0.153	0.342	0.556	0.810	1.0	0.973
6	0.194	0.225	---	0.244	0.337	---	0.194	0.419	0.756	0.8	0.325	
2	0.248	---	---	0.330	0.422	---	0.248	0.578	1.0	0.455		
4	0.372	---	---	---	0.628	---	---	0.372	1.0	0.781		
5	1.000	---	---	---	---	---	---	---	1.0	---		

Hormiga 4 parte de 1							Matriz Probabilidad Acumulada					Aleatorio
4	0.150	0.189	0.233	---	0.253	0.175	0.150	0.339	0.572	0.825	1.0	0.975
6	0.186	0.215	0.276	---	0.323	---	0.186	0.401	0.677	1.0	0.444	
3	0.257	0.316	---	---	0.426	---	0.257	0.574	1.0	0.959		
5	0.444	0.556	---	---	---	---	---	0.444	1.0	0.928		
2	1.000	---	---	---	---	---	---	---	1.0	---		

Hormiga 5 parte de 1							Matriz Probabilidad Acumulada					Aleatorio
5	0.160	0.200	0.229	0.210	---	0.201	0.160	0.360	0.589	0.799	1.0	0.458
3	0.206	0.253	---	0.287	---	0.254	0.206	0.458	0.746	1.0	0.440	
2	0.289	---	---	0.383	---	0.328	0.289	0.672	1.0	0.938		
6	0.444	---	---	0.556	---	---	---	0.444	1.0	0.729		
4	1.000	---	---	---	---	---	---	---	1.0	---		

Hormiga 6 parte de 1							Matriz Probabilidad Acumulada					Aleatorio
6	0.151	0.175	0.224	0.189	0.262	---	0.151	0.326	0.549	0.738	1.0	0.517
3	0.189	0.233	---	0.264	0.313	---	0.189	0.422	0.687	1.0	0.348	
2	0.248	---	---	0.330	0.422	---	0.248	0.248	1.0	0.028		
1	---	---	---	0.438	0.562	---	---	0.438	1.0	0.185		
4	---	---	---	1.000	---	---	---	---	1.0	---		

Figura 8.1. Imagen de la segunda corrida de la primera combinación.

τ_{ij}						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A1	0	0.708	0.673	0.732	0.796	0.652
A2	0.708	0	0.735	0.772	0.649	0.697
A3	0.673	0.735	0	0.618	0.704	0.830
A4	0.732	0.772	0.618	0	0.734	0.7045
A5	0.796	0.649	0.704	0.734	0	0.6772
A6	0.652	0.697	0.830	0.704	0.677	0

η_{ij}						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A1	3010	4514	6584	5267	8653	4326
A2	1582	2374	3462	2769	4549	2275
A3	1224	1836	2678	2142	3519	1760
A4	1114	1670	2436	1949	3202	1601
A5	1227	1841	2685	2148	3528	1764
A6	1299	1949	2842	2274	3735	1868

alfa	0.5
beta	0.5

Hormiga 1 parte de 1						
1	---	0.176	0.207	0.193	0.258	0.165
2	---		0.264	0.242	0.285	0.209
3	---			0.293	0.400	0.307
5	---			0.535		0.465
4	---				1.000	

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.176	0.383	0.576	0.835	1.0		0.170
	0.264	0.506	0.791	1.0		0.217
		0.293	0.693	1.0		0.644
			0.535	1.0		0.185
				1.0		

Hormiga 2 parte de 1						
2	0.149	---	0.225	0.206	0.242	0.178
4	0.191	---	0.260		0.324	0.225
1		---	0.329		0.409	0.262
6		---	0.491		0.509	
5		---	1.000			

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.149	0.374	0.580	0.822	1.0		0.478
	0.191	0.451	0.775	1.0		0.096
		0.329	0.738	1.0		0.789
			0.491	1.0		0.861
				1.0		

Hormiga 3 parte de 1						
3	0.151	0.193	---	0.192	0.262	0.201
5	0.223	0.247	---	0.283		0.247
6	0.275	0.348	---	0.378		
1		0.476	---	0.524		
4		1.000	---			

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.151	0.345	0.536	0.799	1.0		0.589
	0.223	0.470	0.753	1.0		0.776
		0.275	0.622	1.0		0.075
			0.476	1.0		0.984
				1.0		

Hormiga 4 parte de 1						
4	0.154	0.194	0.209	---	0.262	0.181
6	0.177	0.224	0.295	---	0.305	
2	0.242		0.365	---	0.393	
3	0.366			---	0.634	
5	1.000			---		

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.154	0.348	0.557	0.819	1.0		0.986
	0.177	0.400	0.695	1.0		0.279
		0.242	0.607	1.0		0.302
			0.366	1.0		0.879
				1.0		

Hormiga 5 parte de 1						
5	0.170	0.188	0.237	0.216	---	0.188
3	0.205	0.262		0.260	---	0.273
1		0.329		0.362	---	0.309
2				0.537	---	0.463
6				1.000	---	

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.170	0.359	0.595	0.812	1.0		0.436
	0.205	0.467	0.727	1.0		0.122
		0.329	0.691	1.0		0.260
			0.537	1.0		0.773
				1.0		

Hormiga 6 parte de 1						
6	0.142	0.180	0.237	0.195	0.246	---
4	0.188	0.237	0.256		0.319	---
2	0.242		0.365		0.393	---
5	0.418		0.582			---
1			1.000			---

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.142	0.322	0.559	0.754	1.0		0.616
	0.188	0.425	0.681	1.0		0.293
		0.242	0.607	1.0		0.817
			0.418	1.0		0.078
				1.0		

Figura 8.2. Imagen de la tercera corrida de la primera combinación.

En las Figuras 8.3 y 8.4 se muestran la segunda y tercera corrida de la segunda combinación, cada una con sus 6 iteraciones, destacando que son 40 corridas en total, mostrándose solamente una parte de ellas.

nij						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A1	0	0.060	0.238	0.231	0.057	0.123
A2	0.060	0	0.059	0.121	0.298	0.172
A3	0.238	0.059	0	0.123	0.172	0.116
A4	0.231	0.121	0.123	0	0.060	0.1746
A5	0.057	0.298	0.172	0.060	0	0.1232
A6	0.123	0.172	0.116	0.175	0.123	0

nij						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A1	3010	4514	6584	5267	8653	4326
A2	1582	2374	3462	2769	4549	2275
A3	1224	1836	2678	2142	3519	1760
A4	1114	1670	2436	1949	3202	1601
A5	1227	1841	2685	2148	3528	1764
A6	1299	1949	2842	2274	3735	1868

alfa	0.5
beta	0.5

Hormiga 1 parte de 1						
1	---	0.120	0.291	0.256	0.163	0.170
3	---	0.159		0.248	0.375	0.218
4	---	0.317			0.309	0.374
2	---				0.651	0.349
6	---				1.000	

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.120	0.411	0.668	0.830	1.0		0.377
	0.159	0.407	0.782	1.0		0.213
		0.317	0.626	1.0		0.079
			0.651	1.0		0.744
				1.0		

Hormiga 2 parte de 1						
2	0.098	---	0.145	0.185	0.372	0.200
5	0.149	---	0.384	0.202		0.264
6	0.249	---	0.358	0.393		
3	0.513	---		0.487		
1		---		1.000		

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.098	0.243	0.428	0.800	1.0		0.743
	0.149	0.534	0.736	1.0		0.990
		0.249	0.642	1.0		0.283
			0.513	1.0		0.227
				1.0		

Hormiga 3 parte de 1						
3	0.207	0.126	---	0.196	0.297	0.173
5	0.144	0.405	---	0.196		0.255
6	0.249	0.360	---	0.392		
4	0.531	0.469	---			
1		1.000	---			

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.207	0.333	0.529	0.827	1.0		0.551
	0.144	0.549	0.745	1.0		0.961
		0.249	0.608	1.0		0.625
			0.531	1.0		0.499
				1.0		

Hormiga 4 parte de 1						
4	0.206	0.182	0.222	---	0.177	0.214
2	0.120		0.178	---	0.457	0.245
3	0.305			---	0.439	0.256
5	0.362			---		0.638
6	1.000			---		

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.206	0.387	0.609	0.786	1.0		0.328
	0.120	0.298	0.755	1.0		0.263
		0.305	0.744	1.0		0.682
			0.362	1.0		0.751
				1.0		

Hormiga 5 parte de 1						
5	0.105	0.295	0.271	0.143	---	0.186
6	0.183	0.265	0.263	0.289	---	
2	0.229		0.339	0.432	---	
3	0.513			0.487	---	
4	1.000				---	

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.105	0.401	0.671	0.814	1.0		0.899
	0.183	0.448	0.737	0.7		0.225
		0.229	0.661	1.0		0.240
			0.513	1.0		0.651
				1.0		

Hormiga 6 parte de 1						
6	0.140	0.202	0.201	0.220	0.237	---
4	0.261	0.231	0.282		0.225	---
1		0.210	0.507		0.284	---
3		0.298			0.702	---
5		1.000				---

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.140	0.342	0.543	0.763	1.0		0.641
	0.261	0.493	0.775	1.0		0.127
		0.210	0.716	1.0		0.599
			0.298	1.0		0.521
				1.0		

Figura 8.3. Imagen de la segunda corrida de la segunda combinación.

t _{ij}						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A1	0	0.085	0.304	0.406	0.145	0.122
A2	0.085	0	0.199	0.244	0.270	0.201
A3	0.304	0.199	0	0.179	0.263	0.118
A4	0.406	0.244	0.179	0	0.030	0.2044
A5	0.145	0.270	0.263	0.030	0	0.3541
A6	0.122	0.201	0.118	0.204	0.354	0

n _{ij}						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A1	3010	4514	6584	5267	8653	4326
A2	1582	2374	3462	2769	4549	2275
A3	1224	1836	2678	2142	3519	1760
A4	1114	1670	2436	1949	3202	1601
A5	1227	1841	2685	2148	3528	1764
A6	1299	1949	2842	2274	3735	1868

alfa	0.5
beta	0.5

Hormiga 1 parte de 1						
1	----	0.116	0.265	0.274	0.210	0.136
2	----		0.242	0.239	0.323	0.197
4	----		0.428		0.200	0.371
3	----			0.679	0.321	
5	----				1.000	

Matriz Probabilidad Acumulada						
0.116	0.381	0.654	0.864	1.0		
	0.242	0.481	0.803	1.0		
		0.428	0.629	1.0		
			0.679	1.0		
				1.0		

Aleatorio	
0.051	
0.449	
0.331	
0.312	

Hormiga 2 parte de 1						
2	0.097	----	0.218	0.216	0.291	0.178
5	0.183	----	0.365	0.110		0.343
3	0.362	----		0.367		0.270
6	0.369	----		0.631		
1		----		1.000		

Matriz Probabilidad Acumulada						
0.097	0.315	0.531	0.822	1.0		
	0.183	0.548	0.657	1.0		
		0.362	0.730	1.0		
			0.369	1.0		
				1.0		

Aleatorio	
0.766	
0.344	
0.845	
0.205	

Hormiga 3 parte de 1						
3	0.188	0.186	----	0.190	0.296	0.140
2	0.124		----	0.276	0.373	0.227
6	0.178		----	0.306	0.516	
1			----	0.566	0.434	
4			----		1.000	

Matriz Probabilidad Acumulada						
0.188	0.374	0.564	0.860	1.0		
	0.124	0.400	0.773	1.0		
		0.178	0.484	1.0		
			0.566	1.0		
				1.0		

Aleatorio	
0.283	
0.938	
0.101	
0.198	

Hormiga 4 parte de 1						
4	0.236	0.224	0.231	----	0.108	0.201
3	0.232	0.230		----	0.366	0.173
2	0.171			----	0.515	0.314
5	0.348			----	0.652	
1				----	1.000	

Matriz Probabilidad Acumulada						
0.236	0.460	0.691	0.799	1.0		
	0.232	0.461	0.827	1.0		
		0.171	0.686	1.0		
			0.348	1.0		
				1.0		

Aleatorio	
0.563	
0.307	
0.596	
0.306	

Hormiga 5 parte de 1						
5	0.140	0.234	0.279	0.084	----	0.262
6	0.174	0.274	0.253	0.298	----	
1		0.177	0.404	0.418	----	
3		0.494		0.506	----	
4		1.000			----	

Matriz Probabilidad Acumulada						
0.140	0.374	0.654	0.738	1.0		
	0.174	0.448	0.747	1.0		
		0.177	0.582	1.0		
			0.494	1.0		
				1.0		

Aleatorio	
0.867	
0.020	
0.562	
0.679	

Hormiga 6 parte de 1						
6	0.116	0.182	0.168	0.198	0.335	----
1		0.134	0.306	0.317	0.243	----
4		0.397	0.411		0.192	----
5		0.456	0.544			----
3		1.000				----

Matriz Probabilidad Acumulada						
0.116	0.298	0.467	0.665	1.0		
	0.134	0.440	0.757	1.0		
		0.397	0.808	1.0		
			0.456	1.0		
				1.0		

Aleatorio	
0.072	
0.511	
0.920	
0.951	

Figura 8.4. Imagen de la tercera corrida de la segunda combinación.

En las Figuras 8.5 y 8.6 se muestran la segunda y tercera corrida de la tercera combinación, cada una con sus 6 iteraciones, destacando que son 40 corridas en total, mostrándose solamente una parte de ellas.

t _{ij}						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A1	0	0.195	0.188	0.187	0.127	0.063
A2	0.195	0	0.070	0.010	0.365	0.120
A3	0.188	0.070	0	0.185	0.070	0.247
A4	0.187	0.010	0.185	0	0.124	0.2546
A5	0.127	0.365	0.070	0.124	0	0.0745
A6	0.063	0.120	0.247	0.255	0.075	0

n _{ij}						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A1	3010	4514	6584	5267	8653	4326
A2	1582	2374	3462	2769	4549	2275
A3	1224	1836	2678	2142	3519	1760
A4	1114	1670	2436	1949	3202	1601
A5	1227	1841	2685	2148	3528	1764
A6	1299	1949	2842	2274	3735	1868

alfa	0.5
beta	0.5

Hormiga 1 parte de 1						
1	---	0.203	0.241	0.215	0.227	0.113
3	---	0.167		0.294	0.231	0.308
5	---	0.483		0.304		0.214
2	---			0.241		0.759
4	---					1.000

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.203	0.445	0.660	0.887	1.0		0.244
	0.167	0.461	0.692	1.0		0.623
		0.483	0.786	1.0		0.144
			0.241	1.0		0.192
				1.0		

Hormiga 2 parte de 1						
2	0.184	---	0.163	0.055	0.426	0.173
5	0.232	---	0.253	0.302		0.213
4	0.258	---	0.380			0.362
3	0.421	---				0.579
6	1.000	---				

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.184	0.346	0.401	0.827	1.0		0.743
	0.232	0.485	0.787	1.0		0.655
		0.258	0.638	1.0		0.298
			0.421	1.0		0.712
				1.0		

Hormiga 3 parte de 1						
3	0.183	0.137	---	0.240	0.189	0.252
5	0.189	0.392	---	0.246		0.173
2	0.446		---	0.134		0.420
1			---	0.655		0.345
4			---			1.000

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.183	0.320	0.560	0.748	1.0		0.645
	0.189	0.580	0.827	1.0		0.369
		0.446	0.580	1.0		0.162
			0.655	1.0		0.574
				1.0		

Hormiga 4 parte de 1						
4	0.181	0.051	0.266	---	0.249	0.253
1		0.259	0.307	---	0.289	0.144
3		0.237		---	0.327	0.436
2				---	0.711	0.289
5				---		1.000

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.181	0.232	0.498	0.747	1.0		0.015
	0.259	0.566	0.856	1.0		0.492
		0.237	0.564	1.0		0.049
				1.0		0.315
				1.0		

Hormiga 5 parte de 1						
5	0.156	0.325	0.171	0.204	---	0.144
4	0.241	0.068	0.354		---	0.337
1		0.364	0.433		---	0.203
2			0.485		---	0.515
3					---	1.000

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.156	0.481	0.652	0.856	1.0		0.788
	0.241	0.309	0.663	1.0		0.187
		0.364	0.797	1.0		0.092
			0.485	1.0		0.469
				1.0		

Hormiga 6 parte de 1						
6	0.099	0.167	0.289	0.263	0.182	---
5	0.183	0.379	0.200	0.238		---
2	0.458		0.405	0.137		---
3	0.433			0.567		---
4	1.000					---

Matriz Probabilidad Acumulada						Aleatorio
0.099	0.266	0.555	0.818	1.0		0.953
	0.183	0.562	0.800	1.0		0.538
		0.458	0.863	1.0		0.463
			0.433	1.0		0.540
				1.0		

Figura 8.5. Imagen de la segunda corrida de la tercera combinación.

n _{ij}						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A1	0	0.188	0.143	0.247	0.013	0.190
A2	0.188	0	0.181	0.065	0.336	0.012
A3	0.143	0.181	0	0.139	0.126	0.193
A4	0.247	0.065	0.139	0	0.125	0.2048
A5	0.013	0.336	0.126	0.125	0	0.181
A6	0.190	0.012	0.193	0.205	0.181	0

n _{ij}						
	S1	S2	S3	S4	S5	S6
A1	3010	4514	6584	5267	8653	4326
A2	1582	2374	3462	2769	4549	2275
A3	1224	1836	2678	2142	3519	1760
A4	1114	1670	2436	1949	3202	1601
A5	1227	1841	2685	2148	3528	1764
A6	1299	1949	2842	2274	3735	1868

alfa	0.5
beta	0.5

Hormiga 1 parte de 1						
1	---	0.215	0.227	0.267	0.078	0.212
6	---	0.064	0.309	0.285	0.343	
4	---	0.174	0.377		0.410	
5	---	0.575	0.425			
2	---		1			

Matriz Probabilidad Acumulada						
0.215	0.443	0.710	0.788	1.0		
	0.064	0.348	0.633	1.0		
		0.174	0.551	1.0		
			0.575	1.0		
				1.0		

Aleatorio						
						0.889
						0.551
						0.827
						0.561

Hormiga 2 parte de 1						
2	0.172	---	0.250	0.134	0.391	0.052
6	0.181	---	0.270	0.249	0.300	
1		---	0.397	0.467	0.136	
3		---		0.450	0.550	
5		---			1	

Matriz Probabilidad Acumulada						
0.172	0.423	0.557	0.948	1.0		
	0.181	0.451	0.700	1.0		
		0.397	0.864	1.0		
			0.450	1.0		
				1.0		

Aleatorio						
						0.951
						0.065
						0.315
						0.559

Hormiga 3 parte de 1						
3	0.150	0.207	---	0.195	0.239	0.209
5	0.063	0.394	---	0.260		0.283
6	0.373	0.115	---	0.512		
1		0.446	---	0.554		
2		---			1	

Matriz Probabilidad Acumulada						
0.150	0.357	0.552	0.791	1.0		
	0.063	0.457	0.717	1.0		
		0.373	0.488	1.0		
			0.446	1.0		
				1.0		

Aleatorio						
						0.608
						0.865
						0.198
						0.001

Hormiga 4 parte de 1						
4	0.199	0.125	0.220	---	0.240	0.217
1		0.294	0.310	---	0.106	0.290
3		0.316		---	0.365	0.319
2				---	0.882	0.118
5						1

Matriz Probabilidad Acumulada						
0.199	0.323	0.543	0.783	1.0		
	0.294	0.604	0.710	1.0		
		0.316	0.681	1.0		
			0.882	1.0		
				1.0		

Aleatorio						
						0.062
						0.312
						0.062
						0.075

Hormiga 5 parte de 1						
5	0.048	0.305	0.226	0.201	---	0.219
4	0.261	0.164	0.289		---	0.285
2	0.363		0.527		---	0.110
1			0.517		---	0.483
3					---	1.000

Matriz Probabilidad Acumulada						
0.048	0.354	0.579	0.781	1.0		
	0.261	0.425	0.715	1.0		
		0.363	0.890	1.0		
			0.517	1.0		
				1.0		

Aleatorio						
						0.639
						0.362
						0.288
						0.177

Hormiga 6 parte de 1						
6	0.172	0.053	0.256	0.236	0.284	---
4	0.254	0.159	0.281		0.306	---
5	0.084	0.527	0.390		---	
2	0.408		0.592		---	
3	1				---	

Matriz Probabilidad Acumulada						
0.172	0.225	0.480	0.716	1.0		
	0.254	0.413	0.694	1.0		
		0.527	0.916	1.0		
			0.408	1.0		
				1.0		

Aleatorio						
						0.654
						0.696
						0.586
						0.681

Figura 8.6. Imagen de la tercera corrida de la tercera combinación.

En las Figuras 8.7, 8.8 y 8.9 se muestran las 40 soluciones de cada una de las 3 combinaciones, respectivamente. En donde las soluciones factibles se encuentran sombreadas de color verde.

Corrida	Soluciones	C(\$k)									
1	156342	15851	11	145632	15532	21	146352	15451	31	142356	15447
	234165	16731		236541	16384		253416	16785		245613	16473
	316425	17450		315624	17400		365421	17466		354612	18052
	456321	17152		436512	16865		461523	16650		456321	17152
	543126	18921		524316	18699		526143	18889		546321	18757
634251	16428	653421	16642	652413	16730	643152	16364				
2	153246	15922	12	164352	17825	22	134562	15528	32	123654	15463
	263154	16382		253164	16893		235641	16543		235641	16539
	362451	17470		342156	17698		345261	17605		346512	17490
	463521	16561		435621	16988		432651	16993		453216	17259
	532641	18998		543621	18840		521463	18805		546123	19102
632145	16620	624351	16105	625314	16156	625341	16102				
3	123546	15278	13	126435	15511	23	162534	15280	33	142653	15586
	241653	16479		215346	16067		241563	16315		241563	16315
	356142	18102		316254	17398		312564	17241		352164	18120
	462351	16641		465132	16807		431256	17019		461532	16600
	531264	19046		514326	18521		534216	19021		541632	18880
642513	16202	634251	16428	634215	16563	654132	16765				
4	165423	15435	14	126534	15302	24	163524	15278	34	145326	15442
	264135	16464		231564	16439		241536	16261		245316	16333
	342561	17454		352614	18071		356142	18102		362154	17398
	425361	16659		416325	16621		453216	17259		423651	16746
	523416	18747		541236	18868		563421	18694		564321	18645
652413	16730	651342	16632	632451	16400	615324	15960				
5	132564	15546	15	143625	15633	25	154326	15845	35	134652	15691
	245631	16387		236514	16438		236541	16384		236541	16384
	361524	17398		341562	17491		354261	18009		342516	17485
	461523	16650		436512	16865		421356	16696		432516	16861
	541236	18868		512634	18630		541632	17279		541632	18545
643521	16115	641253	16360	635412	16432	654132	16765				
6	152346	15846	16	163425	15487	26	165342	15336	36	136542	15529
	253416	16785		243561	16226		216435	16225		235641	16543
	362451	17470		361452	17508		352416	18013		324615	17662
	451623	17324		456312	17188		451632	17274		456231	17230
	564312	18681		513426	18570		546123	18978		516324	18545
613452	16012	643251	16271	631425	16537	632451	16400				
7	146325	15550	17	164352	15339	27	124653	15496	37	164253	15467
	241365	16443		236415	16647		246513	16314		261453	16332
	324615	17662		354216	18040		326541	17365		315462	17347
	412536	16439		452361	17152		451632	17274		432651	16993
	523461	18716		564312	18681		534162	19083		513264	18621
645312	16227	643512	16151	635412	16432	624513	16113				
8	135264	15698	18	136425	15755	28	142653	15586	38	156324	15869
	245316	16333		215634	16175		254163	16926		263541	16115
	364512	17378		352416	18013		325146	17605		352416	18013
	413652	16605		452316	17183		425163	16879		451263	17317
	524136	18834		524361	18668		564132	18645		541623	18929
651324	16650	612534	15904	635142	16517	645321	16191				
9	164253	15467	19	145263	15574	29	154263	15978	39	134256	15679
	234561	16383		264315	16330		243561	16226		245361	16302
	341526	17487		364152	17591		354126	18097		365421	17466
	432516	16861		426531	16585		416235	16699		415236	16591
	563421	18694		532146	19079		563241	18722		562314	18700
645132	16361	645321	16191	653412	16678	642531	16117				
10	132564	15546	20	154326	15845	30	156342	15851	40	156432	15901
	265134	16380		256314	16760		251364	16762		264531	16116
	345621	17613		315264	17393		316524	17241		345621	17613
	425361	16659		453261	17227		436125	17177		456213	17315
	564231	18723		534216	19021		563241	18722		512634	18630
613452	16012	652341	16595	623541	16026	652143	16815				

Figura 8.7. Todas las soluciones de la primera combinación.

Corrida	Soluciones	C(\$k)									
1	134256	15679	11	163452	15388	21	152346	15846	31	135624	15705
	254631	16790		256413	16841		235164	16646		243156	16471
	362415	17605		325146	17605		316425	17450		345216	17637
	432561	16829		453621	17235		415632	16602		453126	17316
	526413	18804		531246	19024		561234	18780		543261	18833
625314	16156	642153	16415	624351	16105	654132	16765				
2	134265	15783	12	136254	15703	22	145236	15520	32	126543	15334
	256314	16760		246531	16228		253416	16785		265314	16245
	356412	18017		354216	18040		312456	17347		356124	18120
	423561	16583		436512	16865		425631	16744		421536	16618
	562341	18646		541362	18795		536421	18962		531246	19024
641352	16233	653412	16678	615342	15960	652314	16649				
3	124356	15357	13	143265	15626	23	162543	15312	33	153426	15894
	253614	16843		256314	16760		261435	16382		216543	16048
	326145	17713		314526	17218		341526	17487		324516	17396
	432516	16861		463215	16852		436125	17177		462153	16861
	561342	18684		513246	18598		563142	18815		536241	18991
614532	15886	635421	16396	615243	16088	642531	16117				
4	134652	15691	14	136542	15529	24	163542	15260	34	126534	15302
	215463	16171		235641	16543		243615	16524		263451	16243
	346152	17703		321564	17420		361425	17607		356241	18010
	432651	16993		463152	16810		456231	17230		435162	17074
	534261	18990		526314	18723		543612	18876		512463	18626
651432	16682	654213	16757	614523	15935	652341	16595				
5	142635	15635	15	162345	15439	25	153426	15894	35	153426	15894
	231564	16439		256314	16760		213645	16258		241635	16528
	365241	17494		324561	17364		321546	17398		352641	18017
	431265	17122		431256	17019		421653	16835		452631	17237
	524631	18753		561324	18702		512364	18545		561324	18702
625143	16322	651234	16728	634521	16271	642531	16117				
6	146253	15579	16	145236	15520	26	125364	15376	36	154263	15978
	263415	16378		254136	16872		246153	16527		253416	16785
	354162	18101		345216	17637		364521	17342		346251	17610
	463152	16810		452631	17237		452361	17152		432516	16861
	526341	18669		536142	19084		524631	18842		521346	18701
625341	16102	623451	16154	631254	16484	645213	16354				
7	136452	15656	17	165432	15385	27	162435	15489	37	153246	15922
	264351	16195		231546	16417		261345	16332		256314	16760
	342561	17454		321645	17665		364215	17633		354621	18016
	432561	16829		421356	16696		431256	17019		415326	16513
	543162	18926		542163	18978		531624	19053		532614	19052
652314	16649	653214	16724	615234	16056	625341	16102				
8	156432	15901	18	163245	15515	28	134526	15523	38	146532	15373
	234651	16546		236514	16438		213564	16014		243516	16258
	346512	17490		346521	17454		365214	17548		356241	18010
	426315	16798		421356	16696		415362	16517		426351	16663
	534162	19083		542361	18757		524631	18753		524163	18888
642531	16117	621345	16243	605214	16478	615042	15960				
9	125643	15493	19	123465	15509	29	142356	15447	39	164253	15467
	213456	16119		235416	16539		234516	16414		261354	16251
	351246	18043		314652	17386		326514	17419		325614	17578
	421563	16672		435612	17024		431652	17030		423516	16614
	512436	18572		534216	19021		564312	18681		531624	19053
631524	16328	652314	16649	645312	16227	615423	16059				
10	134652	15691	20	156432	15901	30	143562	15371	40	146235	15628
	254631	16790		214356	16071		263451	16243		234516	16414
	364521	17342		362451	17470		312564	17241		342651	17617
	415326	16513		465132	16807		431562	16867		426531	16585
	542163	18978		534621	18997		541326	18790		514236	18600
643152	16364	652431	16644	654231	16672	653142	16763				

Figura 8.8. Todas las soluciones de la segunda combinación.

Corrida	Soluciones	C(\$k)									
1	125643	15493	11	153264	15945	21	145326	15442	31	143562	15371
	253641	16789		256413	16841		256314	16760		215436	16117
	341526	17487		321564	17420		346125	17802		326541	17365
	463251	16717		435621	16988		415623	16652		435261	16981
	526134	18857		562314	18700		543216	18865		523461	18716
631254	16484	632145	16620	641253	16360	634152	16520				
2	135246	15676	12	123654	15463	22	145632	15532	32	143625	15633
	254361	16705		215643	16206		214635	16259		253461	16753
	352146	18098		345126	17694		354126	18097		354162	18101
	413256	16593		462351	16641		453621	17235		435216	17013
	541236	18868		562143	18867		564321	18645		532641	18998
652341	16595	645231	16269	615342	15960	615432	16682				
3	164523	15311	13	156234	15947	23	154326	15845	33	146523	15423
	261354	16251		214536	15993		235416	16539		236415	16647
	356124	18120		346251	17610		365241	17494		321546	17398
	413256	16593		456321	17152		456321	17152		435261	16981
	542136	18924		513624	18628		521463	18805		543162	18926
645231	16269	612354	15983	654321	16594	651432	16682				
4	124356	15357	14	126453	15462	24	153624	15952	34	143625	15633
	231456	16545		264351	16195		235461	16507		251364	16762
	365421	17466		364251	17498		362541	17343		326154	17632
	436251	16986		463512	16597		451326	17185		451632	17274
	562314	18700		563241	18722		532461	18962		543261	18833
614352	15964	623514	16080	631452	16438	623541	16026				
5	135462	15652	15	134265	15783	25	123546	15278	35	132546	15524
	214536	15993		251364	16762		215463	16171		254631	16790
	341652	17655		364251	17498		326541	17365		341526	17487
	463215	16852		465132	16807		463512	16597		462531	16563
	542316	18789		521463	18805		516234	18623		513264	18621
651243	16760	641532	16154	613524	15902	615234	16056				
6	162453	15439	16	154236	15924	26	162354	15358	36	145236	15520
	256431	16756		241536	16261		253164	16893		251346	16739
	356412	18017		315624	17400		362541	17343		345261	17605
	421653	16835		435621	16988		423156	16827		452136	17318
	562341	18646		524136	18834		521346	18701		541632	18880
645321	16191	623514	16080	631542	16310	635214	16478				
7	135264	15698	17	126534	15302	27	154326	15845	37	162543	15312
	214563	16047		216534	16016		234615	16681		234516	16414
	345612	17649		345216	17637		314625	17485		351426	18014
	431562	16867		423651	16746		465312	16673		452361	17152
	541263	18922		514362	18526		562314	18700		541236	18868
612453	16064	642153	16415	623451	16154	623451	16154				
8	142653	15586	18	126543	15334	28	126354	15381	38	154326	15845
	234615	16681		215634	16175		265431	16241		254136	16872
	356412	18017		356142	18102		324615	17662		365421	17466
	412563	16493		425163	16879		451263	17317		435162	17074
	513246	18598		524361	18668		536412	18998		541326	18790
641235	16410	612534	15904	653412	16678	654321	16594				
9	146523	15423	19	164352	15339	29	125364	15376	39	124356	15357
	246531	16228		256413	16841		216534	16016		215346	16067
	365241	17494		321654	17584		326451	17493		345126	17694
	435621	16988		431625	17129		456213	17315		436215	17121
	534621	18997		531264	19046		546123	18978		543162	18926
632154	16539	631425	16537	632514	16326	615432	16010				
10	123654	15463	20	162534	15280	30	145236	15520	40	156432	15901
	243516	16258		254361	16705		235461	16507		263415	16378
	346512	17490		346512	17490		346251	17610		324561	17364
	432651	16993		452163	17372		425361	16659		435162	17074
	564213	18809		521463	18805		532164	19101		543216	18865
634215	16563	613542	15884	614532	15886	623154	16293				

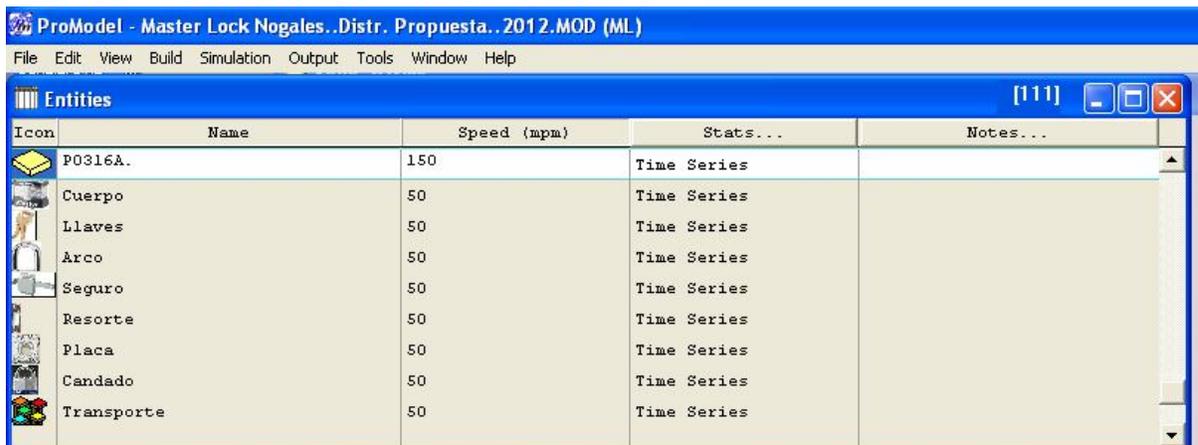
Figura 8.9. Todas las soluciones de la tercera combinación.

En las Figuras 8.10, 8.11, 8.12, 8.13, 8.14 y 8.15 se muestran las operaciones realizadas para la simulación en ProModel 4.22 para la distribución en planta actual, donde el único cambio que existe entre ésta y la distribución en planta propuesta es la ubicación de las secciones (celdas de manufactura) en las áreas.



Icon	Name	Cap.	Units	DTs...	Stats...	Rules...	Notes...
	P0316A	10000	1	None	Time Series: Oldest		
	Maquina1	10000	1	None	Time Series: Oldest		
	MP1	10000	1	None	Time Series: Rand		
	PT1	10000	1	None	Time Series: Oldest		
	MP3	10000	1	None	Time Series: Rand		
	MP2	10000	1	None	Time Series: Rand		
	PT2	10000	1	None	Time Series: Oldest		
	PT3	10000	1	None	Time Series: Oldest		
	Maquina2	10000	1	None	Time Series: Oldest		
	Maquina3	10000	1	None	Time Series: Oldest		
	Maquina5	10000	1	None	Time Series: Oldest		
	MP4	1000	1	None	Time Series: Oldest		
	PT4	10000	1	None	Time Series: Oldest		
	MP5	10000	1	None	Time Series: Oldest		
	PT5	10000	1	None	Time Series: Oldest		
	Maquina4	10000	1	None	Time Series: Oldest		
	PT6	10000	1	None	Time Series: Oldest		
	MP6	10000	1	None	Time Series: Oldest		
	Maquina6	10000	1	None	Time Series: Oldest		

Figura 8.10. Locaciones de la distribución en planta actual.



Icon	Name	Speed (mpm)	Stats...	Notes...
	P0316A.	150	Time Series	
	Cuerpo	50	Time Series	
	Llaves	50	Time Series	
	Arco	50	Time Series	
	Seguro	50	Time Series	
	Resorte	50	Time Series	
	Placa	50	Time Series	
	Candado	50	Time Series	
	Transporte	50	Time Series	

Figura 8.11. Entidades de la distribución en planta actual.

Graphic	Name	Type	T/S	Paths...	Interfaces...	Mapping...	Nodes
	Ruta_carrito	Passing	Speed & Dista	5	7	0	5
	Ruta_materialista1	Passing	Speed & Dista	5	6	0	6
	Ruta_materialista2	Passing	Speed & Dista	5	6	0	6
	Ruta_materialista3	Passing	Speed & Dista	5	6	0	6
	Ruta_materialista4	Passing	Speed & Dista	5	6	0	6
	Ruta_materialista5	Passing	Speed & Dista	5	6	0	6
	Ruta_materialista6	Passing	Speed & Dista	5	6	0	6

Figura 8.12. Rutas de la distribución en planta actual.

Icon	Name	Units	DTs...	Stats...	Specs...	Search...	Logic...	Pts...	Notes...
	Carrito	1	None	None	No Network	None	0	0	
	Materialista1	1	None	By Unit	Ruta_materi	None	0	1	
	Materialista2	1	None	By Unit	Ruta_materi	None	0	1	
	Materialista3	1	None	By Unit	Ruta_materi	None	0	1	
	Materialista4	1	None	By Unit	Ruta_materi	None	0	1	
	Materialista5	1	None	By Unit	Ruta_materi	None	0	1	
	Materialista6	1	None	By Unit	Ruta_materi	None	0	1	

Figura 8.13. Recursos de la distribución en planta actual.

ProModel - Master Lock Nogales. .Distr. Propuesta. .2012.MOD (ML)

File Edit View Build Simulation Output Tools Window Help

Arrivals [112]

Entity...	Location...	by each..	First Time	ccurrence	Frequency	Logic	Disable
Cuerpo	MP1	100		100	5		No
Cuerpo	MP2	100		100	5		No
Cuerpo	MP3	100		100	5		No
Cuerpo	MP4	100		100	5		No
Cuerpo	MP5	100		100	5		No
Cuerpo	MP6	100		100	5		No
Llaves	MP1	100		100	5		No
Llaves	MP2	100		100	5		No
Llaves	MP3	100		100	5		No
Llaves	MP4	100		100	5		No
Llaves	MP5	100		100	5		No
Llaves	MP6	100		100	5		No
Arco	MP1	100		100	5		No
Arco	MP2	100		100	5		No
Arco	MP3	100		100	5		No
Arco	MP4	100		100	5		No
Arco	MP5	100		100	5		No
Arco	MP6	100		100	5		No
Seguro	MP1	100		100	5		No
Seguro	MP2	100		100	5		No
Seguro	MP3	100		100	5		No
Seguro	MP4	100		100	5		No
Seguro	MP5	100		100	5		No
Seguro	MP6	100		100	5		No
Resorte	MP1	100		100	5		No
Resorte	MP2	100		100	5		No
Resorte	MP3	100		100	5		No
Resorte	MP4	100		100	5		No
Resorte	MP5	100		100	5		No
Resorte	MP6	100		100	5		No
Placa	MP1	100		100	5		No
Placa	MP2	100		100	5		No
Placa	MP3	100		100	5		No
Placa	MP4	100		100	5		No
Placa	MP5	100		100	5		No
Placa	MP6	100		100	5		No
P0101D.	Almacen_car	5		100	1		No
P0103A.	Almacen_car	5		100	1		No
P0107E.	Almacen_car	9		100	1		No
P0113B.	Almacen_car	7		100	1		No
P0206A.	Almacen_car	6		100	1		No
P0302A.	Almacen_car	5		100	1		No

Figura 8.14. Arribos de la distribución en planta actual.

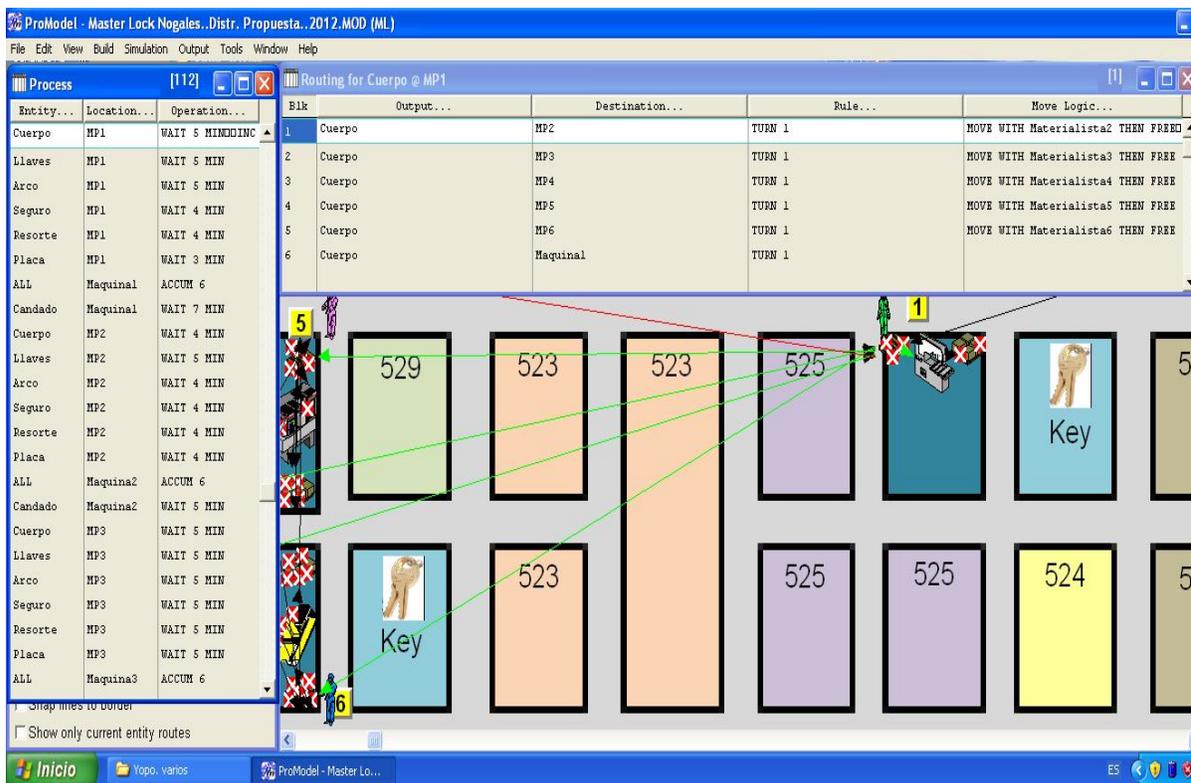


Figura 8.15. Proceso de la distribución en planta actual.