

ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA  
(FLP) DE UN SOLO NIVEL CON ESTRUCTURAS INTERNAS, MUROS Y  
PASAJES, A TRAVÉS DE MÉTODOS METAHEURÍSTICOS.

ERIKA MELISSA RUEDA JAIMES  
GIOVANNY ANDRÉS VILLAMIL RODRIGUEZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
BUCARAMANGA  
2014

ALTERNATIVA DE SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA  
(FLP) DE UN SOLO NIVEL CON ESTRUCTURAS INTERNAS, MUROS Y  
PASAJES, A TRAVÉS DE MÉTODOS METAHEURÍSTICOS.

ERIKA MELISSA RUEDA JAIMES  
GIOVANNY ANDRÉS VILLAMIL RODRIGUEZ

Trabajo de grado para optar al título de  
Ingeniero Industrial

Director:  
CARLOS EDUARDO DÍAZ BOHORQUEZ  
Ingeniero Industrial, MSc.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER  
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS  
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES  
BUCARAMANGA

2014

## DEDICATORIA

*A Dios por bendecirnos y ayudarnos a superar los obstáculos que se han presentado en el transcurso de nuestras carreras y nuestras vidas,*

*A nuestros padres y hermanos por su apoyo, motivación y compañía en todo momento, por ser nuestros pilares y nuestra mayor motivación*

*Por último a nuestros amigos y familiares más cercanos, que con su apoyo y compañía contribuyeron a que este logro se hiciera realidad.*

*Erika Melissa y Giovanni Andrés*

## **AGRADECIMIENTOS**

En el día que culmina esta etapa de nuestras vidas, damos gracias a Dios por acompañarnos en cada paso dado, por brindarnos las herramientas necesarias y bendecirnos con las personas que nos han brindado su apoyo y amor a través de los años.

A nuestros padres y hermanos por su apoyo incondicional, su paciencia y su comprensión, hoy esperamos ser motivo de orgullo.

Agradecemos igualmente a nuestros profesores, especialmente a nuestro director Msc. Carlos E. Díaz Bohórquez cuya dedicación y conocimientos nos guiaron en el desarrollo de este proyecto, sus lecciones nos formaron como personas y nos prepararon para los retos que debemos afrontar en la vida.

A nuestros amigos, que nos acompañaron a lo largo de este recorrido y que permanecerán en nuestras vidas y en nuestros corazones.

A todos y cada uno de ustedes, Muchas gracias!

**Erika Melissa y Giovanni Andrés**

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	17
1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	20
2 OBJETIVOS.....	24
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	24
2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	24
3 JUSTIFICACIÓN.....	25
4 MARCO TEORICO.....	26
4.1 ANTECEDENTES.....	26
4.2 COMPLEJIDAD.....	30
5 CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA.....	31
5.1 TIPOS DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA.....	33
5.1.1 Distribución Por Proceso.....	33
5.1.2 Distribución Por Producto.....	33
5.1.3 Distribución Por Celdas.....	34
5.1.4 Distribución Por Proyecto.....	34
5.2 FLUJO DEL PROCESO.....	35
5.2.1 Distribución lineal simple.....	35
5.2.2 Distribución multilínea.....	35
5.2.3 Distribución circular cerrad.....	36
5.2.4 Distribución de campo abierto.....	36
5.2.5 Distribución vertical.....	36
5.3 CARACTERÍSTICAS ESPACIALES DE LOS DEPARTAMENTOS.....	38
5.3.1 Área.....	38
5.3.2 Forma.....	39
6 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA.....	41
6.1 FORMULACIÓN DISCRETA.....	42
6.2 FORMULACIÓN CONTINUA.....	43
7 MÉTODOS DE SOLUCIÓN.....	46

7.1 MATRIZ DE RELACIÓN DE ACTIVIDADES.....	46
7.1.1 Diagrama Desde-Hacia .....	46
7.1.2 Diagrama de Relación. ....	51
7.2 PROGRAMACIÓN ENTERA MIXTA .....	53
7.2.1 Branch and Bound.....	53
7.3 METODOS HEURÍSTICOS .....	54
7.3.1 HEURÍSTICA.....	54
7.3.2 METAHEURÍSTICA .....	55
8 SOLUCIONES EXISTENTES PARA EL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA CON PAREDES EN LA ESTRUCTURA INTERIOR Y PASAJES.....	58
8.1 ALGORITMO GENÉTICO MEJORADO .....	58
8.2 OPTIMIZACIÓN DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS.....	59
8.3 PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE CORREDOR.....	61
9 ALGORITMO GENÉTICO: SOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA CON ESTRUCTURAS INTERNAS, MUROS Y PASAJES.....	62
9.1 ESTRUCTURA.....	65
9.2 MODELO ANÁLOGO.....	69
9.3 ALGORITMO PROPUESTO.....	71
9.3.1 Parámetros .....	72
9.3.2 Limitaciones.....	72
9.3.3 Resolución del Problema.....	72
9.3.4 Población Inicial.....	74
9.3.5 Codificación.....	74
9.3.6 Función Objetivo (Fitness).....	75
9.3.7 Selección.....	78
9.3.8 Cruce.....	80
9.3.9 Mutación.....	82
9.3.10 Reemplazo.....	83
9.3.11 Condiciones de Parada.....	85
9.4 EJERCICIO DE APLICACIÓN.....	85

10 HERRAMIENTA DE APLICACIÓN.....	92
10.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA.....	92
10.2 USO DE LA HERRAMIENTA.....	92
10.3 PROBLEMA.....	96
10.3.1 Ingreso de Datos.....	96
10.3.2 Obtención de la solución.....	98
11 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.....	101
11.1 PRESENTACIÓN DE DATOS.....	102
11.2 DESEMPEÑO DEL ALGORITMO.....	103
11.3 ANÁLISIS DE DATOS.....	103
11.4 TIEMPO COMPUTACIONAL.....	106
12 CONCLUSIONES.....	107
13 RECOMENDACIONES.....	109
BIBLIOGRAFÍA.....	110
ANEXOS.....	116

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Tipos de distribución y causas más frecuentes .....	32
Figura 2. Distribución lineal simple .....	35
Figura 3. Distribución Multilineal .....	35
Figura 4. Distribución circular cerrada .....	36
Figura 5. Distribución campo abierto .....	36
Figura 6. Distribución vertical.....	37
Figura 7. Retroceso y Bypass.....	37
Figura 8. Ejemplo líneas de llenado.....	39
Figura 9. Formas de departamentos. a) Regulares b) Irregulares .....	40
Figura 10. Histograma de frecuencias .....	47
Figura 11. Diagrama relación de actividades.....	50
Figura 12. Evaluación de la distribución .....	51
Figura 13. Diagrama de relación.....	52
Figura 14. Un ejemplo de la disposición de las instalaciones y de la representación correspondiente al modelo de cromosoma de cuatro segmentos.....	59
Figura 15. Diseño con paredes de la estructura interior y pasajes .....	60
Figura 16. Diseño con cálculo de nodos en la distancia .....	60
Figura 17. Representación de diseño CAP como una partición $\{\pi_1, \pi_2\}$ de una permutación $\pi$ .....	61
Figura 18. Esquema del Algoritmo Genético .....	66
Figura 19. Representación cromosoma binario .....	67
Figura 20. Representación cromosoma entera.....	68
Figura 21. Representación cromosoma real.....	68
Figura 22. Modelo análogo .....	69
Figura 23. Paralelismo entre los términos biológicos y los algoritmos evolutivos. .	70
Figura 24. Ejemplo fenotipo .....	71
Figura 25. Representación de agrupación por columnas.....	73

Figura 26. Representación con pasillos horizontales.....	73
Figura 27. Ejemplo de columnas variables .....	75
Figura 28. Cruce de un punto .....	80
Figura 29. Cruce de dos puntos.....	81
Figura 30. Cruce Uniforme.....	82
Figura 31. Mutación .....	83
Figura 32. Distribución del Caso de Aplicación.....	87
Figura 33. Cálculo entre departamentos en una misma columna .....	88
Figura 34. Cálculo entre departamentos ubicado en columnas continuas.....	89
Figura 35, Cálculo entre departamentos ubicados con columnas intermedias .....	89
Figura 36. Vista Ventana "Interfaz de usuario MATLAB" .....	93
Figura 37, Vista Ventana "Carpeta FLP_AG" .....	93
Figura 38. Vista Ventana "Abrir Interfaz de la herramienta" .....	94
Figura 39. Vista Ventana "Entorno para abrir interfaz de herramienta" .....	95
Figura 40. Vista Ventana "Interfaz gráfica FLP_AG" .....	95
Figura 41. Ingreso de datos al algoritmo propuesto.....	97
Figura 42. Ejemplo de ingreso de datos .....	98
Figura 43. Mejor solución encontrada.....	100
Figura 44. Gráfica de la mejor solución encontrada .....	100
Figura 45. Gráfica de la mejor solución encontrada Ambos métodos.....	105
Figura 46. Gráfica mejora porcentual.....	106

## LISTA DE TABLAS

Tabla 2. Relación producto - cantidad .....	47
Tabla 3. Diagrama desde-hacia (completo) .....	48
Tabla 4. Diagrama desde-hacia (diagonal) .....	48
Tabla 5. Rango .....	50
Tabla 6. Matriz Flujos del Caso de Aplicación .....	86
Tabla 7. Centroides de los Departamentos y Pasillos.....	88
Tabla 8. Matriz de Distancias del Ejercicio de Aplicación .....	90
Tabla 9. Relación de Forma.....	91
Tabla 10. Soluciones por Matriz de Relación.....	102
Tabla 11. Datos de entrada .....	102
Tabla 12. Desempeño del Algoritmo.....	103
Tabla 13. Tiempo Computacional .....	106

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. EJERCICIOS DE REFERENCIA .....	116
ANEXO B. REPRESENTACIÓN EJERCICIOS DE REFERENCIA .....	125
ANEXO C. RESULTADOS PROGRAMA FLP_AG .....	129
ANEXO D. ARTÍCULO ACÁDEMICO .....	136

## RESUMEN

**Título:** Alternativa de solución al problema de distribución de planta (FLP) de un solo nivel, con estructuras internas: muros y pasajes, a través de métodos metaheurísticos.\*

**Autores:** Erika Melissa Rueda Jaimes, Giovanni Andrés Villamil Rodríguez \*\*

**Palabras Claves:** Distribución de Planta, Algoritmo Genético, Optimización.

### Descripción

El Problema de Distribución de Planta, es un problema industrial común que pretende establecer una configuración óptima, o por lo menos factible, relacionada con la ubicación de los diferentes departamentos que componen una planta dentro de la misma, de tal forma que se cumplan con objetivos de maximizar la cercanía entre estos departamentos y minimizar el costo del transporte de material, teniendo en cuenta para ello, sus respectivas restricciones.

En este proyecto se aborda el problema de distribución de planta (FLP, por sus siglas en inglés) de un solo nivel con estructuras internas (muros y pasajes), considerando Algoritmos Genéticos. Estos algoritmos, se basan en las leyes de selección natural y genética y han sido utilizados en diversos problemas de los cuales no se encuentran soluciones eficientes por medio de técnicas convencionales.

Se toma como consideración que los diferentes departamentos tienen en general formas rectangulares y áreas desiguales, al igual que la planta se supone tiene una forma rectangular; la ubicación de los departamentos dentro de la planta se hace a partir de la distribución de los departamentos en columnas de ancho variable con pasillos fijos dentro de las mismas, al igual que las columnas, los pasillos verticales también se consideran de ancho variable.

Con base en lo anterior, a partir de la investigación y documentación del problema, se propone una alternativa de solución a este problema, de acuerdo a las características de la planta, partiendo de la formulación y modelación matemática de un nuevo algoritmo y su posterior programación en el software MATLAB.

---

\* Proyecto de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Msc.. Carlos Eduardo Díaz Bohórquez

## ABSTRACT

**Title:** Alternative solution to the Facility Layout Problem (FLP) of a single level, having inner structure, walls and passages through metaheuristics methods.\*

**Authors:** Erika Melissa Rueda Jaimes, Giovanni Andrés Villamil Rodríguez \*\*

**Keywords:** Plant layout; Genetic Algorithms; Optimization.

### Description

The Problem of Distribution of Plant, is a common industry problem that seeks to establish an optimal configuration, or at least feasible, related to the location of the several departments that make up a plant in its inside, so that objectives are met maximize the closeness between these departments and minimize the cost of transportation of material, taking into account for this, their restrictions.

In this project is approached the plant layout problem (FLP, for its acronym in English) single-level with structures (walls and passages), taking into account genetic algorithms. These algorithms are based on the laws of genetics and natural selection and have been used in several problems in which are not found efficient solutions through conventional techniques.

Is taken as consideration to the various departments have generally rectangular shapes and unequal areas, at the same way is assumed to the plant have a rectangular shape; the location of the departments within the plant is made from the distribution of departments in variable width columns with fixed aisles within them, like the columns, the vertical hallways are also considered of variable width.

Based on the above, from the research and documentation of the problem, is proposed an alternative solution to this problem , according to the characteristics of the plant , based on the formulation and mathematical modeling of a new algorithm and its subsequent programing in the software MATLAB .

---

\* Thesis Degree Project

\*\* Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales. Director: Msc.. Carlos Eduardo Díaz Bohórquez

## INTRODUCCIÓN.

El “Problema de Distribución de Planta”, conocido como FLP por sus siglas en inglés (Facility Layout Problem), se define como la disposición eficiente de los departamentos dentro de una instalación. Este tipo de problema es denominado de optimización combinatoria, y su objetivo es encontrar el máximo (o el mínimo) de una determinada función sobre un conjunto finito de soluciones<sup>1</sup>.

Su función objetivo puede ser maximizar requisitos de adyacencia o reducir al mínimo el costo de flujo de material entre las instalaciones, al mismo tiempo que satisface las restricciones de área. Cuando la función objetivo es la "maximización de adyacencias" se utiliza una tabla de relaciones que especifica cualitativamente una calificación de proximidad para cada par de las instalaciones. Esto se utiliza para determinar una medida global de adyacencia para un diseño dado.

En cuanto a la función objetivo relacionada con la "reducción al mínimo de los costos de transporte" utiliza un valor que se calcula multiplicando el flujo, la distancia y el costo de transporte por unidad de distancia para cada par de las instalaciones.

El Problema de Distribución de Planta tiene un impacto significativo en el rendimiento de un sistema productivo o de servicios, por lo cual ha sido un área de investigación activa durante muchas décadas. Diversos investigadores han mostrado su interés por brindar aportes a este problema, cada uno de ellos lo ha abordado con distintos enfoques y características específicas, generando como alternativas de solución modelos matemáticos y algoritmos para la solución al problema de distribución de planta con departamentos regulares o irregulares, dentro de estas contribuciones cabe destacar los trabajos de Meller y Cheny

---

<sup>1</sup> MARTÍ, Rafael. Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria. [En línea] Departament d'estadística i investigació operativa, facultat de matemàtiques, universitat de valència; p. 2-5. Disponible en: <<http://www.uv.es/rmarti/paper/docs/heur1.pdf>>

Sherali<sup>2</sup>, quienes presentan una nueva formulación para la solución al problema de distribución de planta para áreas desiguales usando una programación entera mixta (MIP); Komarudin y Kuan Yew Wong<sup>3</sup>, proponen el algoritmo colonia de hormigas (ACO) como alternativa de solución al problema de distribución de plantas para áreas desiguales; Duarte y Calderón<sup>4</sup>, estudian las Metaheurísticas: Búsqueda Tabú (TS), Recocido Simulado (SA), y Algoritmo Genético (GA), como alternativas de solución al problema de distribución de planta de un solo nivel y departamentos iguales o desiguales. Sin embargo, en estos algoritmos no se consideran departamentos con estructura de paredes interiores y pasajes, y están restringidos a una forma rectangular límite de bloque.

Como se mencionó anteriormente, para la solución de problemas de distribución de planta se han manejado dos escenarios, uno en el cual se toman las instalaciones como áreas iguales y otro como áreas desiguales. La mayor parte de investigaciones publicadas que resuelven este tipo de problemas para instalaciones de áreas iguales, hacen caso omiso a los tamaños y formas reales de las instalaciones, por lo que el problema se formula generalmente como un problema de asignación cuadrática (QAP). Por otro lado, para la solución del problema del diseño de las instalaciones de áreas desiguales, se formula el Problema del conjunto de cobertura (SCP), el cual consiste en asignar todas las instalaciones en un plano o área disponible.

---

<sup>2</sup> MELLER, Russell D.; CHEN, Weiping & SHERALI, Hanif D. Applying the sequence-pair representation to optimal facility layout designs. En: Operations Research Letters. 2007, vol. 35, no. 5, p. 651-659.

<sup>3</sup> KOMARUDIN & WONG, Kuan Yew. Applying Ant System for solving Unequal Area Facility Layout Problems. En: European Journal of Operational Research. 2010, vol. 202, p. 730-746.

<sup>4</sup> DUARTE SÁNCHEZ, Mónica Tatiana y CALDERÓN MANTILLA, Erika Viviana. Alternativas de Solución al Problema de Distribución de Planta (FLP) de un Solo Nivel y Departamentos Iguales ó Desiguales, Por Medio Del Análisis De Métodos Metaheurísticos. Trabajo de grado (Ingeniería Industrial). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, 2010. 258 p.

El presente trabajo tiene como propósito desarrollar una alternativa de solución al problema de distribución de planta de un solo nivel con estructuras internas, específicamente muros y pasajes, dentro de un área disponible, utilizando métodos Metaheurísticos.

Este proyecto se compone de doce capítulos, en los primeros dos capítulos se encuentran la introducción, y las generalidades del proyecto. A partir del tercer capítulo se trata el problema de distribución de planta, y en el cuarto las características, así mismo el quinto capítulo ilustra los tipos de formulación existentes y el sexto los métodos de solución más destacados. En el capítulo siete se lleva a cabo la documentación de la revisión bibliográfica, sobre el problema de distribución de planta con estructuras internas, y en el capítulo ocho se explica a fondo la metaheurística de Algoritmo genético y se diseña el algoritmo que da solución al problema planteado.

En el capítulo nueve se procede a explicar la herramienta de aplicación del programa diseñado, y para finalizar se evalúa la efectividad del algoritmo, frente a otros métodos de solución, lo cual puede observarse en el capítulo diez. En los siguientes dos capítulos pueden encontrarse las conclusiones y recomendaciones de este proyecto.

## 1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

El Facility Layout Problem (FLP) o Problema de Distribución de Planta, es un problema industrial muy común, que tiene como objetivo lograr una configuración de los departamentos de manera que se maximice la cercanía entre ellos sin violar sus respectivas restricciones, y a su vez se minimice el costo del transporte de materiales entre los mismos (costos de almacenamiento, movimiento, obsolescencia y daño). De igual manera se crea una utilización más efectiva de la mano de obra, se hace más fácil el control sobre la producción, se reduce la congestión, la superficie ocupada por pasillos y almacenamiento.

Este tipo de problema es denominado de optimización combinatoria; en estos problemas el objetivo es encontrar el máximo (o el mínimo) de una determinada función sobre un conjunto finito de soluciones.<sup>5</sup> El problema de distribución de planta es de alta complejidad matemática, dado que si existen  $n$  departamentos y  $n$  lugares, la cantidad de posibles soluciones a evaluar para determinar la solución óptima es de  $n!$ . Considerando esto Garey y Johnson<sup>6</sup> definieron el FLP como un problema NP-Hard. Debido a que a medida que va aumentando el número de departamentos y restricciones al problema, se hace imposible de solucionar por métodos exactos y se hace exponencialmente más complejo.

Una herramienta importante que se ha venido empleando para la solución del problema de distribución de planta, es el uso de diferentes metaheurísticas y combinaciones de diferentes tipos de metaheurísticas llamadas Algoritmos Genéticos Mejorados; la gran ventaja de estos métodos es que evitan ser atrapado en óptimos locales, aceptando movimientos que empeoran la función objetivo, permitiendo así, que la solución no sea un óptimo local, adicionalmente

---

<sup>5</sup> BLUM, Christian & ROLI, Andrea. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. En: ACM Computing Survey. 2003, vol. 35, no. 3, p. 268-308.

<sup>6</sup> GAREY, Michael. R. & JHONSON, David S. Computers and intractability: A guide to the theory of NP-completeness. New York: W. H. Freeman and Company, 1979. 339 p.

se ocupan de algunos aspectos prácticos como son instalaciones con diferentes áreas, formas y orientaciones.

Es importante destacar que en gran medida el trabajo de investigación publicado para problemas de diseño de distribución con instalaciones de igual área, hacen caso omiso a las formas reales y a los tamaños de las instalaciones, este problema se formula generalmente como un problema de asignación cuadrática (QAP); que consiste en asignar igual número de instalaciones a lugares discretos, con el objetivo de minimizar la función de costo. Por otro lado para la optimización del diseño de las instalaciones de áreas desiguales, (SCP) se han desarrollado técnicas heurísticas, tales como el recocido simulado, búsqueda tabú, y diversos algoritmos genéticos, se consigue construyendo una cuadrícula sobre la planta, de manera que cada recuadro representa una unidad de área. A partir de ahí el problema se resuelve, dependiendo del tipo de distribución que se vaya a realizar (bloques de cuadrícula, bloques continuos).

Al ignorar las formas reales de las instalaciones, se omiten en el diseño la existencia de paredes internas, así como pasajes o pasillos por donde circulan los flujos de material, trabajadores y quizás maquinaria como los montacargas, usados para transportar materiales y/o productos en proceso en grandes cantidades, o muy pesados. Al efectuar la revisión bibliográfica correspondiente a los artículos de investigación publicados, para problemas de diseño de distribución con estructuras interiores y pasajes, se encontró que muy pocos investigadores han profundizado en este tema y que son pocos los estudios y artículos que se encuentran al respecto, lo cual hace aún más importante difundir lo poco que se conoce del tema, para que sea considerado en el diseño de plantas.

Este proyecto busca brindar una herramienta que permita llevar a la práctica, una solución propuesta en la literatura, brindando así un diseño más real a la distribución de planta, cumpliendo con los tamaños y formas de las instalaciones. Para lograrlo, se debe definir como llevar a cabo la representación de las instalaciones, lo cual se puede hacer o tomar con base al material consultado, a través del modelo cromosoma de 4 segmentos, que para la distribución de las instalaciones está representada como un cromosoma, mediante un proceso de codificación, a su vez que el cromosoma representa la distribución de las instalaciones por un proceso de decodificación. Por otra parte también se puede considerar el modelo de codificación del ancho de las columnas, cuyo ancho sea fijo o variable, el primero da la posibilidad de que los departamentos tengan formas irregulares, como consecuencia de tratar con columnas de ancho fijo. Sin embargo si lo que se busca es que todos los departamentos tengan una forma regular, cada columna será del ancho necesario para los departamentos asignados a ella, de tal forma que se ajusten dentro de las dimensiones de la superficie.

En cuanto a la definición de las distancias entre las instalaciones, se analiza la posibilidad de utilizar el método gráfico de adyacencia, utilizando el algoritmo de Dijkstra de la teoría de grafos, o bien usando el método por nodos; estos fueron los métodos usados en la literatura, para este tipo de problema. Es importante destacar que las investigaciones publicadas, le han dado solución a través del Algoritmo Genético Mejorado y de la Optimización del Enjambre de Partículas.

Adicionalmente, se encontró otra forma de darle solución a este tipo de problema, por medio del método de programación entera mixta CAP, el cual busca dar una disposición de instalaciones a lo largo de un pasillo central definido por dos líneas horizontales paralelas al eje  $x$  de un sistema de coordenadas cartesianas. Este método permite calcular diseños óptimos en un tiempo razonable para casos de problemas de dimensiones moderadas. Y por

otra parte, presenta procedimientos heurísticos que pueden manejar casos más grandes.

Este proyecto busca conocer y profundizar en la solución al problema de diseño de distribución con estructuras interiores y pasajes a través de la metaheurística Algoritmos Genéticos, ya que es de gran interés académico por su ajuste real a las necesidades de la distribución de planta. Se busca programar el algoritmo en un software computacional, con el objetivo de brindar una herramienta eficaz en el diseño de distribuciones, que tome en cuenta no solo el área de los departamentos, sino también los espacios necesarios para el flujo de material, y que a su vez sea un aporte académico, ya que permitirá contrastar la diferencia con otros métodos ya desarrollados, que tuvieron en consideración diferentes parámetros, a su vez que es posible variar las condiciones del problema y dar resultados en un tiempo eficiente.

## **2 OBJETIVOS.**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Evaluar una alternativa de solución al problema de distribución de planta (FLP) de un solo nivel con estructuras internas, muros y pasajes, a través de la metaheurística de Algoritmos Genéticos.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Efectuar una revisión bibliográfica del problema de distribución de planta (FLP) de un solo nivel con estructuras internas, muros y pasajes, incluyendo planteamientos y enfoques dados al problema.
- Documentar los principales resultados obtenidos de las investigaciones realizadas en problemas de distribución de planta (FLP) de un solo nivel con estructuras internas, muros y pasajes.
- Diseñar un algoritmo, para el problema de distribución de planta (FLP) de un solo nivel con estructuras internas, muros y pasajes.
- Programar el algoritmo en un software computacional y realizar los ajustes correspondientes al diseño del programa
- Evaluar la efectividad del algoritmo, mediante otros métodos de solución al problema de distribución de planta.

### 3 JUSTIFICACIÓN.

El presente proyecto surge como respuesta al problema de distribución de planta (FLP) de un solo nivel con estructuras internas, muros y pasajes, debido a la necesidad de obtener un diseño de instalaciones que contribuya a una solución que respete una condición realista, donde se tengan en cuenta la existencia de paredes interiores y de pasajes en la estructura.

Debido a que la mayoría de los problemas de diseño de instalaciones publicados, no consideran los pasajes y las paredes interiores, se considera de gran importancia para este proyecto, tener en cuenta dichas estructuras internas, ya que considerarlas tiene un impacto significativo al momento de desarrollar un diseño que necesite ser aplicado a una condición existente, además cabe resaltar que el flujo de material entre las instalaciones se lleva a cabo a través de los pasajes, por lo que es poco lógico, hablar de una eficiente distribución de planta, haciendo caso omiso de los mismos.

Este proyecto tiene en cuenta la integración de todos los factores que afectan la distribución, y su objetivo principal es minimizar el movimiento de material, de forma tal que se logre una utilización “efectiva” de todo el espacio, y todo con un mínimo esfuerzo. Es por esto que este proyecto tiene una aplicabilidad práctica, ya que contribuye a la solución de un problema real, al que se enfrentan todo tipo de empresas, desde manufactureras hasta de servicio. Se busca que el algoritmo a programar se ajusté a las características físicas actuales de las empresas, y brinde una solución óptima en un tiempo eficiente.

Por otra parte este trabajo realiza un aporte social, ya que una eficiente distribución del espacio, mejora las condiciones de los trabajadores, respetando los principios de satisfacción y de seguridad, requiriendo un menor esfuerzo por parte de los mismos. Adicionalmente cabe resaltar su pertinencia disciplinar, ya que mejora el desempeño de la planta diseñada, logrando una mayor integración de hombres, materiales, y maquinaria; al mismo tiempo que consigue que el material recorra la menor distancia posible, facilitando de esta forma el flujo de material y minimizando los tiempos totales de producción.

## 4 MARCO TEORICO

Los problemas de distribución de planta o FLP por sus siglas en inglés (Facility Layout Problem), consisten en determinar la distribución más eficiente de determinado número de departamentos en un área estipulada de una instalación; entendiéndose como departamento a toda facilidad identificada como centro de trabajo, máquina o grupos de máquinas que pertenezcan al proceso productivo de la empresa, y como instalación al espacio físico disponible en la planta, donde se ubican los departamentos.

Es preciso destacar que para que exista una eficiente distribución, no solo debe tenerse en cuenta la cantidad de departamentos, sino también es preciso prever los espacios necesarios para el movimiento del flujo del material y almacenamientos. Todo con el objetivo de minimizar los costos de transporte de materiales, considerando las restricciones de área y adyacencias entre departamentos.

### 4.1 ANTECEDENTES

El problema de distribución de planta, es un tema de interés actual para muchos investigadores, debido a su alta complejidad. Con el paso de los años, han sido numerosos los estudios, metodologías, avances y mejoras que se han aportado al problema de distribución de planta, entre los más destacados y en orden cronológico se pueden mencionar los siguientes aportes:

- En 1957, Koopmans y Beckmann<sup>7</sup>, los primeros en definir la distribución de planta como un problema, tomaron como objetivo ubicar instalaciones dentro de un área dada, y tomando como función objetivo la minimización del costo de transporte de los materiales entre las instalaciones, basados en un sistema de asignación QAP (quadratic assignment problem).

---

<sup>7</sup> KOOPMANS, Tjalling C. & BECKMANN, Martin. Assignment problems and the location of economic activities. En: *Econometrica*. January, 1957, vol. 1, no. 25, p. 53-76.

- En el año de 1963 Armour Y Buffa<sup>8</sup> formulan el problema de distribución de planta con áreas desiguales.
- Amine et ál,<sup>9</sup> citan a Kouvelis (1992), como uno de los primeros en hablar de distribución dinámica, debido a que en las empresas la demanda variable hace que el flujo entre departamentos varíe en ciertos periodos de tiempo.
- En 1992, Tam <sup>10</sup> publicó un trabajo en la revista European Journal of Operational Research sobre el uso de algoritmos genéticos para resolver problemas de diseño de planta.
- Eberhart y Kennedy <sup>11</sup> en 1995 desarrollan la técnica Optimización de enjambre de partículas (PSO), un simple algoritmo evolutivo que se diferencia de otras técnicas de computación evolutiva en que está motivado de la simulación de comportamiento social, exhibe un buen rendimiento en la búsqueda de soluciones a los problemas de optimización estática.
- Meller y Gau <sup>12</sup> (1996), definen restricciones para poder dar solución al problema de distribución de planta con áreas desiguales, éstas son: (i) Todos los departamentos deben estar ubicados en una zona o instalación, (ii) que no haya superposición entre los departamentos, (iii) el diseño se debe acoplar a las condiciones restrictivas de área de la instalación.
- En 1998, Tam y Chan<sup>13</sup> presentan un estudio que mejoró los resultados de la aplicación de algoritmos para resolver distribución de las instalaciones de planta que está limitado por las restricciones geométricas,

---

<sup>8</sup> ARMOUR, Gordon C. & BUFFA, Elwood S. A heuristic algorithm and simulation approach to relative allocation of facilities. En: Management Science. January, 1963, vol. 9, no. 2, p. 294-309.

<sup>9</sup> AMINE, Drira; HENRI, Pierreval & SONIA, Hajri-Gabouj. Facility layout problems: A survey. En: Annual Reviews in Control. November, 2007, no. 31, p. 255-267.

<sup>10</sup>Tam, Kar Yan. Genetic algorithms, function optimization, and facility layout design. En: European Journal of Operational Research. December, 1992, vol. 63, no. 2, p. 322-346.

<sup>11</sup> CHRISTU, Paul R.; ASOKAN, P. & PRABHAKAR, V.I. A solution to the facility layout problem having passages and inner structures walls using particle swarm optimization. En: Int. J. Adv. Manuf Technol. January, 2006, vol. 29, p. 766-771.

<sup>12</sup> MELLER, Russell D. & GAU, Kai-Yin. The facility layout problem: Recent and emerging trends and perspectives. En: Journal of Manufacturing Systems. 1996, vol. 15, no. 5, p. 351-366.

<sup>13</sup> GÓMEZ, A., et al. Using genetic algorithms to resolve layout problems in facility where there are aisles. En: International Journal of production Economics. June, 2003, vol. 84, no. 3, p. 271-282.

independientemente del tamaño del problema o el número de variables que intervienen.

- Chwif, Pereira Barretto, y Moscato<sup>14</sup> en 1998 afirman que un departamento puede tener dimensiones de longitud y ancho fijos; para este caso, los departamentos se consideran bloques fijos, también establecen que los departamentos pueden estar definidos por su área, aumentando con sus afirmaciones la complejidad del problema.
- En 1998 Kochhar y Heragu<sup>15</sup>, plantean la posibilidad de realizar una distribución en forma vertical, exponiendo su argumento basados en costos de las distribuciones vertical y horizontal.
- Meller, Narayanan y Vance<sup>16</sup> (1999) contemplan el problema de distribución de planta como la búsqueda de un arreglo ortogonal plano, tanto para áreas iguales y desiguales, donde se asignan n departamentos en una superficie rectangular, sin sobreposición entre ellos.
- En el año 2000 Kim & Kim<sup>17</sup>, dan un grado mayor de complejidad postulando que los departamentos tienen forma irregular, planteando el problema de distribución de planta para dos tipos de forma departamentos: regulares e irregulares, los regulares con formas rectangulares y los irregulares.
- Shayan and Chittiappilly<sup>18</sup> (2004) contextualizan el problema de distribución de planta como un problema de optimización que no solo incluye el flujo del producto sino que además implica herramientas necesarias para efectuar el transporte del producto (AVGs, bandas transportadoras, rodillos, etc.)

---

<sup>14</sup> CHWIF, Leonardo; PEREIRA BARRETTO, Marcos R. & MOSCATO, Lucas Antonio. A solution to the facility layout problem using simulated annealing. En: Computers in Industry. April, 1998, vol. 2, no. 36, p. 125-132.

<sup>15</sup> KOCHHAR, Jasmit Singh.; FOSTER, Bryce T. & HERAGU, Sunderesh S. Hope: A genetic algorithm for the unequal area facility layout problem. En: Computers operation research. July, 1998, vol. 25, no. 7/8, p. 583-594.

<sup>16</sup> MELLER, Russell D.; NARAYANAN, Venkat & VANCE, Pamela H. Optimal facility layout design. En: Operations research letters. October, 1998, vol. 23, no. 3/5, p. 117-127.

<sup>17</sup> KIM, Jae-Gon & KIM, Yeong-Dae. Layout planning for facilities with fixed shapes and input and output points. En: International journal of Production Research. 2000, vol. 38, no. 18, p. 4635-4653.

<sup>18</sup> SHAYAN, E. & CHITTIAPPILLY, A. Genetic algorithm for facilities layout problems based on slicing tree structure. En: International Journal of Production Research. 2004, vol. 42, no. 19, p. 4055-4067.

- Meller, Cheny Sherali<sup>19</sup> (2007), dan como aporte una solución al FLP para departamentos con áreas desiguales, atreves de un algoritmo genético y de MIP (Programación Entera Mixta).
- Komarudin y Kuan Yew Wong<sup>20</sup> (2009), como respuesta al problema de distribución de planta para áreas desiguales, proponen el algoritmo de colonia de hormigas (ACO), para dar solución al problema.
- Duarte y Calderón<sup>21</sup> (2010), a través de las metaheurísticas: Recocido simulado (SA). Búsqueda Tabú (TS) y Algoritmo Genético (GA), proponen una solución al problema de distribución de planta para áreas desiguales.

Una vez revisada la bibliografía pertinente a los antecedes, se lleva a cabo la investigación y recopilación de los últimos artículos publicados, que desarrollan métodos metaheurísticos para dar solución al problema de distribución de planta (FLP), de un solo nivel con estructuras internas, muros y pasajes, el cual se presenta a continuación:

- A.Gómez, Q.I. et al<sup>22</sup> (2003) proponen un método para incluir los pasillos a la distribución de los departamentos, a través de dos enfoques distintos: columnas de ancho fijo y columnas de ancho variable.
- LEE KYU, HAN SN, Y ROH MI (2003)<sup>23</sup>, Proponen un nuevo método de cálculo de la distancia entre instalaciones, se introdujo para determinar la distancia entre las mismas, mediante el uso de la teoría de grafos.
- CHRISTU PAUL, P. ASOKAN, VI PRABHAKAR (2006)<sup>24</sup>, se presenta un nuevo enfoque llamado enjambre de partículas de optimización (PSO) para obtener mejores soluciones para distribuciones desiguales, de la zona de las instalaciones que se van a tener paredes interiores y pasadizos.

---

<sup>19</sup> MELLER; CHEN & SHERALI. Op. cit., p. 651-659.

<sup>20</sup> KOMARUDIN & WONG. Op. cit., p. 730-746.

<sup>21</sup> DUARTE SÁNCHEZ Y CALDERON MANTILLA. Op. cit., p. 248..

<sup>22</sup> GÓMEZ, et al. Op. cit., p. 271-282.

<sup>23</sup> LEE, Kyu-Yeul; HAN, Seong-Nam & ROH, Myung-II. An improved genetic algorithm for facility layout problems having inner structure walls and passages. En: Computers & Operations Research. January, 2003, vol. 30, no. 1, p. 117-138.

<sup>24</sup> Christu; Asokan & Prabhakar. Op. cit., p. 766-771.

## 4.2 COMPLEJIDAD

El problema de distribución de planta o FLP, toma en consideración las relaciones existentes entre cada uno de los departamentos, ya sea a través de costos, flujos de material, distancias o simplemente la combinación de estas, en conjunto las relaciones influyen directamente en el grado de complejidad del problema, adicional a las mencionadas anteriormente, otras consideraciones que pueden aumentar la complejidad del diseño de planta son: inclusión de pasillos, muros, posición de máquinas y puntos de entrada y salida de material.

Es por esto que el problema de distribución de planta se considera de alta complejidad matemática, suponga que existen  $n$  departamentos y  $n$  lugares a donde atribuirlos, entonces la cantidad de posibles soluciones a evaluar para determinar la solución óptima es de  $n!$ . Considerando esto Garey y Johnson<sup>25</sup> definieron el FLP como un problema NP-Hard. Debido a que a medida que va aumentando el número de departamentos y restricciones al problema, se hace imposible de solucionar por métodos exactos y se hace exponencialmente más complejo.

---

<sup>25</sup> GAREY & JHONSON. Op. cit., p. 339.

## 5 CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA.

Para empezar es importante mencionar que el problema de distribución de planta es aplicable tanto a nuevas plantas industriales como para las ya existentes, debido a que con el tiempo surgen cambios o desajustes, que pueden hacer necesario la reestructuración de la misma para el buen funcionamiento del proceso.

La óptima distribución de planta da como resultado una producción más económica y con mayor eficiencia, debido a que disminuye los tiempos de flujo de material, y a su vez genera una mejor utilización de maquinaria, mano de obra y de tiempo. Los problemas que pueden presentarse en una planta, por los cuales se hace necesario modificar la distribución, pueden clasificarse en función de la causa que determina su necesidad. Moore<sup>26</sup> y Apple<sup>27</sup> realizan una enumeración de posibles causas:

- Cambios en el diseño de los productos
- Equipos, maquinaria o actividades obsoletas
- Accidentes frecuentes
- Puestos de trabajo inadecuados para el personal
- Cambios en la localización de los mercados
- Necesidad de reducir costos

Como podemos ver, al momento de diseñar la adecuada distribución de una planta es importante tener en cuenta la flexibilidad necesaria del proceso productivo, de tal forma que ante los cambios repentinos de la producción se puedan hacer mejoras en el proceso, ya sean por cambio en la demanda, en el diseño, en los materiales o en cualquier otro factor, de manera que se tenga una distribución dinámica que se adapte a las exigencias del mercado.

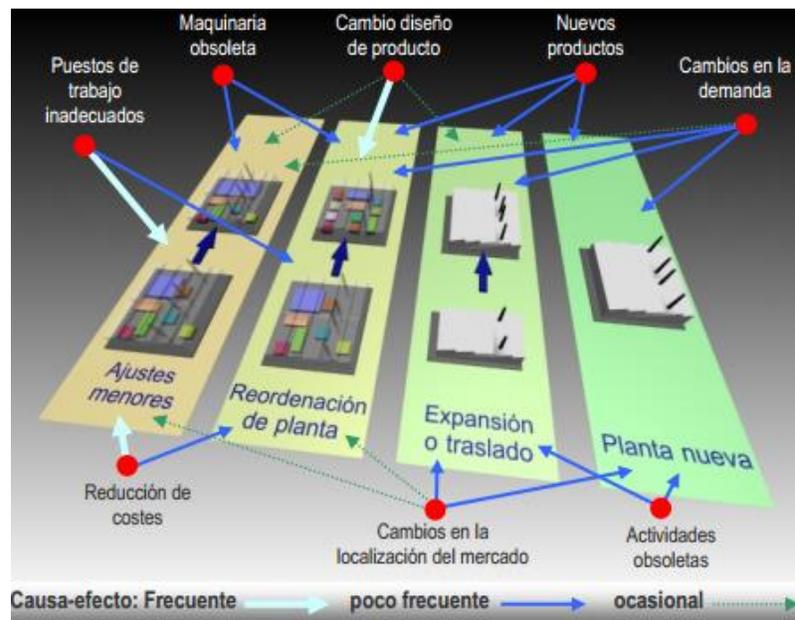
---

<sup>26</sup> MOORE, James Mendon. Plan Layout and Design. New York: MacMillan Company, 1962. 566 p.

<sup>27</sup> APPLE, James Macgregor. Plant Layout and Material Handling, Third Edition. John Wiley & Sons, 1977. 488 p.

Es por esta razón que, Muther<sup>28</sup> realiza una clasificación del problema de distribución en planta de acuerdo a su naturaleza planteando cuatro tipos fundamentales: Proyecto de una planta completamente nueva; Expansión o traslado a una planta ya existente; Reordenación de una planta ya existente; y Ajustes menores en distribuciones ya existentes (Ver figura 1.)

**Figura 1. Tipos de distribución y causas más frecuentes**



**Fuente:** MOORE J.M., "Plan Layout and Design", Macmillan Publishing Co, Inc, (1962)

Es de suma importancia tener en cuenta que la solución a la distribución de planta, debe lograr un equilibrio entre las características del diseño y las consideraciones de factores, tales como: la flexibilidad, el flujo de material, los materiales, la maquinaria, las esperas, la mano de obra, los servicios auxiliares y el espacio disponible, de forma que el diseño permite obtener las máximas ventajas para el sistema productivo.

<sup>28</sup> MUTHER, Richard. Distribución en planta, ordenación racional de los elementos de producción industrial. Cuarta edición. España: Editorial Hispano Europea, 1981.

## 5.1 TIPOS DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA

El tipo de distribución de una planta, determina la forma en la que se agruparan los diferentes departamentos, los grupos de trabajo y la maquinaria necesaria para la producción, de forma que se garantice el flujo continuo del mismo.

**5.1.1 Distribución Por Proceso.** En este tipo de distribución se agrupan todas las operaciones de la misma naturaleza, es decir que las operaciones de un mismo proceso o tipo de proceso están agrupadas en una misma área. Este tipo de distribución da lugar a los denominados talleres, que se van recorriendo de acuerdo a la secuencia de operaciones necesaria.

Se escoge cuando la producción se organiza por lotes de una amplia gama de productos que requieren la misma maquinaria y la producción en volumen es relativamente pequeña de cada producto; es por esto que ofrece una gran flexibilidad en cuanto a tipo de productos.

Este tipo de distribución, también es usado cuando la maquinaria que interviene en el proceso es muy costosa y no puede moverse fácilmente, adicionalmente cuando existe una demanda intermitente, en cuanto a la producción. Ejemplo de eso es la fabricación de muebles, la reparación de vehículos, la fabricación de hilados o los talleres de mantenimiento.

**5.1.2 Distribución Por Producto.** Este tipo de distribución se da cuando toda la maquinaria y equipos necesarios para la fabricación de determinado producto, son agrupados en una misma área, de forma que se siga la secuencia de las operaciones de producción. Se emplea principalmente cuando existe una elevada demanda de uno o varios productos normalizados.

Este sistema permite reducir tiempos de producción, minimiza el trabajo en curso y el manejo de materiales, y destaca por su elevada eficiencia. Sin embargo presenta desventajas tales como poca flexibilidad en la ejecución de tareas, elevada inversión en maquinaria, y un riesgo alto en que se detenga toda una línea de producción si una máquina sufre una avería. Ejemplo de distribución por producto se da en las plantas de ensamble, embotellados y envasados.

**5.1.3 Distribución Por Celdas.** En este tipo de distribución se crean “células” las cuales consisten en pequeñas agrupaciones de máquinas y trabajadores que realizan una secuencia de operaciones sobre un determinado producto o grupo de productos. Las salidas de las células de fabricación pueden ser un producto final o componentes que deben integrarse en el producto final o en otros componentes.

La distribución interna de las células, puede realizarse a su vez por proceso, por producto o una mezcla de ambas. Con este sistema se reduce el inventario y los costos directos de producción. Sin embargo se requiere una elevada inversión en maquinaria y equipos, que sólo es justificable a partir de determinados volúmenes de producción.

**5.1.4 Distribución Por Proyecto.** También conocida como Distribución por posición fija, se emplea cuando el material permanece inmóvil, mientras que tanto los operarios como la maquinaria y equipos se trasladan a los puntos de operación.

Se emplea cuando el producto es grande y pesado, y se producen pocas unidades al mismo tiempo, suele ser necesaria una minuciosa planificación de las actividades a desarrollar. Ejemplo de este tipo de distribución es la usada para la fabricación de grandes barcos, aviones, motores o en la construcción de obras públicas.

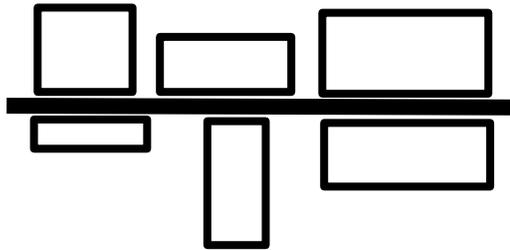
## 5.2 FLUJO DEL PROCESO

A través del flujo del proceso se establece la entrada y la salida adecuada del material y producto en proceso entre departamentos, de manera organizada.

Los diferentes tipos de flujo de las partes de un producto fue explicado por Amine Drira et al<sup>29</sup> según las formas que adquiere la distribución, las cuales son:

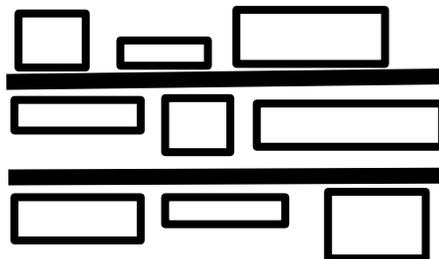
**5.2.1 Distribución lineal simple:** En este tipo de distribución, el producto traza su recorrido a través de una única línea, recorriendo todas las instalaciones; la línea de flujo puede ser recta (*Figura 2*), semicircular o en forma de U.

Figura 2. Distribución lineal simple



**5.2.2 Distribución multilineal:** Con esta distribución se involucra en el proceso más de una línea de flujo, en la cual el recorrido de las partes se puede dar por una de las líneas, o a través de un intercambio entre las mismas si el proceso de fabricación lo requiere. (*Figura 3*).

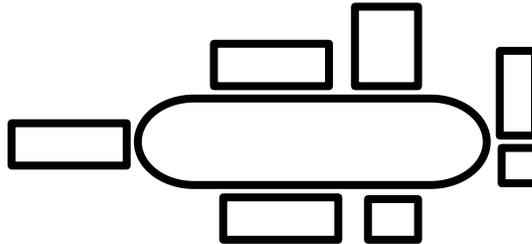
Figura 3. Distribución Multilineal



<sup>29</sup> AMINE; HENRI & SONIA. Op. cit., p. 13.

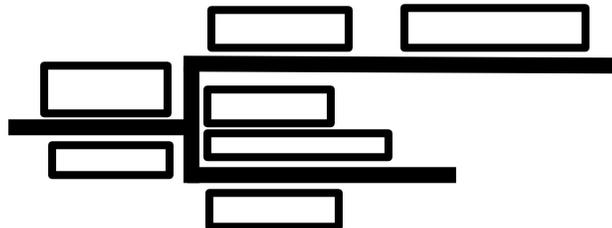
**5.2.3 Distribución circular cerrada:** En este tipo de distribución las instalaciones se disponen en forma de anillo, misma forma en que se da la línea de flujo, con un único sentido. (Figura 4).

Figura 4. Distribución circular cerrada



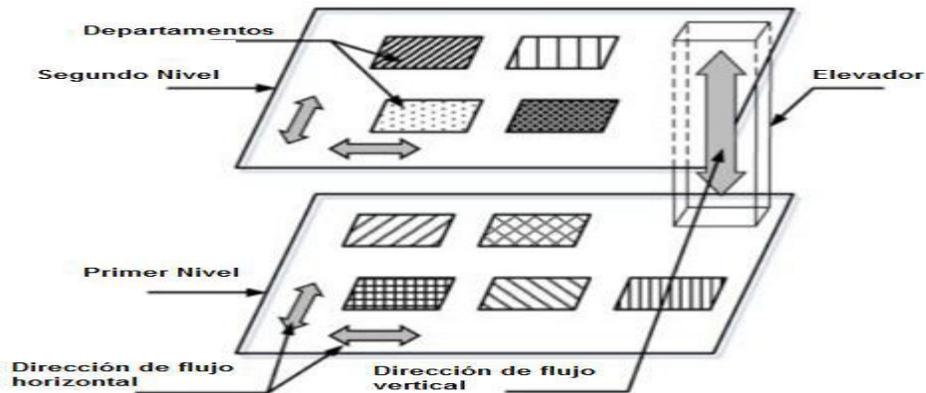
**5.2.4 Distribución de campo abierto:** En este tipo de distribución se observan diferentes líneas de flujo, pero con la característica de tener un mismo punto de entrada de material, y ramificaciones que se presentan a medida que el producto sufre modificaciones hasta llegar al producto terminado. (Figura 5).

Figura 5. Distribución campo abierto



**5.2.5 Distribución vertical:** Cuando se tiene un espacio horizontal predefinido para la ubicación de las instalaciones y este se constituye en una limitante, la distribución vertical juega un papel importante, a través de la cual se puede contar con  $n$  niveles de planta; en este tipo de distribución el flujo de material va de un piso a otro y se empiezan a considerar nuevas variables tales como: la cantidad de niveles requeridos, tamaño y localización de elevadores a construir, restricciones de expansión vertical. (Figura 6).

**Figura 6. Distribución vertical**

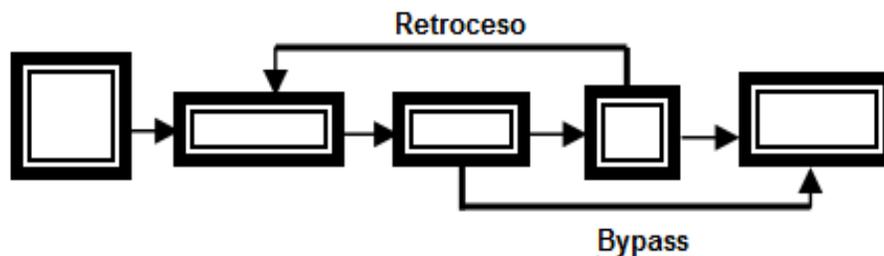


**Fuente:** TOMPKINS, J.A., WHITE, J.A., BOZER, Y.A, FRAZELLE, E.H., TANCHOCO, J.M., & TREVINO, J. Facilities planning. En : New York: Wiley. (1996).

No obstante el flujo del proceso no siempre es como se definió, en todos los tipos de distribución se pueden presentar flujos con movimientos de retroceso o con movimientos de Bypass.

Se da lugar al retroceso, cuando el producto pasa a través de un proceso realizado con anterioridad, puede darse por diseño en las secuencias de fabricación o por defectos en algún proceso; por otra parte *Bypass* se da cuando el producto realiza saltos en la línea de producción; la minimización de estos movimientos es el objetivo si se quiere mejorar tiempos de producción y dar uniformidad al proceso productivo.

**Figura 7. Retroceso y Bypass**



### 5.3 CARACTERÍSTICAS ESPACIALES DE LOS DEPARTAMENTOS

Un departamento está definido físicamente por su área o por su forma, esto sujeto al espacio disponible, al espacio necesario para las máquinas y al material en flujo del proceso en cada departamento.

**5.3.1 Área.** De acuerdo al área asignada, los departamentos se pueden clasificar como departamentos de áreas iguales y departamentos de áreas desiguales, dependiendo del tipo de clasificación de área la solución para el problema de distribución de planta será de forma diferente.

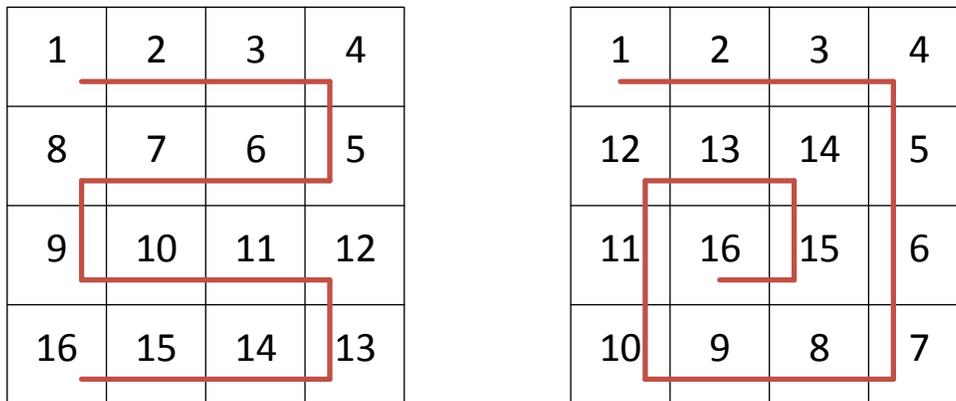
Cuando se aborda un problema de distribución de planta con departamentos de áreas iguales este se plantea como un problema de asignación cuadrática (QAP), el cual consiste en asignar un conjunto discreto de departamentos a un conjunto discreto de ubicaciones, garantizando que a cada instalación se le asigne una única ubicación (asignación uno a uno).

Cuando se trata del problema de distribución de planta para departamentos con áreas desiguales, este se plantea como un problema del conjunto de cobertura (SCP), el cual consiste en asignar las instalaciones en un plano o área disponible.

La solución al problema de distribución de planta con departamentos de áreas desiguales, se puede desarrollar de dos maneras diferentes, en la primera se toma el área disponible total y sobre ésta se construye una cuadrícula, en la cual cada recuadro representara una unidad de área, unidad que será asignada según el requerimiento del departamento a ubicar, este tipo de solución se denomina problema de distribución basado en bloques de cuadrícula, en esta solución se penaliza la función objetivo para garantizar la cercanía entre las unidades de área.

El segundo planteamiento para el desarrollo del problema de distribución de planta con departamentos de áreas desiguales maneja el concepto de unidades de área, pero con la diferencia de que la cercanía entre éstas se da a través de una curva de llenado, concepto introducido por Bartholdi y Platzman<sup>30</sup>, la curva de llenado consiste en asignar un orden a la asignación de unidades de área para cada departamento, asegurando que los departamentos con requerimientos de área superiores a la unidad no sean fraccionados (*Figura 8*).

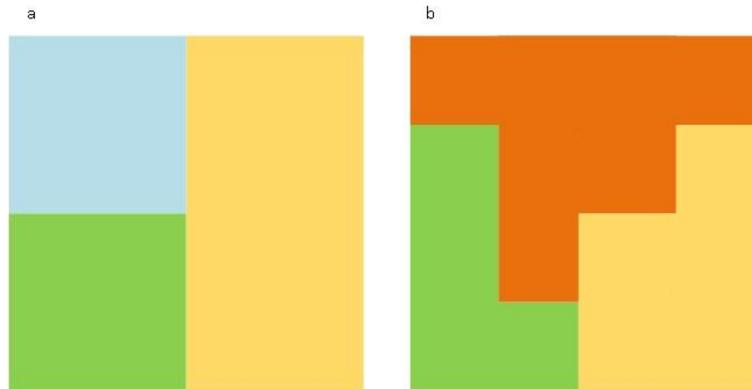
**Figura 8. Ejemplo líneas de llenado**



**5.3.2 Forma.** Según sea la forma del departamento hay dos clasificaciones diferentes para los departamentos en el problema de distribución de planta, los cuales son: problema de distribución de planta para departamentos con formas regulares y para departamentos con formas irregulares, la primera hace referencia a departamentos con dos dimensiones únicamente: largo y ancho, para la segunda se toman las demás formas resultantes de departamentos, a los cuales se les denomina de forma irregular. (*Figura 9*).

<sup>30</sup> BARTHOLDI, John. Joseph & PLATZMAN, Loren Kerry. An On long planar traveling salesman heuristic based on Space filling curves. En: Operation research letters. 1982, vol.1, no. 4, p. 121 – 125.

**Figura 9. Formas de departamentos. a) Regulares b) Irregulares**



Cuando se presentan casos de distribución de departamentos con formas irregulares, Lee y Kim<sup>31</sup>, exponen algoritmos que corrigen la irregularidad conformando una nueva distribución de bloque que abarca la posición relativa de los departamentos en la distribución, a través de la solución propuesta se hace una partición en bloques al área a distribuir en sentido vertical, horizontal o en ambos sentidos, para asegurar de esta forma la regularidad de los departamentos, los cuales tendrán ahora una forma rectangular.

A pesar de las formas rectangulares que resultan de este método, se pueden presentar departamentos con dimensiones inapropiadas, demasiado largos o pequeños. Para corregir estas soluciones inapropiadas, los autores proponen unos algoritmos para pasar departamentos de formas irregulares a departamentos de formas regulares. Algunos de los algoritmos propuestos fueron:

- Shaping algorithm using distance between centroids (SA±DC)
- Shaping algorithm using beam search (SA±BS)
- Shaping algorithms using traversing lines (SA±TL1 and SA±TL2)

---

<sup>31</sup> LEE, Geun-Cheol & KIM, Yeong-Dae. Algorithms for adjusting shapes of departments in block layouts on the grid-based plane. En: Omega. February, 2000, vol. 28, no.1, p. 111-122.

## 6 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA.

Una vez establecida la forma de abordar el problema y las características de los departamentos y la planta (niveles), se procede a realizar la formulación matemática que permite dar una solución al problema de distribución, la cual puede involucrar diferentes tipos de criterio para la función objetivo y para las restricciones.

Existen varias formas de abordar la solución al problema de distribución de planta, ya sea con una única función objetivo, multiobjetivo, con restricciones o irrestricto. Las funciones objetivo más utilizadas para la solución al problema de distribución de planta suelen ser:

- Minimización del costo de transporte del material.
- Minimización de los costos adecuación de los departamentos en la planta.
- Maximización de adyacencias entre departamentos
- Minimización de movimientos inapropiados, retrocesos y saltos (*bypass*).
- Minimización del flujo de material.
- Minimización de costos de alistamiento
- Minimización de las formas irregulares de las instalaciones.

Igualmente los planteamientos de soluciones restrictas suelen estar sujetos a

- Ubicación de ciertas instalaciones fijas.
- Distancia mínima entre las instalaciones.
- Condiciones de área predefinidas
- Orientación de los puestos de trabajo.
- Conservación de forma de las instalaciones
- Puntos de entrada y salida de material preestablecidos.
- No sobreposición entre las instalaciones.

## 6.1 FORMULACIÓN DISCRETA

Cuando se aborda el problema a través de una formulación discreta el problema es denominado como problema de asignación cuadrática, en el cual se realiza una partición del área total disponible en bloques de la misma área, a los cuales serán asignados los departamentos con una relación uno a uno, con el fin de minimizar el transporte de material en las fases del proceso productivo.

Una de las formulaciones más comunes para solucionar el problema de distribución de planta minimizando el flujo de material es la propuesta por BALAKRISHNAN J., et al<sup>32</sup>, que es:

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

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^N X_{ij} = 1, \quad j = 1, \dots, N \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^N X_{ij} = 1, \quad i = 1, \dots, N \quad (3)$$

Entonces:

La ecuación (1) es la función objetivo, que busca minimizar el flujo de material ( $f_{ik}$ ) del departamento  $i$  al departamento  $k$ , por la distancia ( $d_{jl}$ ) de la instalación  $i$  a la instalación  $l$ , para  $N$  departamentos y en donde  $X_{ij}$  es una variable binaria que toma valores de  $\{0,1\}$  para localizar al departamento  $i$  en la instalación  $j$ .

La ecuación (2), es la restricción que asegura que a cada instalación sólo se le asigne un departamento y en la ecuación (3) se asegura que cada departamento esté ubicado en una instalación.

---

<sup>32</sup> BALAKRISHNAN, Jaydeep, et. al. A hybrid genetic algorithm for the dynamic plant layout problem. En: International journal of production economics. November, 2003, vol. 86, no. 2, p. 107 -120.

Dentro de los usos de la formulación, se encuentra el minimizar los retrocesos de una distribución en línea continua, la congestión de tráfico del producto y problemas dinámicos, en contraparte este tipo de formulación no permite establecer restricciones de límites de distancia, orientación de las instalaciones, y comienzo y fin del flujo de material, para este tipo de condiciones se hace más relevante el uso de la formulación continua.

## 6.2 FORMULACIÓN CONTINUA.

La formulación continua es aplicable a problemas de distribución del conjunto de cobertura, de departamentos con áreas desiguales, ya que con este tipo de formulación la ubicación de las instalaciones se da de acuerdo a las coordenadas del centroíde  $(X_i, Y_j)$  , teniendo en cuenta las dimensiones de largo por ancho. Este tipo de formulación permite una variedad de restricciones a la función objetivo, tales como restricciones de área, de sobreposición y de orientación. Para la formulación continua diversos investigadores han expuesto algunas restricciones presentadas a continuación:

Para Chwif et al <sup>33</sup> la distancia entre dos instalaciones, está definida como la Variación rectilínea entre los dos centroides de las instalaciones involucradas:

$$d_{ij} = |X_i - X_j| + |Y_i - Y_j|$$

Siendo  $(X_i, Y_i)$  las cordenadas del centroide de la instalación i y  $(X_j, Y_j)$  las coordenadas del centroide de la instalación j.

Según Kim & Kim<sup>34</sup>, se define una distancia rectilínea a partir de los puntos de entrada y salida del material de las instalaciones

$$d_{ij} = |X_i^0 - X_j^l| + |Y_i^0 - Y_j^l|$$

---

<sup>33</sup> CHWIF; PEREIRA BARRETO & MOSCATO. Op. cit., p. 14.

<sup>34</sup> KIM & KIM. Op. cit., p. 4635 – 4653.

Siendo el primer término de la ecuación la variación rectilínea en X entre el punto de salida del material en la instalación i y el punto de llegada en la instalación j, y el segundo término de la ecuación la variación rectilínea en Y entre el punto de salida del material en la instalación i y el punto de llegada en la instalación j.

Un aporte importante a las restricciones de sobreposición lo hacen Welgama y Gibson<sup>35</sup> aportando en su formulación condiciones que evitan la sobreposición de las instalaciones, cumpliendo solamente una de las siguientes restricciones:

$$(X_{jt}, X_{ib}), (X_{jb}, X_{it}) \geq 0$$

$$(Y_{jt}, Y_{ib}), (Y_{jb}, Y_{it}) \geq 0$$

De donde  $X_{it}$ ,  $Y_{it}$  y  $X_{ib}$ ,  $Y_{ib}$  son las coordenadas de las esquinas superior izquierda e inferior derecha de la instalación i,  $X_{jt}$ ,  $Y_{jt}$  y  $X_{jb}$ ,  $Y_{jb}$  son las coordenadas de las esquinas superior izquierda e inferior derecha de la instalación j.

La consideración del área de sobreposición como una restricción dentro del modelo es el aporte que hacen Mir e Imam<sup>36</sup>, quienes expresan que el problema puede ser expresado de la siguiente forma:

Función objetivo sujeta a:

$$A_{ij} \leq 0, \text{ en donde:}$$

$$A_{ij} = \lambda_{ij} (\Delta X_{ij}) (\Delta Y_{ij}),$$

$$\Delta X_{ij} = \lambda_{ij} \left( \frac{L_i + L_j}{2} \right) - |X_i - X_j|,$$

$$\Delta Y_{ij} = \lambda_{ij} \left( \frac{W_i + W_j}{2} \right) - |Y_i - Y_j|,$$

<sup>35</sup> WELGAMA, P.S. & GIBSON, P.R. A construction algorithm for the machine layout problem with fixed pick-up and drop-off points. En: International journal of production research. 1993, vol. 31, no. 11, p. 2575 – 2589.

<sup>36</sup> MIR, M. & IMAM, M.H. A hybrid optimization approach for layout design of unequal – area facilities. En: Computers and industrial engineering. February, 2001, vol. 39, no. 1-2, p. 49 – 63.

$$\lambda_{ij} = \begin{cases} -1 & \text{para } \Delta X_{ij} \leq 0 \text{ y } \Delta Y_{ij} \leq 0 \\ +1 & \text{para } \Delta X_{ij} \leq 0 \text{ y } \Delta Y_{ij} \leq 0 \end{cases}$$

$(L_i, W_i)$  son el largo y el ancho de la instalación  $i$ , y  $(X_i, Y_i)$  son las coordenadas de la instalación  $i$ .

Dunker, T, et al<sup>37</sup>, Propone la siguiente ecuación para el problema de distribución de planta. Con departamentos de áreas desiguales e irregulares:

$$\text{Minimizar } C = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N f_{ij} (|X_j - X_i| + |Y_j - Y_i|),$$

Donde  $N$  es el número de instalaciones,  $f_{ij}$  el costo del flujo de material desde el centroide de la instalación  $i$  hasta el centroide de la instalación  $j$ ,  $(X_i, Y_i)$  las coordenadas del centroide de la instalación  $i$  y  $(X_j, Y_j)$  las coordenadas del centroide de la instalación  $j$ .

---

<sup>37</sup> DUNKER, Thomas; RADONS, Günter & WESTKÄMPER, Engelbert. Combining evolutionary computation and dynamic programming for solving a dynamic facility layout problem. En: European Journal of Operational Research. August, 2005, vol. 165, no. 1, p. 55–69.

## 7 MÉTODOS DE SOLUCIÓN.

A lo largo de la historia se han desarrollado diversos métodos de solución para el problema de distribución de planta, como respuesta a las diferentes investigaciones llevadas a cabo. Dado que, a medida que aumenta el número de departamentos, se hace más difícil encontrar la solución al problema de diseño de planta, se han propuesto numerosas formas de resolver este tipo de problema. A continuación se explicaran brevemente las más destacadas.

### 7.1 MATRIZ DE RELACIÓN DE ACTIVIDADES

Más conocida como Metodología de la Planeación sistemática de la distribución de plantas o SLP (Systematic layout planning) por sus siglas en inglés, ha sido la más aceptada y utilizada para la solución de problemas de distribución de planta a partir de criterios cualitativos.

El SLP fue desarrollado por Richard Muther<sup>38</sup>, como un procedimiento sistemático y relativamente simple, para la resolución de problemas de distribución de planta de diversas naturalezas. El método reúne las ventajas de las aproximaciones y adicionalmente tiene en cuenta el flujo de materiales en el estudio de la distribución.

**7.1.1 Diagrama Desde-Hacia.** Este diagrama congrega la información del flujo de material de un departamento a otro. A continuación se describen los pasos a seguir para realizar el diagrama.

**Paso 1. Análisis P-Q:** El punto de partida de este método es la información de los productos y cantidades a producir. Muther<sup>39</sup> recomienda la elaboración de una gráfica en forma de histograma de las frecuencias, en donde los productos estarán en las abscisas y las cantidades en las ordenadas.

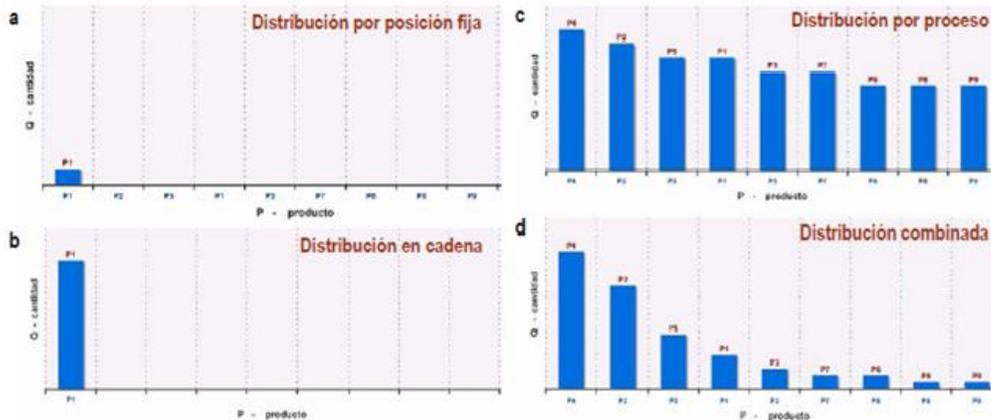
---

<sup>38</sup> MUTHER, Richard. Systematic layout plannig. 2 Ed. Boston: Cahners books, 1973.

<sup>39</sup> Ibid., p. 360

El resultado del histograma indicara el tipo de distribución más recomendable para la planta. La figura 10 describe mejor, lo dicho anteriormente:

**Figura 10. Histograma de frecuencias**



**Paso 2. Análisis del Recorrido:** En este paso se determina la secuencia y la cantidad de movimientos de los productos a través de todo el proceso productivo

*Ejemplo 1:* Se considera una planta con una distribución por procesos como: Prensado (P), Fresado (F), Inspección (I), Acabado (A), y Embalaje (E); en donde se elaboran los productos (1, 2, 3).(Ver tabla 2)

**Tabla 1. Relación producto - cantidad**

PRODUCTO	SECUENCIA	PRODUCCIÓN (Q)
1	P-I-A-E	100
2	F-P-I-E-A	400
3	P-A-E	200

**Paso 3. Análisis de Flujo:** Con base en los datos del ejemplo anterior, se procede a elaborar el diagrama: Desde-Hacia; en donde los departamentos ubicados en la primera columna de la tabla, corresponden al origen del flujo, y la primera fila representa el destino de dicho flujo; las celdas restantes se llenan de acuerdo a las cantidades de producción.

Para entender mejor lo anteriormente descrito, se continúa con el ejemplo anterior. En la tabla 3., se muestra que del departamento de “Prensado” al departamento de “Inspección” se movilizan 500 unidades correspondientes: 100 unidades del producto 1 y 400 unidades del producto 2.

**Tabla 2. Diagrama desde-hacia (completo)**

	Prensado (P)	Fresado (F)	Inspección (I)	Acabado (A)	Embalaje (E)
Prensado (P)	-		500	200	
Fresado (F)	400	-			
Inspección (I)			-	100	400
Acabado (A)				-	300
Embalaje (E)				400	-

**Paso 4. Suma de flujos entre Departamentos:** En este paso se suman las unidades totales a movilizarse entre cada par de departamentos, de forma que se complete solo la parte superior de la diagonal principal de la matriz. (Ver tabla 4.)

**Tabla 3. Diagrama desde-hacia (diagonal)**

	Prensado (P)	Fresado (F)	Inspección (I)	Acabado (A)	Embalaje (E)
Prensado (P)	-	400	500	200	
Fresado (F)		-			
Inspección (I)			-	100	400
Acabado (A)				-	700
Embalaje (E)					-

**Paso 5. Análisis de cercanía:** También conocido como el análisis de intensidad, el cual se calcula identificando el valor máximo y mínimo de la matriz. Una vez identificado el rango (máximo – mínimo) se divide entre la cantidad de niveles con los que se trabajará, estos niveles clasifican la necesidad de adyacencia entre cada par de departamentos. Muther <sup>40</sup> propone los niveles de relación de la siguiente forma:

A= Absolutamente necesaria

E= Especialmente necesaria

I= Importante

O= Cercanía común

U= No importa la cercanía

X= No se desea que esté cerca

Para el ejemplo sólo se tendrán en cuenta los primero 4 niveles, obteniendo los siguientes intervalos:

$$Rango = \frac{700 - 100}{4} = 150$$

De tal forma que, A inicia en 700 y se le resta el rango (150), lo que dispone un nivel entre 700 y 550. El siguiente nivel parte desde el valor mínimo del nivel anterior y se repite el proceso con los demás niveles. (Ver tabla 5.)

---

<sup>40</sup> Ibid., p. 360.

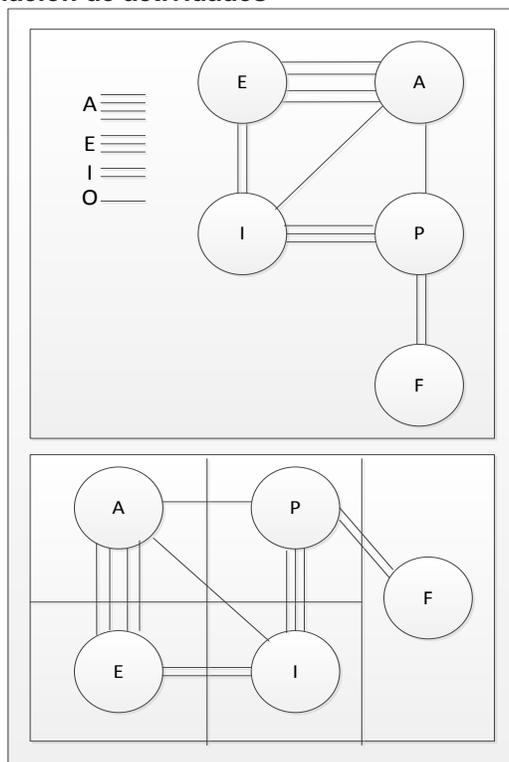
**Tabla 4. Rango**

Nivel	Rango
A	700-550
E	550-400
I	400-250
O	250-100

**Paso 6. Elaborar Diagrama de Relación de Actividades:** Para efectuar el diagrama de relación de actividades se parte de la clasificación de las relaciones establecida anteriormente, dando prioridad a las relaciones más fuertes, es decir graficando en primera instancia los departamentos con la relación más fuerte.

En el ejemplo, se puede observar que las relaciones se encuentran representadas gráficamente con líneas en cantidades proporcionales a la relación. (Ver figura 11.)

**Figura 11. Diagrama relación de actividades**

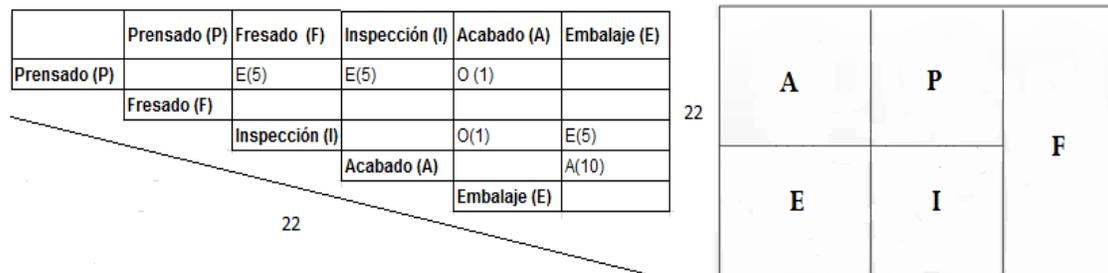


**Paso 7. Evaluación de la Distribución:** Se realiza comparando la distribución elaborada con la ideal. La calificación está dada de acuerdo con el puntaje que se otorga a cada nivel. Para este caso se tiene en cuenta el siguiente puntaje\*:

$$A=10 \quad E=5 \quad I=2 \quad O=1$$

En la figura 12. Se puede observar la clasificación para el ejemplo que se ha desarrollado, y además se puede constatar que la distribución cumple todas las relaciones de cercanía.

**Figura 12. Evaluación de la distribución**



**7.1.2 Diagrama de Relación.** El diagrama de relación de actividades (Tompkins<sup>41</sup>) muestra los departamentos y la relación entre ellos con base en un ranking de flujos de material, y en ocasiones, por conveniencia, con base a criterios especiales. Esta clasificación se realiza en forma cualitativa y a criterio de la persona a la que se le confía la distribución. Al igual que en el diagrama Desde-Hacia considera los niveles de adyacencia, solo que no de forma cuantitativa.

<sup>41</sup> TOMPKINS, James A., et al. Facilities Planning. Nueva York: Editorial John Wiley and Sons, 1996. 854 p.

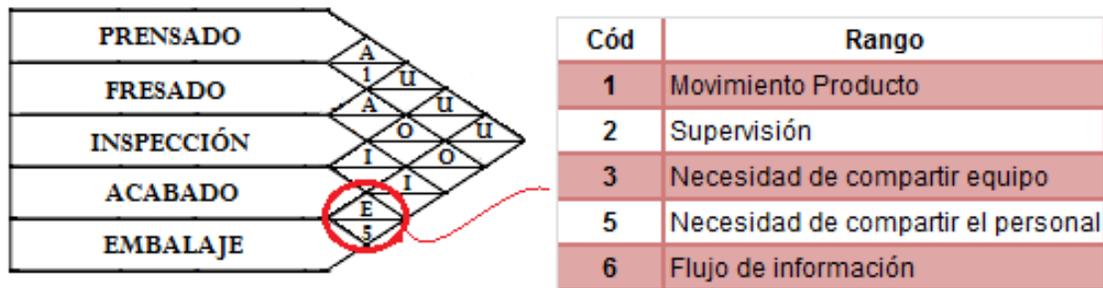
\*CLASE con Edwin Garavito, docente planta, Universidad Industrial de Santander, 2013

La metodología para el diagrama de relación es la siguiente:

- I. El diagrama enlista todos los departamentos para la distribución.
- II. Determinar criterios propios de importancia de adyacencia y la razón.
- III. Llenar el diagrama

Se puede observar que el diagrama de relación se encuentra formado por rombos, en los que se describe la relación correspondiente entre dos departamentos. Si se observa el rombo enmarcado, éste corresponde a la relación existente entre los departamentos Acabado y Embalaje. Cada rombo consta de dos entradas; en la parte superior se ubica el nivel de relación de adyacencia (A, E, I, O U) que se considera entre los dos departamentos, y en la parte inferior, el motivo por el cual se da dicha cercanía, que para el ejemplo se representan a continuación numéricamente (1, 2, 3, 4, 5).

**Figura 13. Diagrama de relación**



A partir de las relaciones identificadas en el diagrama anterior, se elabora el diagrama de relación de actividades definido en el paso 6 del numeral 6.1.1 en donde se ubican los departamentos según su relación, y si dos o más departamentos coinciden en la misma, se evalúa el motivo de acuerdo a su prioridad, seguido por la evaluación descrita en el mismo numeral.

## 7.2 PROGRAMACIÓN ENTERA MIXTA

En la actualidad son pocos los métodos que llegan a dar una solución exacta al problema de diseño de distribución de planta, debido a que es un problema de gran complejidad; sin embargo a continuación, se procede a explicar el método de solución exacta más conocido y usado por los expertos.

**7.2.1 Branch and Bound.** El método de ramificación y acotación, más conocido por su nombre en inglés Branch and Bound, recibe su nombre precisamente por las dos técnicas en las que basa su desarrollo, que son la ramificación y la acotación.

La ramificación consiste en dividir el problema en dos nuevos subproblemas, obtenidos mediante la imposición de restricciones excluyentes que dividen el conjunto de oportunidades del problema original en dos partes, pero eliminando en ambas partes la solución no entera del problema original, mientras la acotación se basa en el hecho de que dado que los conjuntos de oportunidades del subproblema (S11) y del subproblema (S12) son a su vez subconjuntos del conjunto de oportunidades del problema (S1) la solución óptima de los dos subproblemas siempre será inferior en el problema de máximo o superior para problemas de mínimo, que la solución óptima del problema 1.<sup>42</sup>

Es una técnica que realiza un recorrido sistemático en un árbol de soluciones, guiada por estimaciones de la función objetivo. Se usan técnicas de poda para eliminar posibles soluciones que no lleven a la solución óptima. Un concepto fundamental para entender el algoritmo es el nodo vivo, el cual es un nodo con posibilidades de ser ramificado, es decir, un nodo que no ha sido podado.

---

<sup>42</sup> UNIVERSITAT DE VALENCIA, Programación Lineal Entera.[En línea]. Available from World Wide Web: <<http://www.uv.es/~sala/Clase14.pdf>>

Este método se realiza en tres etapas:

- I. Selección: es la encargada de escoger un nodo del conjunto de nodos vivos. La forma es que se escogen los nodos depende directamente de la estrategia de búsqueda.
- II. Ramificación: Se construyen los posibles nodos hijos del nodo seleccionado en el paso anterior.
- III. Acotamiento: Se eliminan algunos nodos creados en la etapa anterior. Esto contribuye a disminuir en lo posible el espacio de búsqueda y así disminuir la complejidad del algoritmo. Aquellos nodos que no se eliminan, pasan a formar parte del conjunto de nodos vivos, y se comienza de nuevo el proceso de selección<sup>43</sup>

### 7.3 METODOS HEURÍSTICOS

El origen etimológico de la palabra heurística es del vocablo griego heuriskein que traduce descubrir o hallar, al igual que la palabra Eureka de Arquímedes<sup>44</sup>.

**7.3.1 HEURÍSTICA** La idea genérica del termino heurístico es la de resolver inteligentemente problemas reales con el conocimiento disponible. Una solución heurística es la proporcionada por un método heurístico, la cual tiene un alto grado de factibilidad, aunque no necesariamente la respuesta óptima<sup>45</sup>.

Pueden haber diferentes heurísticas para resolver un problema dado, aunque éstas más específicas o generales que otras, las soluciones heurísticas específicas se adaptan a un problema en particular mostrando un rendimiento más alto que las heurísticas generales, estas últimas por el contrario se caracterizan por ser aplicables a variados problemas, y por su sencillez<sup>46</sup>.

---

<sup>43</sup> CHASE, Richard B.; JACOBS, F. Robert Y AQUILANO, Nicholas J. Administración de la producción y operaciones: Para una ventaja competitiva. 10 ed. México: McGraw -Hill, 1997. p. 206-239.

<sup>44</sup> BRITO SANTANA, Julio, et. al. Metaheurísticas: una revisión actualizada. La Laguna: Universidad de La Laguna. Grupo de Computación Inteligente. Departamento de Estadística, Investigación Operativa y Computación, 2004. 47 p.

<sup>45</sup> Ibid., p. 47.

<sup>46</sup> Ibid., p. 47.

En las soluciones de problemas realizadas a través de heurísticas, no hay garantía de la calidad de la solución obtenida, sin embargo un método heurístico bien diseñado puede generar soluciones cercanas a la óptima. Por lo general una heurística es un algoritmo iterativo cuyo fin es encontrar una solución mejor que la anterior.

**7.3.2 METAHEURÍSTICA** El término metaheurística se obtiene de anteponer a heurística el sufijo meta que significa “más allá” o “a un nivel superior”. Son estrategias inteligentes que buscan mejorar las soluciones de procedimientos heurísticos muy generales con un alto rendimiento.

El término metaheurística se conoció por primera vez por F. Glover<sup>47</sup> en 1986. Una metaheurística es un tipo de método de solución que organiza de forma inteligente la interacción entre los procedimientos de mejora local y las estrategias de más alto nivel para generar un proceso que esté en capacidad de escapar de un óptimo local y realizar una búsqueda efectiva en un espacio de soluciones factibles.

### **7.3.2.1 Ventajas y Desventajas**

#### **Ventajas**

- Tiende a moverse relativamente rápido hacia soluciones muy buenas, por lo que proporciona una forma muy eficiente de abordar problemas grandes y complicados.
- Alto grado de confiabilidad en la solución
- Gran éxito en la práctica.

---

<sup>47</sup> GLOVER, Fred. Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. En: Computers & Operations Research. 1986, vol. 13, no 5, p. 533-549.

### **Desventajas**

- No existe garantía de optimalidad.
- Son aproximados y generalmente probabilísticas

**7.3.2.2 Tipos de Metaheurísticas.** En la literatura se encuentran diferentes tipos de metaheurísticas, planteadas por diversos investigadores para dar solución a problemas que impliquen procedimientos heurísticos, dentro de las más usadas se encuentran:

- **Metaheurísticas de relajación.** Se refieren a procedimientos de resolución de problemas que utilizan relajaciones del modelo original, es decir, modificar o eliminar restricciones del problema real, lo que lo hace más fácil de resolver en comparación al original<sup>48</sup>.
- **Metaheurísticas constructivas.** Las heurísticas constructivas están orientadas a la solución a partir de la selección paulatina de los componentes que la forman. Las metaheurísticas constructivas establecen estrategias para seleccionar las componentes con las que se construye una buena solución del problema. Dentro de este tipo de metaheurística, se destaca GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedures*), que en la primera de sus dos fases, incorpora a la estrategia “greedy” pasos aleatorios con criterios adaptativos para la selección de los elementos a incluir en la solución<sup>49</sup>.
- **Metaheurísticas de búsqueda.** Establecen estrategias para recorrer el espacio de soluciones del problema, transformando la forma de recorrer el espacio solución teniendo en cuenta soluciones alternativas. Un ejemplo de este tipo es, *escalada de montaña (en inglés hillclimbing)* que es un

---

<sup>48</sup> BRITO, et al. Op.cit., p. 6-10.

<sup>49</sup> Ibid., p. 6-10.

procedimiento de búsqueda local. Esta denominación obedece a que basa su estrategia en el estudio de soluciones del vecindario o entorno de la solución que realiza el recorrido<sup>50</sup>.

El principal inconveniente de estas búsquedas locales es que se quedan atrapadas en óptimos locales, sin permitir explorar otro espacio de soluciones. Las metaheurísticas de búsqueda global incorporan pautas para escapar de los óptimos locales de baja calidad. *El recocido simulado* es el ejemplo más importante de este tipo. Las metaheurísticas de búsqueda con memoria utilizan información sobre el recorrido realizado para evitar que la búsqueda se concentre en una misma zona del espacio. El ejemplo más representativo es la *búsqueda tabú* que prohíbe temporalmente soluciones muy parecidas a las últimas soluciones del recorrido<sup>51</sup>.

- **Metaheurísticas evolutivas.** Establecen estrategias para conducir la evolución de un conjunto de soluciones en el espacio solución, buscan acercarse a la solución óptima con sus elementos. A diferencia de las metaheurísticas de búsqueda que toman solo una solución, las metaheurísticas evolutivas toman un conjunto de soluciones del espacio solución.

Una de las características fundamentales de las heurísticas evolutivas consiste en la interacción entre los miembros de la población frente a la búsqueda que se guía por la información de soluciones individuales. Las diferentes metaheurísticas evolutivas se distinguen por la forma en que combinan la información proporcionada por los elementos de la población para hacerla evolucionar mediante la obtención de nuevas soluciones. Las principales metaheurísticas con enfoques evolutivos encontradas son el *algoritmo genético*, el *algoritmo de colonia de hormigas* y el *algoritmo HBMO*<sup>52</sup>.

---

<sup>50</sup> Ibid., p. 6-10.

<sup>51</sup> Ibid., p. 9-28.

<sup>52</sup> Ibid., p. 9-28.

## 8 SOLUCIONES EXISTENTES PARA EL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA CON PAREDES EN LA ESTRUCTURA INTERIOR Y PASAJES

### 8.1 ALGORITMO GENÉTICO MEJORADO

El algoritmo propuesto en el estudio de Lee KY, Han SN, y Roh MI en el 2003, se basa en el algoritmo genético (GA) que en la actualidad está siendo ampliamente utilizado para el diseño de distribución de las instalaciones, se propone un método para modelar la distribución de las instalaciones, un modelo de cromosoma de cuatro segmentos, incluyendo posiciones de pasajes, como se muestra en la figura 14. El primer segmento del cromosoma representa una secuencia de las instalaciones que deben asignarse.

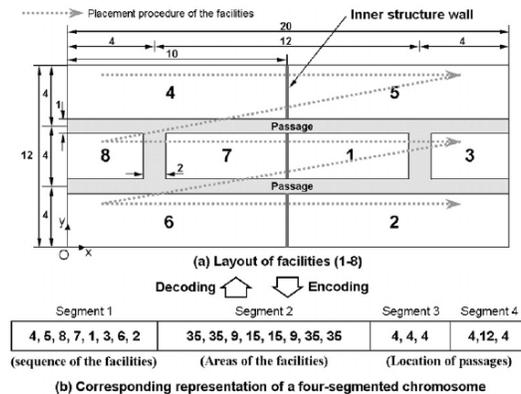
El segundo segmento representa las áreas de las instalaciones. Las áreas de las instalaciones se dan en el mismo orden que el primer segmento y se les permite variar entre sus límites superior e inferior. Los segmentos tercero y cuarto, respectivamente, representan las posiciones de los pasajes horizontales y verticales en términos de distancias desde el origen  $O$  en la figura 14. A las posiciones de los pasajes se les permite variar entre sus límites superior e inferior.

La figura 14, muestra un ejemplo de la disposición de las instalaciones, junto con la representación correspondiente del cuarto segmento del cromosoma.<sup>53</sup>

---

<sup>53</sup> LEE; HAN & ROH. Op. cit., p. 117–138.

**Figura 14. Un ejemplo de la disposición de las instalaciones y de la representación correspondiente al modelo de cromosoma de cuatro segmentos**



**Fuente:** LEE KYU, HAN SN, Y ROH MI, An improved genetic algorithm for facility layout problems having inner structure walls and passages, Computers & Operations Research 30 (2003) (117–138).

Se desarrolló un nuevo método de cálculo de la distancia entre instalaciones, se introdujo para determinar la distancia entre las mismas, mediante el uso de la teoría de grafos. En este nuevo método de cálculo de distancia entre todas las relaciones de instalaciones y pasajes, primero se representan en un gráfico de adyacencia. A continuación, el camino más corto entre las instalaciones de  $i$  y  $j$ , y la distancia  $d_{ij}$  entre estas instalaciones, se determina utilizando el algoritmo de Dijkstra de la teoría de grafos.

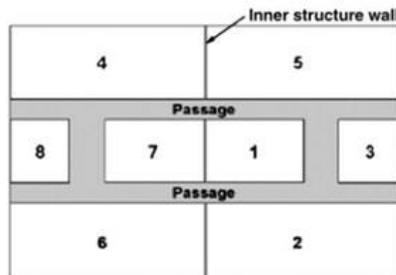
## 8.2 OPTIMIZACIÓN DE ENJAMBRE DE PARTÍCULAS

En el trabajo propuesto por R. Christu Paul, P. Asokan, VI Prabhakar, en 2006, se presenta un nuevo enfoque llamado enjambre de partículas de optimización (PSO) para obtener mejores soluciones para distribuciones desiguales, de la zona de las instalaciones que van a tener paredes interiores y pasadizos. PSO es una herramienta de optimización basado en la población, tiene valores de aptitud para evaluar la población, actualizar la misma y buscar la solución óptima con técnicas aleatorias.

Se describe la representación de la distribución de instalaciones de la siguiente manera: La figura 15, muestra la disposición de las instalaciones en el área

disponible rectangular con las paredes de la estructura interior y pasajes. El procedimiento de asignación de todas las instalaciones sigue un patrón variable que oscila entre [3, 15].

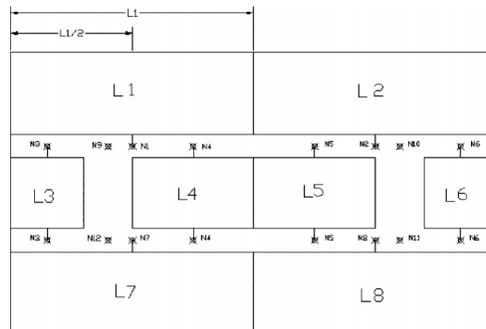
**Figura 15. Diseño con paredes de la estructura interior y pasajes**



**Fuente:** CHRISTU PAUL, P. ASOKAN, VI PRABHAKAR, A solution to the facility layout problem having passages and inner structure walls using particle swarm optimization, International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2006) 29; (766-771).

En esta solución se planteó un nuevo método para el cálculo de la distancia entre los centros a través de los pasajes. En este método, algunos nodos se establecen para cada instalación como se muestra en la figura 16, es decir, N1, N2, N3. . . N12.<sup>54</sup>

**Figura 16. Diseño con cálculo de nodos en la distancia**



**Fuente:** CHRIST PAUL, P. ASOKAN, VI PRABHAKAR, A solution to the facility layout problem having passages and inner structure walls using particle swarm optimization, International Journal of Advanced Manufacturing Technology (2006) 29; (766-771).

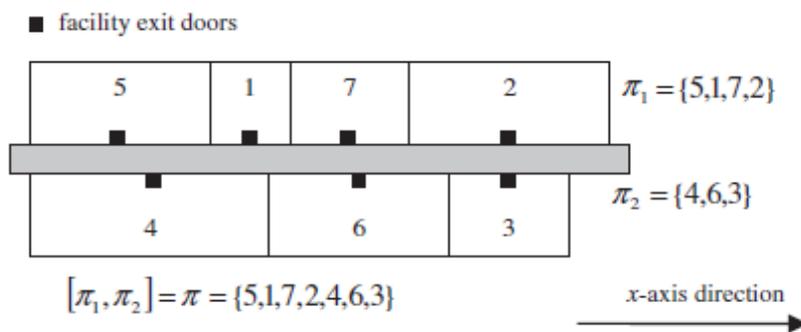
<sup>54</sup> Christu; Asokan & Prabhakar. Op. cit., p. 766-771.

### 8.3 PROBLEMA DE ASIGNACIÓN DE CORREDOR

En el problema de asignación de corredor se busca una forma alargada de las instalaciones a lo largo de un corredor central definido por dos líneas horizontales paralelas al eje x de un sistema de coordenadas cartesianas. Un diseño de CAP debe respetar dos condiciones principales: (i) no hay espacio permitido entre dos instalaciones adyacentes, y (ii) el punto de más a la izquierda la disposición en cualquiera de las líneas debe tener abscisa cero. Los requisitos (i) y (ii) son importantes en muchas aplicaciones, tales como arreglos de salas en edificios de oficinas u hospitales. El CAP puede ser visto como la organización de las longitudes de las instalaciones a lo largo de dos líneas paralelas horizontales.<sup>55</sup>

Un diseño de CAP puede ser representado por una partición de una permutación  $\pi$  en dos partes:  $\pi_1$  y  $\pi_2$ , en donde  $\pi_1$  y  $\pi_2$  dan la disposición de las instalaciones de cada fila paralela. En este contexto, el operador se define tal como  $[\pi_1, \pi_2] = \pi$  si y sólo si  $\{\pi_1, \pi_2\}$  es una partición de la permutación  $\pi$ .<sup>56</sup> Ver Figura 10.

Figura 17. Representación de diseño CAP como una partición  $\{\pi_1, \pi_2\}$  de una permutación  $\pi$



**Fuente:** ANDRÉ R.S. AMARAL, The corridor allocation problem, Computers & Operations Research 39 (2012) 3325–3330

<sup>55</sup> Amaral, André R.S. The corridor allocation problem. En: Computers & Operations Research. December, 2012, vol. 39, no. 12, p. 3325–3330.

<sup>56</sup> Ibid., p. 3325–3330.

## **9 ALGORITMO GENÉTICO: SOLUCIÓN PARA EL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA CON ESTRUCTURAS INTERNAS, MUROS Y PASAJES.**

Los algoritmos genéticos, fueron propuestos en 1975 por John Holland<sup>57</sup>, de la universidad de Michigan; tienen sus antecedentes en la biología y comienzan con Darwin<sup>58</sup>, que con su libro *“El origen de las especies por medio de la selección natural o la preservación de las razas favorecidas en su lucha por la vida”*, nos habla sobre los principios de la selección natural.

Los algoritmos genéticos están basados en modelos computacionales de la evolución biológica natural, pertenecen a la clase de los algoritmos evolutivos, junto con la programación evolutiva, la evolución de estrategias y la programación genética.

Los algoritmos genéticos (AGs) son mecanismos de búsqueda basados en las leyes de la selección natural y de la genética. Combinan la supervivencia de los individuos mejor adaptados junto con operadores de búsqueda genéticos como la mutación y el cruce, de ahí que sean comparables a una búsqueda biológica.<sup>59</sup> Son algoritmos de optimización, es decir, tratan de encontrar la mejor solución a un problema dado entre un conjunto de soluciones posibles; son métodos adaptativos, generalmente usados en problemas de búsqueda y optimización de parámetros, basados en la reproducción sexual y en el principio de supervivencia del más apto. Para alcanzar la solución a un problema se parte de un conjunto inicial de individuos, llamado población, generado de forma aleatoria. Cada uno de estos individuos representa una posible solución al problema.

---

<sup>57</sup> HOLLAND, John Henry. *Adaptation in natural and artificial systems*. University of Michigan Press, 1975. 183 p.

<sup>58</sup> DARWIN, Charles. *On the origin of species by means of natural selection*. London: J. Murray, 1859. 502 p.

<sup>59</sup> LÓPEZ DÍAZ, José Carlos. *Un algoritmo genético con codificación real para la evolución de transformadores lineales*. Trabajo de grado Ingeniería en Informática. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Informática, 2010. p. 14-19.

Estos algoritmos tienen aplicaciones variadas en ingeniería, como es el diseño de piezas (turbinas, rotores, etc.), diseño y control de redes, planificación de tareas, síntesis de mecanismos, diseño de tolerancias, etc. y aplicaciones en otros gremios como en sistemas de computación paralelos, optimización de procesos de producción, diseño tecnológico y de instalaciones, modelización de sistemas económicos complejos, predicción de mercados, análisis de datos en medicina, diagnóstico automático o análisis de datos en gestión. Para la ingeniería, los algoritmos genéticos y la programación evolutiva en general presentan oportunidades de plantearse problemas que no permiten una solución eficiente a través de la aplicación de técnicas convencionales.<sup>60</sup>

Las ventajas y características principales de los algoritmos genéticos son:<sup>61</sup>

- Son algoritmos estocásticos. Dos ejecuciones distintas pueden dar dos soluciones distintas.
- Son algoritmos de búsqueda múltiple.
- Tiende a converger a medida que se realizan más generaciones.
- La función objetivo da la información de los individuos más aptos.
- Las reglas de transición son probabilísticas, no determinísticas.
- Se pueden utilizar como método de optimización global o semilocal.
- El espacio de soluciones posibles es más amplio.
- Soporta optimización multimodal y multiobjetivo
- Es fácilmente modificable para ser utilizado en diferentes problemas.
- Puede manejar espacios de búsqueda grandes, incluso que no hayan sido debidamente estudiados.

---

<sup>60</sup> Ibid., p. 14-19.

<sup>61</sup> DI PASQUALE, Ricardo. Algoritmos genéticos. Available from Internet:  
<URL:<http://algoneticosgenitimos.files.wordpress.com/2013/01/cneisi-algoritmos-geneticos.pdf>.>

- No requieren conocer el gradiente u otra información sobre la función del problema.
- Tienen buen rendimiento en problemas de optimización a gran escala.
- Pueden ser empleados para una gran gama de problemas de optimización.

Los principales inconvenientes son<sup>62</sup>:

- El número de operaciones y por tanto el coste computacional puede ser muy alto
- Este tipo de método es apropiado cuando se trabaja con funciones que no son suaves, no son convexas y que no se deben aplicar a casos sencillos en que son más rápidos y precisos otros métodos.
- En el diseño de un algoritmo genético, a la hora de modelar el problema, es muy importante elegir una buena representación de las soluciones posibles y diseñar cuidadosamente la función de evaluación de dichas soluciones.
- Puede ser difícil identificar la función de fitness
- La definición de la representación de los cromosomas puede ser compleja.
- Puede ocurrir convergencia prematura.
- El problema de ajustar los parámetros (tamaño de población, probabilidad de mutación)
- No puede usar gradientes
- No incorporan por defecto heurística propia del problema.
- No son buenos para identificar óptimos locales.
- Necesitan ser acoplados a técnicas de búsqueda local.
- Tienen problemas en encontrar el óptimo global exacto.
- Requieren un gran tiempo de procesamiento para evaluar el fitness de cada individuo.
- 

---

<sup>62</sup> LÓPEZ DÍAZ. Op. cit., p. 46.

## 9.1 ESTRUCTURA

Se puede decir que el Algoritmo genético es un modelo que involucra poblaciones de posibles soluciones inspiradas en la selección y evolución natural. Entre los elementos requeridos para el algoritmo genético se encuentran: esquema de codificación de la población de soluciones, un mecanismo de selección de padres para la reproducción, el operador de cruce para crear nuevas generaciones provenientes de los padres seleccionados, el operador de mutación, y finalmente el esquema de sacrificio, donde se definen quienes permanecen y perduran de generación en generación, o por el contrario, quienes son eliminados.

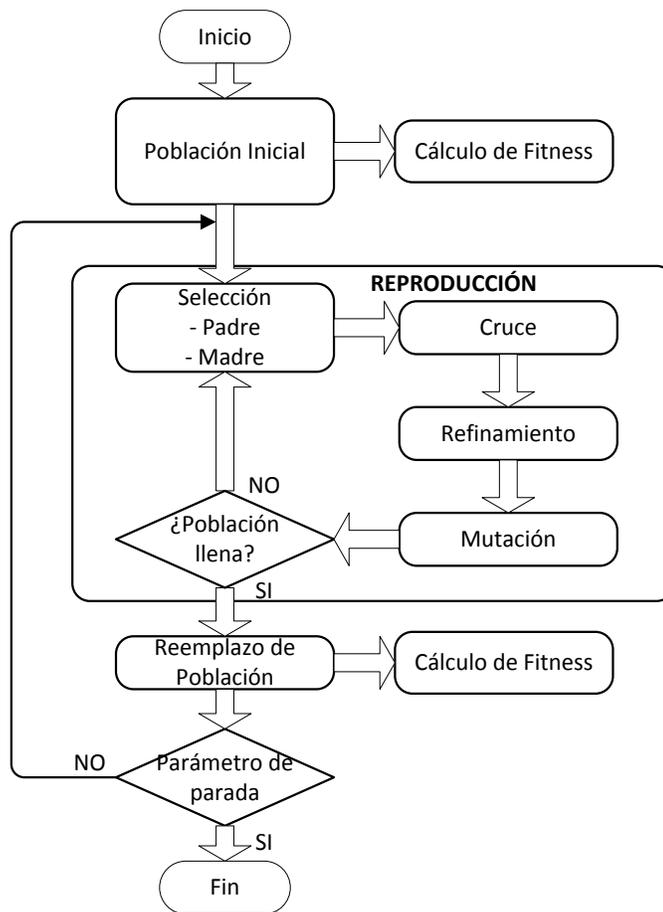
El pseudocódigo de un algoritmo genético es el siguiente:

- I. Elegir la población inicial de  $n$  individuos de forma aleatoria
- II. Evaluar la función objetivo (fitness) de cada individuo de la población
- III. Generar  $k$  nuevas soluciones, hasta terminar (límite de tiempo, alcanzar un valor en la función objetivo, etc.) Por medio de:
  - Seleccionar los mejores individuos para la reproducción (padres).
  - Crear nuevos individuos (hijos) a través de los operadores cruce y mutación.
  - Evaluar la función objetivo de las nuevas soluciones (hijos) y agregarlas a la población.
- IV. Seleccionar las mejores soluciones de la población, con el fin de que entren a ser parte en la siguiente generación, y se reemplace la población con los mejores individuos según su fitness.
- V. Sí el criterio de parada no se ha dado, regresar al paso III.

En la figura 18. Se muestra el diagrama de flujo simplificado con las partes más importantes de un algoritmo genético clásico: selección, reproducción y sustitución.

Aparte de estos procesos, que pertenecen al núcleo principal y exclusivo de los algoritmos genéticos, existen otros, de igual importancia, que sirven de apoyo a los anteriores: descripción del problema a resolver, codificación de sus soluciones e inicialización. La selección y codificación son los puntos críticos de un algoritmo genético.

**Figura 18. Esquema del Algoritmo Genético**



Al igual que en muchas otras heurísticas, el comportamiento del algoritmo genético es altamente dependiente de los parámetros iniciales (tamaño de la población, porcentaje de cruce, porcentaje de mutación, número de generaciones, etc.), por lo que es necesario ajustar estos parámetros para tratar de mejorar la solución para los objetivos del problema.

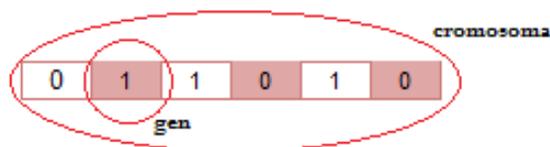
A cada iteración de este proceso se le denomina una generación. Un algoritmo genético típicamente se itera de 50 a 500 o incluso más generaciones. El conjunto entero de generaciones se denomina una ejecución. Al final de una ejecución existen a menudo uno o varios cromosomas altamente adecuados en la población, y que pueden ser elegidos como solución al problema.

La función de evaluación o de fitness de un problema es realmente la función que se desea optimizar. Su diseño es, junto con el del genotipo, una de las características más importantes a la hora de encontrar la mejor solución a un problema.

Se pueden considerar tres tipos básicos de representación o codificación de los genes:

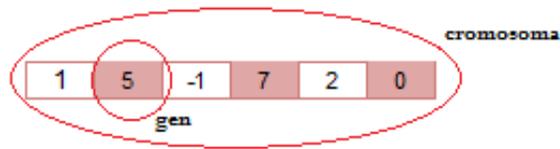
- **Binaria:** Es la codificación más extendida debido a que los primeros algoritmos genéticos utilizaron este tipo de codificación. En este caso, cada cromosoma es una cadena de bits (0 o 1). A su favor tiene que puede abarcar muchos cromosomas incluso con un número reducido de genes. Sin embargo por otro lado esta opción no es la idónea para muchos problemas y en algunas ocasiones es necesario realizar correcciones después de la reproducción y/o mutación. Este tipo de codificación se utiliza por ejemplo en el problema de la mochila. Se utiliza un vector cuya longitud es la del número de genes de cada individuo, y el valor que puede tomar cada elemento es un número binario. (Ver figura19)

**Figura 19. Representación cromosoma binario**



- **Entera:** En este tipo de codificación se utiliza un vector cuya longitud es la del número de genes de cada individuo y el valor que puede tomar cada elemento es un número entero. (Ver figura 20.)

**Figura 20. Representación cromosoma entera**

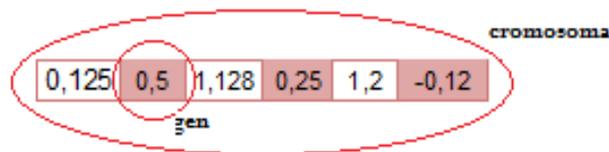


- **Real:** Este tipo de codificación es utilizada en caso de resolución de problemas, en los que se requiere del uso de valores de cifrado complicado, como podría ser en el uso de números reales, cuya codificación con números binarios sería muy complejo. En codificación por valor directo cada cromosoma es una cadena de valores relacionados con el problema a estudiar, pudiendo ser desde números decimales, cadenas de caracteres o incluso una combinación de varios de ellos.

Su aplicación es muy buena en ciertos problemas concretos. Por el contrario para la utilización de esta codificación, normalmente es necesario desarrollar nuevas técnicas de reproducción y mutación específicas hacia la resolución del problema. Una aplicación de esta codificación se da en la resolución de problemas para la búsqueda en las redes neuronales.

Se utiliza un vector cuya longitud es la del número de genes de cada individuo y el valor que puede tomar cada elemento es un número real. (Ver figura 21.)

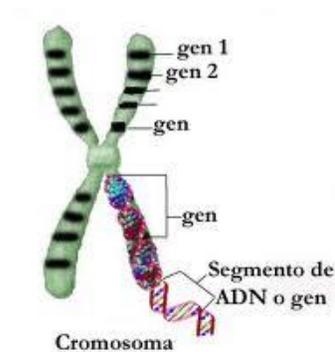
**Figura 21. Representación cromosoma real**



## 9.2 MODELO ANÁLOGO

Todos los organismos vivos están constituidos por células, y cada célula contiene uno o más *cromosomas* (cadenas de ADN). Un cromosoma puede ser conceptualmente dividido en *genes*, cada uno de los cuales codifica una proteína. En términos generales, se puede decir que un gen se codifica como si fuera un *rasgo*, como puede serlo el color de ojos. Cada gen se encuentra en una posición particular del cromosoma, y está formado por *alelos*. (Ver figura 22.)

**Figura 22. Modelo análogo**



**Fuente:** Carmen Eugenia Piña Lopez, Universidad Nacional Abierta a Distancia. Disponible en internet: URL <http://datateca.unad.edu.co/contenidos/201101/curso/cromosomas.html>

Se supone que los individuos (posibles soluciones del problema), pueden representarse como un conjunto de parámetros (que denominaremos genes), los cuales agrupados forman una cadena de valores, a menudo referida como cromosoma. Debe existir una representación de estos genes para poder utilizarlos posteriormente en el algoritmo genético y dotarles de unos valores. A continuación en la figura 23 un paralelismo entre los términos biológicos y los algoritmos evolutivos.<sup>63</sup>

<sup>63</sup> PEREZ, Elena. Guía para los recién llegados a los algoritmos genéticos.[online]. Universidad de Valladolid. Dpto. Organización de Empresas: Escuela de Ingenierías Industriales, 2010. p. 6. Disponible en internet: <URL:[http://www.insisoc.org/elena/Elena\\_Perez\\_Vazquez\\_archivos/files\\_newcomers/newcomers-spanish.pdf](http://www.insisoc.org/elena/Elena_Perez_Vazquez_archivos/files_newcomers/newcomers-spanish.pdf)>.

Figura 23. Paralelismo entre los términos biológicos y los algoritmos evolutivos.

<b>Término</b>	<b>Descripción</b>
<b>Ser vivo</b>	Ente natural formado por cromosomas
<b>Solución</b>	Elemento básico del algoritmo
<b>Genotipo</b>	Conjunto de factores heredados en un individuo
	Solución codificada del problema a resolver
<b>Fenotipo</b>	La dependencia con el ambiente en el que el genotipo funciona en la práctica
	La solución decodificada y que adquiere significado cuando se utiliza conjunta con los datos del problema.
<b>Cromosoma</b>	Estructura que transporta los factores hereditarios o genes
	Cadena de caracteres donde se almacena la solución codificada
<b>Gen</b>	Unidad de recombinación: el segmento más corto en que el cromosoma puede dividirse
	Número real o binario cuya unión forma el cromosoma
<b>Loci</b>	Cada una de las posiciones que puede ocupar un gen dentro del cromosoma
	Cada una de las posiciones en la cadena de codificación
<b>Generación</b>	Cada uno de los reemplazos que se origina cuando se tiene descendientes
<b>Iteración</b>	Cada uno de los pasos en que se divide la búsqueda

### 9.3 ALGORITMO PROPUESTO

La representación utilizada en este proyecto, es la codificación entera de un cromosoma. Un individuo es una solución potencial al problema que se trata. Cada individuo contiene un cromosoma. A un conjunto de individuos se le denomina población.

El fitness de un individuo es la evaluación de la función objetivo e indica qué tan bueno es el individuo (solución del problema) con respecto a las demás. Así que, en otras palabras:

- **Cromosoma:** Es una cadena de longitud igual al número de departamentos (el primer cromosoma está constituido por los números que representan a cada departamento y el segundo por las áreas disponible para cada uno de ellos)
- **Genotipo:** Es una permutación de la longitud del cromosoma. Es una posible solución, que indica el orden en el que se deben ubicar los departamentos.
- **Fenotipo:** Es el orden específico de ubicación de las instalaciones, una vez decodificada la solución.
- **Genes:** Son cada uno de los números enteros que forman la cadena (cromosoma).

La población de los individuos son soluciones al problema que se está desarrollando, están representados por una cadena de genes, donde el número de genes que conforma dicho genotipo es igual al número de departamentos (N) del problema.

Un ejemplo de un genotipo (individuo), para un problema de 6 departamentos se muestra a continuación: (Figura 24)

Figura 24. Ejemplo fenotipo



**9.3.1 Parámetros.** Los parámetros generales para trabajar en el algoritmo propuesto, son:

- Población Inicial ( $n$ ): Representa el número de individuos a tener en cuenta al inicio de cada generación.
- Número de Generaciones ( $nG$ ): Representa la cantidad de veces que se corre el algoritmo; en otras palabras la cantidad de generaciones que dará lugar la población inicial, antes de detener el problema.
- Tasa de mutación ( $T_{mut}$ ): Es el porcentaje de individuos que muta en cada generación. En la implementación del algoritmo se trabaja con una mutación del 0.05.
- Tasa de Penalización ( $T_{pen}$ ): Es el porcentaje en el cual se incrementa la función objetivo, de acuerdo al incumplimiento de las restricciones.

**9.3.2 Limitaciones.** A la hora de analizar este tipo de problema es necesario incluir una serie de consideraciones. En este caso se ha supuesto que:

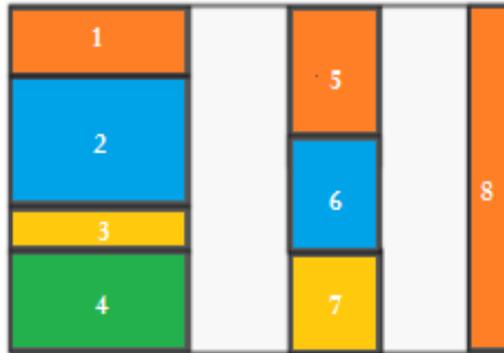
- I. La superficie de la fábrica tiene forma rectangular.
- II. Los diferentes departamentos también tienen formas rectangulares.
- III. El cálculo de las distancias tiene en cuenta los centroides de los departamentos y pasillos, a través de distancias rectilíneas.

**9.3.3 Resolución del Problema.** El desarrollo de este algoritmo busca que todos los departamentos tengan una forma regular, rectangular, por lo que la posibilidad de que un departamento tenga una forma "extraña" queda eliminada, esto se logra ubicando los departamentos dentro de columnas de ancho variable; entendiendo como columna, las distintas agrupaciones de departamentos separadas por pasillos verticales o secciones obtenidas mediante las agrupaciones de los departamentos.

Es por esto que cada columna es del ancho necesario para los departamentos asignados a ella, de tal forma que se ajustan dentro de las dimensiones de la

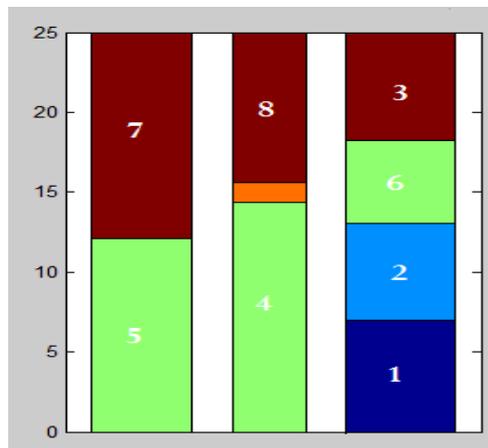
superficie. Por lo cual los departamentos de una misma columna tienen el mismo ancho, pero el ancho entre columnas es diferente para cada una. (Ver figura 25).

**Figura 25. Representación de agrupación por columnas**



Por otro lado, se diseña un algoritmo que permita realizar una distribución en planta que contemple el diseño automático de pasillos tanto verticales, como horizontales. Para este último se define un valor de ancho de pasillo fijo de 1,2 metros, mientras que el ancho de los pasillos verticales es variable, y está determinado por el ancho disponible después del cálculo del espacio ocupado por las diferentes columnas. (Figura 26)

**Figura 26. Representación con pasillos horizontales**



**9.3.4 Población Inicial.** Generalmente la población inicial es seleccionada de forma aleatoria, por lo que cada gen tiene una probabilidad uniforme de obtener gran variedad de diferentes secuencias en el orden de las instalaciones.

Se podría preguntar ¿qué es lo que sucede en caso de que los individuos de la población inicial se obtengan como resultado de alguna técnica heurística o de un proceso de optimización local?. En los pocos trabajos que existen sobre este aspecto, se constata que esta inicialización no aleatoria de la población inicial, puede acelerar la convergencia del Algoritmo Genético. Sin embargo en algunos casos la desventaja resulta ser la prematura convergencia del algoritmo, queriendo indicar con esto la convergencia hacia óptimos locales.

Es por esta razón que para el desarrollo del algoritmo de este proyecto, se toma la decisión de generar la población inicial a partir de la aleatoriedad.

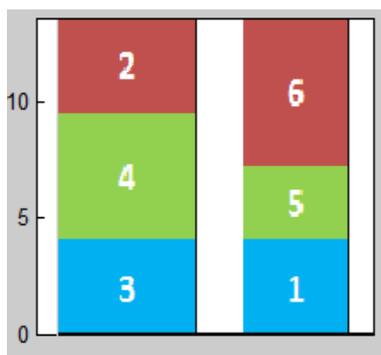
**9.3.5 Codificación.** La codificación utilizada para la solución de este problema consta de columnas de ancho variable. Donde el individuo está determinado por dos sub-cadenas. La primera sub-cadena, consiste en asignar un número a cada departamento, de modo que cada cromosoma (diseño) en la población se componen de una cadena de números, los cuales representan los departamentos. La posición en la cadena muestra la posición del departamento en el área disponible, por ejemplo (2, 3, 1) indica que hay tres departamentos a instalar, y que se encuentran en el siguiente orden: en el primer departamento el número 2 (siempre se comienza en la esquina superior izquierda), a continuación, el departamento 3, y, finalmente, el departamento 1.

La segunda, siendo del mismo tamaño de la primera sub-cadena, incluye información adicional necesaria para saber cuándo hay que pasar de una columna a la siguiente.

Esta información auxiliar combina de ceros y unos. Un '0' indica que la columna no se ha completado, y un '1' que el departamento es el último de una fila, y que la columna es así completada<sup>64</sup>.

Un ejemplo más claro de lo anteriormente expuesto es el siguiente, supóngase que se cuenta con 6 departamentos a ubicar, en el siguiente orden (2,4,3,6,5,1) y la segunda sub-cadena está compuesta de la siguiente manera (0,0,1,0,0,1). Por la cantidad de unos en la sub-cadena auxiliar, se puede deducir que el número de columnas donde se asignan los departamentos es dos; en la primera columna se ubican las cantidad de departamentos hasta donde se halla el "1", es por esto que en ella se colocan los departamentos (2, 4, 3), y en la segunda columna los departamentos (6,5,1)<sup>65</sup> como se ilustra en la figura 27.

**Figura 27. Ejemplo de columnas variables**



**9.3.6 Función Objetivo (Fitness).** La función objetivo es la que permite valorar la aptitud de los individuos, por lo que siempre debe tomar valores positivos, representa que es a lo que se quiere llegar al optimizar la función, ya sea que se busque maximizar o como es nuestro caso se requiera minimizar.

<sup>64</sup> Gómez, et al. Op. cit., p.271-282.

<sup>65</sup> DÍAZ ROMERO, Oscar Andrés. Resolución de problemas de distribución en planta con pasillos mediante algoritmos genéticos. [online] Universidad Católica del Maule. Facultad de Ingeniería Civil Informática. Disponible en Internet : <URL:[http://es.scribd.com/doc/89987927/RESOLUCION\\_DE\\_PROBLEMAS\\_DE\\_DISTRIBUCION\\_DE\\_PLANTA\\_CON-pasillo-mediante-algoritmos-geneticos](http://es.scribd.com/doc/89987927/RESOLUCION_DE_PROBLEMAS_DE_DISTRIBUCION_DE_PLANTA_CON-pasillo-mediante-algoritmos-geneticos)>.

En un Algoritmo Genético existen dos aspectos que resultan cruciales en el comportamiento de los mismos, que son: la determinación de una adecuada función de adaptación o función objetivo, y la codificación utilizada.

Una importante dificultad en el comportamiento del Algoritmo Genético puede ser la existencia de gran cantidad de óptimos locales, así como el hecho de que el óptimo global se encuentre muy aislado. La regla general para construir una buena función objetivo, es que ésta debe reflejar el valor “real” del individuo, sin embargo en muchos problemas de optimización combinatoria, donde existe gran cantidad de restricciones, buena parte de los puntos del espacio de búsqueda representan individuos no válidos.

Para este planteamiento en el que los individuos están sometidos a restricciones, se han propuesto varias soluciones. La primera es la que podemos denominar absolutista, en la que aquellos individuos que no verifican las restricciones, no son considerados como tales, y se siguen efectuando cruces y mutaciones hasta obtener individuos válidos, o bien, a dichos individuos se les asigna una función objetivo igual a cero, en caso de que lo que se busque es maximizar la función, o un valor muy grande, cuando se busca minimizar la misma. Otra posibilidad consiste en reconstruir aquellos individuos que no cumplen con las restricciones. Dicha reconstrucción suele llevarse a cabo por medio de un nuevo operador que se acostumbra a denominar reparador.

Adicionalmente si el individuo no cumple con las restricciones del problema, se puede usar la penalización de la función objetivo del individuo, por un valor de penalización que guarde relación con las restricciones que dicho individuo viola. Dicha cantidad puede simplemente tener en cuenta el número de restricciones violadas o bien el denominado costo esperado de reconstrucción, es decir, el coste asociado a la conversión de dicho individuo en otro que no viole ninguna restricción.

Para el desarrollo de este algoritmo, inicialmente se definió como función objetivo la siguiente función:

$$\text{Min } F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m f_{ij} * d_{ij}$$

Donde,

$f_{ij}$  = *flujo de materiales entre las instalaciones i y j*

$d_{ij}$  = *distancia entre los centroides de las instalaciones i y j*

$m$  = *número de departamentos*

Sin embargo, el desarrollo de este problema se encuentra sujeto a ciertas restricciones como lo son: las relaciones de forma y el ancho de los pasillos verticales entre instalaciones; la primera restricción busca que las instalaciones no tomen formas demasiado largas o anchas, sino que por el contrario tengan un relación de ancho por alto que brinde formas que tiendan a ser cuadradas, adicional la siguiente restricción penaliza los pasillos verticales, cuyos anchos sean menores a 1.2 mtrs ya que estos violan el Artículo 12 del **ESTATUTO DE SEGURIDAD INDUSTRIAL Resolución Número 2400 de 1979** , donde se establece que: *“Los corredores que sirven de unión entre los locales, escaleras, etc., y los pasillos interiores de los locales de trabajo que conduzcan a las puertas de salida, deberán tener la anchura precisa teniendo en cuenta el número de trabajadores que deben circular por ellos, y de acuerdo a las necesidades propias de la industria y establecimiento de trabajo. La anchura mínima de los pasillos interiores de trabajo será de 1,20 metros”*

En cuanto a los valores de área de cada instalación y al valor de área total disponible, no es necesario incluirlo como restricción, dada la forma en que se desarrolla el algoritmo para la adecuación de dichas áreas, lo cual se analiza más adelante. Es por esta razón que usando el método de penalización, la función objetivo final es:

$$\text{Min } F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m f_{ij} * d_{ij} + (k * \%f * F)$$

Donde,

$k$  = Cantidad de veces que se viola una restricción

$\%f$  = Porcentaje de penalización sobre la función objetivo sin restricciones

$F$  = Función objetivo sin restricciones

**9.3.7 Selección.** El proceso de selección, se usa para elegir a los individuos mejor adaptados de la población, de forma que actúen de progenitores de la siguiente generación. En la naturaleza existen varios factores que intervienen para que un individuo pueda tener descendencia. El primero de todos es que consiga sobrevivir, ya sea porque no es devorado por depredadores, o porque es capaz de conseguir alimento. Lo segundo es que encuentre pareja para reproducirse. El último factor influye en que ambos individuos sean aptos para crear un nuevo individuo. Sin embargo, en la realidad es posible que el individuo más apto no pueda reproducirse, y sí que otro individuo menos apto pueda conseguirlo. Aunque éste hecho es menos probable, sigue siendo posible.

En los algoritmos genéticos, la selección es un conjunto de reglas que sirven para elegir a los padres de la siguiente generación. Estos padres se reproducirán y generarán descendencia, al igual que los individuos en la naturaleza. Los métodos de selección basados en la calidad de las soluciones (adaptación de individuos), seleccionan a los mejores individuos (soluciones) para que se reproduzcan, formado parte de la población de padres. Por el contrario, los peores individuos (soluciones) no serán seleccionados y desaparecerán de la búsqueda. Este proceso permite que una misma solución pase varias copias a la población de padres. Se trata, por tanto, de un muestreo sin sustitución.

Los métodos existentes en la actualidad se dividen en tres, los basados en la calidad, en el orden y los que realizan la selección mediante torneos o competiciones. Para este algoritmo se emplea el método de selección por ruleta.

- **El método selección por ruleta o proporcional**, fue desarrollado en un principio por Holland en 1975, y ampliamente analizado por otros autores como Brindle en su Tesis Doctoral en 1981 y Goldberg en 1989.

La operación de selección se usa para seleccionar dos individuos (padre y madre) a partir de la población actual. El método proporcional es el más popular de los métodos de selección estocásticos. En este método, se selecciona al individuo con base a una probabilidad de selección, que se muestra en la siguiente ecuación:

$$P_{\text{selección}}(i) = \frac{F(i)}{\sum_i F(i)}$$

La probabilidad de selección  $p_i$ , para el individuo  $i$  es solamente una función de la capacidad relativa del individuo  $i$ .

Una vez calculada la probabilidad de selección de cada individuo, el paso a seguir es organizarlos en orden de menor a mayor. Dado que, lo que busca este problema es minimizar la función objetivo, a lo que se procede es a intercambiar los valores de las probabilidades, de tal forma que las funciones con menor valor en la función objetivo queden con las probabilidades más altas, y los de mayor valor en la función objetivo, tengan las probabilidades más bajas. A continuación se calculan las probabilidades acumuladas de todos los individuos.

Para concluir con la selección de los padres lo que se generan 2 aleatorios de (0-1) y se ubican dentro de las probabilidades acumuladas los individuos que estén dentro de estos valores.

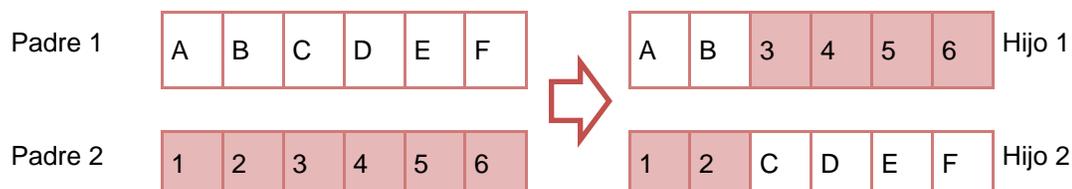
Con este método los individuos de mejor aptitud participarán en la creación de la próxima generación con más frecuencia que los que tienen peor aptitud.

**9.3.8 Cruce.** Una vez seleccionados los individuos que van a cumplir la función de padres, son recombinados para producir la descendencia que hará parte en la siguiente generación. Es de importancia resaltar que el cruce es una estrategia de reproducción sexual.

La idea principal del cruce se basa en que, si se toman los dos individuos correctamente adaptados al medio, se obtiene una descendencia que comparte genes de ambos, existe la probabilidad de que los genes heredados sean precisamente los causantes de la bondad de los padres. Al compartir las características buenas de ambos padres, la descendencia o al menos parte de ella, debería tener una bondad mayor que cada uno de los padres por separado. Existen multitud de algoritmos de cruce. Sin embargo los más empelados son<sup>66</sup>:

- **Cruce de 1 punto:** En la bibliografía SPX (Single Point Crossover). Es la más sencilla de las técnicas de cruce. Una vez seleccionados dos individuos, se cortan sus cromosomas por un punto seleccionado aleatoriamente para generar dos segmentos diferenciados en cada uno de ellos: la cabeza y la cola. Se intercambian las colas entres los individuos para generar nuevos descendientes. (ver figura 28)

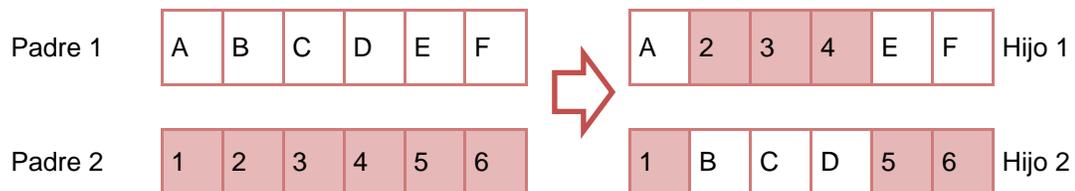
**Figura 28. Cruce de un punto**



<sup>66</sup> GESTAL, Marcos, et. al. Introducción a los algoritmos genéticos y la programación genética. A Coruña: Universidade da Coruña, 2010. p. 20-23. ISBN 978-84-9749-422-9.

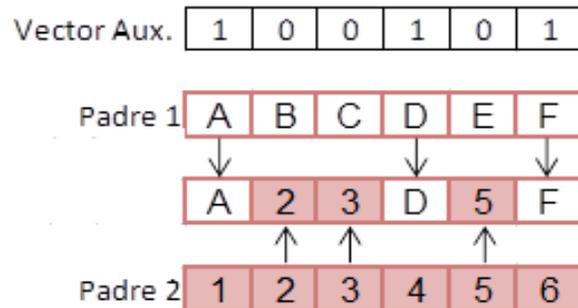
- **Cruce de 2 puntos:** Se suele referir a este tipo de cruce con las siglas DPX (Double Point Crossover). Se trata de una generalización del cruce de 1 punto. En vez de cortar por un único punto los cromosomas de los padres como en el caso anterior se realizan dos cortes. Se debe tener en cuenta que ninguno de estos puntos de corte coincida con el extremo de los cromosomas para garantizar que se originan tres segmentos. Para generar la descendencia se escoge el segmento central de uno de los padres y los segmentos laterales del otro padre. (Ver figura 29.)

**Figura 29. Cruce de dos puntos**



- **Cruce uniforme:** Se suele referir a este tipo de cruce con las siglas UPX (Uniform Point Crossover), es el cruce aplicado en el desarrollo de este algoritmo. La técnica implica la generación de un vector auxiliar de cruce con valores binarios. Si en una de las posiciones del vector auxiliar hay un 1, el gen situado en esa posición en uno de los descendientes se copia del primer padre. Si por el contrario hay un 0 el gen se copia del segundo padre. Para producir el segundo descendiente se intercambian los papeles de los padres, o bien se intercambia la interpretación de los unos y los ceros. (Ver figura 30)

**Figura 30. Cruce Uniforme**



En una aplicación real, puede presentarse que al combinar los genes de dos cromosomas, un mismo gen (departamento) se repita en una misma solución; lo cual no puede ser considerado como una solución factible. Es por esta razón que el algoritmo se encarga de buscar dentro del cromosoma que no falte ninguna de las instalaciones, en caso tal que halle una faltante, éste compara que ningún gen se repita y localiza al gen doble, que es reemplazado por el gen faltante.

**9.3.9 Mutación.** La función de la mutación es provocar que en un individuo, varié el valor de alguno de sus genes en forma aleatoria, con esto intenta imitar el comportamiento que se da en la naturaleza<sup>67</sup>.

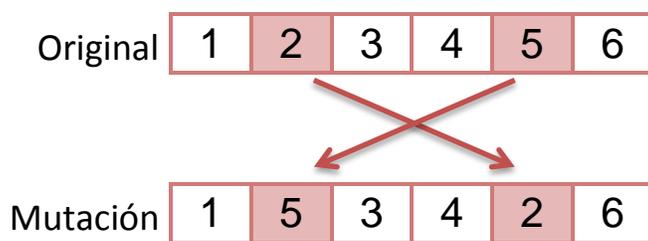
Es por esta razón que se considera un operador básico, que proporciona un pequeño elemento de aleatoriedad en los individuos de la población. En otras palabras, el operador de mutación es el responsable del aumento o reducción del espacio de búsqueda dentro del algoritmo genético y del fomento de la variabilidad genética de los individuos de la población.

<sup>67</sup> ARROYO APAZA, Víctor Manuel. Modelo de un algoritmo genético con selección discriminatoria de individuos bajo un esquema de ponderación de probabilidades de mutación. Trabajo de grado(IngenieríaInformática). Peru: Universidad Católica San pablo, 2013. 64 p

La Mutación se utiliza en bajo porcentaje (entre el 1 y el 5 % en codificación binaria o finita, hasta 10 o 15% en codificación real)<sup>68</sup>, debido al peligro de que opere sobre la única copia disponible de una buena solución y la arruine. Hay que tener en cuenta que un porcentaje excesivo de mutación provoca que la búsqueda se convierta en aleatoria (dado que gran cantidad de soluciones son mutadas al azar en cada generación); y un porcentaje demasiado bajo puede provocar convergencia prematura, o que ciertas zonas del espacio de búsqueda no sean exploradas.

Existen varios métodos para aplicar la mutación a los individuos de una población, para este proyecto, se usó un tipo de mutación denominada al azar. También conocida como Swap Mutación, este tipo de mutación consiste en elegir 2 números al azar dentro de la cantidad de genes y una vez generados, se procede a intercambiar los valores que estaban en ese orden. Un ejemplo de esto lo veremos a continuación donde se generaron dos números aleatorios 2 y 5. Por esta razón para mutar la solución se procede a intercambiar los lugares de los genes 2 y 5, como se ilustra a continuación en la figura 31.

**Figura 31. Mutación**



**9.3.10 Reemplazo.** Para la sustitución o reemplazo destacaremos que existen dos tipos diferentes de algoritmos genéticos según sea el proceso de la reproducción, y que afecta a la forma de aplicar la sustitución.<sup>69</sup>

<sup>68</sup> WILL, Adrian. Algoritmos genéticos y optimización heurística. [En línea]. Universidad Nacional de Tucuman. Disponible en internet: <URL: [http://www.herrera.unt.edu.ar/gapia/Curso\\_AG/Curso\\_AG\\_08\\_Clase\\_3.pdf](http://www.herrera.unt.edu.ar/gapia/Curso_AG/Curso_AG_08_Clase_3.pdf)>

<sup>69</sup> PEREZ. Op. cit., p. 27.

- **Algoritmos genéticos generacionales.** Donde de la población inicial formada por  $N$  individuos se obtienen  $N$  padres que son recombinados mediante los operadores genéticos apropiados para dar lugar a  $N$  hijos. Después, estos  $N$  hijos sustituyen directamente a la población inicial siendo así la población de partida de la siguiente generación cerrando el ciclo.
- **Algoritmos genéticos de creación continúa.** En esta técnica se seleccionan dos individuos para obtener dos hijos, siendo incorporados a la población mediante la sustitución de uno o dos individuos. La sustitución puede ser:
  1. Totalmente aleatoria. Todos tienen la misma probabilidad.
  2. Seleccionando directamente al peor ó peores individuos.
  3. Mediante técnicas de clasificación u ordenación.

La principal diferencia entre los algoritmos genéticos generacionales y los de creación continua es que cuando se crea un buen individuo, el cual está disponible para el proceso inmediatamente, mientras que en el reemplazo generacional hay que esperar a la siguiente generación.

Para el desarrollo de este algoritmo, se usó una combinación de ambos tipos de algoritmos, se llevó acabo de la siguiente manera: de la población inicial se seleccionan dos individuos para obtener dos hijos, dichos hijos son almacenados en otra matriz, sin sustituir o reemplazar a la población inicial. Los  $N$  individuos de la población inicial son recombinados de acuerdo al método de la ruleta, explicado anteriormente hasta dar lugar a  $N$  hijos. Una vez terminado este proceso, se procede a consolidar en una sola población la población inicial y la población de hijos, para seguidamente escoger los mejores  $N$  individuos, que se convertirán en la nueva generación. De esta forma se garantiza que los mejores individuos sobrevivan a las nuevas generaciones.

**9.3.11 Condiciones de Parada.** Generalmente el criterio o condición de parada, viene determinado por criterios que define el usuario, comúnmente definido como un número máximo de generaciones o el tiempo máximo de búsqueda de la solución. Los algoritmos más eficientes utilizan estrategias relacionadas con indicadores del estado de evolución de la población, como por la pérdida de diversidad dentro de la población o por no haber mejora en un cierto número de iteraciones. Por lo general lo más utilizado es una condición mixta, donde se busca limitar el tiempo de ejecución a un número de iteraciones y adicionalmente tener en cuenta algún indicador del estado de la población que considere la convergencia antes de alcanzar tal limitación.<sup>70</sup>

Sin embargo para el desarrollo de este proyecto se establece como condición de parada el número de generaciones que define el usuario, como dato de entrada.

## 9.4 EJERCICIO DE APLICACIÓN

A continuación se desarrolla el ejercicio de aplicación propuesto en el artículo: Using genetic algorithms to resolve layout problems in facilities where there are aisles por A.Gómez, Q.I. et al<sup>71</sup> (2003), (ejercicio al cual se le ajusto el área total disponible para la adecuación del pasillo horizontal) para un mejor entendimiento del funcionamiento del algoritmo genético:

*1. Condiciones del problema:* Se trabaja con 6 departamentos de áreas: [10 15 10 12 10 15] en [m<sup>2</sup>], en una planta con dimensiones de: alto 8 [m] y ancho 13 [m]. Las relaciones entre los departamentos están dadas por los flujos que se ven a continuación en la tabla 6.

---

<sup>70</sup> CABALLERO FERNÁNDEZ, Rafael, et. al. Algoritmos Genéticos para la resolución de problemas de programación por metas entera. Aplicación a la economía de educación. Departamento de economía aplicada.[En línea].Universidad de Málaga. Disponible en internet: <URL: <http://www.uv.es/asepuma/X/J01C.pdf> >.

<sup>71</sup> GÓMEZ, et al. Op. cit., p. 271-282.

**Tabla 5. Matriz Flujos del Caso de Aplicación**

MATRIZ DE FLUJOS ENTRE DEPARTAMENTOS						
	1	2	3	4	5	6
1	0	1000	20	200	50	1000
2		0	200	20	0	200
3			0	50	1000	20
4				0	50	0
5					0	50
6						0

*II. Parámetros del Algoritmo Genético*

Número de Generaciones: 100

Tamaño de la Población: 100

Probabilidad de Mutación: 5%

Porcentaje de Penalización: 20%

*III. Inicialización:* Se genera una población inicial de forma aleatoria, en la que cada uno de los individuos o distribuciones está formado por una permutación de seis números, correspondiendo cada uno de estos números a un departamento. Esta población sirve como punto de partida del AG. Así por ejemplo, tomemos el siguiente individuo [4 2 1 6 3 5] como punto de partida

*IV. Ubicación de Departamentos:* Como ya se había mencionado, es necesario crear una subcadena binaria auxiliar para cada uno de los individuos de la población, de dimensión igual al número de departamentos que se tengan (en el ejemplo analizado son de seis) cuya misión consiste, en indicar en que columna se encuentra ubicado cada uno de los departamentos.

Para el caso de Aplicación, la subcadena auxiliar es [1 0 0 1 0 1], lo que significa que la distribución se hace en tres columnas. La primera [4], la segunda [2 1 6] y la tercera [3 5] Las dimensiones de las columnas se calculan de la siguiente forma:

- Columna 1:** Área del Dpto = 12  
 Alto de la superficie= 8  
 Ancho de la columna=  $12/8= 1,50$
- Columna 2:** Área del Dpto =  $15+10+15$   
 Alto de la superficie=  $8-1,2$   
 Ancho de la columna=  $40/6,8= 5,88$
- Columna 3:** Área del Dpto =  $10+10$   
 Alto de la superficie= 8  
 Ancho de la columna=  $20/8= 2,5$

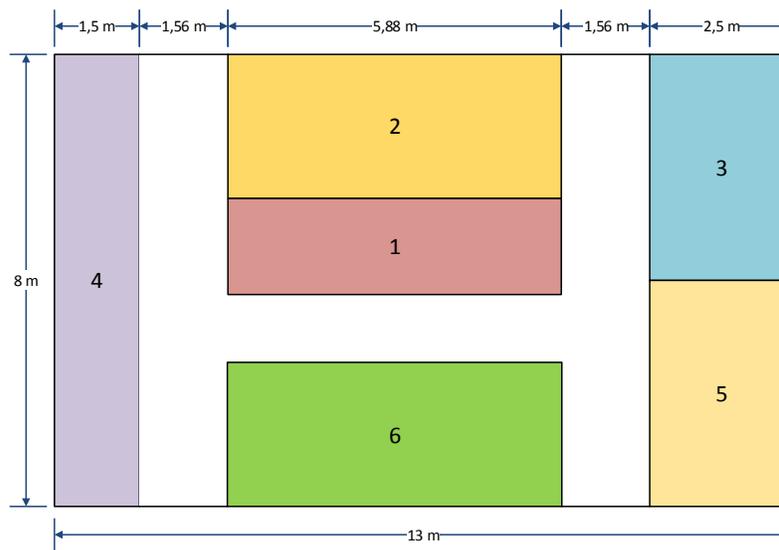
*Todos Los  
pasillos  
intermedios*

- Pasillo Vertical:** No. De Columnas =3  
 No. De Pasillos=  $3-1=2$

$$\text{Ancho} = \frac{\text{Ancho total} - \text{Ancho columnas}}{\text{No. De Pasillos}} = \frac{(13-9.88)}{2} = 1,56$$

V. *Calculo de Distancias:* Para el cálculo de las distancias se tienen en cuenta las variaciones rectilíneas en los centroídes (entendido como el centro de simetría de una figura geométrica), de cada departamento, los resultados de los mismos se presentan en la tabla 7, para el cálculo de los centroide se toma como marco de referencia la esquina superior izquierda tal como se ilustra en la figura 32.

**Figura 32. Distribución del Caso de Aplicación**



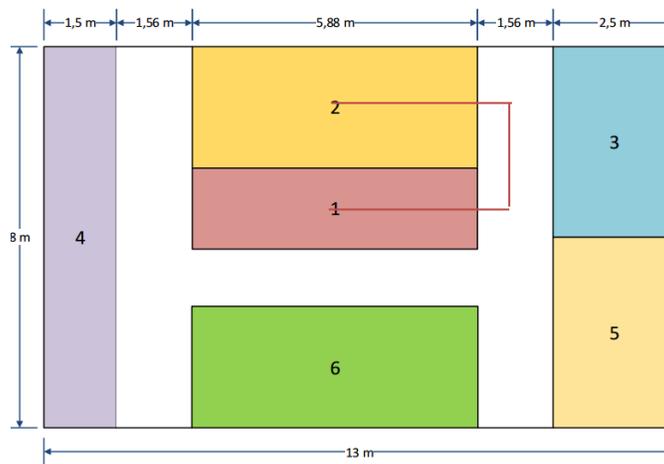
**Tabla 6. Centroides de los Departamentos y Pasillos**

<b>Centroides de los departamentos y pasillos</b>		
<b>Departamento/ pasillo</b>	<b>coordenada x</b>	<b>coordenada y</b>
Departamento 1	6,00	3,40
Departamento 2	6,00	1,28
Departamento 3	11,75	2
Departamento 4	0,75	4
Departamento 5	11,75	6
Departamento 6	6,00	6,73
Pasillo vertical 1	2,28	4
Pasillo vertical 2	9,72	4
Pasillo horizontal	6,00	4,85

Con el plano podemos ver más claramente el cálculo de las distancias. Para entender este proceso, se explica detalladamente el cálculo de 2 a 4 de 2 a 1 y de 4 a 3.

Cálculo entre departamentos en una misma columna (De 2 a 1): Para el caso, es la misma distancia de 1 a 2. Como se supuso que las puertas se sitúan lateralmente el desplazamiento se hace de la siguiente forma (ver Figura 33):

**Figura 33. Cálculo entre departamentos en una misma columna**



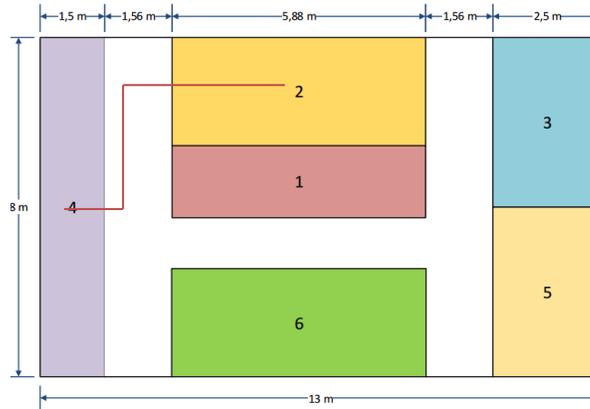
$$D_{1-2} = 2|X_1 - X_{pv2}| + |Y_1 - Y_2|$$

$$D_{1-2} = 2|6 - 9,72| + |3,40 - 1,28|$$

$$D_{1-2} = 7,15$$

Cálculo entre departamentos ubicado en columnas continuas (De 2 a 4): Como se supuso que las puertas se sitúan lateralmente el desplazamiento se hace de la siguiente forma (Ver figura 34):

**Figura 34. Cálculo entre departamentos ubicado en columnas continuas**



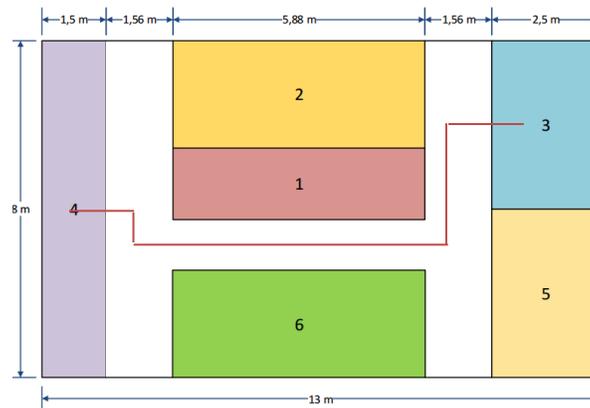
$$D_{2-4} = |X_2 - X_4| + |Y_2 - Y_4|$$

$$D_{2-4} = |6 - 0.85| + |1.28 - 4|$$

$$D_{2-4} = 7.98$$

Cálculo entre departamentos ubicados con columnas intermedias (De 4 a 3): Como se supuso que las puertas se sitúan lateralmente, y debe respetar el espacio ocupado por el pasillo horizontal, el desplazamiento se hace de la siguiente forma (Ver figura 35):

**Figura 35, Cálculo entre departamentos ubicados con columnas intermedias**



$$D_{3-4} = |X_4 - X_{ph}| + |X_{ph} - X_3| + |Y_4 - Y_{ph}| + |Y_{ph} - Y_3|$$

$$D_{3-4} = |0.75 - 6| + |6 - 11.75| + |4 - 4.85| + |4.85 - 2|$$

$$D_{3-4} = 14.70$$

Se analizan de dos en dos, hasta llenar la matriz de distancias como se ilustra en la tabla 8.

**Tabla 7. Matriz de Distancias del Ejercicio de Aplicación**

	1	2	3	4	5	6
1	0	9.57	7.15	5.85	8.35	10.77
2		0	6.48	7.98	10.48	12.89
3			0	14.70	8.06	10.48
4				0	13.00	7.98
5					0	6.48
6						0

VI. *Cálculo del Fitness*: Corresponde según las distancias de Departamentos, multiplicando las distancias halladas por sus respectivos flujos como lo dice la función.

$$Min F = \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^m f_{ij} * d_{ij} + (k * \%f * F)$$

Donde,

$k$  = Cantidad de veces que se viola una restricción

$\%f$  = Porcentaje de penalización sobre la función objetivo sin restricciones

$F$  = Función objetivo sin restricciones

Adicionalmente se debe tener en cuenta cuantas veces se penaliza la función por incumplimiento con las restricciones. El ancho del pasillo vertical es mayor a 1,2 por lo tanto cumple con la restricción.

Para esto se procede a calcular el valor de la restricción de forma de cada instalación, es decir la proporción entre su alto y su ancho, este se calcula dividiendo el alto por el ancho, se expresa normalmente como «X:Y» Para el ejercicio de aplicación, la restricción de forma debe estar dentro de los límites:  $0,5 \leq \text{restricción} \leq 1,7$ , en caso contrario el valor de k se incrementa en 1 por cada incumplimiento.

En la tabla 9, puede apreciarse los datos obtenidos.

**Tabla 8. Relación de Forma**

RELACIÓN DE FORMA	
1	0,29
2	0,43
3	1,6
4	5,33
5	1,6
6	0,43

Como se puede observar existen 4 incumplimientos en las restricciones. Reemplazando los valores en la función objetivo tenemos:

$$\begin{aligned} \text{Min } F &= 36072,66 + (4 * 0,2 * 36072,66) \\ \mathbf{Z} &= 64930,79 \end{aligned}$$

Una vez evaluados todos los individuos de la población mediante la función objetivo, el proceso continúa, mediante la realización de la selección (Ruleta), y son seleccionados los individuos aptos para la reproducción, para posteriormente aplicarles los operadores de cruce y mutación.

Una vez realizada la reproducción de los individuos, se obtiene una nueva población para trabajar, continuándose el proceso hasta satisfacer el criterio de culminación elegido, en este caso que se cumplan el número de generaciones establecido.

## **10 HERRAMIENTA DE APLICACIÓN.**

Para el diseño de la herramienta de aplicación se utiliza el software MATLAB versión R2012a. Donde se codifica el algoritmo correspondiente a la metaheurística de Algoritmos Genéticos, siguiendo los parámetros estudiados y definidos para el desarrollo de este proyecto. La herramienta computacional permite dar solución al problema de distribución de planta de un solo nivel con estructuras internas, muros y pasajes.

Este capítulo pretende dar a conocer la herramienta, ofrecer una guía para los usuarios donde se explique cómo manejar la interfaz desarrollada y adicionalmente informar sobre los requerimientos que el usuario debe tener en cuenta, así como las condiciones de uso y limitaciones de funcionamiento.

### **10.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA**

Para el correcto funcionamiento del programa, necesita instalar la versión de MATLAB en la que fue desarrollada la herramienta, para el caso MATLAB versión R2012a.

### **10.2 USO DE LA HERRAMIENTA**

Al abrir MATLAB en el equipo, se despliega la interfaz de usuario como se observa en la figura 36, en la cual se debe seleccionar el icono “ABRIR”, que corresponde a la carpeta señalada en color rojo, al hacer clic en ella, el usuario puede seleccionar la carpeta “ FLP\_AG” como se ve a continuación en la figura 37.

Figura 36. Vista Ventana "Interfaz de usuario MATLAB"

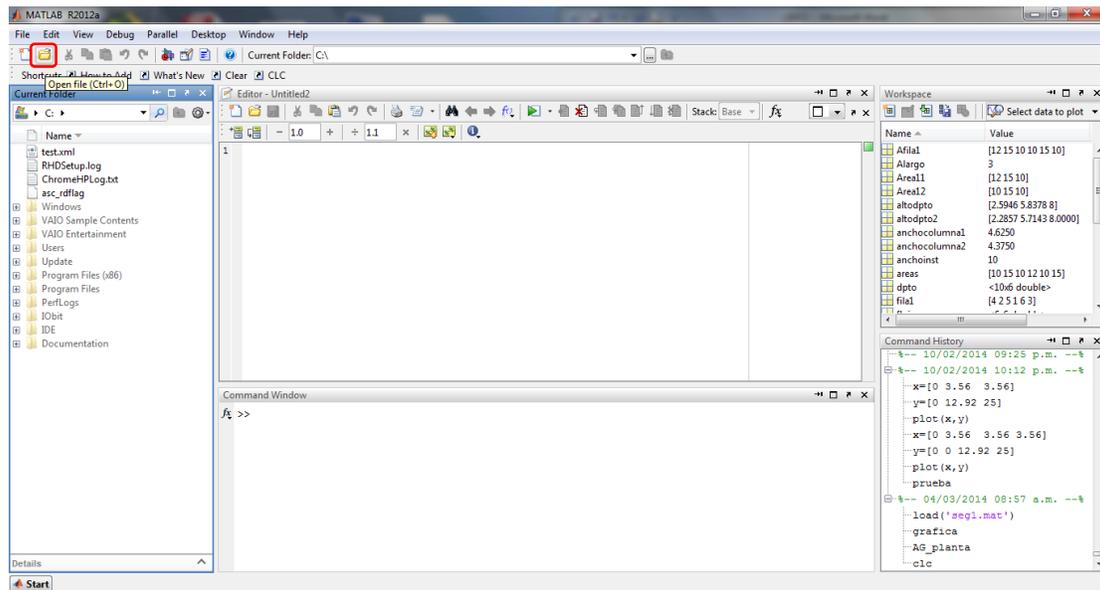
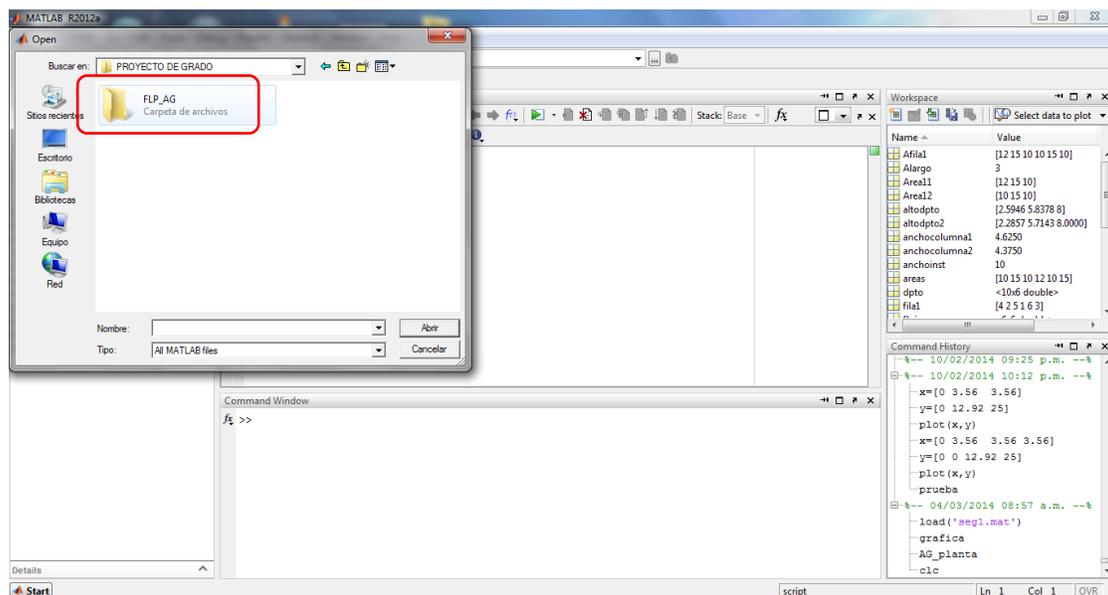


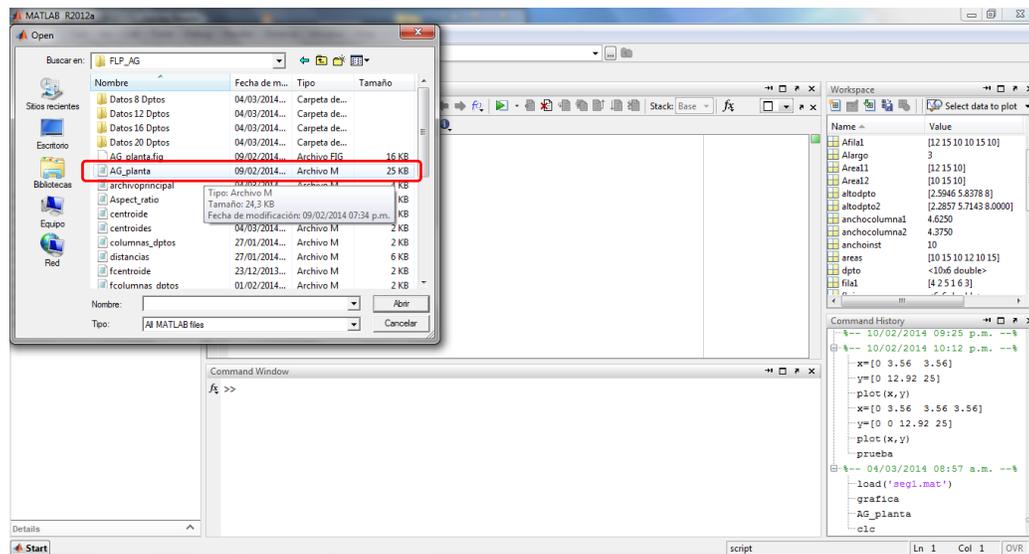
Figura 37, Vista Ventana "Carpeta FLP\_AG"



Al seleccionar la carpeta "FLP\_AG" se abren todos los archivos.m donde se ha codificado la metaheurística, además de una carpeta con el nombre "Datos Dptos", en la cual se encuentran almacenados los problemas de aplicación que se desarrollaron en el trabajo, para su correcto funcionamiento se debe dejar fuera de la carpeta el archivo que se desea corra el programa, debido a que el

programa reconoce el archivo en excel llamado “Datos” donde el usuario puede guardar cualquier otro problema de distribución de planta que desee abordar, más adelante se explica con mayor detalle. Para abrir la interfaz gráfica de la herramienta diseñada, se selecciona haciendo clic en el archivo “AG\_planta”, de tipo “Archivo.M”. Ver figura 38 .

**Figura 38. Vista Ventana "Abrir Interfaz de la herramienta"**



Al abrir el archivo, se despliega el código general del algoritmo, con lo que se procede a hacer clic en el icono “Ejecutar” o “Run”  , dando lugar a una ventana más pequeña como se evidencia en la figura 39, donde se debe seleccionar la opción “Change Directory” que dará paso a la interfaz de la herramienta diseñada. (figura 40).

Figura 39. Vista Ventana "Entorno para abrir interfaz de herramienta"

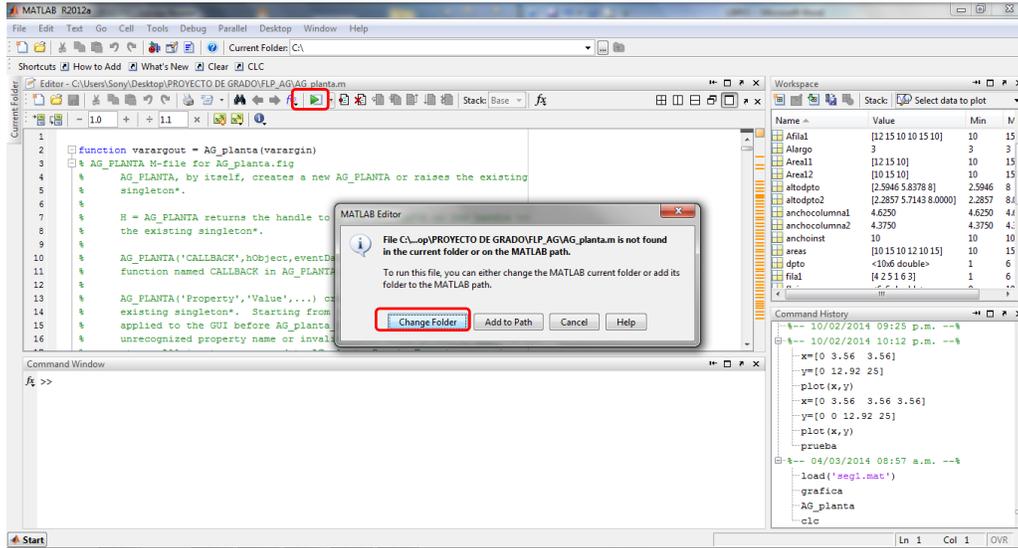
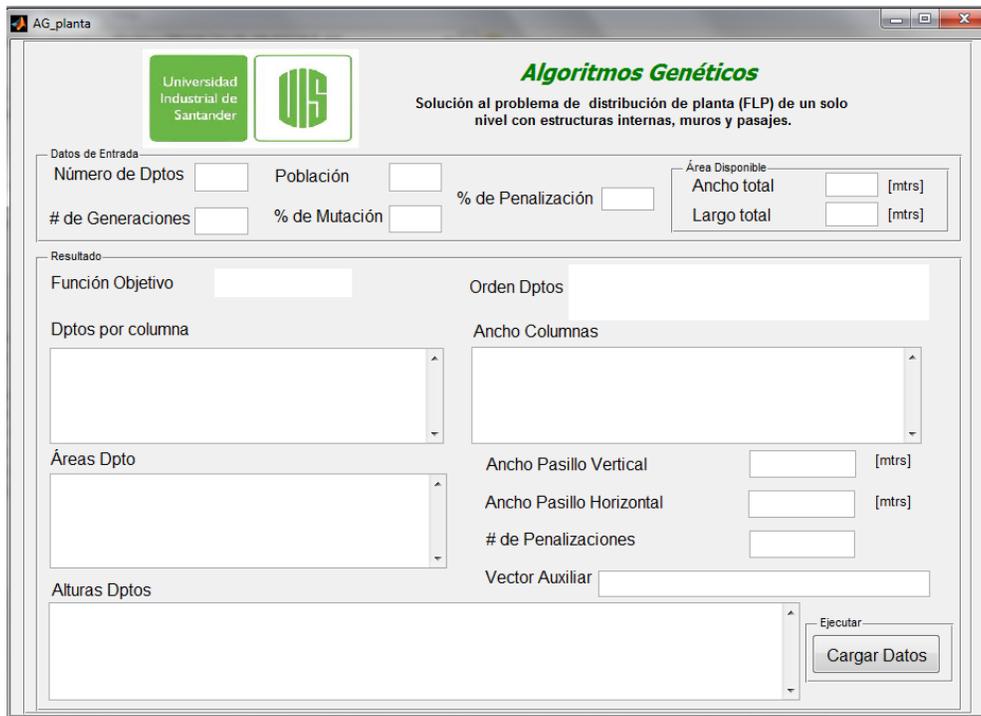


Figura 40. Vista Ventana "Interfaz gráfica FLP\_AG"



### 10.3 PROBLEMA

Para el desarrollo de este algoritmo, la distribución de planta de los departamentos es de áreas iguales, debido que el problema se lleva a cabo bajo la configuración de columnas de ancho variable, como se explicó anteriormente.

**10.3.1 Ingreso de Datos.** Los datos de entrada que el usuario debe digitar son: Número de departamentos, Número de Generaciones, Tamaño de población, Porcentaje de mutación, Porcentaje de penalización, así como el ancho y el alto total de área disponible. Así mismo es necesario que se digiten en un archivo de Excel el área de cada uno de los departamentos y la matriz de flujos actual de la planta.

- **Número de Departamentos:** Se refiere a la cantidad de departamentos, ya sean oficinas, grupos de máquinas o centros de trabajo, los cuales se van a distribuir en el área total disponible de la planta. Para el ejemplo se aborda un problema de 8 departamentos.
- **Número de Generaciones:** Corresponde al número de generaciones que se desean realizar. Para el ejemplo se trabaja con 100 generaciones.
- **Tamaño de población:** Representa el número de individuos que se tiene al inicio de cada generación. Para el ejemplo 100 individuos
- **Porcentaje de Mutación:** Es el porcentaje de individuos que muta en cada generación. Para el ejemplo se usa un porcentaje de 5%
- **Porcentaje de Penalización:** Es el porcentaje en el cual se incrementa la función objetivo, por cada incumplimiento a las restricciones. Para el ejemplo 20%
- **Área Disponible:** Se refiere al área total disponible (Ancho y Alto) donde son ubicados los departamentos.
- **Áreas de Departamentos:** Son las áreas de cada uno de los departamentos a ubicar en el problema, las cuales deben ser digitadas en el archivo Excel "Datos" de la carpeta "FLP\_AG"

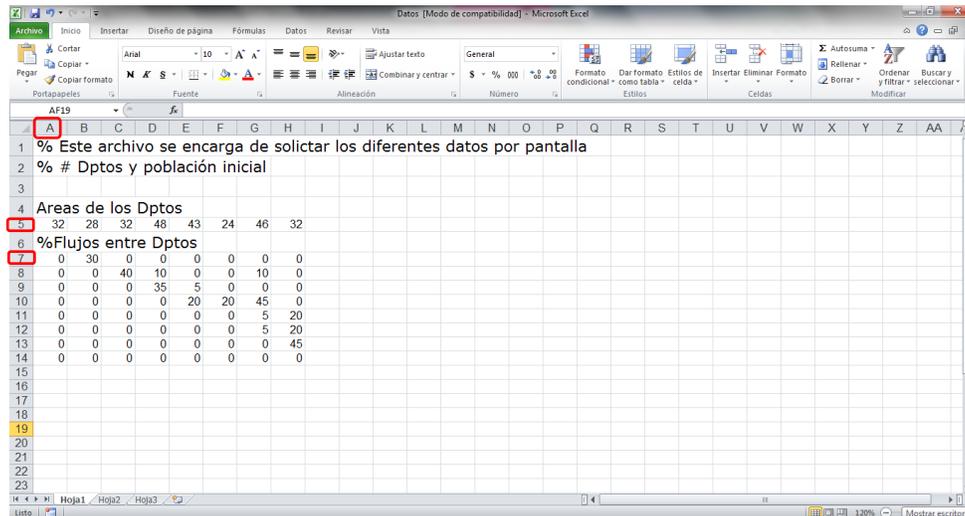
- **Matriz de Flujos:** Corresponde a la cantidad de material y/o producto en proceso que se transporta entre departamentos, por lo cual debe ser una matriz de tamaño igual a la cantidad de departamentos digitada, para nuestro ejemplo una matriz cuadrada de tamaño 8x8, la cual debe ser almacenada en el archivo Excel “Datos” de la carpeta “FLP\_AG”.

Para ingresar los datos de área y la matriz de flujos, se llena el archivo en Excel anteriormente nombrado. Los datos de las áreas de las instalaciones se ingresan en la fila 5 iniciando en la columna A, de derecha a izquierda, en caso de que la cantidad de departamentos sea mayor a la del ejemplo simplemente se siguen digitando los datos en las columnas siguientes.

Los datos de matriz de flujo, también deben incluirse en el mismo archivo a partir de la fila 7, en la columna A, recorriendo de derecha a izquierda y de arriba hacia abajo.

De igual forma si la cantidad de departamentos es mayor a la del ejemplo, lo que implica que el tamaño de la matriz aumenta en la misma proporción, simplemente se siguen digitando los datos en las filas y columnas siguientes. A continuación, en la figura 41 se muestra un ejemplo de los datos que se llenan en el archivo “Datos”

**Figura 41. Ingreso de datos al algoritmo propuesto**



Una vez digitados los datos de entrada en la interfaz, y completo el archivo de excel, se procede a hacer clic en “Cargar Datos” lo que da lugar a la ejecución del programa. (Ver figura 42.)

**Figura 42. Ejemplo de ingreso de datos**

The screenshot shows a software window titled 'AG\_planta' with a header for 'Universidad Industrial de Santander' and 'Algoritmos Genéticos'. The main title is 'Solución al problema de distribución de planta (FLP) de un solo nivel con estructuras internas, muros y pasajes'. The interface is divided into 'Datos de Entrada' and 'Resultado' sections. The 'Datos de Entrada' section contains several input fields: 'Número de Dptos' (8), 'Población' (100), '% de Mutación' (5), '% de Penalización' (20), 'Área Disponible' (21 [mtrs]), 'Ancho total' (16 [mtrs]), and 'Largo total' (16 [mtrs]). The 'Resultado' section includes fields for 'Función Objetivo', 'Orden Dptos', 'Dptos por columna', 'Ancho Columnas', 'Áreas Dpto', 'Ancho Pasillo Vertical', 'Ancho Pasillo Horizontal', '# de Penalizaciones', 'Alturas Dptos', and 'Vector Auxiliar'. A 'Cargar Datos' button is highlighted with a red box in the bottom right corner.

**10.3.2 Obtención de la solución.** Al terminar la ejecución, los campos vacíos de la interfaz son llenados automáticamente, y adicionalmente se despliega en una ventana la gráfica de la distribución solución. Cabe resaltar que aún cuando la gráfica respeta las alturas de los departamentos y el alto disponible, no sucede lo mismo con los anchos, ya que la gráfica no muestra a escala los anchos de los mismos. Sin embargo es útil para identificar los pasillos de la distribución.

Es por esta razón que los datos que se llenan en la interfaz son de gran importancia, a continuación se explicará en detalle los datos que se obtienen con la ejecución de este programa. Figura 43:

- **Funcion Objetivo:** En este campo de la interfaz se muestra el valor fitness penalizado de la solución calculada por el programa.

- **Orden Dptos:** En este campo de la interfaz se ve reflejado el vector del orden de los departamentos en la solución, orden que el programa lee de izquierda a derecha y va acomodando de arriba hacia abajo empezando por la primera columna de la izquierda en la gráfica.
- **Dptos por columna:** En este campo se puede visualizar la distribución del vector solución por columnas.
- **Ancho Columnas:** En este campo se encuentran los anchos de cada columna de departamentos, la lectura de los mismos se corresponde con el campo Dptos por columna con una lectura de izquierda a derecha.
- **Áreas dpto:** Los datos de áreas encontrados en este campo corresponden respectivamente al orden mostrado en el campo de Dptos por columna.
- **Ancho pasillo vertical:** En este campo se puede observar el resultado final del ancho de los pasillos verticales.
- **Ancho pasillo horizontal:** Para la ejecución del programa como se define en capítulos anteriores, se establece un ancho fijo correspondiente al valor mínimo de ancho de pasillo, de uno coma dos metros 1,2 [m]
- **# de penalizaciones:** En este campo se hace el conteo de las restricciones que infringe la solución, tanto las de forma como la del pasillo vertical.
- **Vector Auxiliar:** En este campo se muestra la segunda subcadena o vector auxiliar, el cual define la distribución por columnas de los departamentos.
- **Alturas Dptos:** Define la coordenada de cada departamento, tomando como marco de referencia la esquina superior izquierda de la planta.
- **Gráfica de la Distribución:** Representación de solución (Ver Figura 44)

**Nota:** El tiempo computacional para encontrar la solución puede tardarse minutos, horas, hasta días completos buscando la mejor solución posible, esto puede variar dependiendo de la cantidad de instalaciones a distribuir y la cantidad de generaciones a realizar.

Figura 43. Mejor solución encontrada

**Datos de Entrada**

Número de Dptos: 8    Población: 100    % de Penalización: 20    Área Disponible: Ancho total: 21 [mtrs]    Largo total: 16 [mtrs]

# de Generaciones: 100    % de Mutación: 5

**Resultado**

Función Objetivo: 2331.1848    Orden Dptos: 1 2 6 4 3 5 8 7

**Dptos por columna**

1	4	8
2	3	0
6	5	7

**Ancho Columnas**

5.25	8.3108	4.875
------	--------	-------

**Áreas Dpto**

32	48	32
28	32	0
24	43	46

**Ancho Pasillo Vertical**: 1.2821 [mtrs]

**Ancho Pasillo Horizontal**: 1.2 [mtrs]

**# de Penalizaciones**: 0

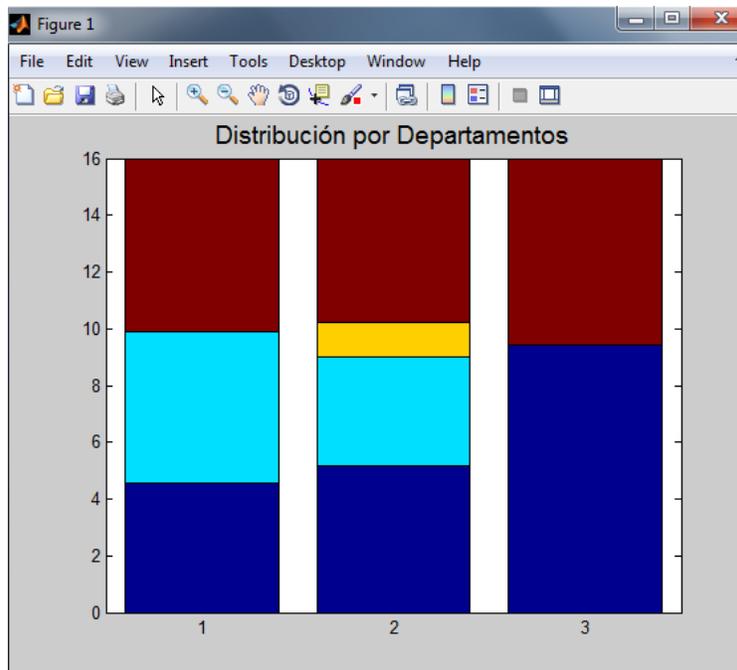
**Alturas Dptos**

6.1	5.78	6.56
999	6.98	999
11.43	10.83	0
16	16	16

**Vector Auxiliar**: 0 0 1 0 0 1 1

Ejecutar:

Figura 44. Gráfica de la mejor solución encontrada



## 11 ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE RESULTADOS.

Con el objeto de conocer el comportamiento del algoritmo estudiado bajo diferentes condiciones o parámetros, se realizó el siguiente estudio:

Para empezar, se procede a identificar los parámetros a utilizar en el algoritmo. Se decide analizar el comportamiento del Algoritmo Genético para 4 tamaños de planta diferentes (8, 12, 16 y 20 departamentos) seleccionados de acuerdo al artículo "*An improved genetic algorithm for facility layout problems having inner structure walls and passages*", datos enviados por el señor Myung-II Ro, *Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul National University*, a través de correo electrónico.

Sin embargo los datos arrojados por el algoritmo, no pueden ser comparados con los resultados del artículo debido a que los parámetros de los pasillos son planteados, pero no son aplicados de la misma forma, el algoritmo es desarrollado en un buque, donde los pasillos ya están preestablecidos.

El experimento se lleva a cabo mediante la aplicación del programa "FLP\_AG" diseñado y desarrollado por los autores de este proyecto, el funcionamiento del algoritmo, no solo ubica departamentos, sino que también crea y asigna los pasillos horizontales y verticales, que han de permitir la comunicación entre los mismos. Es por esta razón, que a los datos de entrada recibidos, de uno de los autores del artículo mencionado anteriormente, se les aplicó ciertas consideraciones, entre las cuales están: manejar un área de departamento fijo, y aumentar el área total disponible, con la intención de dejar el espacio necesario para incluir las áreas de los pasillos.

Dadas estas consideraciones, las comparaciones de los resultados arrojados por el software desarrollado, se hacen contra los resultados hallados mediante otro método de solución al problema de distribución de planta, como lo es la matriz de relación de actividades, con la que se busca la mejor distribución de planta basada

en el flujo, una vez definida la mejor distribución, se procede al cálculo del ancho de columnas de la misma forma que se desarrolla en el software (Ver Anexo A). Y su respectiva representación (Ver Anexo B)

A continuación se presenta en resumen los datos obtenidos en la tabla

**Tabla 9. Soluciones por Matriz de Relación**

<b>No. De Dptos</b>	<b>Mejor Solución</b>
<b>8</b>	9.162,5
<b>12</b>	14.006,57
<b>16</b>	21.009,97
<b>20</b>	25.822,88

## 11.1 PRESENTACIÓN DE DATOS

Para determinar la mejor función objetivo, se tuvieron en cuenta 4 factores: número de generaciones, tamaño de población, porcentaje de mutación, Porcentaje de penalización. En la tabla 11. Se presentan los datos que se utilizan en cada uno de los cuatro tamaños de planta definidos.

**Tabla 10. Datos de entrada**

	<b>Departamentos</b>			
	<b>8</b>	<b>12</b>	<b>16</b>	<b>20</b>
<b>No. De Generaciones</b>	100	100	100	100
<b>Tamaño de población</b>	100	100	100	100
<b>Porcentaje de mutación</b>	5%	5%	5%	5%
<b>Porcentaje de penalización</b>	20%	20%	20%	20%

## 11.2 DESEMPEÑO DEL ALGORITMO

Para medir el desempeño del algoritmo desarrollado, se usa el método de solución denominado matriz de relación de actividades. A continuación se muestra en la tabla 12 la comparación de resultados entre ambos métodos. Para verificar los datos arrojados por el programa ver Anexo C.

Tabla 11. Desempeño del Algoritmo

	Departamentos			
	8	12	16	20
# de Penalizaciones matriz de Relaciones	5	5	6	5
# de Penalizaciones Algoritmo	0	3	3	2
Z matriz de Relaciones [unid/metros]	9.162,50	14.006,57	21.009,97	25.822,88
Z Algoritmo propuesto [unid/metros]	4.588,01	13.332,63	20.738,77	24.789,67
Variación Porcentual	49,92%	4,81%	1,29%	4,00%

En la tabla anterior se puede observar que la herramienta desarrollada por los autores, reduce la cantidad de incumplimientos para todos los ejercicios resueltos (8, 12, 16 y 20 departamentos). Como también se reducen los valores de función objetivo, dados en unidades transportadas por distancias recorridas en metros. Adicional a esto se observa, una notable mejora porcentual en distribuciones con pocos departamentos, y una pequeña mejora a medida que aumenta la cantidad de los mismos.

## 11.3 ANÁLISIS DE DATOS

Se quiere medir la efectividad en la respuesta de la función objetivo de los cuatro ejercicios de distribución de planta, solucionados por los dos métodos diferentes, el método de matriz de relaciones y el Algoritmo propuesto por los autores, eliminando el efecto de la cantidad de departamentos a distribuir 8, 12, 16 y 20 Departamentos, tal como se muestra en la Tabla 13.

**Tabla 13. Análisis de Datos**

	<b>Matriz de Relaciones</b> [unid/metros]	<b>Algoritmo Propuesto</b> [unid/metros]
<b>8 Departamentos</b>	9162,5	4588,01
<b>12 Departamentos</b>	14006,57	13332,63
<b>16 Departamentos</b>	21.009,97	20.738,77
<b>20 Departamentos</b>	25.822,88	24.789,67

Para el diseño del experimento se toman como tratamientos los métodos de solución al problema de distribución de planta y como bloques la cantidad de departamentos considerados en los ejercicios, dando como resultado la Tabla 14.

**Tabla 14. Tabla Anova**

<b>FUENTE DE VARIACION</b>	<b>SC</b>	<b>GL</b>	<b>CM</b>	<b>Rv=Fo</b>
<b>Entre tratamientos</b>	5367464,01	1	5367464,01	2,73
<b>Bloques</b>	394401770,37	3	131467256,79	
<b>Dentro de Tratamientos</b>	5893149,11	3	1964383,04	
<b>TOTAL</b>	405662383,48	7	57951769,07	

A continuación se realiza el planteamiento de la hipótesis y decisión de la misma con un nivel de confianza del 95 %

Planteamiento de la Hipótesis:

$$H_0: \mu_{\text{Algoritmo Propuesto}} = \mu_{\text{Matriz de Relaciones}}$$

$$H_a: \mu_{\text{Algoritmo Propuesto}} \neq \mu_{\text{Matriz de Relaciones}}$$

Regla de decisión al  $\alpha = 5\%$

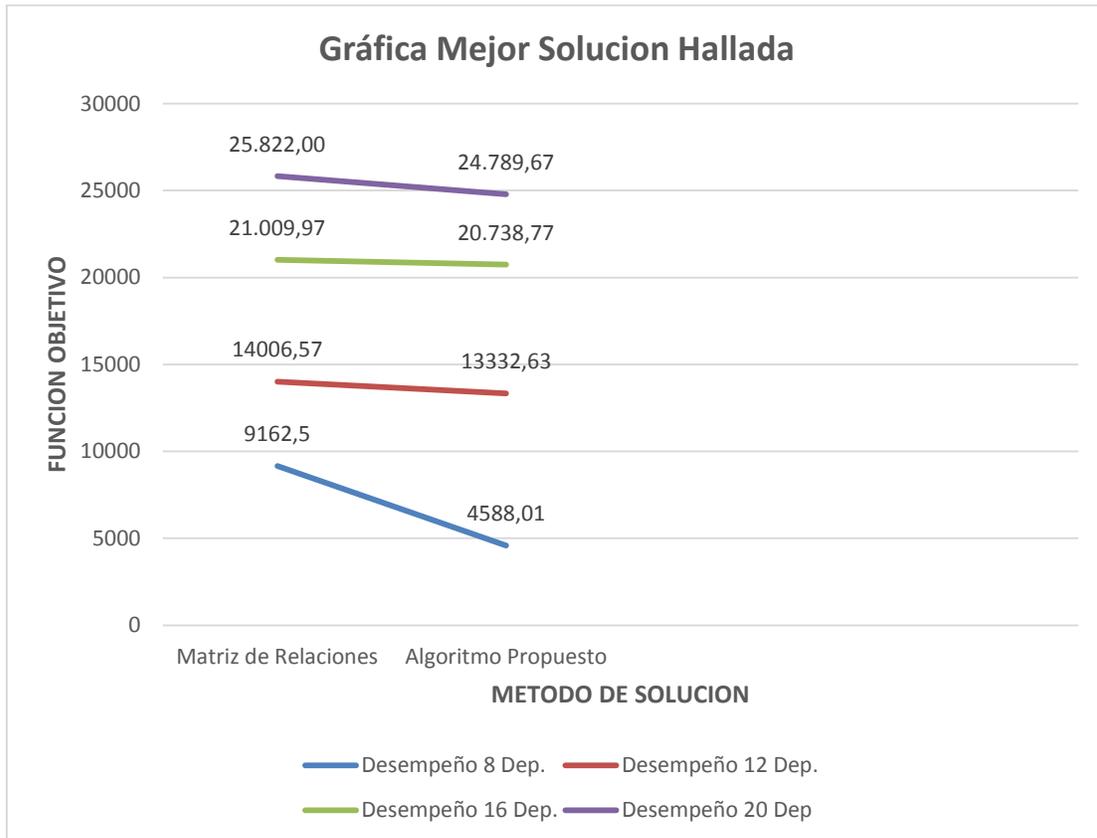
Acepto  $H_0$  si  $F_o < F_c$

Rechazo  $H_0$  si  $F_o > F_c$

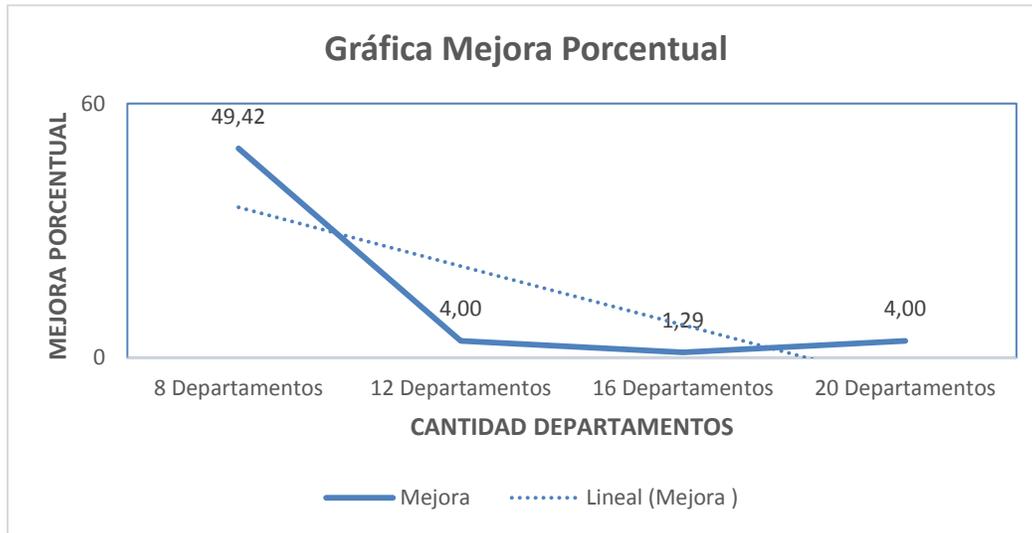
Dado que el  $F(0,05;1;3) = 10,13$  ,valor mayor a  $F_0 = 2,73$ , se concluye que después de aislar la variabilidad producto de la cantidad de departamentos considerados en los ejercicios, no existe evidencia suficiente para rechazar la hipótesis nula.

A continuación en la figura 45, se muestra la representación gráfica de las funciones objetivo y en la figura 46, las mejoras porcentuales obtenidas por los dos métodos de solución

**Figura 45. Gráfica de la mejor solución encontrada Ambos métodos**



**Figura 46. Gráfica mejora porcentual**



#### 11.4 TIEMPO COMPUTACIONAL

El experimento para los escenarios de 8, 12, 16 y 20 departamentos, fue realizado en un computador SONY VAIO, con un procesador Intel Core™ I5 CPU, 6 GHz y 4 GB de memoria. Sistema operativo de 64 bits. Los tiempos registrados en minutos para cada ejercicio, se pueden observar en la tabla 13 a continuación:

**Tabla 12. Tiempo Computacional**

Problema	Tiempo (horas)
<b>8</b>	00:22:05
<b>12</b>	00:51:25
<b>16</b>	01:24:49
<b>20</b>	01:58:30

De la tabla anterior se concluye que a medida que se aumentan los departamentos hay un incremento proporcional en el tiempo de ejecución, lo cual no se considera una variable fundamental, debido a que este tipo de distribuciones son de largo plazo.

## 12 CONCLUSIONES.

- Los algoritmos genéticos son una alternativa factible para la solución de problemas de distribución de planta, debido a que poseen una tendencia a mejorar la solución a medida que nace una nueva generación y descarta las peores soluciones.
- Se parte de un planteamiento de solución al problema de distribución de planta con estructuras internas: muros y pasajes verticales, y adicionalmente se diseña la forma de comunicar los departamentos que no quedan situados en columnas contiguas, de forma que el material no debe pasar a través de otro departamento, se simuló la existencia de pasillos y el transporte de material por los mismos.
- No es posible realizar una comparación de resultados con soluciones de problemas aceptados a nivel científico, debido a la no existencia de problemas FLP que tenga en cuenta pasillos, sin embargo se desarrolla por parte de los autores una solución por escenario a través de la matriz de relación de actividades.
- Los resultados que se encuentran por medio del algoritmo diseñado por los autores para la solución de los problemas seleccionados son los siguientes:
  - ✓ El tiempo computacional aumenta a medida que aumenta la cantidad de departamentos a ubicar, es por esto que el escenario de 8 departamentos tarda menos tiempo al correr y arrojar la mejor solución que el escenario de 20 departamentos que tarda aproximadamente 5 veces más.
  - ✓ Se considera que los altos resultados en el escenario de 20 departamentos, se debe a que el individuo auxiliar es aleatorio, después de desarrollado el proyecto se adiciona una nueva restricción al problema que solo permite cierta cantidad de "1" en el vector auxiliar, de forma que se limita la cantidad de columnas por solución.

- ✓ A pesar de que el diseño de experimentos no refleja que hay diferencias significativas entre los métodos de solución, se puede observar una notable mejoría en los valores de la función objetivo, para ejercicios de distribución de planta con pocos departamentos, y a medida que se aumenta la cantidad se observa que el porcentaje de mejora disminuye, mas sin embargo la línea de tendencia muestra que sigue siendo mejor el valor encontrado con la herramienta desarrollada por los autores.
- ✓ La herramienta diseñada y desarrollada por los autores presenta soluciones reales con la inclusión de pasillos verticales y horizontales, que permiten la comunicación entre todos los departamentos. De igual forma las distancias calculadas entre los departamentos se hacen de forma que se simule el recorrido del flujo por los pasillos. Y se respeta la existencia de muros que bloquean el paso, y puertas que facilitan el mismo.
- ✓ Los tiempos de ejecución del algoritmo son aceptables dentro de los límites establecidos para el ejercicio práctico de los autores. Sin embargo es necesario aplicar otras técnicas de programación que permitan mejorar el rendimiento del mismo, si se quiere llevar el algoritmo a un ambiente de producción.
- La descripción del funcionamiento de los AG mediante la exposición de un ejemplo práctico, y su teoría, permite tener una herramienta pedagógica que sirva como guía o base a futuros investigadores interesados en el tema
- No se lleva a cabo un diseño para el problema FLP con departamentos de áreas desiguales, ya que para el desarrollo se debe tener en cuenta columnas de ancho fijo. Adicionalmente el desarrollo de un diseño de experimentos con departamentos de áreas desiguales dificultaría la ubicación de pasillos en manera proporcional a las desigualdades.

### 13 RECOMENDACIONES.

- Para una futura investigación se recomienda enfocar la búsqueda en el tratamiento de columnas de ancho fijo, que genera departamentos con áreas desiguales, y además se puede llegar a investigar distribución de plantas con multiniveles.
- Adicionalmente para el estudio de columnas variables, se recomienda establecer anchos de pasillos verticales y horizontales fijos, de tal forma que se pueda expresar al usuario el área sobrante para la distribución de la solución encontrada, o área faltante en caso de que el área disponible no sea suficiente.
- Debido a la desmejora en la efectividad del algoritmo a medida que aumenta el número de departamentos a distribuir, se puede pensar que existe algún problema en la programación que no fue posible identificar por parte de los autores, debido al escaso conocimiento en programación, sería de gran utilidad que algunas clases de la carrera se enfoquen más a este tema.
- Se recomienda incentivar a más estudiantes con la clase de Diseño de plantas, para impulsar su interés en dar solución al problema de distribución de planta, en las diversas extensiones que puede acarrear.
- Divulgar los proyectos de grado en investigación dentro de los estudiantes, ya que enriquecería el aprendizaje de las nuevas generaciones de estudiantes, y es un gran porte para el desarrollo de la profesión.
- La divulgación de proyectos de investigación dentro de los estudiantes, y también dentro de las pequeñas empresas, sería de gran aporte académico que no solo se crean herramientas para dar solución a problemas académicos, si no que adicionalmente se pueden llevar a la aplicación de problemas de la vida real, dando orientación y asistencia a las empresas, aportando a la eficiencia y productividad de las mismas.

## BIBLIOGRAFIA

AMARAL, André R.S. The Corridor Allocation Problem. En: Computers & Operations Research. December, 2012, vol. 39, no. 12, p. 3325–3330.

AMINE, Drira; HENRI, Pierreval & SONIA, Hajri-Gabouj. Facility Layout Problems: A Survey. En: Annual Reviews in Control. November, 2007, no. 31, p. 255-267.

APPLE, James Macgregor. Plant Layout And Material Handling, Third Edition. John Wiley & Sons, 1977. 488 p.

ARMOUR, Gordon C. & BUFFA, Elwood S. A Heuristic Algorithm and Simulation Approach to Relative Allocation of Facilities. En: Management Science. January, 1963, vol. 9, no. 2, p. 294-309.

ARROYO APAZA, Víctor Manuel. Modelo de un Algoritmo Genético con Selección Discriminatoria de Individuos Bajo un Esquema de Ponderación de Probabilidades de Mutación. Trabajo de Grado (Ingeniería Informática). Perú: Universidad Católica San Pablo, 2013. 64 p.

BALAKRISHNAN, Jaydeep, et. al. A Hybrid Genetic Algorithm for the Dynamic Plant Layout Problem. En: International Journal of Production Economics. November, 2003, vol. 86, no. 2, p. 107 -120.

BARTHOLDI, John Joseph & PLATZMAN, Loren Kerry. An on Long Planar Traveling Salesman Heuristic Based on Space Filling Curves. En: Operation Research Letters. 1982, vol.1, no. 4, p. 121 – 125.

BLUM, Christian & ROLI, Andrea. Metaheuristics in Combinatorial Optimization: Overview and Conceptual Comparison. En: Acm Computing Survey. 2003, vol. 35, no. 3, p. 268-308.

BRITO SANTANA, Julio, et. al. Metaheurísticas: Una Revisión Actualizada. La Laguna: Universidad de La Laguna. Grupo de Computación Inteligente. Departamento de Estadística, Investigación Operativa y Computación, 2004. 47 p.

CABALLERO FERNÁNDEZ, Rafael, et. al. Algoritmos Genéticos para la Resolución de Problemas de Programación por Metas Entera. Aplicación a la Economía de Educación. Departamento de Economía Aplicada. [En Línea]. Universidad de Málaga. Disponible en internet: <Url: <http://www.uv.es/asepuma/X/J01C.pdf> >.

CHASE, Richard B.; JACOBS, F. Robert Y AQUILANO, Nicholas J. Administración de la Producción y Operaciones: Para una Ventaja Competitiva. 10 Ed. México: Mcgraw -Hill, 1997. p. 206-239.

CHRISTU, Paul R.; ASOKAN, P. & PRABHAKAR, V.I. A Solution to the Facility Layout Problem Having Passages and Inner Structures Walls Using Particle Swarm Optimization. En: Int. J. Adv. Manuf Technol. January, 2006, vol. 29, p. 766-771.

CHWIF, Leonardo; PEREIRA BARRETTO, Marcos R. & MOSCATO, Lucas Antonio. A Solution to the Facility Layout Problem Using Simulated Annealing. En: Computers In Industry. April, 1998, vol. 2, no. 36, p. 125-132.

DARWIN, Charles. On the Origin of Species by Means of Natural Selection. London: J. Murray, 1859. 502 p.

DI PASQUALE, Ricardo. Algoritmos Genéticos. Available from internet: <URL:<http://algoneticosgenitimos.files.wordpress.com/2013/01/cneisi-algoritmos-geneticos.pdf>>.

DIAZ ROMERO, Oscar Andrés. Resolución de Problemas de Distribución en Planta con Pasillos Mediante Algoritmos Genéticos. [Online] Universidad Católica del Maule. Facultad de Ingeniería Civil Informática. Disponible en Internet:

<URL:[http://es.scribd.com/doc/89987927/RESOLUCION DE PROBLEMAS DE DISTRIBUCION DE PLANTA CON-pasillo-mediante-algoritmos-geneticos](http://es.scribd.com/doc/89987927/RESOLUCION_DE_PROBLEMAS_DE_DISTRIBUCION_DE_PLANTA_CON-pasillo-mediante-algoritmos-geneticos)>.

DUARTE SÁNCHEZ, Mónica Tatiana y CALDERÓN MANTILLA, Erika Viviana. Alternativas de Solución al Problema de Distribución de Planta (FLP) de un Solo Nivel y Departamentos Iguales ó Desiguales, Por Medio del Análisis de Métodos Metaheurísticos. Trabajo de Grado (Ingeniería Industrial). Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, 2010. 258 p.

DUNKER, Thomas; RADONS, Günter & WESTKÄMPER, Engelbert. Combining Evolutionary Computation and Dynamic Programming for Solving A Dynamic Facility Layout Problem. En: European Journal of Operational Research. August, 2005, vol. 165, no. 1, p. 55–69.

GAREY, Michael. R. & JHONSON, David S. Computers and Intractability: A Guide to the Theory of Np-Completeness. New York: W. H. Freeman and Company, 1979. 339 p.

GESTAL, Marcos, et. al. Introducción A Los Algoritmos Genéticos y la Programación Genética. A Coruña: Universidade Da Coruña, 2010. p. 20-23. ISBN 978-84-9749-422-9.

GLOVER, Fred. Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence. En: Computers & Operations Research. 1986, vol. 13, no 5, p. 533-549.

GÓMEZ, A., et al. Using Genetic Algorithms to Resolve Layout Problems in Facility Where There Are Aisles. En: International Journal of Production Economics. June, 2003, vol. 84, no. 3, p. 271-282.

HOLLAND, John Henry. Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press, 1975. 183 p.

KIM, Jae-Gon & KIM, Yeong-Dae. Layout Planning for Facilities with Fixed Shapes and Input And Output Points. En: International Journal of Production Research. 2000, vol. 38, no. 18, p. 4635-4653.

KOCHHAR, Jasmit Singh.; FOSTER, Bryce T. & HERAGU, Sunderesh S. HOPE: A Genetic Algorithm for the Unequal Area Facility Layout Problem. En: Computers Operation Research. July, 1998, vol. 25, no. 7/8, p. 583-594.

KOMARUDIN & WONG, Kuan Yew. Applying Ant System for Solving Unequal Area Facility Layout Problems. En: European Journal of Operational Research. 2010, vol. 202, p. 730-746.

KOOPMANS, Tjalling C. & BECKMANN, Martin. Assignment Problems and the Location of Economic Activities. En: Econométrica. January, 1957, vol. 1, no. 25, p. 53-76.

LEE, Geun-Cheol & KIM, Yeong-Dae. Algorithms for Adjusting Shapes of Departments in Block Layouts on the Grid-Based Plane. En: Omega. February, 2000, vol. 28, no.1, p. 111-122.

LEE, Kyu-Yeul; HAN, Seong-Nam & ROH, Myung-II. An Improved Genetic Algorithm for Facility Layout Problems Having Inner Structure Walls and Passages. En: Computers & Operations Research. January, 2003, vol. 30, no. 1, p. 117–138.

LÓPEZ DÍAZ, José Carlos. Un Algoritmo Genético con Codificación Real Para la Evolución de Transformadores Lineales. Trabajo de Grado Ingeniería En Informática. Leganés: Universidad Carlos III de Madrid. Departamento de Informática, 2010. p. 14-19.

MARTÍ, Rafael. Procedimientos Metaheurísticos en Optimización Combinatoria. [En Línea]. Departament D'Estadística i Investigació Operativa. Facultat de

Matemàtiques, Universitat de València; p. 2-5. Disponible en: <<http://www.uv.es/rmarti/paper/docs/heur1.pdf>>.

MELLER, Russell D. & GAU, Kai-Yin. The Facility Layout Problem: Recent and Emerging Trends and Perspectives. En: Journal of Manufacturing Systems. 1996, vol. 15, no. 5, p. 351-366.

MELLER, Russell D.; CHEN, Weiping & SHERALI, Hanif D. Applying the Sequence-Pair Representation to Optimal Facility Layout Designs. En: Operations Research Letters. 2007, vol. 35, no. 5, p. 651-659.

MELLER, Russell D.; NARAYANAN, Venkat & VANCE, Pamela H. Optimal Facility Layout Design. En: Operations Research Letters. October, 1998, vol. 23, no. 3/5, p. 117-127.

MIR, M. & IMAM, M.H. A Hybrid Optimization Approach for Layout Design of Unequal – Area Facilities. En: Computers and Industrial Engineering. February, 2001, vol. 39, no. 1-2, p. 49 – 63.

MOORE, James Mendon. Plan Layout and Design. New York: Macmillan Company, 1962. 566 p.

MUTHER, Richard. Distribución en Planta, Ordenación Racional de los Elementos de Producción Industrial. Cuarta Edición. España: Editorial Hispano Europea, 1981.

PEREZ, Elena. Guía para los Recién Llegados a los Algoritmos Genéticos. [Online]. Universidad de Valladolid. Dpto. Organización de Empresas: Escuela de Ingenierías Industriales, 2010. p. 6. Disponible En Internet: <URL: [http://www.insisoc.org/elena/Elena%20Perez%20Vazquez\\_archivos/files\\_newcomers/newcomers-spanish.pdf](http://www.insisoc.org/elena/Elena%20Perez%20Vazquez_archivos/files_newcomers/newcomers-spanish.pdf)>.

SHAYAN, E. & CHITTILAPPILLY, A. Genetic Algorithm for Facilities Layout Problems Based on Slicing Tree Structure. En: International Journal of Production Research. 2004, vol. 42, no. 19, p. 4055-4067.

TAM, Kar Yan. Genetic Algorithms, Function Optimization, and Facility Layout Design. En: European Journal of Operational Research. December, 1992, vol. 63, no. 2, p. 322-346.

TOMPKINS, James A., et al. Facilities Planning. Nueva York: Editorial John Wiley and Sons, 1996. 854 p.

UNIVERSITAT DE VALENCIA, Programación Lineal Entera.[En línea]. Available from World Wide Web: <<http://www.uv.es/~sala/Clase14.pdf>>

WELGAMA, P.S. & GIBSON, P.R. A Construction Algorithm for the Machine Layout Problem With Fixed Pick-Up and Drop-Off Points. En: International Journal of Production Research. 1993, vol. 31, no. 11, p. 2575 – 2589.

WILL, Adrian. Algoritmos Genéticos y Optimización Heurística. [En línea]. Universidad Nacional de Tucuman. Disponible en internet: <[URL:http://www.herrera.unt.edu.ar/gapia/Curso\\_AG/Curso\\_AG\\_08\\_Clase\\_7.pdf](http://www.herrera.unt.edu.ar/gapia/Curso_AG/Curso_AG_08_Clase_7.pdf)>  
>

## ANEXOS.

### ANEXO A. EJERCICIOS DE REFERENCIA

#### 1. ESCENARIO DE 8 DEPARTAMENTOS

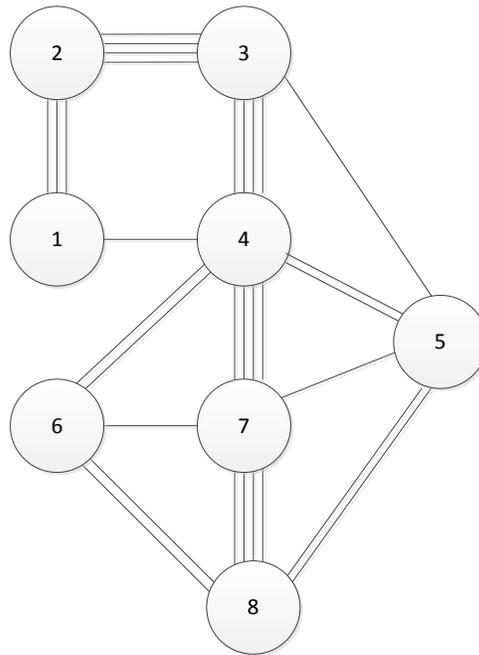
##### 1.1. MATRIZ DE FLUJOS

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	30	0	0	0	0	0	0
2	0	0	40	10	0	0	10	0
3	0	0	0	35	5	0	0	0
4	0	0	0	0	20	20	45	0
5	0	0	0	0	0	0	5	20
6	0	0	0	0	0	0	5	20
7	0	0	0	0	0	0	0	45
8	0	0	0	0	0	0	0	0

##### 1.2. MATRIZ DE RELACIÓN DE ACTIVIDADES

	1	2	3	4	5	6	7	8
1		E						
2			A	O			O	
3				A	O			
4					I	I	A	
5							O	I
6							O	I
7								A
8								

### 1.1. DIAGRAMA DE FLUJO



### 1.2. MATRIZ DE DISTANCIAS

	1	2	3	4	5	6	7	8
1	0	13,2773	17,0401	13,0401	18,6695	12,8725	12,3305	16,2305
2		0,0000	10,9686	12,5020	24,1314	18,9440	18,4020	22,3020
3			0,0000	16,2647	15,4294	22,7067	22,1647	26,0647
4				0,0000	11,4294	18,7067	18,1647	22,0647
5					0,0000	24,3361	11,5294	15,4294
6						0,0000	12,8067	10,5639
7							0,0000	16,1647
8								0,0000

### 1.3. MEJOR SOLUCIÓN ENCONTRADA

INDIVIDUO	2	1	6	3	4	7	8	5
VEC AUX	0	0	1	0	0	0	1	1
VEC AREAS	28	32	24	32	48	46	32	43

**FUNCIÓN OBJETIVO = 9162,5**

## 2. ESCENARIO DE 12 DEPARTAMENTOS

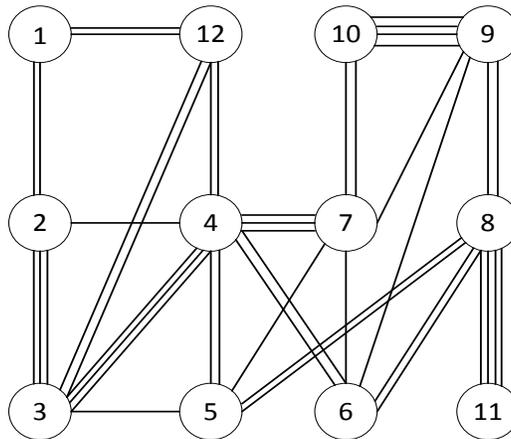
### 2.1. MATRIZ DE FLUJOS

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30
2		0	40	10	0	0	10	0	0	0	0	0
3			0	35	5	0	0	0	0	0	0	20
4				0	20	20	45	0	0	0	0	30
5					0	0	5	20	10	0	0	0
6						0	5	20	15	10	0	0
7							0	45	10	20	0	0
8								0	25	0	60	0
9									0	50	0	0
10										0	0	0
11											0	0
12												0

### 2.2. MATRIZ DE RELACION DE ACTIVIDADES

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1		I										I
2			E	O			O					
3				E	O							I
4					I	I	E					I
5							O	I	O			
6							O	I	O	O		
7								E	O	I		
8									I		A	
9										A		
10												
11												
12												

### 1.1. DIAGRAMA DE FLUJO



### 1.2. MATRIZ DE DISTANCIAS

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0,00	9,96	15,42	10,24	16,77	25,42	20,19	23,90	24,39	13,53	29,52	7,57
2		0,00	10,25	6,72	11,61	30,01	24,77	28,48	28,98	18,12	34,11	12,73
3			0,00	12,17	6,15	35,47	30,24	33,95	34,44	23,58	39,52	18,20
4				0,00	13,55	15,18	10,95	16,54	17,03	11,39	22,16	13,02
5					0,00	8,65	10,96	23,08	23,57	17,93	28,70	19,55
6						0,00	11,60	13,22	18,84	19,57	7,59	21,20
7							0,00	7,98	13,61	14,34	9,94	11,96
8								0,00	7,98	11,68	10,57	19,67
9									0,00	6,05	16,57	20,17
10										0,00	17,30	7,99
11											0,00	25,30
12												0,00

### 1.3. MEJOR SOLUCIÓN ENCONTRADA

INDIVIDUO	1	2	3	12	4	5	10	7	6	9	8	11
VEC AUX	0	0	1	0	0	1	0	0	1	0	0	1
VEC AREAS	20	14	22	15	38	34	26	40	11	22	21	22

**FUNCIÓN OBJETIVO = 14006,571**

### 3. ESCENARIO DE 16 DEPARTAMENTOS

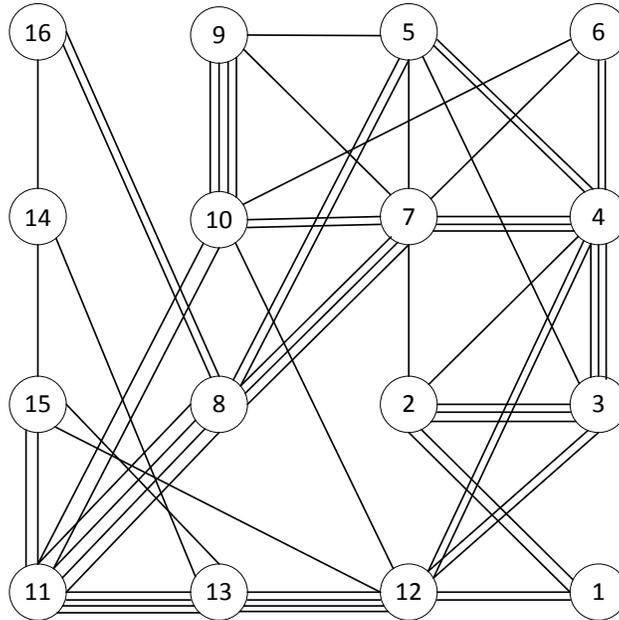
#### 3.1. MATRIZ DE FLUJOS

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0
2		0	40	10	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3			0	35	5	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0
4				0	20	20	45	0	0	0	0	30	0	0	0	0
5					0	0	5	20	10	0	0	0	0	0	0	0
6						0	5	20	15	10	0	0	0	0	0	0
7							0	45	10	20	0	0	0	0	0	0
8								0	0	0	60	0	0	0	0	25
9									0	50	0	0	0	0	0	0
10										0	20	15	0	0	0	0
11											0	0	55	0	25	0
12												0	60	0	15	0
13													0	5	10	0
14														0	5	10
15															0	0
16																0

#### 3.2. MATRIZ DE RELACIÓN DE ACTIVIDADES

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	1	11	12	13	14	15	16
1		I										I				
2			E	O			O									
3				E	O							I				
4					I	I	E					I				
5							O	I	O							
6							O	I	O	O						
7								E	O	I						
8											A					I
9										A						
1											I	O				
11													A		I	
12													A		O	
13														O	O	
14															O	O
15																
16																

### 3.3. DIAGRAMA DE FLUJO



### 3.4. MATRIZ DE DISTANCIAS

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	8,32	9,57	15,31	19,24	20,28	13,61	17,01	26,43	21,92	27,99	7,00	20,39	27,58	24,42	31,58
2		0	8,27	14,01	17,93	18,97	12,30	7,66	18,11	13,60	19,67	9,29	8,69	19,26	16,09	23,26
3			0	11,78	15,71	16,75	10,08	13,57	23,00	18,48	24,55	10,54	16,96	24,14	20,98	28,14
4				0	9,97	11,01	8,72	19,31	28,74	24,22	30,29	16,28	22,70	29,88	26,72	33,88
5					0	8,06	12,65	16,22	7,19	10,28	22,74	20,20	19,60	22,33	19,16	26,33
6						0	13,69	24,28	33,71	29,19	35,26	21,24	27,66	34,65	31,68	38,85
7							0	10,59	12,82	8,31	17,11	14,57	13,98	19,70	13,53	20,70
8								0	16,4	11,88	6,52	9,93	9,33	11,60	8,43	15,60
9									0	10,46	16,97	20,38	19,78	9,31	12,47	5,31
10										0	12,46	15,87	25,27	5,66	7,96	9,66
11											0	21,93	8,32	12,18	9,01	16,18
12												0	7,54	21,53	18,36	25,53
13													0	14,99	11,82	18,99
14														0	7,68	8,51
15															0	22,68
16																0

### 3.5. MEJOR SOLUCIÓN ENCONTRADA

INDIVIDUO	16	14	15	11	9	10	8	13	5	7	2	12	6	4	3	1
VEC AUX	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
VEC AREAS	12	12	7	20	17	23	19	11	29	33	12	13	10	35	17	15

FUNCIÓN OBJETIVO = 21009,97

### 4. ESCENARIO DE 20 DEPARTAMENTOS

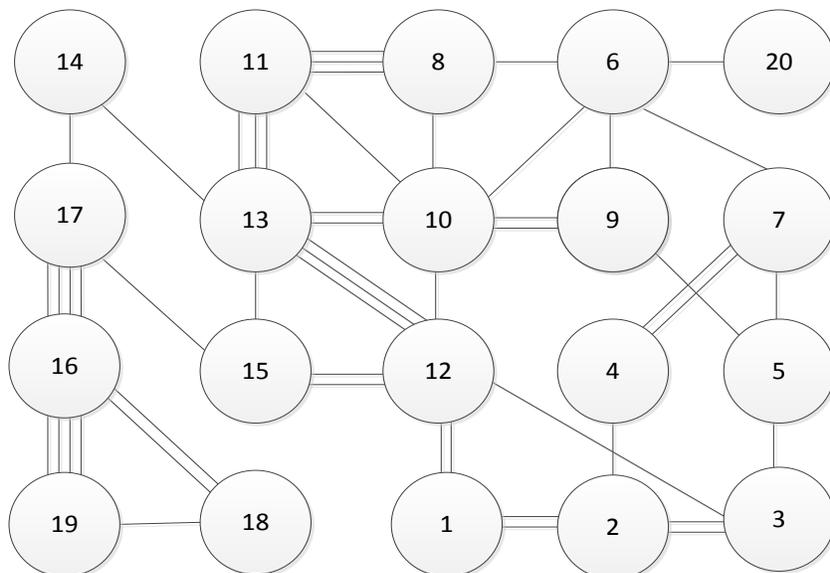
#### 4.1. MATRIZ DE FLUJOS

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	40	10	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	35	5	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	20	20	45	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	5	20	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	5	20	15	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	0	0	45	10	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0	0	0	25
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	15	50	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	55	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	15	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	10	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	10	25	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	100	50	90	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	10	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

## 4.2. MATRIZ DE RELACIÓN DE ACTIVIDADES

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1		I									I								
2			I	O			O												
3				I	O						O								
4					O	O	I				I								
5							O	O	O										
6							O	O	O	O									
7								I	O	O									
8										E									O
9									I										
11										O	O	I							
12											E			O					
13												E							
14													O	O					
15														O	O	O			
16																A	I	A	
17																	O	O	
18																		O	
19																			
20																			

## 4.3. DIAGRAMA DE FLUJO



#### 4.4. MATRIZ DE DISTANCIAS

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	0,0	7,3	25,0	10,6	21,9	18,6	17,2	19,0	15,0	14,7	17,8	9,0	13,7	22,3	8,8	16,6	18,6	5,1	21,4	22,7
2		0,0	7,1	10,0	6,1	17,0	12,9	17,5	13,4	13,1	21,7	7,5	17,6	26,2	17,7	20,5	22,5	31,5	25,3	16,4
3			0,0	11,4	7,4	18,4	12,3	23,6	14,8	19,2	30,8	21,4	26,7	35,3	25,9	29,6	31,6	29,7	34,4	17,8
4				0,0	7,4	12,7	8,6	13,2	9,1	8,8	17,4	7,0	13,3	21,9	13,5	16,2	18,3	17,2	21,0	12,1
5					0,0	15,4	9,3	20,5	11,8	16,2	27,8	18,4	23,6	32,3	22,8	26,6	28,6	26,6	31,4	14,7
6						0,0	10,5	5,2	8,3	9,4	24,4	15,0	20,3	28,9	19,5	23,2	25,3	23,3	27,0	5,0
7							0,0	15,8	6,9	11,5	23,0	13,7	18,9	27,6	18,1	21,8	33,9	21,9	25,6	9,9
8								0,0	8,8	9,8	5,5	15,5	9,6	23,0	14,5	17,2	19,3	18,3	22,0	21,3
9									0,0	5,8	20,8	11,4	16,7	25,3	15,9	19,6	21,7	19,7	24,4	7,7
10										0,0	8,6	11,1	5,3	18,6	10,1	12,8	14,9	13,9	17,7	16,9
11											0,0	14,2	8,4	4,5	13,2	11,7	7,7	17,0	16,5	28,5
12												0,0	10,1	18,8	5,3	13,0	15,1	8,2	17,8	19,1
13													0,0	8,6	9,1	7,6	5,0	12,9	12,4	24,4
14														0,0	13,5	11,9	7,9	17,3	16,7	33,1
15															0,0	5,8	10,8	9,1	7,5	23,6
16																0,0	8,2	9,1	10,0	27,3
17																	0,0	13,6	13,1	29,4
18																		0,0	4,8	27,4
19																			0,0	32,1
20																				0,0

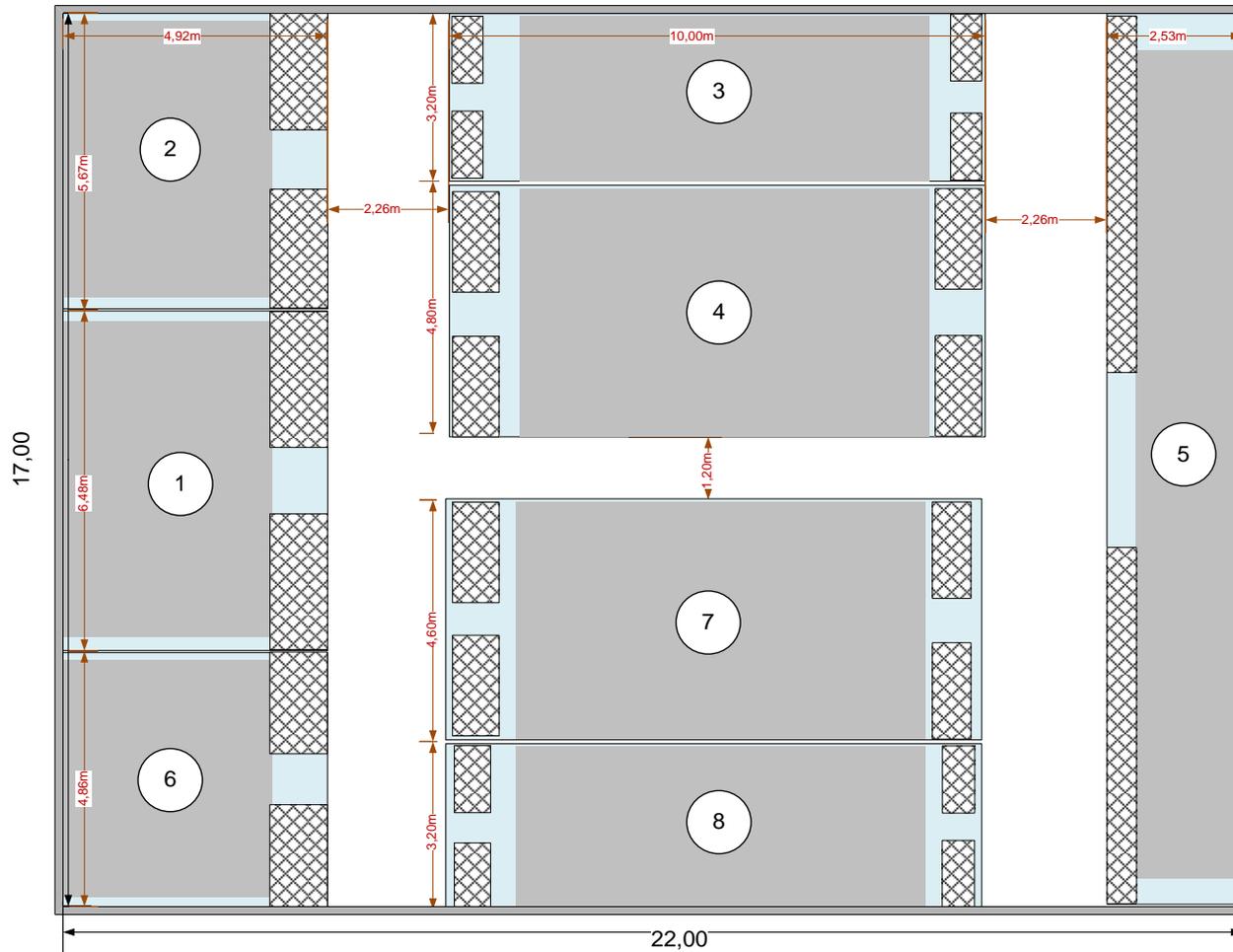
#### 4.5. MEJOR SOLUCIÓN ENCONTRADA

INDIVIDUO	14	17	16	19	11	13	15	18	8	10	12	1	6	9	4	2	20	7	5	3
VEC AUX	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1
VEC AREAS	13	10	15	15	15	11	12	12	15	23	16	15	13	13	10	21	15	21	11	9

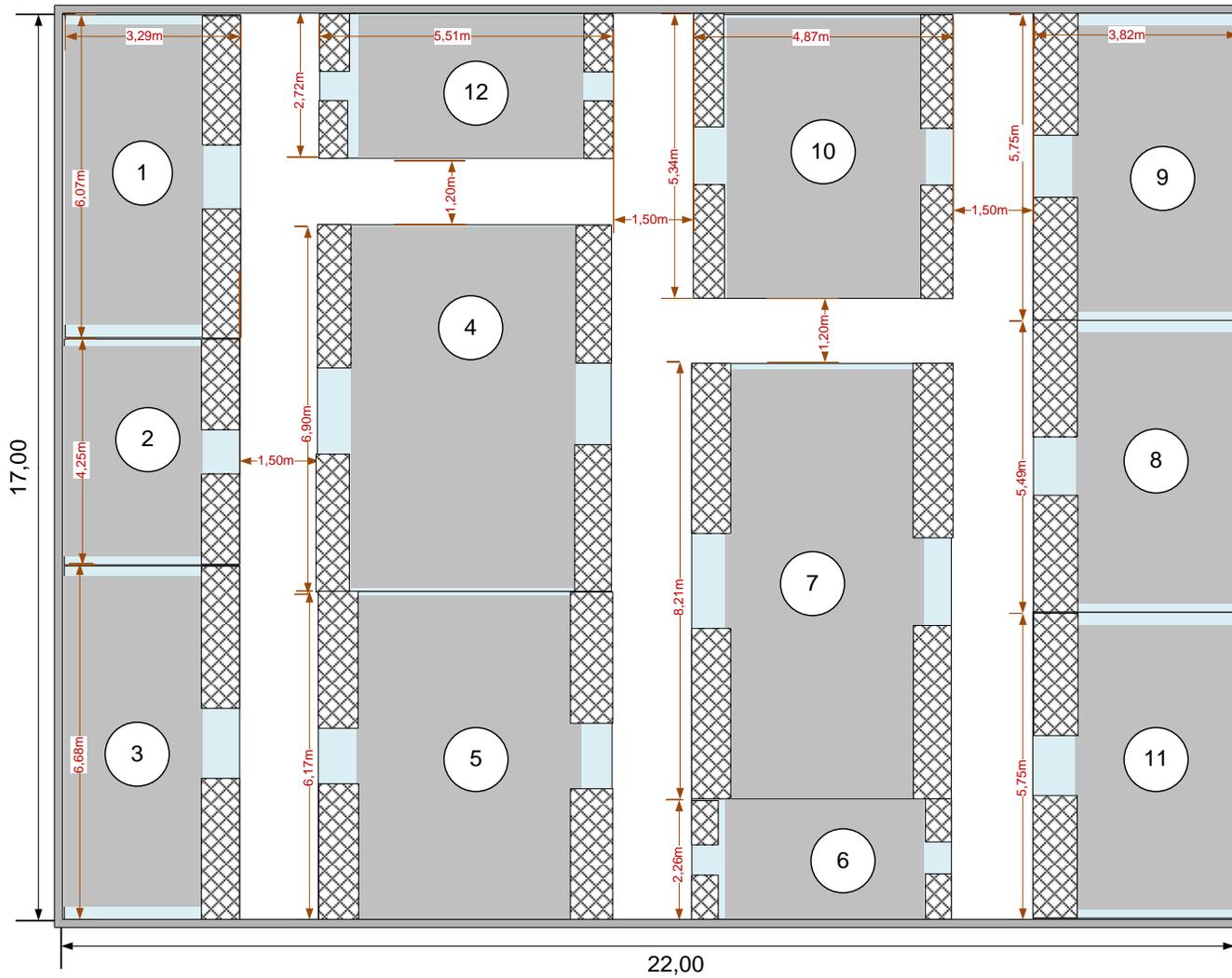
**FUNCIÓN OBJETIVO =** 25822,88

## ANEXO B. REPRESENTACIÓN EJERCICIOS DE REFERENCIA

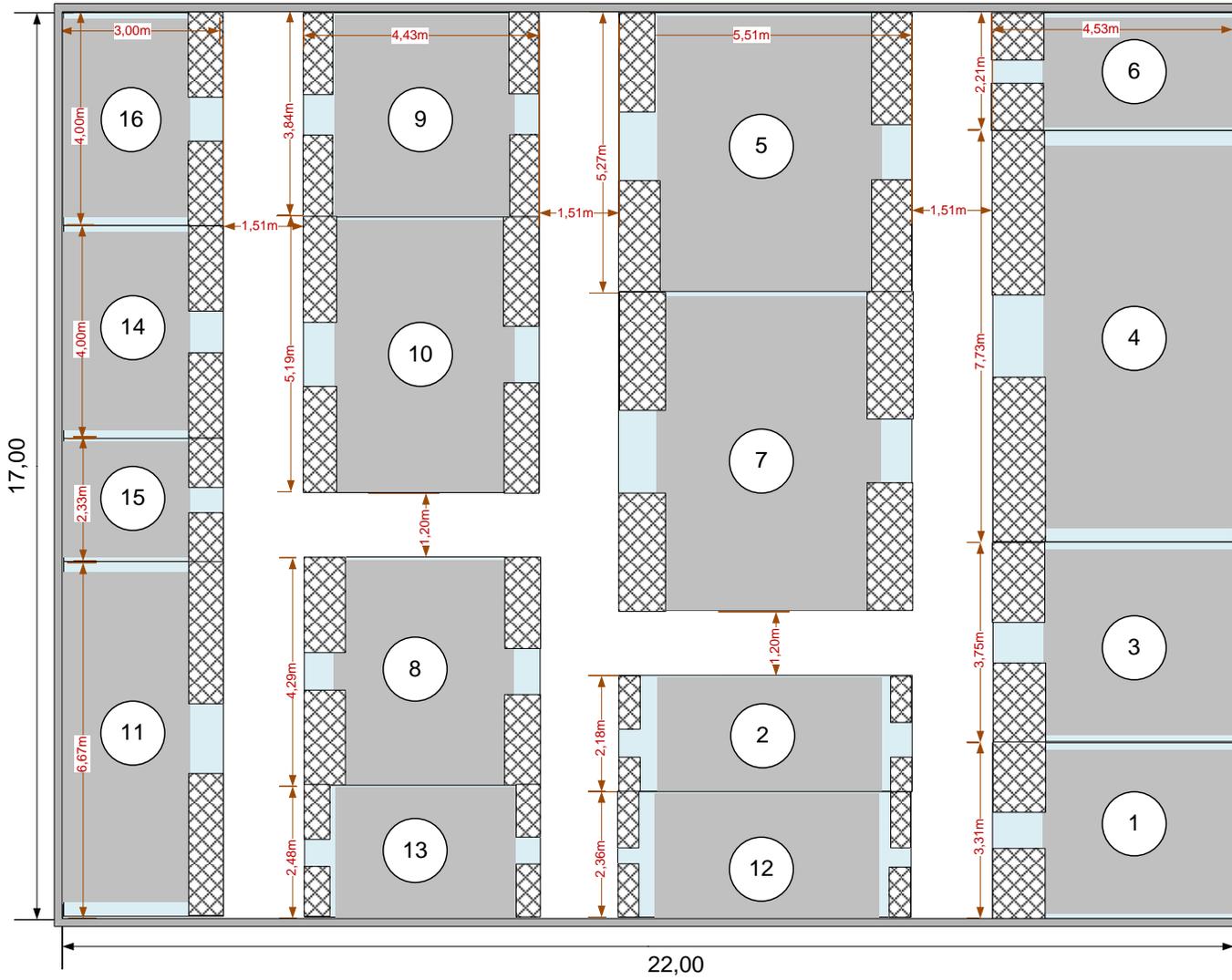
### 1. ESCENARIO DE 8 DEPARTAMENTOS



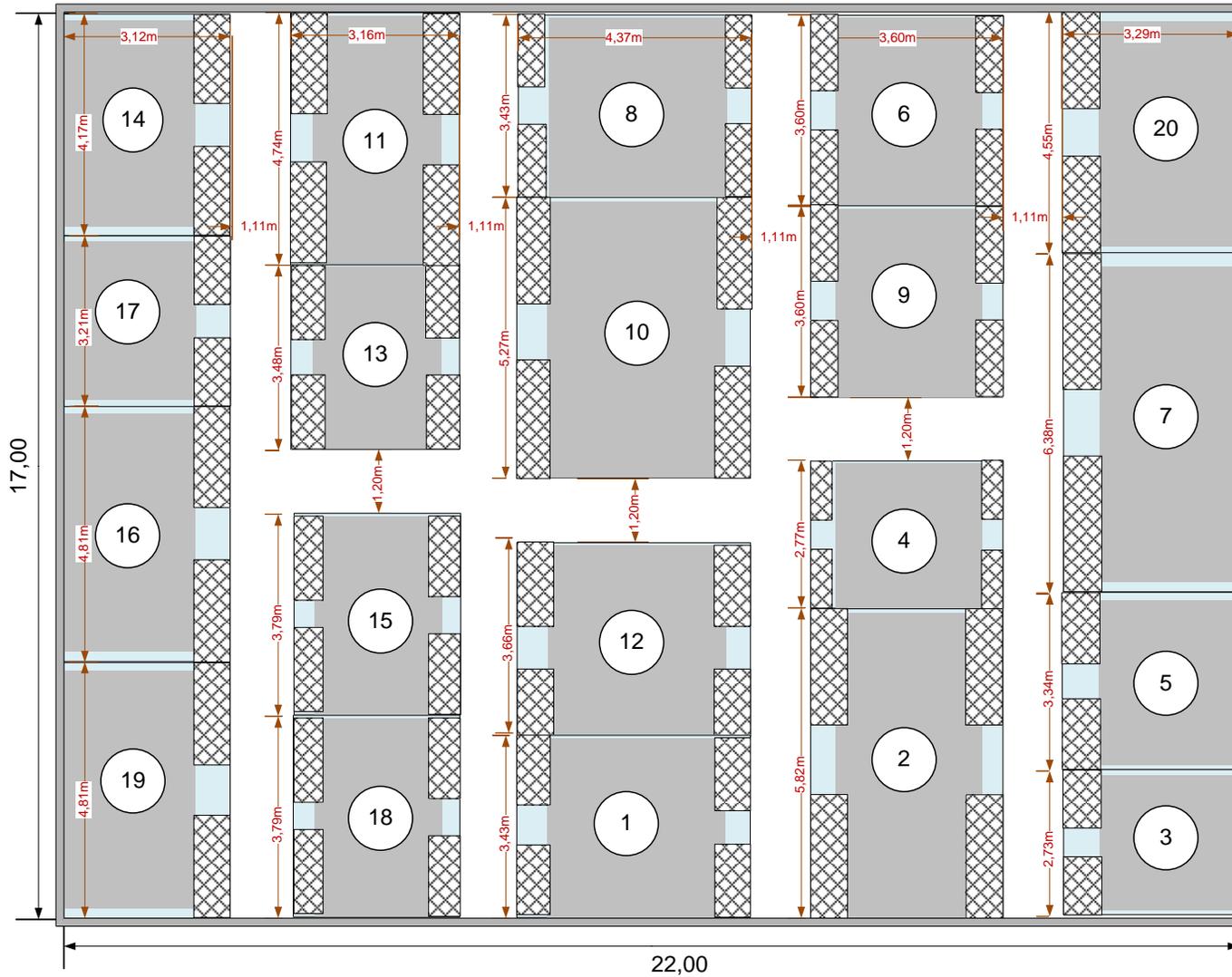
## 2. ESCENARIO DE 12 DEPARTAMENTOS



### 3. ESCENARIO DE 16 DEPARTAMENTOS



#### 4. ESCENARIO DE 20 DEPARTAMENTOS



## ANEXO C. RESULTADOS PROGRAMA FLP\_AG

### 1. ESCENARIO DE 8 DEPARTAMENTOS

#### 1.1. INTERFAZ

**AG\_planta** [Minimizar] [Maximizar] [Cerrar]

**Universidad Industrial de Santander** **Algoritmos Genéticos**

Solución al problema de distribución de planta (FLP) de un sólo nivel, con estructuras internas: muros y pasajes.

---

**Datos de entrada**

Número de Dptos	<input type="text" value="8"/>	Población	<input type="text" value="100"/>	% de Penalización	<input type="text" value="20"/>	Área Disponible	<input type="text" value="22"/> [mtrs]
# de Generaciones	<input type="text" value="100"/>	% de Mutación	<input type="text" value="5"/>			Ancho total	<input type="text" value="17"/> [mtrs]

---

**Resultado**

Función Objetivo:       Orden Dptos:

<p>Dptos por columna</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>3</td><td>4</td><td>7</td></tr> <tr><td>6</td><td>5</td><td>8</td></tr> <tr><td>2</td><td>0</td><td>1</td></tr> </table>	3	4	7	6	5	8	2	0	1	<p>Ancho Columnas</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>4.9412</td><td>5.7595</td><td>6.4706</td></tr> </table>	4.9412	5.7595	6.4706
3	4	7											
6	5	8											
2	0	1											
4.9412	5.7595	6.4706											

<p>Areas Dpto</p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td>32</td><td>48</td><td>46</td></tr> <tr><td>24</td><td>43</td><td>32</td></tr> <tr><td>28</td><td>0</td><td>32</td></tr> </table>	32	48	46	24	43	32	28	0	32	<p>Ancho Pasillo Vertical</p> <input type="text" value="2.4144"/> [mtrs]
32	48	46								
24	43	32								
28	0	32								
	Ancho Pasillo Horizontal	<input type="text" value="1.2"/> [mtrs]								
	# de Penalizaciones	<input type="text" value="0"/>								

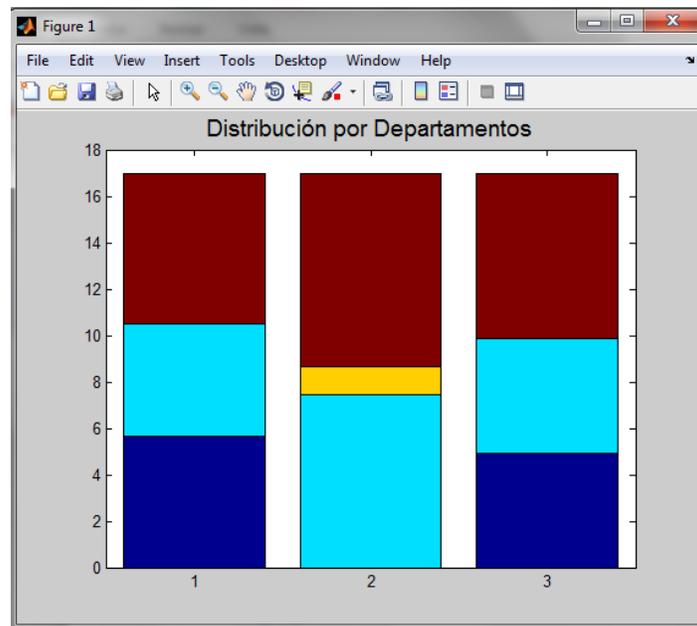
Alturas Dptos

6.48	8.33	7.11
999	9.53	999
11.33	17	12.05
17	0	17

Vector Auxiliar:

Ejecutar

#### 1.2. DISTRIBUCIONES



### 1.3. DISTANCIAS

```

Command Window

distancia =

    0    27.1199    27.5833    18.8897    9.7897    21.9166    19.8577    13.8304
    0         0    18.2841    17.7643    8.6643    12.6175    26.9062    22.1745
    0         0         0     8.6936    17.7936    13.0222    27.3696    22.6378
    0         0         0         0    17.2739    12.5024    9.1419    13.9442
    0         0         0         0         0    12.1270    18.2419    12.2146
    0         0         0         0         0         0    21.7029    16.9712
    0         0         0         0         0         0         0    14.9122
    0         0         0         0         0         0         0         0

Aspect Ratio
1.31
1.45
1.10
0.98
1.30
0.76
1.15
0.76
Penalización sin la del pasillo 0
Penalización con pasillo 0
fx >>
  
```

## 2. ESCENARIO DE 12 DEPARTAMENTOS

### 2.1. INTERFAZ

The interface displays the following data and settings:

**Datos de entrada:**

- Número de Dptos: 12
- Población: 100
- % de Penalización: 20
- Área Disponible: Ancho total 22 [mtrs], Largo total 17 [mtrs]
- # de Generaciones: 100
- % de Mutación: 5

**Resultado:**

- Función Objetivo: 13332.6258
- Orden Dptos: 11 4 3 1 12 7 9 8 2 10 6 5
- Dptos por columna:
 

11	3	7	2
4	1	9	10
0	12	8	6
0	0	0	5
- Ancho Columnas:
 

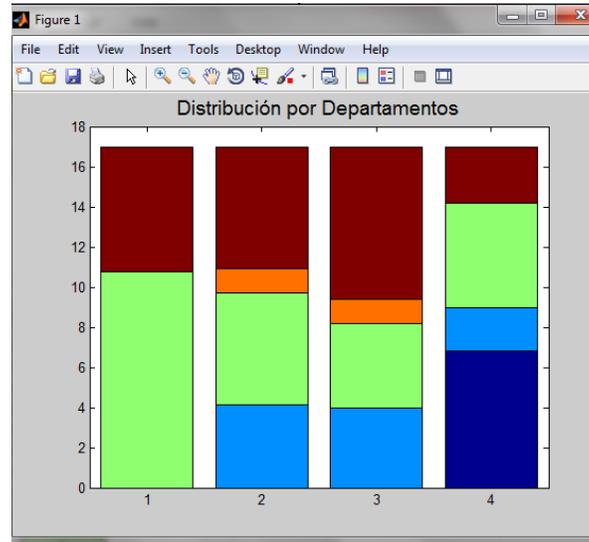
3.5294	3.6076	5.2532	5
--------	--------	--------	---
- Areas Dpto:
 

22	22	40	14
38	20	22	26
0	15	21	11
0	0	0	34
- Ancho Pasillo Vertical: 1.5366 [mtrs]
- Ancho Pasillo Horizontal: 1.2 [mtrs]
- # de Penalizaciones: 3
- Vector Auxiliar: 0 1 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1
- Alturas Dptos:
 

6.23	6.1	7.61	2.8
999	7.3	8.81	999
17	12.84	13	8
0	17	17	10.2
0	0	0	17

Buttons: Ejecutar, Cargar Datos

## 2.2. DISTRIBUCIÓN



## 2.3. DISTANCIAS

Command Window

```

distancia =

Columns 1 through 9

    0    21.3004    12.1653     6.6516    19.8714    15.3714    12.2299    10.8980     6.8052
    0         0    24.6100    30.9844    18.7366    14.2366     9.0704    20.2644    16.1716
    0         0         0    13.6727    23.1811    18.6811     6.7251    17.9191    13.8263
    0         0         0         0    29.5555    25.0555    18.8815    24.2935    20.2007
    0         0         0         0         0    11.0366    16.4560     8.0644     9.3548
    0         0         0         0         0         0    11.9560    12.5644     8.4716
    0         0         0         0         0         0         0    17.9838    13.8910
    0         0         0         0         0         0         0         0    10.8825
    0         0         0         0         0         0         0         0         0
    0         0         0         0         0         0         0         0         0
    0         0         0         0         0         0         0         0         0
    0         0         0         0         0         0         0         0         0

Columns 10 through 12

    17.3004    12.0586     9.9951
    10.5366    29.6475    26.1512
    20.6100     5.1727    17.0161
    26.9844    13.5660     8.4095
    14.7366    28.2186    24.7223
    10.2366    23.7186    20.2223
     8.2560    17.5447    17.0808
    16.2644    22.9566     6.0471
    12.1716    18.8639     9.9796
     0         25.6475    22.1512
     0         0         16.9095
    
```

### 3. ESCENARIO DE 16 DEPARTAMENTOS

#### 3.1. INTERFAZ

**AG\_planta**

Universidad Industrial de Santander

**Algoritmos Genéticos**

Solución al problema de distribución de planta (FLP) de un sólo nivel, con estructuras internas: muros y pasajes.

Datos de entrada:

Número de Dptos: 16    Población: 100    % de Penalización: 20

# de Generaciones: 100    % de Mutación: 5

Área Disponible:

Ancho total: 22 [mtrs]

Largo total: 17 [mtrs]

Resultado:

Función Objetivo: 20738.7783

Orden Dptos: 11 13 14 3 12 10 7 4 9 5 8 2 1 6 15 16

Dptos por columna:

11	12	4	2
13	10	9	1
14	7	5	6
3	0	8	15
0	0	0	16

Áreas Dpto:

20	13	35	12
11	23	17	15
12	33	29	10
17	0	19	7
0	0	0	12

Alturas Dptos:

5.67	2.98	5.53	3.64
9.99	4.18	6.73	9.99
8.78	9.44	9.42	8.2
12.18	17	14	11.23
17	0	17	13.36

Ancho Columnas:

3.5294	4.3671	6.3291	3.2941
--------	--------	--------	--------

Ancho Pasillo Vertical: 1.4934 [mtrs]

Ancho Pasillo Horizontal: 1.2 [mtrs]

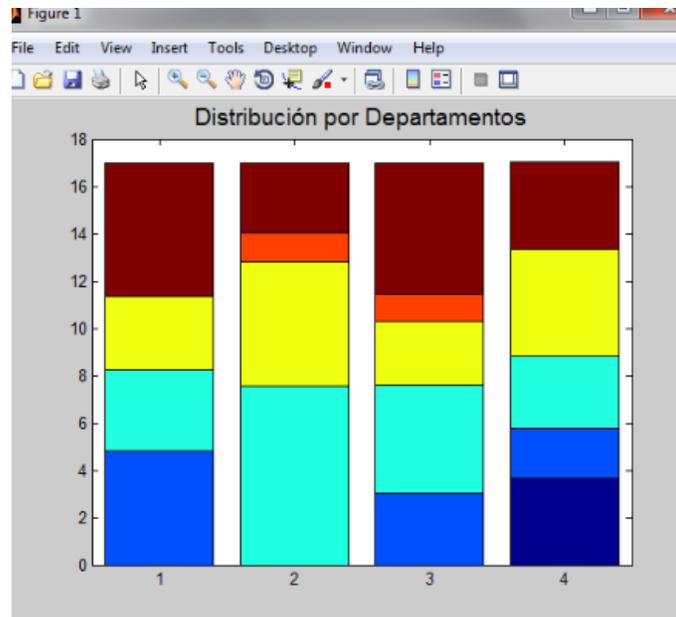
# de Penalizaciones: 3

Vector Auxiliar: 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 0 1

Ejecutar

Cargar Datos

#### 3.2. DISTRIBUCIÓN



### 3.3. DISTANCIAS

Command Window

```

distancia =

Columns 1 through 9

    0    8.8858    32.3666    9.4597    12.0924    8.5822    20.4487    15.8844    8.4584
    0     0    36.4649    7.2486    16.1906    12.6804    24.5469    19.9826    12.5566
    0     0     0    24.1099    31.4282    35.7406    6.8116    35.2202    27.7942
    0     0     0     0    16.7645    13.2543    17.2983    20.5565    13.1305
    0     0     0     0     0     8.2978    8.3563    11.6145    11.4565
    0     0     0     0     0     0    23.8226    12.0898    7.9463
    0     0     0     0     0     0     0     9.1188    11.9903
    0     0     0     0     0     0     0     0    15.2485
    0     0     0     0     0     0     0     0     0
    0     0     0     0     0     0     0     0     0
    0     0     0     0     0     0     0     0     0
    0     0     0     0     0     0     0     0     0
    0     0     0     0     0     0     0     0     0
    0     0     0     0     0     0     0     0     0
    0     0     0     0     0     0     0     0     0
    0     0     0     0     0     0     0     0     0

Columns 10 through 16

14.0371    22.0953    17.9985    25.0000    28.2583    11.1625    14.0465
18.1353    26.1935    22.0967    29.0982    32.3565    15.2608    18.1447
13.2232    16.7812    18.5449    12.3895    9.1312    38.3209    41.2049
10.8867    13.8385    8.1181    16.7432    20.0015    15.8347    18.7186
11.7384    21.1569    17.0601    24.0616    27.3199    6.8927    9.7766
17.4110    25.4692    21.3724    28.3739    31.6322    7.3679    10.2518
12.2721    15.8301    17.5938    11.4384    8.1801    26.4029    29.2869
15.5304    24.9489    20.8521    27.8536    31.1119    9.5094    6.6255
8.1044    17.5229    13.4261    20.4276    23.6859    10.5267    13.4106
0     9.4185    11.1823    5.8565    9.1149    19.9914    22.8753
0     0     6.7866    9.4145    12.6728    28.0495    30.9335
0     0     0    11.1783    14.4366    23.9528    26.8367
0     0     0     0     8.2812    30.9543    33.8382
0     0     0     0     0    34.2126    37.0965
0     0     0     0     0     0     7.6715
0     0     0     0     0     0     0

```

Captura de pantalla  
Se guardó una copia

## 4. ESCENARIO DE 20 DEPARTAMENTOS

### 4.1. INTERFAZ

**Datos de entrada**

Número de Dptos: 20    Población: 100    % de Penalización: 20    Área Disponible: Ancho total: 22 [mtrs], Largo total: 17 [mtrs]

# de Generaciones: 100    % de Mutación: 5

**Resultado**

Función Objetivo: 24789.6775

Orden Dptos: 1 13 8 3 7 14 20 4 6 15 9 2 10 17 19 18 12 11 5 16

Dptos por columna: 1 14 15 10 12, 13 20 9 17 11, 8 4 2 19 5, 3 6 0 18 16, 7 0 0 0 0

Áreas Dpto: 15 13 12 23 16, 11 15 13 10 15, 15 10 21 15 11, 9 13 0 12 15, 21 0 0 0 0

Alturas Dptos: 3.59 4.03 4.12 6.06 4.77, 9.99 5.23 5.32 7.26 9.99, 6.23 9.87 9.79 9.89 9.25, 9.82 12.97 17 13.84 12.53, 11.97 17 0 17 17

Ancho Columnas: 4.1765 3.2278 2.9114 3.7975 3.3529

Ancho Pasillo Vertical: 1.1335 [mtrs]

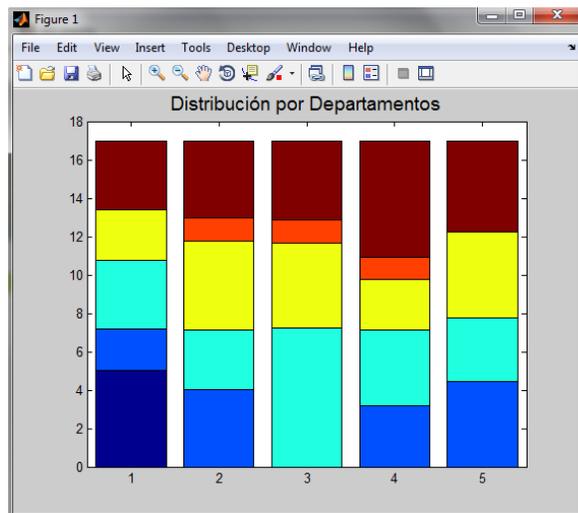
Ancho Pasillo Horizontal: 1.2 [mtrs]

# de Penalizaciones: 2

Vector Auxiliar: 0 0 0 0 1 0 0 0 1 0 0 1 0 0 0 1 0 0 0 1

Ejecutar / Cargar Datos

### 4.2. DISTRIBUCIÓN





**ANEXO D**  
**ARTÍCULO ACÁDEMICO**

**(EN LA SIGUIENTE PÁGINA)**