

**REGULARIZACIÓN DE DEPARTAMENTOS DE ÁREAS DESIGUALES A
PARTIR DE SOLUCIONES PLANTEADAS AL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN
DE PLANTA.**

**FABIAN ANDRÉS CAMARGO CÁRDENAS
JORGE ARTURO ARIAS GARCÍA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIAS FISICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2012

**REGULARIZACIÓN DE DEPARTAMENTOS DE ÁREAS DESIGUALES A
PARTIR DE SOLUCIONES PLANTEADAS AL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN
DE PLANTA.**

**FABIAN ANDRÉS CAMARGO CÁRDENAS
JORGE ARTURO ARIAS GARCÍA**

**Trabajo De Grado Para Optar Al Título De
Ingeniero Industrial**

**Director
CARLOS EDUARDO DÍAZ BOHÓRQUEZ
MSC. ING. INDUSTRIAL**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOMECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA**

2012

AGRADECIMIENTOS

A nuestros familiares, amigos y aquellas personas que nos permitieron alcanzar este sueño, por medio de su apoyo, consideración y animo incondicional, a nuestro director de proyecto, el ingeniero Carlos Díaz Bohórquez, quien con su experiencia y colaboración, nos permitió tomar el rumbo adecuado en la persecución de las metas trazadas, y a Dios que siempre está presente con su amor en nuestras vidas.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	18
1. GENERALIDADES	20
1.1 TÍTULO	20
1.2 MODALIDAD	20
1.3 RESPONSABLES	20
1.3.1 Autores	20
1.3.2 Director del proyecto de investigación	20
1.3.3 Director del grupo de investigación	20
1.4 OPALO: GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS PRODUCTIVOS, ADMINISTRATIVOS Y LOGÍSTICOS	21
1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	22
1.6 RESULTADOS ESPERADOS	23
1.7 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO	24
1.8 OBJETIVOS	25
1.8.1 Objetivo general	25
1.8.2 Objetivos específicos	25
1.9 METODOLOGÍA	26
1.9.1 Revisión Bibliográfica y documentación	26
1.9.2 Comprensión de Algoritmos de Forma	26
1.9.3 Alternativas de solución	26
1.9.4 Diseño del programa	26
1.9.5 Implementación del Programa	27
1.9.6 Análisis de resultados	27
2. PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA (PDP)	27
2.1 REVISIÓN DE LA LITERATURA	27
3 CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA	34

3.1	TIPO DE DISTRIBUCIÓN.....	31
3.1.1	Distribución por Proceso.....	31
3.1.2	Distribución por Producto	31
3.1.3	Distribución por Centros de Trabajo.....	32
3.1.4	Distribución por Posición Fija.....	32
3.2	CARACTERÍSTICAS ESPACIALES DE LOS DEPARTAMENTOS.....	32
3.2.1	Características de forma	37
3.2.2	Características de área	38
3.3	FLUJO DEL PROCESO	38
4.	FORMULACIÓN DE PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA (PDP).....	43
4.1	FORMULACIÓN DISCRETA.....	44
4.2	FORMULACIÓN CONTINUA.....	46
5.	MÉTODOS DE SOLUCIÓN AL PDP.....	49
5.1	PLANEACIÓN SISTEMÁTICA DE LA DISTRIBUCIÓN DE PLANTAS...	50
5.1.1	Matriz Origen – Destino.....	50
5.1.2	Tabla de Relación de Actividades	54
5.2	MÉTODOS DE SOLUCIÓN EXACTA.....	55
5.2.1	Branch and Bound	56
5.3	MÉTODOS METAHEURÍSTICOS.....	57
5.3.1	Búsqueda Tabú.....	58
5.3.2	Recocido Simulado	63
5.3.3	Algoritmo Genético	64
5.3.4	Algoritmo Híbrido Genético	67
5.4	REGULARIZACIÓN DE LOS DEPARTAMENTOS.....	71
5.4.1	Algoritmo de forma con distancias entre los centroides (AF - DC).....	72
5.4.2	Algoritmo de forma de Búsqueda (AF-B).....	73
5.4.3	Algoritmos de forma utilizando líneas transversales (AF-LT1 y AF-LT2)	76
6.	MANUAL DEL PROGRAMA AF.....	83
6.1	REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA	83

6.2	PROGRAMA AF	83
7.	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	94
7.1	FACTORES UTILIZADOS EN EL ALGORITMO HÍBRIDOGENÉTICO (AHG).....	96
7.2	ANÁLISIS ENTRE ALGORITMOS DE FORMA (AF).....	96
7.2.1	ESCENARIO DE 12 DEPARTAMENTOS.....	97
7.2.2	ESCENARIO DE 16 DEPARTAMENTOS.....	99
7.2.3	ESCENARIO DE 20 DEPARTAMENTOS.....	100
7.2.4	ESCENARIO DE 25 DEPARTAMENTOS.....	102
7.3	ANÁLISIS DE EJERCICIOS.....	103
7.3.1	EJERCICIO 1.....	103
7.3.2	EJERCICIO 2.....	104
7.3.3	EJERCICIO 3.....	105
7.3.4	TIEMPO COMPUTACIONAL	107
8.	CONCLUSIONES.....	108
9.	RECOMENDACIONES.....	111
	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS.....	112

LISTA DE ILUSTRACIONES

		Pág.
Ilustración 1	Formas regulares e irregulares de los departamentos.....	37
Ilustración 2	Distribución Lineal Simple.....	39
Ilustración 3	Distribución Multilineal.....	39
Ilustración 4	Distribución Circular Cerrada.....	40
Ilustración 5	Distribución de Campo Abierto.....	40
Ilustración 6	Diagrama de Distribución Vertical.....	41
Ilustración 7	Retroceso y Adelanto.....	42
Ilustración 8	Puntos de Carga y Descarga de una maquina con forma regular.....	42
Ilustración 9	Evolución de distribución en cuatro períodos.....	43
Ilustración 10	Ejemplo de líneas de llenado.....	47
Ilustración 11	Diagrama de relación de actividades parte 1.....	54
Ilustración 12	Diagrama de relación de actividades parte 2.....	55
Ilustración 13	Algoritmo Híbrido Genético.....	58
Ilustración 14	Ejemplo: Solución Inicial BT.....	59
Ilustración 15	Diagrama de Flujo-Búsqueda Tabú.....	62
Ilustración 16	Diagrama de Flujo-Recocido Simulado.....	65
Ilustración 17	Diagrama de Flujo-Algoritmo Genético.....	68
Ilustración 18	Ejemplo AHG Parte 1.....	69
Ilustración 19	Ejemplo AHG Parte 2a.....	70
Ilustración 20	Ejemplo AHG Parte 2b.....	70
Ilustración 21	Ejemplo AHG Parte 3.....	70
Ilustración 22	Ejemplo AHG Parte 4.....	71
Ilustración 23	Construcción del nuevo diseño por AF-DC.....	73
Ilustración 24	Construcción del nuevo diseño por AF-LT1.....	76

Ilustración 25	Diagrama de Flujo - Algoritmo de Forma con Distancia entre Centroides (AF-DC).....	79
Ilustración 26	Diagrama de Flujo - Algoritmo de Forma de Búsqueda (AF-B)	80
Ilustración 27	Diagrama de Flujo - Algoritmo de Forma con líneas transversales 1 (AF-LT1).....	81
Ilustración 28	Diagrama de Flujo - Algoritmo de Forma con líneas transversales 1 (AF-LT2).....	82
Ilustración 29	Vista de MATLAB.....	84
Ilustración 30	Vista del programa AF.....	84
Ilustración 31	Vista ventana solución planteada.....	85
Ilustración 32	Opción Personalizada.....	85
Ilustración 32a	Personalizada: Entradas.....	86
Ilustración 32b	Personalizada: Unidades de Área.....	87
Ilustración 32c	Personalizada: Flujos.....	87
Ilustración 33	Regularización.....	88
Ilustración 33a	Regularización por el AF-DC.....	89
Ilustración 34	Opción Exportar.....	90
Ilustración 35	Opción Automático.....	90
Ilustración 36	Comparación entre los cuatro Algoritmos de Forma.....	91
Ilustración 37	Opción AHG.....	92
Ilustración 37a	AHG: Flujos.....	92
Ilustración 37b	AHG: Unidades de Área.....	93
Ilustración 37c	AHG: Líneas de llenado.....	93
Ilustración 38	Solución planteada por el AHG.....	94

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cumplimiento de Objetivos.....	15
Tabla 2. Relación de volúmenes.....	51
Tabla 3. Diagrama Origen – Destino.....	52
Tabla 4. Diagrama Origen – Destino (suma total).....	52
Tabla 5. Factores de entrada del AHG.....	97
Tabla 6a. Desempeño de los Algoritmos en la DTT: 12 Departamentos.....	98
Tabla 6b. Desempeño de los Algoritmos en la RA: 12 Departamentos.....	98
Tabla 7a. Desempeño de los Algoritmos en la DTT: 16 Departamentos.....	99
Tabla 7b. Desempeño de los Algoritmos en la RA: 16 Departamentos.....	100
Tabla 8a. Desempeño de los Algoritmos en la DTT: 20 Departamentos.....	101
Tabla 8b. Desempeño de los Algoritmos en la RA: 20 Departamentos.....	101
Tabla 9a. Desempeño de los Algoritmos en la DTT: 25 Departamentos.....	102
Tabla 9b. Desempeño de los Algoritmos en la RA: 25 Departamentos.....	103
Tabla 10a. Reducciones de RA en el ejercicio 1.....	104
Tabla 10b. Valores de la DTT: ejercicio 1.....	104
Tabla 11a. Reducciones de RA en el ejercicio 2.....	104
Tabla 11b. Valores de la DTT: ejercicio 2.....	105
Tabla 11a. Reducciones de RA en el ejercicio 3.....	105
Tabla 11b. Valores de la DTT: ejercicio 3.....	106

LISTA DE ANEXOS

Anexo A.	EJERCICIOS DE REFERENCIA.....	116
Anexo B.	RESULTADOS GENERALES PROGRAMA AF.....	131
Anexo C.	TIEMPOS COMPUTACIONALES.....	147
Anexo D.	RESULTADOS PARA EXPORTAR.....	148

CUMPLIMIENTO DE OBJETIVOS

Tabla 1. Cumplimiento de Objetivos

Objetivos Específicos	Numerales Relacionados
<ul style="list-style-type: none">• Realizar la revisión bibliográfica del problema de distribución de planta (PDP) de un solo nivel y departamentos de áreas desiguales con formas regulares; junto al progreso y orientación que se le ha dado al problema.	2, 3, 4 y 5
<ul style="list-style-type: none">• Presentar de manera sistemática los Algoritmos de Forma, estudiando su aplicación en soluciones planteadas al PDP por diferentes heurísticas y metaheurísticas.	4 y 5
<ul style="list-style-type: none">• Programar los Algoritmos de Forma y realizar los arreglos apropiados al diseño del programa.	6
<ul style="list-style-type: none">• Implementar los Algoritmos de Forma en las soluciones planteadas al PDP por el Algoritmo Híbrido Genético (AHG).	6 y 7
<ul style="list-style-type: none">• Evaluar la efectividad de los Algoritmos de Forma, comparando las DTT y las Relaciones de Aspecto de los nuevos diseños con las DTT y las Relaciones de Aspecto obtenidas en las soluciones al PDP planteadas por el Algoritmo Híbrido Genético en áreas desiguales.	7

RESUMEN

TÍTULO: REGULARIZACIÓN DE DEPARTAMENTOS DE ÁREAS DESIGUALES A PARTIR DE SOLUCIONES PLANTEADAS AL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA.*

AUTORES: Fabian Andrés Camargo Cárdenas, Jorge Arturo Arias García.*

PALABRAS CLAVES: Distribución de planta, metaheurísticas, relación de aspecto, distancia total de transporte, algoritmos de forma, algoritmo híbrido genético.

Este trabajo de investigación estudia el comportamiento de cuatro algoritmos de forma que integran el programa desarrollado por los autores, donde el objetivo principal es la regularización de departamentos de áreas desiguales partiendo de soluciones planteadas al problema de distribución de planta, teniendo en cuenta las investigaciones realizadas en la Universidad Industrial de Santander y los antecedentes históricos de estudios relacionados con el diseño de plantas aún más reales.

A partir de un análisis detallado de los diferentes estudios que buscan dar solución al problema de distribución de planta PDP para departamentos de áreas desiguales, se obtienen valores a partir del algoritmo híbrido genético AHG considerados como buenas soluciones a pesar de que presentan distribuciones de los departamentos con forma irregular como consecuencia de la utilización de líneas de llenado. Con estos resultados y con el interés de implementar una metodología más eficiente en la obtención de departamentos regulares en plantas de áreas desiguales, se analizan cuatro algoritmos en diferentes escenarios y los beneficios de cada algoritmo, en donde se utiliza la relación de aspecto y la distancia total de transporte DTT como medidas de comparación.

En este estudio, se diseña y desarrolla una herramienta computacional en MATLAB con la capacidad de regularizar los departamentos de áreas desiguales obtenidos por el AHG y con valores cercanos a los valores de referencia. Finalmente se realiza un análisis de rendimiento e incrementos porcentuales para cada uno de los algoritmos implementados por separado.

* Proyecto de grado modalidad trabajo de investigación.

* Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, Ingeniería Industrial. Dirigido por Carlos E. Díaz Bohórquez.

ABSTRACT

TITLE: ADJUSTING SHAPES OF UNEQUAL AREA DEPARTMENTS BASED ON SOLUTIONS TO THE FACILITY LAYOUT PROBLEM.*

AUTHORS: Fabian Andrés Camargo Cárdenas, Jorge Arturo Arias García.*

KEYWORDS: Facility Layout, Metaheuristic methods, Aspect Ratio, Total Transportation Distance, Shaping Algorithms, Hybrid Genetic Algorithm.

This research studies the behavior of four shaping algorithms that integrate the program developed by the authors, where the main objective is to adjust the shape of unequal area departments based on proposed solutions to the facility layout problem, taking into account the research done in the Industrial University of Santander and historical studies related to the facility layout even more realistic.

From a detailed analysis of the different studies that looking to solve the Facility Layout Problem FLP for departments of unequal areas, values are obtained from hybrid genetic algorithm HGA as good solutions even though the departments have distributions with irregular shape as a result of the use of filling flows. With these results and with the interest to implement a more efficient methodology to obtain regular departments in unequal area facilities, analyze four algorithms under different scenarios and the benefits of each algorithm which uses the aspect ratio and the total transportation distance TTD as compared measures.

In this study, a software tool is design and develops in MATLAB programming, with the ability to regulate the unequal areas departments obtained by the HGA and values around benchmarks. Finally, an analysis is made of performance and increment for each of the algorithms implemented separately.

* Degree Project

*Industrial and Business Studies Department. Industrial Engineering. Directed by Carlos E. Díaz Bohórquez

INTRODUCCIÓN

El problema de la ubicación de los departamentos dentro del área de una planta, comúnmente se refiere al “Problema de Distribución de Plantas” conocido como Facility Layout Problem FLP por sus siglas en inglés, y citado en adelante como PDP¹, el cual se caracteriza por tener un impacto significativo sobre los costos totales de operación y producción. La eficiencia global de las operaciones en las distintas instalaciones puede reducir hasta un 50% los gastos totales de la operación (Tompkins et al., 1996), y para que los sistemas de producción y servicio operen eficientemente, estos no sólo tienen que ser operados con planificación óptima y buenas políticas operativas, sino también tienen que estar bien diseñados. Los departamentos tienen que ser ubicados estratégicamente y a su vez: no sobreponerse unos a otros, seguir las restricciones que los limitan (tipos de áreas: iguales o desiguales, tipos de forma: regulares e irregulares), y permitir minimizar el costo de manejo de materiales. Estos requisitos son fundamentales porque resultan de gran impacto en el rendimiento del sistema. [9]. En general, el PDP se basa en dos etapas, la realización de un diseño de bloques y la finalización de los detalles. La primera determina las formas y ubicaciones relativas de los departamentos, mientras que la segunda especifica la ubicación de los equipos primarios utilizados en cada departamento y equipos imprevistos, tales como, el gas, las líneas de aire y los accesorios de iluminación.

El PDP puede ser clasificado en dos categorías de acuerdo al método dispuesto para la construcción de las instalaciones: una es la de áreas iguales y la otra es la de áreas desiguales, ésta última puede ser clasificada en dos sub-categorías según los tipos de planos utilizados en el diseño de bloques: en la primera el diseño de bloques utiliza un plano que es dividido en cuadrados o rectángulos de una unidad de área (Plano de cuadrículas), mientras que en la segunda el diseño de bloques utiliza un plano continuo, que no está dividido por una cuadrícula. En el

¹PDP es el Problema de Distribución de Plantas.

plano de cuadrículas, la longitud y el ancho de los departamentos tienen siempre valores enteros o múltiplos enteros de una unidad de longitud, mientras que en el plano continuo puede haber valores reales [24]. El punto de partida para el desarrollo de la investigación, son las soluciones obtenidas en proyectos que se realizaron anteriormente sobre el PDP en la Universidad Industrial de Santander, Sin embargo, dichas soluciones presentan inconvenientes debido a las formas irregulares de algunos departamentos de áreas desiguales, por ello se exponen cuatro “algoritmos de forma” según Lee, G-C. And Kim, Y-D. (2000). Los algoritmos sugeridos convierten un diseño de bloques determinado en el cual algunos o todos los departamentos son de formas irregulares, en un nuevo diseño de bloques en el cual todos los departamentos tienen una forma regular (rectangular o cuadrada). Dicho diseño de bloques conserva las posiciones relativas de los departamentos tanto como es posible, y a su vez el valor objetivo no cambia significativamente con lo cual se puede conservar la calidad del diseño original. En este documento, la distancia total de transporte (DTT)² se utiliza como una medida de la calidad de la solución. La DTT es definida como la suma ponderada de las distancias rectilíneas entre los centroides de los departamentos por las cantidades de flujo entre los departamentos. Sin embargo, los algoritmos sugeridos se pueden utilizar o fácilmente modificar por otras medidas [24].

El documento se organiza de la siguiente manera: el capítulo 2 explica el PDP, en el capítulo 3 se analizan las características de las plantas, en el capítulo 4 se formulan los modelos matemáticos del PDP, en el capítulo 5 se revisan los métodos utilizados en la solución del PDP, en el capítulo 6 se encuentra un manual del programa desarrollado, en el capítulo 7 se llevan a cabo experimentos computacionales para mostrar el rendimiento de los algoritmos sugeridos y se analizan esos resultados, finalmente se concluye el documento y se dan recomendaciones para investigaciones futuras en los capítulos 8 y 9 respectivamente.

²DTT es la Distancia Total de Transporte entre los departamentos de una planta.

1. GENERALIDADES

1.1 TÍTULO:

REGULARIZACIÓN DE DEPARTAMENTOS DE ÁREAS DESIGUALES A PARTIR DE SOLUCIONES PLANTEADAS AL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA.

1.2 MODALIDAD:

TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.3 RESPONSABLES

1.3.1 Autores:

FABIAN ANDRÉS CAMARGO CÁRDENAS	JORGE ARTURO ARIAS GARCÍA
Estudiante de Ingeniería Industrial	Estudiante de Ingeniería Industrial
CÓDIGO: 2060043	CÓDIGO: 2051989

1.3.2 Director del proyecto de investigación

CARLOS EDUARDO DÍAZ BOHÓRQUEZ
Msc en Ingeniería Industrial
Docente Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

1.3.3 Director del grupo de investigación

Ma. JAVIER EDUARDO ARIAS OSORIO
Docente Escuela de Estudios Industriales y Empresariales

1.4 OPALO: GRUPO DE INVESTIGACIÓN EN OPTIMIZACIÓN DE SISTEMAS PRODUCTIVOS, ADMINISTRATIVOS Y LOGÍSTICOS

Creado en el año 2005 y liderado por el Ingeniero Javier Eduardo Arias Osorio, el Grupo OPALO centra su investigación en los procesos de Modelamiento para resolver problemas de Ingeniería Industrial y en general de las operaciones de la empresa, realizando tanto investigación pura como aplicada. El grupo OPALO cuenta con tres líneas generales de investigación:

Optimización de Sistemas Productivos: Desarrollo de proyectos de investigación orientados al estudio, análisis y aprovechamiento óptimo de los recursos productivos de empresa, generadoras de bienes y servicios.

Optimización de procesos Administrativos: Elevar la productividad y competitividad de la empresa en el área administrativa y financiera.

Sistemas de Distribución y Logística: Resolver por medio de la aplicación de modelos de optimización, problemas relacionados con las actividades de despacho, envío y entrega de productos a los clientes, elevando la operatividad y confiabilidad de la cadena de suministro.

Los docentes investigadores del grupo son:

- Olga Lucia Mantilla Celis
- Javier Eduardo Arias Osorio
- Edwin Alberto Garavito Hernández
- Henry Lamos Díaz
- Myriam Leonor Niño López
- Néstor Raúl Ortiz Pimiento
- Carlos Eduardo Díaz Bohórquez

Actualmente ÓPALO tiene como reto consolidar una cultura investigativa al interior de la Universidad Industrial de Santander con trascendencia en al ámbito regional y nacional a través de los proyectos de investigación desarrollados por el grupo. Su visión se basa en que para el año 2014 el Grupo de Investigación en Optimización de Sistemas Productivos, Administrativos y Logísticos de la Universidad Industrial de Santander, será reconocido como uno de los mejores de esta institución por su excelente producción científica y su constante labor de apoyo al sector empresarial de la región santandereana”.³

1.5 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Recientemente en la Universidad Industrial de Santander (UIS) se han estudiado diferentes alternativas de solución para el PDP, entre ellas, Calderón y Duarte (2010) [6], presentan un análisis de métodos metaheurísticos, Palacios y Jaimes (2011) [32] comparan los métodos metaheurísticos propuestos con un algoritmo híbrido genético (AHG⁴), planteado por Lee y Lee (2002) [25] y a su vez, Cote y Mendoza muestran la eficiencia de Optimización del Apareamiento de las Abejas de Miel (OAAM⁵) propuesto por Abbas Afshar (2006) [1]. Sin embargo, las soluciones (basadas en planos de cuadrículas y curvas de llenado) generalmente llevan a departamentos de áreas desiguales con formas irregulares que en términos reales no son muy apropiadas o muy prácticas, debido a que en diversas ocasiones no permiten el aprovechamiento de los espacios o generan limitaciones dentro de los mismos, como por ejemplo, cuando una instalación no satisface las dimensiones de una maquina o un centro de trabajo.

Para favorecer el acondicionamiento de las instalaciones, los departamentos de áreas desiguales deben tener formas regulares, por este motivo nace la idea de

³Carpintero UIS-Escuela de Estudios Industriales y Empresariales [online]. [Citado el 5 de Julio de 2012]. Disponible en: <http://carpintero.uis.edu.co/eisi/eisi.jsp?IdServicio=S72>

⁴AHG es el Algoritmo Híbrido Genético.

⁵OAAM es el Algoritmo de Optimización del Apareamiento de las Abejas de Miel.

realizar la investigación de “Algoritmos de Forma” presentados por Geun-Cheol Lee, Yeong-Dae Kim (2000) [24] los cuales convierten un diseño de bloque dado de departamentos con forma irregular en un nuevo diseño con departamentos de forma regular, conservando sus posiciones relativas y sin deteriorar la calidad DTT de la solución, con ello podremos aplicar los “Algoritmos de Forma” para regularizar las formas obtenidas a partir de las soluciones planteadas al problema de distribución de planta. Tales soluciones se pueden obtener por parte de las investigaciones anteriormente nombradas. En particular, en nuestro caso se tienen en cuenta las soluciones planteadas por el AHG y en segunda medida se permite personalizar las soluciones por parte del usuario, con lo cual se brinda la opción de acceder al programa AF⁶ por cualquier método. Hay que tener en cuenta que las tres principales e interdependientes decisiones del diseño en el Problema de Distribución de Planta son: 1. La determinación de las formas y ubicaciones de los departamentos dentro de la instalación, la cual es llamada el problema de distribución del bloque conceptual. 2. La determinación de las ubicaciones de los puntos de entrada y de salida E/S en los límites de cada departamento. 3. El diseño de las líneas de flujo o pasillos que conectan esos puntos de entrada y salida E/S. Aunque estos tres problemas tienen relación se han desarrollado por separado debido a las dificultades computacionales, y en este estudio se enfoca en la primera de ellas [16].

1.6 RESULTADOS ESPERADOS

Los productos a entregar como resultado de este proyecto de grado son los siguientes:

- Documento con la definición y explicación del problema de distribución de planta PDP, en el cual se muestra su organización, revisión de la literatura, conceptualización del Algoritmo Híbrido Genético y los cuatro Algoritmos de

⁶ AF es Algoritmo de Forma.

Forma, así como los resultados logrados por la implementación de la herramienta desarrollada.

- Una herramienta que ajuste formas irregulares de departamentos de manera que se obtengan nuevos diseños en los cuales todos los departamentos sean de formas regulares, se conserven sus posiciones relativas y la calidad de la DTT no cambie significativamente y un manual de uso.
- Artículo académico que resuma el desarrollo de la investigación y los resultados obtenidos.

1.7 JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

Estudios realizados en los últimos años en la UIS [6,32] se han enfocado en plantear soluciones al PDP, mediante el uso de metaheurísticas tales como: búsqueda tabú, recocido simulado, algoritmo genético y algoritmos híbridos (AHG y OAAM) buscando generar soluciones óptimas o cercanas a la misma, en un tiempo computacional prudente y a un bajo costo; pero sus soluciones generan departamentos de formas irregulares, las cuales no son muy reales en la práctica; por esta razón resulta de gran conveniencia esta investigación, en la que se hace un estudio sobre los llamados “Algoritmos de Forma”.

De esta manera nos apropiaremos y divulgaremos los algoritmos, creando una herramienta computacional que regularice departamentos de áreas desiguales de las soluciones planteadas al PDP de una manera económica y asequible para las empresas del sector, ya que el valor adquisitivo de programas mejorados que actualmente resuelven dicho problema es muy alto. Siendo esta investigación, un punto de inicio para que se innove en futuras investigaciones y se tengan en cuenta más condiciones necesarias para cumplir con un escenario ideal o aún más práctico.

1.8 OBJETIVOS

1.8.1 Objetivo general:

Evaluar la aplicación de los “Algoritmos de Forma”, en la regularización de departamentos de áreas desiguales, a partir de soluciones planteadas al problema de distribución de planta.

1.8.2 Objetivos específicos:

- Realizar la revisión bibliográfica del problema de distribución de planta (PDP) de un solo nivel y departamentos de áreas desiguales con formas regulares; junto al progreso y orientación que se le ha dado al problema.
- Presentar de manera sistemática los Algoritmos de Forma, estudiando su aplicación en soluciones planteadas al PDP por diferentes heurísticas y metaheurísticas.
- Programar los Algoritmos de Forma y realizar los arreglos apropiados al diseño del programa.
- Implementar los Algoritmos de Forma en las soluciones planteadas al PDP por el Algoritmo Híbrido Genético (AHG).
- Evaluar la efectividad de los Algoritmos de Forma, comparando las DTT y las Relaciones de Aspecto de los nuevos diseños con las DTT y las Relaciones de Aspecto obtenidas en las soluciones al PDP planteadas por el Algoritmo Híbrido Genético en áreas desiguales.

1.9 METODOLOGÍA

Al iniciar y finalizar cada etapa se realizaron reuniones con el director de proyecto para establecer tareas concretas que cumplieran con los objetivos trazados por medio de su evaluación, corrección y aprobación.

1.9.1 Revisión Bibliográfica y documentación

Compilar documentos, artículos y libros que contengan información bibliográfica disponible sobre regularización de departamentos de áreas desiguales y los diferentes métodos utilizados en la solución del problema de distribución de planta.

1.9.2 Comprensión de Algoritmos de Forma

Comprender los Algoritmos de Forma por medio del estudio de las aplicaciones que se la ha dado en otras áreas, con el fin de aplicarlos a soluciones planteadas al PDP.

1.9.3 Alternativas de solución

Permitir el acceso al programa AF de las soluciones planteadas al PDP de un solo nivel y departamentos de áreas desiguales por los diferentes métodos estudiados en la universidad Industrial de Santander, mediante el análisis de toda la información recopilada.

1.9.4 Diseño del programa

Formular las restricciones del modelo matemático junto con el objetivo del problema para programar los Algoritmos de Forma.

1.9.5 Implementación del Programa

Ejecutar el programa desarrollado a partir de las soluciones propuestas al PDP por diferentes métodos estudiados en la universidad Industrial de Santander, realizando ajustes de diseño de la herramienta y elaborando un manual para su uso.

1.9.6 Análisis de resultados

Realizar una comparación de efectividad, en términos de DTT y Relación de Aspecto, entre los diseños propuestos por el Algoritmo Híbrido Genético estudiado en la Universidad Industrial de Santander y el diseño final obtenido por los cuatro Algoritmos de Forma.

2. PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA (PDP)

El problema de distribución de planta consiste en el diseño de una planta considerando las características y restricciones que presentan las empresas, ubicando todas las facilidades necesarias para la producción de bienes o prestación de servicios. Es importante tener en cuenta que las instalaciones son el espacio físico disponible en la planta (fábricas industriales, centros administrativos u oficinas de servicios) y los departamentos son lugares específicos dentro de esas instalaciones, en los cuales se facilita la producción (una máquina herramienta, un centro de trabajo, una celda de producción, un taller de máquinas, un almacén, etc.). Heragu, (1997) [14].

2.1 REVISIÓN DE LA LITERATURA

El PDP ha sido estudiado por diferentes autores los cuales han propuesto soluciones cercanas a lo que es una planta real, con sus características y restricciones, pero muchas de dichas respuestas o soluciones arrojan algunos

departamentos con formas irregulares. La investigación para solucionar este problema nos ha llevado a una intensa búsqueda en documentos relacionados con la solución del mismo. A continuación se muestra una evolución progresiva del PDP y temas implicados con la regularización de los departamentos:

En 1957, Koopmans y Beckmann [22] fueron los primeros en definir la distribución de planta como un problema de optimización, en donde el objetivo es ubicar instalaciones dentro de un área dada y minimizar el costo de transporte de material entre las mismas.

En 1963, Armour y Buffa plantearon el PDP de áreas desiguales que es un problema fundamental de optimización y el cual enfrentan empresas tanto de manufactura como de servicios. [4]

En 1992 Tam, K.Y., Li utilizaron una metaheurística de recocido simulado, para encontrar un mejor diseño. En este trabajo se describe un procedimiento que puede ser utilizado para el diseño de plantas, asignando espacio a las celdas de fabricación. Hay que tomar en cuenta la zona y los requisitos de forma de las celdas individuales, así como cualquier región ocupada en la planta. Un diseño se representa como una suma de particiones rectangulares organizadas por niveles de corte. El método consiste en buscar la solución del corte de una estructura dada a través del espacio de todos los niveles. Se presenta un algoritmo de recocido simulado eficaz, capaz de reducir al mínimo el flujo de tráfico entre las celdas y hacer cumplir las restricciones geométricas [36].

En 1996, Tompkins et al, plantearon que una buena ubicación de los departamentos contribuye a la eficiencia global de las operaciones y puede reducir hasta un 50% los gastos totales de la operación [37].

Meller y Gau en 1996 plantearon que las limitaciones para la solución de la distribución de planta en áreas desiguales son: (1) todos los departamentos deben estar ubicados en una zona o instalación, (2) que los departamentos no se superpongan entre sí, y (3) el diseño debe cumplir con las restricciones de área de la instalación. [28]

En 1998, Chwif, Pereira, Barretto y Moscato una instalación puede haber dado dimensiones definidas por una longitud fija (L_i) y un ancho fijo (W_i). En este caso, las instalaciones son llamadas bloques fijos o rígidos. Según los mismos autores, una instalación también puede ser definida por su área, su relación de aspecto: $a_i = L_i / W_i$, un límite superior a_{iu} y un límite inferior a_{il} , tal que $a_{il} \leq a_i \leq a_{iu}$. Si $a_{il} = a_i = a_{iu}$, este corresponde al caso de bloques de forma fija. [8]

En 1998, Kochhar, J.S., Heragu, S.S. and Foster, B., utilizaron Algoritmos Genéticos en la aplicación de una técnica de computación evolutiva para el diseño de instalaciones eficientes. Los algoritmos genéticos (AG⁷) se han aplicado para resolver heurísticamente una serie de problemas combinatorios, tales como la programación de tareas, el problema del agente viajero y el problema de asignación cuadrática. En este trabajo se planteó un algoritmo basado en los AG para resolver el problema de distribución de planta (PDP) de un solo piso. Consideraron a los departamentos en tamaños iguales y desiguales. Los resultados indican que los algoritmos genéticos (AG) pueden proporcionar una mejor alternativa en un entorno realista donde el objetivo es encontrar una serie de buenas distribuciones. [19]

En 1998, Kim y Kim [17], presentaron un documento que se centra en el problema de distribución de plantas con restricciones de forma. En este estudio, el diseño de bloques se construye en el plano continuo, y por lo tanto, los departamentos pueden tener valores reales de sus largos y anchos, es decir, su longitud y

⁷AG es el Algoritmo Genético.

anchura no necesariamente son múltiplos enteros de una unidad de longitud dada. Se supone que el piso es de forma rectangular. Los departamentos se modelan en forma de rectángulos en el diseño de bloque. La restricción de la forma de cada departamento está representada por la relación de aspecto, es decir, la relación de aspecto de cada bloque debe estar dentro de un rango determinado y se define como la relación entre los valores máximos y mínimos de un departamento en su longitud y anchura. El objetivo del problema considerado es minimizar la distancia total de transporte (DTT), es decir, la suma ponderada de las distancias rectilíneas entre los centroides por las cantidades de flujo de los departamentos. Además de las restricciones de forma, el problema tiene las siguientes restricciones: (1) bloques, los cuales especifican los lugares y formas de los departamentos, no deben superponerse entre sí, y (2) el tamaño de cada bloque debe ser igual al área de su departamento correspondiente (restricciones de área).

En 1999, Meller, Narayanan y Vance afirman que el problema consiste en encontrar un arreglo ortogonal plano para áreas iguales y desiguales, sin superposición, de n departamentos rectangulares dada un área igualmente rectangular. [30].

En 2000, Azadivar y Wang presentaron una técnica de optimización al PDP teniendo en cuenta, a la vez, tanto las características dinámicas como las restricciones operacionales del sistema. Determinaron la ubicación relativa, y la asignación del espacio disponible entre un número determinado de instalaciones, además utilizaron un algoritmo genético en la búsqueda de soluciones de óptimos locales o globales. [5]

En 2000, Kim & Kim, presentaron un documento en el cual se enfocaron en el PDP en el cual cada instalación tiene una forma predeterminada y puntos de entrada y de salida. Ellos dieron un modelo de programación entera mixta con el objetivo de minimizar la suma de las distancias rectilíneas ponderadas por las cantidades de flujo entre los puntos de entrada y de salida de los departamentos.

Usando el modelo de programación, desarrollaron un algoritmo de dos fases en el cual generaban un diseño inicial en la primera fase (fase de construcción) y lo optimizaban usando (4) cuatro métodos de mejora aplicados iterativamente en la segunda fase (fase de mejora). [18]

En 2000, Lee y Kim presentaron los “Algoritmos de Forma” los cuales convierten un diseño de bloque dado de departamentos con forma irregular en un nuevo diseño con departamentos de forma regular, conservando sus posiciones relativas y sin deteriorar la calidad DTT de la solución. [24]

En 2001, AbbassHussein A. [2], presentó la metaheurística de optimización del apareamiento de las abejas de miel OAAM, y posteriormente, Teo y Abbas (2001 y 2003), presentan algunas modificaciones y mejoras al algoritmo inicialmente propuesto. La principal contribución de Abbas, consiste en modelar el proceso de apareamiento de las abejas, para aplicarlo a la resolución de problemas de optimización. Aunque en la literatura no se encuentra aplicación de esta técnica, en la Universidad Industrial de Santander, Cote R., Ginna y Mendoza M., Diana adaptaron la formulación del algoritmo para dar solución al PDP.

En 2002, Lee, Y. H., y Lee, M. H. [25], presentaron la solución al PDP de instalaciones con áreas desiguales mediante un algoritmo híbrido genético. El algoritmo híbrido genético (AHG) lo plantearon para aprovechar la efectividad de tres técnicas en especial: búsqueda Tabú (BT)⁸, recocido simulado (RS)⁹ y algoritmos genéticos (AG). Las dos primeras se encargan de buscar soluciones locales efectivas, con las cuales se arman las “cadenas” de los algoritmos genéticos para encontrar la solución global del problema. Lo ideal es aprovechar las ventajas de dichas técnicas para llegar a una muy buena solución de manera práctica y efectiva. En la Universidad Industrial de Santander Palacios M., Melissa

⁸ BT es el Búsqueda Tabú

⁹ RS es el Recocido Simulado

y Jaimes T., Christian adaptaron la formulación del AHG en la solución del PDP en departamentos de áreas iguales y desiguales.

En 2003, Kyu-Yeul Lee, Seong-Nam Han, MyungRoh [23], presentaron un algoritmo genético mejorado (AG) el cual es una propuesta para resolver el problema de diseño de áreas desiguales con paredes de estructura interna y pasillos dentro de un área disponible con curvas de llenado.

Recientemente Meller, Chen&Sherali (2007) presentaron una nueva formulación para la solución del problema de distribución de planta para áreas desiguales, representado como una secuencia de pares, usando algoritmo genético y programación entera mixta. Este enfoque permitió solucionar problemas con hasta 11 departamentos. [27]

En 2007, Drira,A., Pierreval, H., y Hajri-Gabouj S. [9], presentaron un estudio reciente sobre los problemas de distribución basados en numerosas referencia bibliográficas. Consideran varias posibles definiciones de los problemas de distribución. Luego, proponen un marco general que puede ser usado para analizar la literatura actual. Distinguen las características principales de los talleres que se pueden encontrar. Se hace hincapié en los llamados problemas dinámicos. Se discute cómo pueden ser formulados los problemas de distribución de plantas. Se interesan en los métodos que se utilizan para resolver estos problemas.

En 2010 Komarudin, KuanYew, Wong [20], proponen el algoritmo de colonia de hormigas (ACH¹⁰) como alternativa de solución al problema de distribución de planta para áreas desiguales, encontrando buenos resultados.

En 2010 Alan R. McKendall Jr., ArtakHakobyan [3], utilizaron la Búsqueda tabú para plantear el problema de distribución de planta dinámico, el cual se basa en

¹⁰ ACH es el Algoritmo de Colonia de Hormigas

encontrar las posiciones de los departamentos en la planta por períodos múltiples, de tal manera que los departamentos no se superponen, y la suma de la manipulación de materiales y reordenación de los costos se reduce al mínimo. En este trabajo, los departamentos pueden tener áreas desiguales y orientación libre. Debido a la complejidad del problema, sólo los problemas de tamaño pequeño se pueden resolver en un tiempo razonable utilizando técnicas exactas. La solución se mejora mediante una búsqueda heurística tabú. La heurística se probó en algunos casos, para el problema de distribución de planta dinámico (PDPD¹¹) y para el problema de distribución de planta estático (PDPE¹²). Los resultados obtenidos demuestran la eficacia de la heurística.

En la Universidad Industrial de Santander en 2010, Duarte y Calderón, estudiaron y desarrollaron un programa encargado de comparar la eficacia para la solución del PDP de tres técnicas metaheurísticas: Recocido simulado RS, búsqueda tabú BT y algoritmo genético AG, como alternativas de solución al problema de distribución de planta (PDP) de un solo nivel y departamentos iguales ó desiguales [6].

En 2011, Palacios y Jaimes de la misma forma plantearon un programa para comprobar la efectividad de un algoritmo híbrido genético frente a otras metaheurísticas en la solución del PDP para instalaciones de áreas desiguales [32].

Con la revisión anterior se puede verificar que son grandes los esfuerzos realizados por varios autores en dar soluciones prácticas y aplicables al PDP, con lo cual se confirma la complejidad del mismo y se comprueba que existen diferentes métodos para ajustar las formas de los departamentos, optando finalmente por los algoritmos propuestos y dejando como invitación a continuar

¹¹PDPD es el Problema de Distribución de Planta Dinámico

¹²PDPE es el Problema de Distribución de Planta Estático

con su estudio y profundización. Para ello es de gran importancia revisar y comprender tres aspectos fundamentales en el estudio del PDP como lo son: las características de la planta, la formulación del problema y los métodos de solución abordados a continuación.

3. CARACTERÍSTICAS DE LA PLANTA

El PDP depende en gran medida de las características específicas de los sistemas de producción. Varios factores y temas de distribución diferencian claramente la naturaleza de los problemas que deben resolverse, debido a su importancia, estos factores se detallan a continuación [9].

El problema que surge a partir de diseñar o distribuir una planta “idónea”, de acuerdo con las características y restricciones que cada empresa tiene, recibe el nombre de PDP. Dentro de una planta, bien sea de manufactura o de servicios, resulta indispensable una localización adecuada de las instalaciones que se tengan, para facilitar la comunicación y/o el transporte entre ellas. Cabe destacar que dicho transporte representa un costo como parte de la operación, el cual debe estar bajo control. Sin embargo, la complejidad del problema PDP se incrementa debido al crecimiento exponencial del número de posibles soluciones a medida que aumenta el número de departamentos, siendo ésta una medida factorial. Es indispensable que no haya superposición entre las instalaciones y los flujos entre departamentos se faciliten. Después de planificar e identificar la distribución, los pasos a seguir en un proceso o sistema productivo son encaminar el flujo del proceso acorde a la distribución, para garantizar la entrada y salida del material y producto en proceso entre departamentos y, proceder a identificar las características de los departamentos. Teniendo todo esto claro se podrá desarrollar un sistema que permita aprovechar de la mejor manera la distribución de la planta y lo que ella pueda ofrecer.

3.1 TIPO DE DISTRIBUCIÓN

El tipo de distribución, determina la forma en que se van a agrupar los departamentos, los grupos de trabajo y las maquinas en una instalación de producción de manera que permitan un flujo de trabajo permanente. Los tipos de distribución que se pueden dar dentro de una planta son: distribución por proceso, distribución por producto, distribución por centro de trabajo y distribución por posición fija. A continuación se explican cada una de ellas:

3.1.1 Distribución por Proceso

El enfoque más común es arreglar los departamentos cuyos procesos sean similares, de tal manera que se optimice su colocación relativa. En muchas instalaciones la colocación óptima consiste en poner juntos los departamentos cuyo tráfico interdepartamental es muy elevado. Este tipo de operación es común en los hospitales cuyas áreas están dedicadas a tipos diferentes de cuidado médico, como pabellones de maternidad y unidades de cuidado intensivo.

3.1.2 Distribución por Producto

La diferencia básica entre la distribución por productos y la distribución por procesos es el patrón de flujo del trabajo. Como hemos visto en la distribución por procesos; dicho patrón puede ser altamente variable, pues el material para cualquier trabajo determinado debe enviarse al mismo departamento de procesamiento varias veces durante su ciclo de producción. En una distribución por producto, el equipo o los departamentos están dedicados a una línea de productos en particular, se emplea equipo duplicado para evitar la repetición de la misma ruta y puede lograrse un movimiento en línea recta para el flujo del material. Las líneas de producción de calzado y las plantas de productos químicos son distribuciones por producto.

3.1.3 Distribución por Centros de Trabajo

La distribución por centros o celdas de trabajo asigna máquinas diferentes a celdas que trabajan en productos cuya forma y requerimientos de procesamiento son similares. Es similar a la distribución por procesos porque las celdas están diseñadas para desempeñar una serie específica de procesos, y es similar a la distribución por productos porque las celdas están dedicadas a una gama limitada de productos. (Por grupo de tecnología nos referimos a la clasificación por partes y al sistema de codificación utilizado para especificar el tipo de máquinas que hay en una celda.) Se utilizan ampliamente en la actualidad para la fabricación de metal, de chips para computadora y en el trabajo de ensamble. El objetivo general es obtener los beneficios de la distribución por productos para distintas clases de producción en la fábrica.

3.1.4 Distribución por Posición Fija

La distribución por posición fija se caracteriza por un número relativamente bajo de unidades de producción, comparada con los formatos de distribución por procesos y distribución por productos. Cuando se desarrolla esta distribución, el producto debe visualizarse como el eje de una rueda en la que los materiales y el equipo se arreglan en forma concéntrica alrededor del punto de producción, de acuerdo con el orden de su utilización y la dificultad de movimiento. El producto (en virtud de su volumen o peso) permanece en una sola ubicación. El equipo de manufactura es el que se mueve hasta el producto. Los sitios en construcción son ejemplos de este formato. [7]

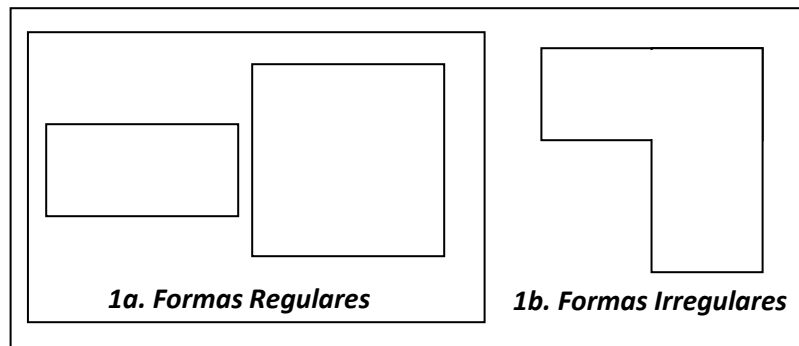
3.2 CARACTERÍSTICAS ESPACIALES DE LOS DEPARTAMENTOS

Un departamento puede estar definido físicamente por su forma o por su área, dependiendo del espacio necesario para las operaciones, el proceso a realizar y las máquinas que lo compongan.

3.2.1 Características de forma

Un departamento puede tener una forma regular o irregular. Las formas regulares son las conocidas como cuadrados o rectángulos definidos únicamente por el ancho y largo (ver ilustración 1a). Por ende, todas aquellas que no son lo anterior son las formas irregulares (ver ilustración 1b).

Ilustración 1. Formas regulares e irregulares de los departamentos



Fuente:Drira, A., Pierreval, H., y Hajri-Gabouj S. (2007). Facility layout problems: A survey

Geun-Cheol Lee, Yeong-Dae Kim [24] diseñan cuatro algoritmos de forma que convierten un diseño de bloque dado de departamentos con forma irregular en un nuevo diseño con departamentos de forma regular, conservando sus posiciones relativas y sin deteriorar la calidad DTT de la solución. Los algoritmos desarrollados son:

- Algoritmo de forma con distancias entre los centroides (AF-DC¹³)
- Algoritmo de forma con búsqueda (AF-B¹⁴)
- Algoritmo de forma con líneas transversales 1 (AF-LT1¹⁵)
- Algoritmo de forma con líneas transversales 2 (AF-LT2¹⁶)

¹³ AF-DC (Algoritmo de Forma con Distancias entre los Centroides)

¹⁴ AF-B es el Algoritmo de Forma con Búsqueda

¹⁵ AF-LT1 es el Algoritmo de Forma con Líneas Transversales 1

¹⁶ AF-LT2 es el Algoritmo de Forma con Líneas Transversales 2

3.2.2 Características de área

Los departamentos se clasifican según su área: iguales o desiguales. Cada una se aborda de manera diferente para solucionar el problema de PDP. En el caso de áreas iguales, el problema se considera de asignación cuadrática y para áreas desiguales, recibe el nombre de problema del conjunto de cobertura.

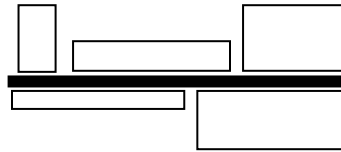
De acuerdo con Kyu-Yeul Lee et ál [23] el problema de áreas iguales consiste en ubicar dentro de un conjunto de instalaciones discretas, un conjunto definido de departamentos, de manera que a cada instalación se le asigne un solo departamento, también llamado problema de asignación uno a uno o asignación cuadrática. Mientras que el problema de áreas desiguales consiste en asignar todas las instalaciones en un plano o área disponible. En este problema, un departamento es representado por un polígono que puede tomar cualquier forma o número de instalaciones, dependiendo de las unidades de área que requiera para su operación [25].

3.3 FLUJO DEL PROCESO

Un sistema de manejo de materiales garantiza la entrada y salida de material de cada una de las instalaciones. Los equipos utilizados pueden ser transportadores: bandas transportadoras, rodillos, ruedas, vehículos guiados automáticamente, robots entre otros. Existen dos problemas en la organización de las instalaciones a lo largo del flujo del proceso: la selección de los equipos de manipulación y optimizar a su vez la utilización de los espacios dentro de la planta. De acuerdo con lo anterior, Amine Drira et ál [9] enuncia en su documento diferentes autores que explican los tipos de medida de distribución utilizados según el equipo de manejo de material así:

- a) Distribución Lineal Simple: el producto se desplaza a través de una línea por todas las instalaciones. La línea puede ser: recta, semicircular o tener forma de U(ver Ilustración 3).

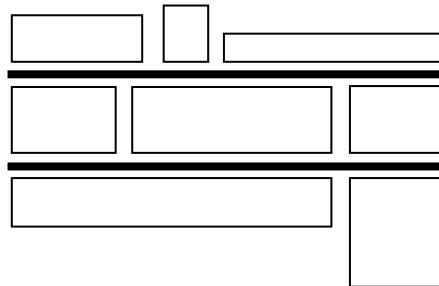
Ilustración 2. Distribución Lineal Simple



Fuente: Drira, A., Pierreval, H., y Hajri-Gabouj S. (2007). Facility layout problems: A survey

- b) Distribución Multilineal: involucra múltiples líneas de fabricación. El intercambio de materiales se puede dar en una misma línea y/o entre ellas si el proceso lo requiere (ver ilustración 4).

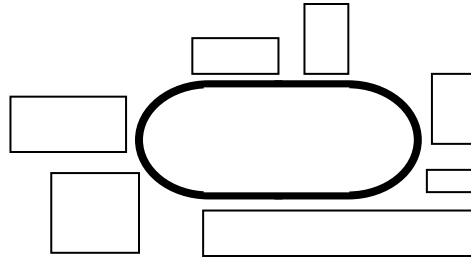
Ilustración 3. Distribución Multilineal



Fuente: Drira, A., Pierreval, H., y Hajri-Gabouj S. (2007). Facility layout problems: A survey

- c) Distribución Circular Cerrada: Las instalaciones se organizan en forma de anillo, de tal manera que las partes del producto únicamente circulen en una misma dirección entre ellas (ver ilustración 5).

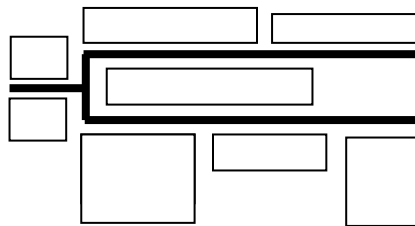
Ilustración 4. Distribución Circular Cerrada



Fuente:Drira, A., Pierreval, H., y Hajri-Gabouj S. (2007). Facility layout problems: A survey

- d) Distribución de Campo Abierto: se caracteriza porque las instalaciones tienen un mismo punto de entrada de material, pero conforme se van agrupando las piezas se pueden presentar diferentes caminos entre las instalaciones para obtener el producto final deseado (ver ilustración 6).

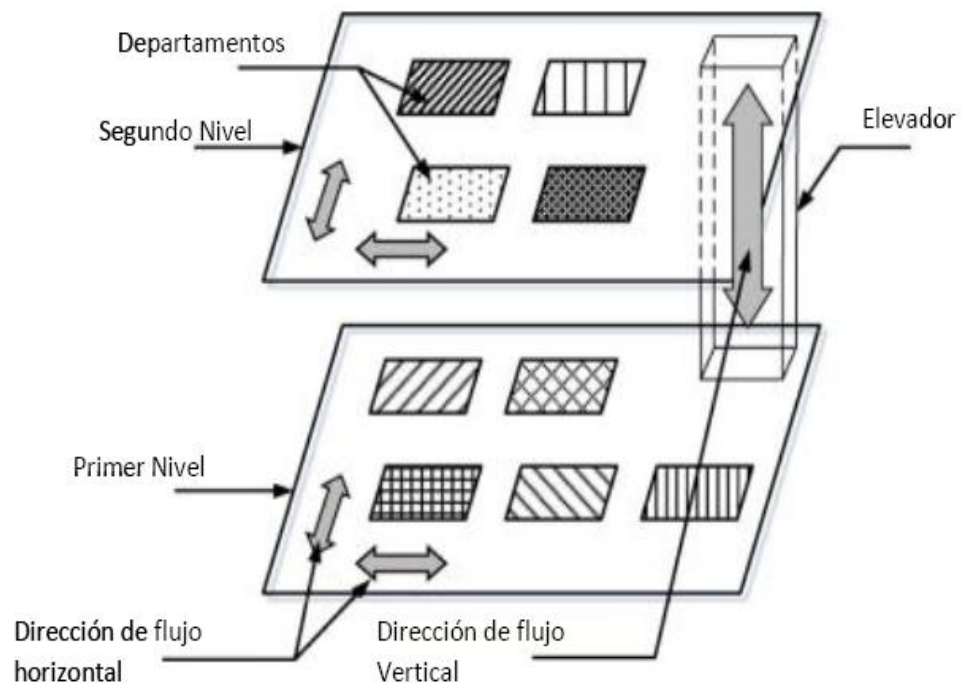
Ilustración 5. Distribución de Campo Abierto



Fuente:Drira, A., Pierreval, H., y Hajri-Gabouj S. (2007). Facility layout problems: A survey

- e) Distribución Vertical: Hoy en día, cuando se trata de construir una fábrica en las áreas urbanas, la oferta de suelo es en general insuficiente y costoso. La limitación de espacio horizontal disponible (un mismo piso), crea la necesidad de utilizar una dimensión vertical (varios pisos o niveles de planta). Para optimizar los flujos entre niveles se utiliza un número determinado de elevadores con una capacidad y ubicación conocidas. Además, el número de pisos puede ser conocido o determinado, dependiendo del área de cada piso y en el número y las dimensiones de las instalaciones (ver ilustración 7).

Ilustración 6. Diagrama de Distribución Vertical

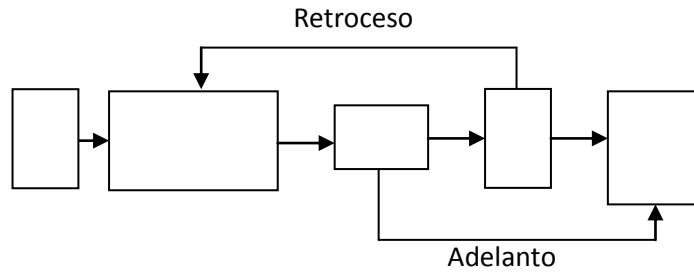


Fuentes: TOMPKINS, J.A., WHITE, J.A., BOZER, Y.A., FRAZELLE, E.H., TANCHOCO, J.M., & TREVINO, J. Facilities planning. En: New York: Wiley. (1996).

Dos particulares movimientos que pueden ocurrir en la distribución de la línea de flujo, que tienen un impacto en el flujo de los productos son el retroceso y el adelanto (ver ilustración 8).

Un retroceso se presenta cuando es necesario que el producto nuevamente pase por una estación de trabajo. Ésta situación se puede dar debido a un defecto o por un reprocesamiento necesario al producto. Este tipo de movimientos se debe minimizar, para evitar flujos contrarios al flujo normal de producción. Por otro lado, el adelanto se presenta cuando el producto se salta determinado proceso, porque así está estipulado en su línea de producción, lo cual agiliza tiempos en manejos de materiales y de producción.

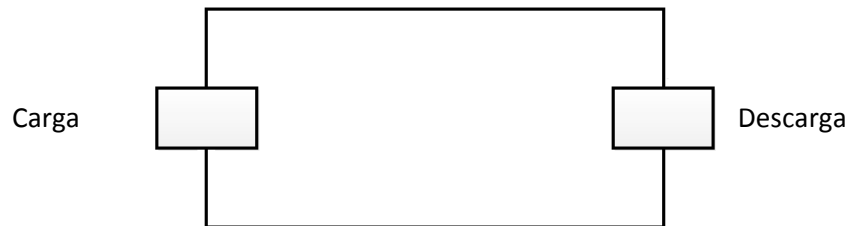
Ilustración 7. Retroceso y Adelanto



Fuente:Drira, A., Pierreval, H., y Hajri-Gabouj S. (2007). Facility layout problems: A survey

Los llamados puntos de carga y descarga son necesarios para determinar la ubicación desde la cual las piezas entran y salen de las instalaciones. A pesar de que potencialmente pueden ser ubicados en diferentes lugares se ha restringido su posible posición para reducir la complejidad (ver ilustración 9).

Ilustración 8. Puntos de Carga y Descarga de una maquina con forma regular



Fuente:Drira, A., Pierreval, H., y Hajri-Gabouj S. (2007). Facility layout problems: A survey

La mayoría de artículos que tratan con los problemas de distribución son considerados implícitamente como algo estáticos, en otras palabras, ellos asumen los datos claves sobre la planta y lo que es destinado a producir se mantendrá constante durante un período de tiempo suficientemente largo. Recientemente, la idea de los problemas de distribución dinámicos se ha introducido por varios investigadores, los cuales toman en cuenta los posibles cambios en la manipulación del flujo de material durante varios períodos. Con respecto a esto, el horizonte de planificación es generalmente dividido en períodos que se pueden

definir en semanas, meses o años. Para cada período, los datos de estimación de flujos siguen siendo constantes. Un plan de diseño para el problema de la distribución dinámica consiste de una serie de diseños asociados con un periodo [9], (ver ilustración 10).

Ilustración 9. Evolución de distribución en cuatro períodos

1	2	3	6	4	1	3	5	6	2	1	5
4	5	6	2	5	3	1	4	2	3	6	4
Período 1			Período 2			Período 3			Período 4		

Fuente: Drira, A., Pierreval, H., y Hajri-Gabouj S. (2007). Facility layout problems: A survey

La ilustración 10 muestra un esquema con seis ubicaciones iguales que son dispuestas en cada uno de los cuatro períodos en el horizonte de planificación. El objetivo puede ser determinar un diseño para cada período en el horizonte de planificación, y reducir al mínimo la suma de los costos del manejo de materiales, para todos los períodos y la suma de los costos de reorganización entre períodos de tiempo. Además, los costos de reorganización tienen que ser considerados cuando las instalaciones necesitan ser trasladadas de un lugar a otro. [9]

4. FORMULACIÓN DE PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA (PDP)

Después de definir las características de los departamentos y la distribución a utilizar, se formula el problema por medio de un modelo matemático para poder solucionarlo, teniendo presente todas las relaciones entre los diferentes elementos. Por lo tanto, dentro de la literatura existen diferentes textos que formulan el problema por medio de asignación cuadrática para departamentos con áreas iguales o utilizan el problema del conjunto de cobertura para áreas desiguales.

La primera parte de la formulación es la definición de la función objetivo, puede ser única al problema planteado o puede haber múltiples de éstas. Las funciones objetivo más comunes en el PDP son las siguientes:

- Minimización del costo del espacio entre departamentos.
- Minimización del tráfico de material.
- Minimización del costo de manejo y manipulación del material.
- Minimización del número de retrocesos y adelantos.
- Minimización de las formas irregulares de las instalaciones.

La función objetivo, en algunas ocasiones, está sujeta a ciertas restricciones para definir mejor el problema; las restricciones más comunes son:

- Ubicación de ciertas instalaciones fijas
- Orientación de los puestos de trabajo
- Puntos de entrada y salida de material establecidos
- Distancia mínimas entre instalaciones
- No exista traslape entre instalaciones

Además de definir lo anterior, es importante aclarar la forma que tendrá el problema. Existen dos formas para plantear el problema: la discreta y la continua; cada una se aborda de manera distinta [22].

4.1 FORMULACIÓN DISCRETA

El problema de optimización se considera de asignación cuadrática, en donde la planta se divide en bloques rectangulares de la misma área y forma, a cada bloque se le asigna una instalación. Si la instalación tiene áreas desiguales, ésta puede ocupar diferentes bloques. Los primeros en abordar éste problema fueron

Koopmans y Beckmann (1957) [22] como un modelo matemático para la localización de actividades económicas indivisibles. El objetivo es asignar un conjunto de departamentos en un conjunto de instalaciones, establecen una matriz $n \times n$ de tal manera que el costo sea proporcional al flujo entre los departamentos F_{ik} (desde el departamento j hasta el departamento k) multiplicado por las distancias D_{jl} entre las instalaciones (desde la instalación i hasta la instalación l). Además, proponen tener en cuenta el costo de ubicación de dichas instalaciones en sus respectivos lugares. Cuando se tiene dicho costo la matriz ya quedaría $n \times n \times n$, dado que entran tres parámetros: flujos, distancias y costos. De lo contrario, sería únicamente $n \times n$ (flujos por distancias) [32]. Luego de establecer los flujos y distancias, la planta se divide en bloques rectangulares de igual forma y área para ser asignados.

Otro modelo muy utilizado resulta a partir de la determinación de la ubicación relativa de las instalaciones dentro de los departamentos, para minimizar el flujo de material (Balakrishnan, Cheng, & Wong, 2003) [24]:

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

Sujeto a:

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

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

Donde N es el número de departamentos del diseño, f_{ik} el flujo del departamento i hasta k , d_{jl} la distancia entre la instalación j hasta l y X_{ij} es una variable binaria $[0,1]$ que determina la posición del departamento i en la instalación j . La función

objetivo (1) representa la sumatoria de los costos de flujo por cada par de instalaciones. La ecuación (2) asegura que cada instalación contiene un solo departamento y la ecuación (3) garantiza que cada departamento está ubicado únicamente en una instalación.

Usualmente el problema de PDP se aborda desde representaciones discretas, porque se enfoca en la cercanía entre los departamentos teniendo en cuenta la relación y dependencia entre ellos; pero éstas no son las únicas condiciones reales para representar las posiciones exactas de las instalaciones en la planta, ya que no pueden modelar restricciones apropiadas específicas como: la orientación de las instalaciones, puntos de entrega y de recogida de material o espacio entre ellas. Por ende, para estos casos particulares la alternativa de solución más adecuada son las formulaciones continuas.

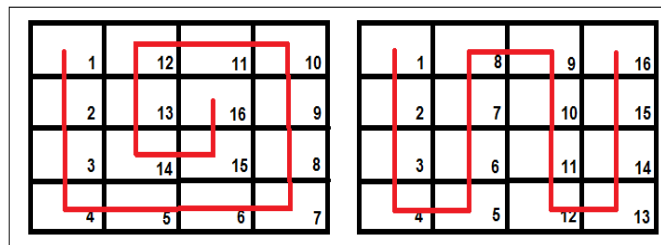
4.2 FORMULACIÓN CONTINUA

La formulación continua es considerada un problema del conjunto de cobertura para resolver el problema de áreas desiguales. Ésta formulación permite la asignación de los departamentos en cualquier lugar de la planta sin traslaparse. El objetivo es ubicar las instalaciones según las coordenadas del centroide (X_i, Y_j) y dimensiones (ancho y largo).

Para solucionar el problema de áreas desiguales, lo primero que se debe hacer es construir una cuadrícula en la planta a distribuir, cada uno de los recuadros representara una unidad de área. A partir de ahí, el problema se puede resolver de dos formas diferentes, dependiendo del tipo de distribución que se vaya a realizar; una distribución es basada en bloques de una cuadrícula, y otra es de bloques continuos. En la primera distribución basada en bloques, se asigna a cada departamento el número de unidades de área que necesite, el objetivo va a ser distribuir éstas unidades de área en el espacio total disponible. Para garantizar que las unidades de área correspondientes a cada departamento queden juntas

en la distribución, se le agrega un término de penalización a la función objetivo. En la segunda, se van a manejar los mismos departamentos con sus unidades de área correspondientes, pero para garantizar que dichas unidades de área queden juntas en la distribución, se va a manejar una curva de llenado, ésta fue desarrollada para el problema del agente viajero. Esta curva, formada por medio de conexiones de las series de curvas, consiste en una línea continua que atraviesa cada una de las unidades de área y va definiendo la secuencia en la que van a ser ubicados los departamentos, garantizando que aquellos que estén constituidos por más de una unidad de área, no vayan a ser divididos. En el caso en el que se presenten restricciones como departamentos en instalaciones fijas, áreas bloqueadas u otras, las curvas de llenado se pueden definir arbitrariamente a mano alzada, asegurando el cumplimiento de dichas restricciones o también pueden ser dibujadas siguiendo un patrón determinado, y así crear diferentes soluciones en donde las unidades de área que representan el mismo departamento, se ubican siguiendo la curva de llenado (ver ilustración 2), garantizando así una solución factible [25].

Ilustración 10. Ejemplo de líneas de llenado



Fuente: Drira, A., Pierreval, H., y Hajri-Gabouj S. (2007). Facility layout problems: A survey

Algunas de las restricciones que proponen los autores son:

- La distancia entre dos instalaciones está dada por una norma rectilínea entre los centroides de los departamentos (Chwif et ál, 1998) [14]:

$$d_{ij}((x_i, y_i), (x_j, y_j)) = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$$

- La distancia entre dos instalaciones está dada por la distancia rectilínea entre los puntos de entrada y de salida de material de las mismas (Kim & Kim, 2000) [15]:

$$d_{ij} = |x_i^o - x_j^l| + |y_i^o - y_j^l|$$

Donde:

(x_i^o, y_i^o) Definen las coordenadas del punto de salida del material de la instalación i ,

(x_j^l, y_j^l) Definen las coordenadas del punto de entrada del material de la instalación j .

- Otra restricción muy importante en el modelo es la de garantizar que no haya traslape entre las instalaciones a distribuir. Los investigadores Welgama y Gibson (1993) [10] propusieron 2 condiciones que aseguren la no presencia de superposición, teniendo en cuenta las dimensiones (ancho y largo) de las instalaciones:

$$(x_{jt} - x_{ib})(x_{jb} - x_{it}) \geq 0$$

$$(y_{jt} - y_{ib})(y_{jb} - y_{it}) \geq 0$$

Donde (x_{it}, y_{it}) y (x_{ib}, y_{ib}) son las coordenadas de las esquinas superior e inferior derecha de la instalación i , y (x_{jb}, y_{jb}) son las coordenadas de las esquinas superior izquierda e inferior derecha de la instalación j . Además, se

asegura la ausencia de traslape por medio del área del mismo, siendo que ésta sea menor ó igual a cero.

- Mir e Imam (2001) consideran que el área de traslape entre dos instalaciones, también debe ser tomada en cuenta como restricción dentro del modelo, de esta manera, el modelo puede ser expresado de la siguiente forma [20]:

Función objetivo sujeta a:

$$A_{ij} \leq 0$$

En donde:

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

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

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

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

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

(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 .

5. MÉTODOS DE SOLUCIÓN AL PDP

Existen diferentes métodos de solución para el problema de distribución de planta, los cuales han venido surgiendo como respuesta a las diferentes investigaciones que se han desarrollado [6]. Para encontrar la solución al PDP en casos pequeños, se ha resuelto de manera óptima el problema con (seis instalaciones y cinco períodos de tiempo) $n \leq 10$ departamentos [9]. Sin embargo, a medida que

aumenta el número de departamentos, llegar a la solución óptima del PDP es una tarea más complicada y se considera como un problema de difícil solución o NP-HARD¹⁷. Es posible llegar a una buena solución mediante métodos heurísticos, pero a medida que aumenta la complejidad, se compromete la calidad de ésta y la posibilidad de obtenerla en un tiempo de operación razonable. La hibridación de diferentes metaheurísticas ha sido considerada como la tendencia más usada, con el objetivo de obtener los mejores resultados.

5.1 PLANEACIÓN SISTEMÁTICA DE LA DISTRIBUCIÓN DE PLANTAS

El método de Planeación sistemática de distribución de planta conocida como SLP por sus siglas en inglés, fue desarrollado por Richard Muther en 1961 [30]. A partir de criterios cualitativos ha sido la más aceptada y utilizada para la solución de problemas de distribución de planta cuando los departamentos a distribuir son pocos y también como solución inicial para los métodos exactos y heurísticos.

El método reúne las ventajas de las aproximaciones metodológicas precedentes, e incorpora el flujo de materiales en el estudio de distribución, organizando el proceso de planificación total de manera racional y estableciendo una serie de fases y técnicas que, como el propio Muther describe, permiten identificar, valorar y visualizar todos los elementos involucrados en la implantación y las relaciones existentes entre ellos.

5.1.1 Matriz Origen – Destino

Se reúne información del flujo de material entre los departamentos en un diagrama. A continuación se explica los pasos a seguir para realizar el diagrama.

Paso 1. Análisis del producto, cantidad y tiempo: Se debe conocer qué se produce, en qué cantidades y el tiempo en el que se ejecutará.

¹⁷ NP-hard o teoría de la complejidad computacional, la clase de complejidad NP-hard (o NP-complejo, o NP-difícil).

Paso 2. Análisis de recorrido: Se determina la secuencia y los movimientos de los productos por las diferentes operaciones a través del proceso.

Ejemplo: Para el siguiente ejemplo, se considera una planta con una distribución por procesos definidos como A, B, C, D y E, en donde se elaboran 3 productos (1, 2, 3). En la tabla 2 se podrán observar los pasos 1 y 2.

Tabla 2. Relación de volúmenes

Producto	Secuencia de las operaciones (Departamentos)	Producción semanal
1	A-C-D-E-B	100
2	B-A-C-E-D	200
3	E-C-A-D-C	50

Fuente: Elaboración propia

Paso 3. Análisis de flujos: Con base en los datos de la tabla 2, se elabora la matriz Origen – Destino; en la cual los departamentos ubicados en la primera columna representarán el departamento donde se origina el flujo y los ubicados en la primera fila representarán el destino de dicho flujo (éste flujo, será representado por el número de unidades a desplazar)

En la tabla 3, se muestra que del departamento “A” al departamento “C” se movilizan 300 unidades correspondientes así: 100 unidades del producto 1 y 200 unidades del producto 2.

Paso 4. Suma de los flujos: Se suman las unidades totales a transportar entre cada par de departamentos, completando así, solamente la parte superior de la diagonal principal de la matriz.

Ejemplo: Las unidades a transportar de “A” a “C” más las unidades a transportar de “C” a “A” suman 350, como se ve en la tabla 4.

Tabla 3. Diagrama Origen – Destino

	A	B	C	D	E
A	-		300	50	
B	200	-			
C	50		-	100	200
D			50	-	100
E		100	50	200	-

Fuente: Elaboración propia

Tabla 4. Diagrama Origen – Destino (suma total)

	A	B	C	D	E
A	-	200	350	50	
B		-			100
C			-	150	250
D				-	300
E					-

Fuente: Elaboración propia

Paso 5. Análisis de cercanía: Se identifica el valor máximo y el valor mínimo de la matriz. Se halla el rango (máximo – mínimo) y se divide en la cantidad de niveles con la que se vaya a trabajar, para crear así los intervalos de los niveles de cercanía a tener en cuenta para identificar la relación entre departamentos. Muther [28] propone los niveles de relación así:

- A Absolutamente necesaria
- E Especialmente importante
- I Importante
- O Ordinario
- U No importante
- X Indeseable

Para el Ejemplo sólo se tendrán en cuenta los primeros 5 niveles, obteniendo los siguientes intervalos entre los niveles:

$$\text{Rango} = (350-50)/5 = 60$$

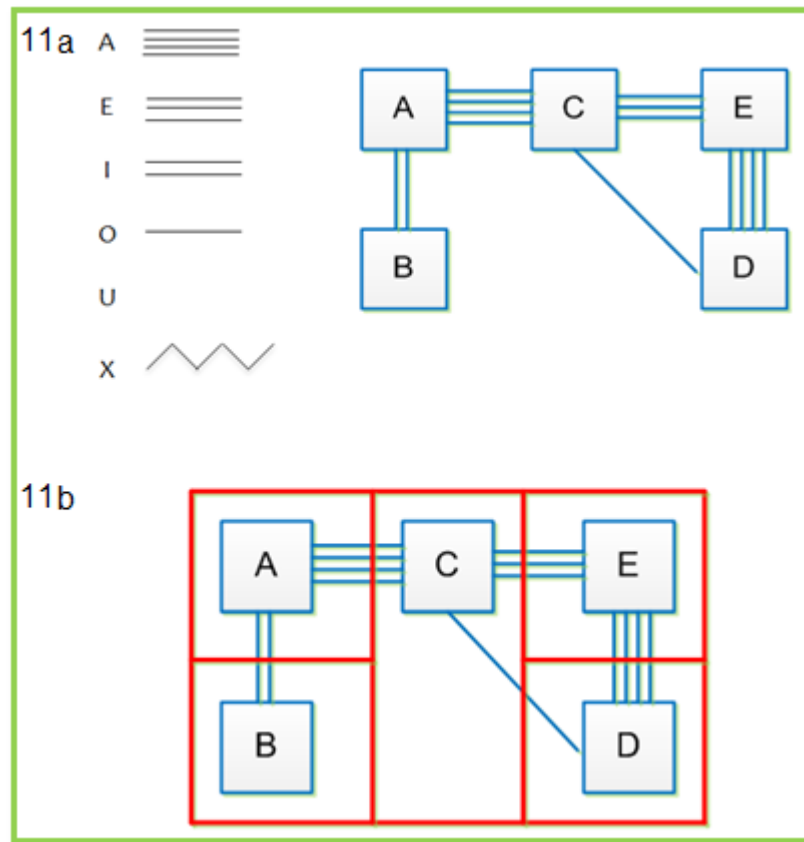
Por lo tanto, **A** iniciará con 350 (valor máximo en la tabla) se le resta el rango (60), lo cual da lugar a un nivel entre 350-290. El siguiente nivel comenzará desde el valor mínimo del nivel anterior a éste y se repite el proceso con el resto de niveles, según los definidos. Para éste ejemplo, los niveles quedan de la siguiente manera:

$$\mathbf{A} = 350-290; \mathbf{E} = 290-230; \mathbf{I} = 230-170; \mathbf{O} = 170-110; \mathbf{U} = 110-50$$

Paso 6. Elaborar el diagrama de relación de actividades: El diagrama consiste en distribuir los departamentos en el espacio disponible, dando prioridad a las relaciones más fuertes. En el ejemplo se puede observar, que las relaciones se encuentran representadas gráficamente con líneas en cantidades proporcionales a la relación que conservan los departamentos (ver ilustración 11a).

En la ilustración 11b se puede observar una posible distribución para el ejemplo dado, cabe resaltar que el método utilizado es cualitativo y por tal motivo puede quedar de diferentes formas de acuerdo con las preferencias de la persona que lo realiza.

Ilustración 11. Diagrama de relación de actividades parte 1



Fuente: Elaboración propia

Paso 7. Evaluación de la distribución: La evaluación de la distribución se realiza comparando la distribución elaborada con la ideal. La calificación va a estar dada de acuerdo con el puntaje que se le otorgue a cada nivel.

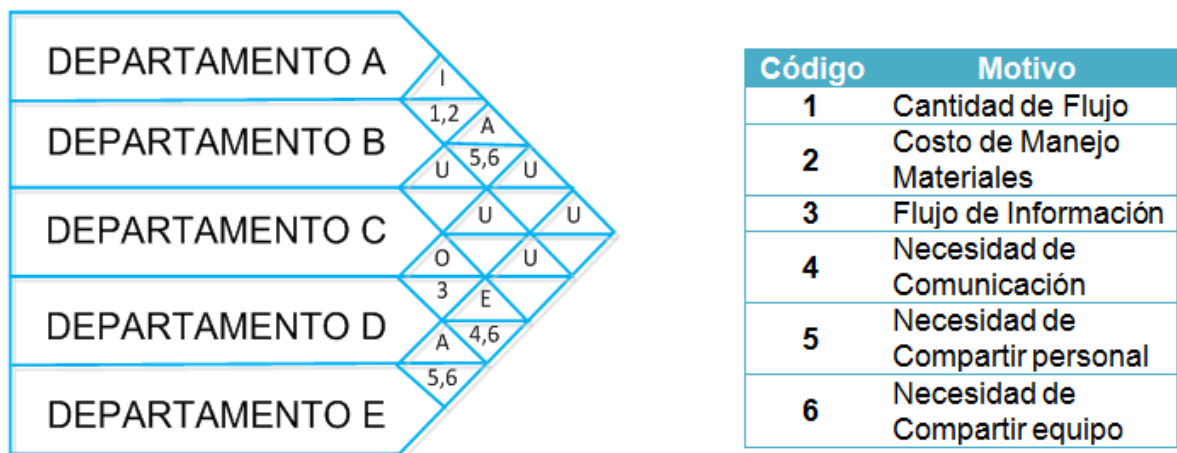
5.1.2 Tabla de Relación de Actividades

El diagrama consiste en clasificar la necesidad de cercanía entre cada par de departamentos, de acuerdo con los niveles establecidos. La clasificación se realiza de forma cualitativa y a criterio de la persona que conozca el funcionamiento de los procesos desarrollados por la empresa. Para esta metodología, se consideran los niveles de cercanía establecidos en la matriz Origen – Destino para analizar la relación y su intensidad. Los niveles de cercanía son identificados dependiendo

del problema específico que se esté resolviendo, el tipo de empresa y demás factores que se consideren influyentes [34].

En la ilustración 12 se muestra el diagrama de relación, en donde se describe la relación entre dos departamentos. El rombo enmarcado, corresponde a la relación que existe entre los departamentos, por ejemplo A y E. Cada rombo está dividido en dos; en la parte superior se ubica el nivel de relación de cercanía (A, E, I, O, U y X) que existe entre los dos departamentos, y en la parte inferior, el motivo por el cual se da la cercanía, (para el ejemplo se representa numéricamente).

Ilustración 12. Diagrama de relación de actividades parte 2



Fuente: Elaboración propia

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 5.1.1.

5.2 MÉTODOS DE SOLUCIÓN EXACTA

Actualmente existen pocos métodos que llegan a dar una solución exacta al problema de distribución de planta debido a su complejidad; a continuación, se va a explicar el método de solución exacto más conocido, aprobado y usado por los investigadores.

5.2.1 Branch and Bound

El algoritmo branch and bound es una técnica que realiza un recorrido sistemático en un árbol de soluciones; este recorrido no necesita realizarse en profundidad, en lugar de ello puede usar una estrategia de ramificación, guiada por estimaciones de la función objetivo, que se realiza para cada posible solución (nodo). Se usan técnicas de poda para eliminar posibles soluciones que no lleven a la solución óptima, el acotamiento se realiza estimando en cada nodo las cotas de beneficio que se pueden obtener a partir del mismo. Un concepto fundamental para entender el algoritmo es el nodo vivo. Nodo vivo es un nodo con posibilidades de ser ramificado, es decir, un nodo que no ha sido podado. Para determinar en cada momento qué nodo va a ser expandido y dependiendo de la estrategia de búsqueda seleccionada, se hace necesario almacenar todos los nodos vivos en alguna estructura que se pueda recorrer.

Este método, se realiza en tres etapas: La primera, denominada selección, es la encargada de escoger un nodo del conjunto de nodos vivos. La forma que se escogen los nodos depende directamente de la estrategia de búsqueda. En la segunda etapa, denominada ramificación, se construye los posibles nodos hijos del nodo seleccionado en el paso anterior. Por último, la tercera etapa, denominada acotamiento, en la que se eliminan algunos de los 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 por el proceso de selección [13]

5.3 MÉTODOS METAHEURÍSTICOS

Debido a la complejidad de algunos problemas en la distribución de plantas o en otra clase de situaciones, no es posible solucionarlos por métodos exactos. En tales situaciones, aún es importante encontrar una buena solución factible, que al menos esté razonablemente cerca de ser óptima en un tiempo razonable. Por lo general, para buscar esa solución se utilizan métodos heurísticos.

Un método heurístico es un procedimiento que trata de descubrir una solución factible muy buena, pero no necesariamente una solución óptima, para el problema específico bajo consideración. Es un método que proporciona tanto una estructura general, como criterios estratégicos que se ajustan a un tipo particular de problema. Debido a la complejidad de algunos problemas en la distribución de plantas o en otra clase de situaciones, no es posible solucionarlos por métodos exactos. En tales situaciones, aún es importante encontrar una buena solución factible, que al menos esté razonablemente cerca de ser óptima en un tiempo razonable. Por lo general, para buscar la solución se utilizan métodos heurísticos.

Un método heurístico es un procedimiento que trata de descubrir una solución factible muy buena, pero no necesariamente una solución óptima, para el problema específico bajo consideración. Es un método que proporciona tanto una estructura general, como criterios estratégicos que se ajustan a un tipo particular de problema.

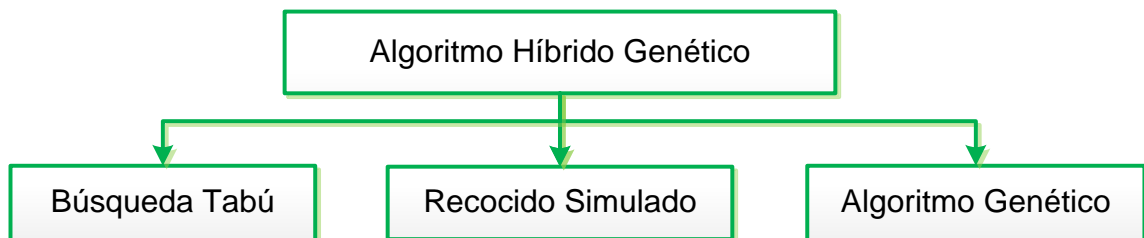
Por muchos años, esto significó que para desarrollar un método heurístico se necesitaría comenzar desde cero, para así ajustarse al problema bajo consideración, siempre que no existiera un algoritmo disponible para encontrar una solución óptima. Este panorama ha cambiado en años relativamente recientes con el desarrollo de metaheurísticas.

Una metaheurística es un método de solución general que proporciona tanto una estructura general como criterios estratégicos, para desarrollar un método

heurístico específico que se ajuste a un tipo particular de problema. Las metaheurísticas se han convertido en una de las técnicas más importantes [26].

- El uso de estos métodos metaheurísticos, surge a partir de la necesidad de solucionar el problema de planta, no solo para instalaciones pequeñas, sino también en los casos donde el número de instalaciones a distribuir es muy grande. A pesar que los métodos utilizados en las metaheurísticas no generen soluciones óptimas, si logran definir una distribución factible y cercana a ésta. Para el uso de los algoritmos de forma se tuvieron en cuenta los resultados arrojados por el algoritmo híbrido genético desarrollado por Palacios M., Melissa y Jaimes T., Christian (2011) el cual a su vez se compone de tres metaheurísticas: Búsqueda Tabú, Recocido Simulado y el Algoritmo Genético, razón por lo cual se explicarán a continuación:

Ilustración 13. Algoritmo Híbrido Genético



Fuente: Elaboración propia

5.3.1 Búsqueda Tabú

La Búsqueda tabú es un procedimiento heurístico que fue introducido por primera vez por Glover en 1986 [32]. Skorin – Kapov (1986) [11] fue el primero en usar esta metodología para el problema PAC¹⁸. La metaheurística se caracteriza por el uso de una memoria adaptativa y múltiples estrategias de solución.

¹⁸ PAC o Problema de Asignación Cuadrática

Básicamente, la Búsqueda Tabú es un método que se mueve desde la solución de prueba actual, ver ilustración 14, siendo la solución la mejor secuencia de los departamentos dentro de una planta bajo un valor de calidad, a la mejor solución de prueba vecina en cada iteración, muy parecido a un procedimiento de mejora local, con la excepción que permite un movimiento sin mejora cuando no existen movimientos que mejoren la solución de prueba actual. También incorpora una memoria a corto plazo de la búsqueda pasada, para incentivar el movimiento hacia nuevas áreas de la región factible en lugar de regresar a soluciones consideradas con anterioridad. Además, puede utilizar estrategias de intensificación y diversificación basadas en la memoria a largo plazo para enfocar la búsqueda en vecindades promisorias [26].

Ilustración 14. Ejemplo: Solución Inicial BT

No. Instalaciones	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Orden Secuencial	3	10	11	2	12	5	6	7	8	1	4	9

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

Fuente: Elaboración propia

La memoria a largo plazo permite establecer guías de búsqueda debido a la base de datos obtenida. Acumula información que de acuerdo con probabilidad estadística o mediante la asignación de atributos especiales se puede recorrer la región factible con mayor eficacia. Lo ideal es evitar tanto los mínimos locales como repetir búsquedas en vecindades previamente recorridas y ya abortadas. Según Glover (1990), tener presente el uso adecuado del espacio y cantidad de memoria entre las iteraciones permite un refinamiento de la solución al problema

[12]. El algoritmo búsqueda tabú, está compuesto principalmente por 4 operadores:

- **Búsqueda por entorno.** Este procedimiento incluye métodos constructivos y de mejora dentro de todos los procesos que desarrolla la memoria adaptiva. Los pasos de la búsqueda son:

Paso 1 (Inicialización)

- (A) Seleccionar una solución inicial $s_{Actual} \in S$
- (B) Almacenar la mejor solución actual conocida haciendo $s_{Mejor} = s_{Actual}$ y definiendo $Z = Z(s_{Mejor})$

Paso 2 (Elección y finalización)

Elegir una solución $s^* \in N(s_{Actual})$. Si los criterios de elección empleados no pueden ser satisfechos por ningún miembro de $N(s_{Actual})$, o si se aplican otros criterios de parada, entonces el método para.

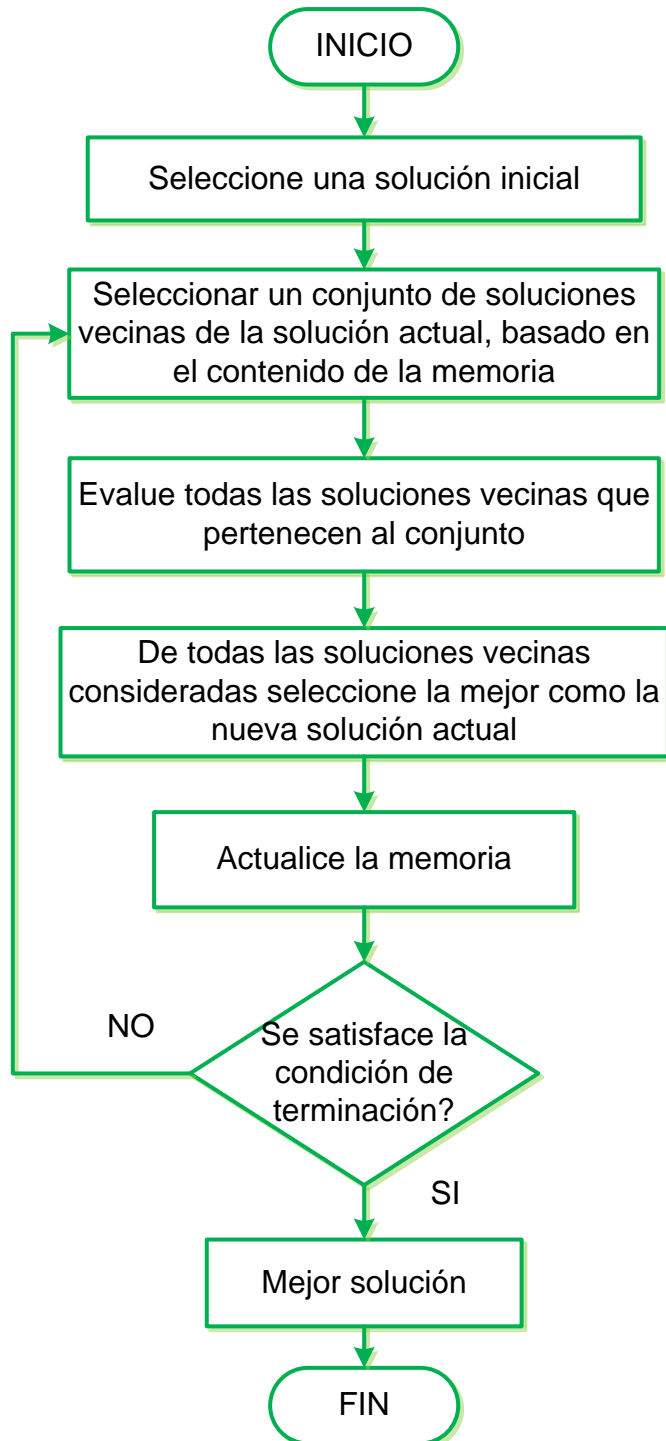
Paso 3 (Actualización)

Rehacer $s_{Actual} = s^*$, y si $Z(s_{Actual}) < Z$, ejecutar el paso 1(B). Volver al paso 2.
(Ver ilustración 15)

- **Lista tabú.** Es la memoria que utiliza el procedimiento de búsqueda para no regresarse a configuraciones visitadas anteriormente y caer en movimientos cíclicos. A medida que se van realizando los movimientos, éstos son señalados como *tabú* ingresando a dicha lista. Esta lista, tiene un tamaño definido que va a estar dado por un número límite de iteraciones en las que se van a prohibir los movimientos que vayan ingresando y estén en ella. Esta regla tiene una excepción en la presencia del criterio de aspiración [12].

- **Criterio de aspiración.** el criterio de aspiración tiene como objetivo no rechazar una mejor solución, cuando el movimiento que la genera se encuentra clasificado como tabú. Éste criterio elimina dicha clasificación en el momento en el que al comparar el valor de la función objetivo encontrado para el movimiento prohibido, éste mejora el valor de la mejor solución encontrada hasta el momento. Una vez aplicado el criterio de aspiración, la configuración dada por el movimiento nuevamente permitido, pasa a ser la mejor solución actual de la búsqueda.

Ilustración 15. Diagrama de Flujo-Búsqueda Tabú



Fuente: Palacios, M.M. y Jaimes T. C., tesis de grado de la UIS, Bucaramanga (2011)

- **Criterios de parada.** Se manejan diferentes métodos dependiendo del tipo de problema o de las necesidades del investigador. Entre los criterios de parada más comunes se encuentran:
 - a. Definir un límite o un número total de iteraciones a realizar.
 - b. Detenerse cuando se alcance un costo menor o igual al deseado.
 - c. Detener el algoritmo luego de realizar un determinado número de iteraciones, sin encontrar una solución igual o mejor a la actual.
 - d. Varias condiciones de las anteriormente mencionadas al mismo tiempo.

5.3.2 Recocido Simulado

La técnica heurística del recocido simulado, está basada en un algoritmo propuesto por Metropolis et al. (1953) en el marco de la termodinámica estadística, para simular el proceso de enfriamiento de un material (recocido).

Esta heurística comprende una secuencia de iteraciones que modifica de forma aleatoria una solución actual. El método comienza con una solución inicial, realiza una búsqueda local y genera una solución vecina de manera aleatoria; después utiliza la analogía con un proceso de templado físico, para determinar si este vecino debe rechazarse como la próxima solución de prueba [26]. La función de probabilidad de este método está dada por la ecuación: $P(\Delta E) = e^{-\frac{\Delta E}{t}}$ Donde ΔE es igual a la diferencia entre el valor objetivo de la solución actual (solución inicial) y el valor objetivo de la solución vecina, y t es un parámetro del algoritmo llamado temperatura.

Aceptar una solución de menor calidad, permite salir de un posible mínimo local y explorar otras áreas del espacio de soluciones. El algoritmo comienza siempre con una temperatura alta, por lo tanto en las primeras iteraciones $P(\Delta E)$, es cercana a 1, lo que significa que una nueva solución de peor calidad tiene una alta probabilidad de ser aceptada, con el fin de diversificar la búsqueda. La probabilidad de aceptar una solución peor va disminuyendo a medida que avanzan

las iteraciones del algoritmo y la temperatura decrece, con el objetivo de encontrar soluciones en áreas promisorias. Éste proceso se repite n veces. Cuando este ciclo iterativo se completa, la temperatura se disminuye y comienza nuevamente el proceso de creación, evaluación y posible aceptación de soluciones vecinas. Cuando la temperatura es lo suficientemente baja o después de haber alcanzado un número máximo de iteraciones, el algoritmo finaliza y debe indicar cuál fue la mejor solución encontrada. El diagrama de flujo correspondiente al algoritmo se presenta en la ilustración 16.

Los operadores que usa RS son los siguientes:

- **Programa de Temperaturas.** éste programa está definido básicamente por la velocidad de enfriamiento que establezca el investigador.

$$T_{i+1} = \alpha T_i$$

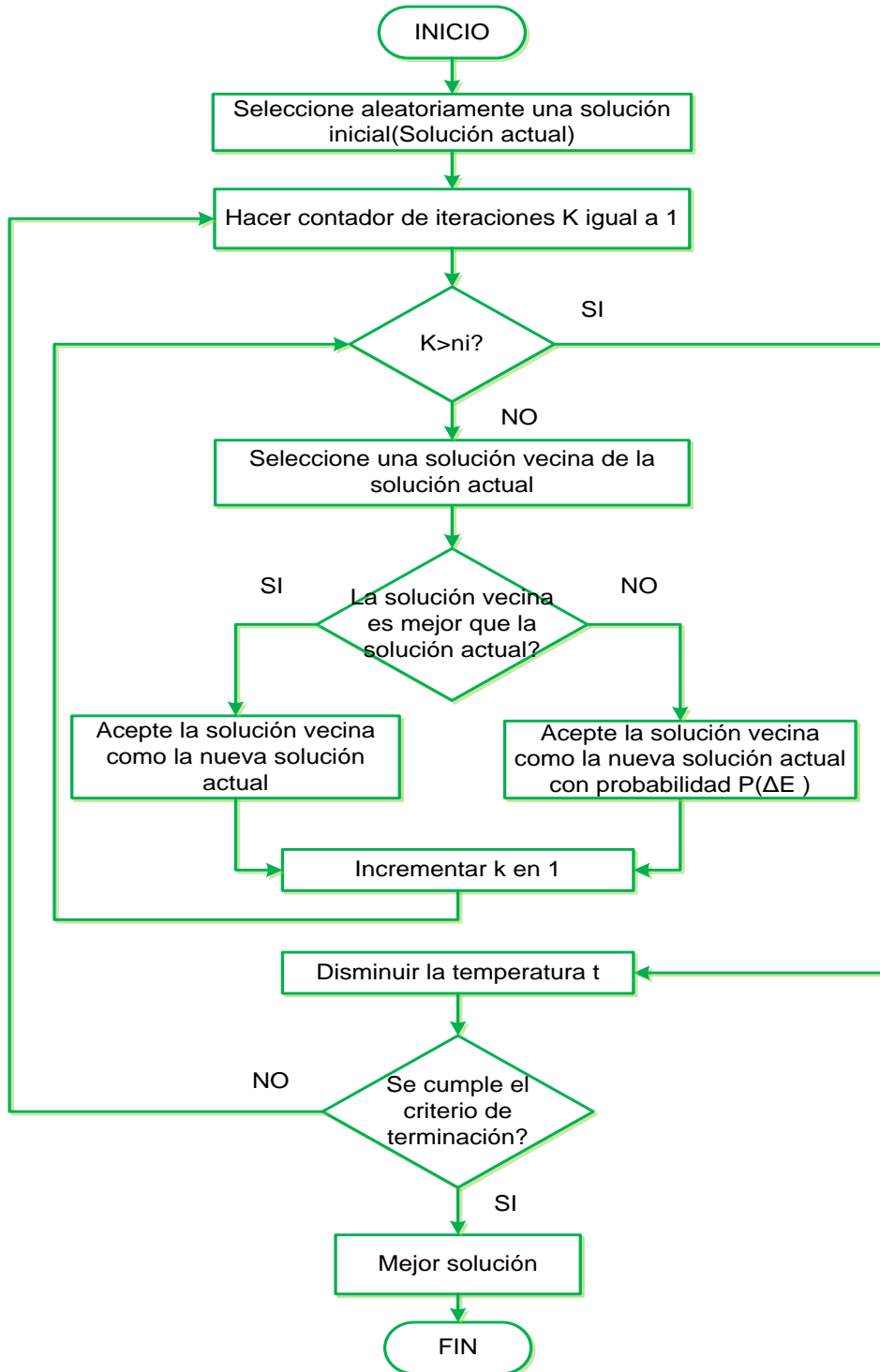
Donde T= Temperatura y α = velocidad de enfriamiento

- a) Valores elevados de α entre 0,8 y 0,99 (velocidades lentas de enfriamiento) son los que mejores resultados proporcionan.
 - b) El número de iteraciones por temperatura aumenta a medida que aumente el tamaño del problema.
 - c) El número de iteraciones aumenta a medida que se reduce la temperatura.
- **Criterios de parada.** Generalmente se detiene la búsqueda cuando se haya producido un número determinado de iteraciones en la última temperatura.

5.3.3 Algoritmo Genético:

Los algoritmos genéticos, fueron propuestos en 1975 por John Holland, de la Universidad de Michigan. Son algoritmos de optimización, es decir, tratan de encontrar la mejor solución a un problema dado entre un conjunto de soluciones posibles.

Ilustración16. Diagrama de Flujo-Recocido Simulado



Fuente: Palacios, M.M. y Jaimes T. C., tesis de grado de la UIS, Bucaramanga (2011)

Trabaja con una población completa de soluciones de prueba en cada iteración. Después utiliza la analogía con la teoría biológica de la evolución, sobre todo el concepto de la supervivencia del más apto, para descartar algunas de las soluciones de prueba (en especial las más pobres) y remplazarlas con otras nuevas. En este proceso de remplazo tiene pares de miembros sobrevivientes que transfieren algunas de sus características a pares de nuevos miembros como si fueran padres que reproducen hijos [31]. Esas características que pasan de generación en generación son las conocidas como soluciones viables que se organizan cada una en una tira de cromosoma o genotipo. Cada cromosoma tiene una medida de conveniencia dada por la función objetivo. En dicha función se define la habilidad que tendrá para sobrevivir y reproducirse. Los cromosomas también se pueden renovar para llevar la búsqueda a las áreas más promisorias del espacio.

Para resolver algoritmos genéticos hay que partir del hecho que se tiene que manejar un número finito de cromosomas para realizar la evolución de la población por medio de reglas probabilísticas que se guían por los siguientes operadores:

Reproducción parcial. Seleccionar al más apto para reproducirse.

- **Cruce.** Combinar cromosomas “padres” para producir cromosomas hijos. Combina los cromosomas más aptos y pasa los genes superiores a la siguiente generación.
- **Mutación.** Alteración de algunos genes en el cromosoma. Con ellos se asegura que se explore todo el espacio de soluciones y se pueda salir de un mínimo local.
- **Sacrificio.** Debe haber un esquema de sacrificio en el cual se define quienes permanecen y perduran de generación en generación o por el contrario quienes son eliminados de las poblaciones.

Además, hay que tener presente el tamaño de la población a analizar, ya que no puede ser ni tan pequeña como para que se llegue prematuramente a un mínimo local, ni tan grande que comprometa más tiempo de solución computacional. La población permanece constante de generación a generación. De igual manera, debe quedar muy bien definida la función objetivo, el método de cruce y la tasa de mutación para obtener una buena solución [36]. Ver ilustración 17.

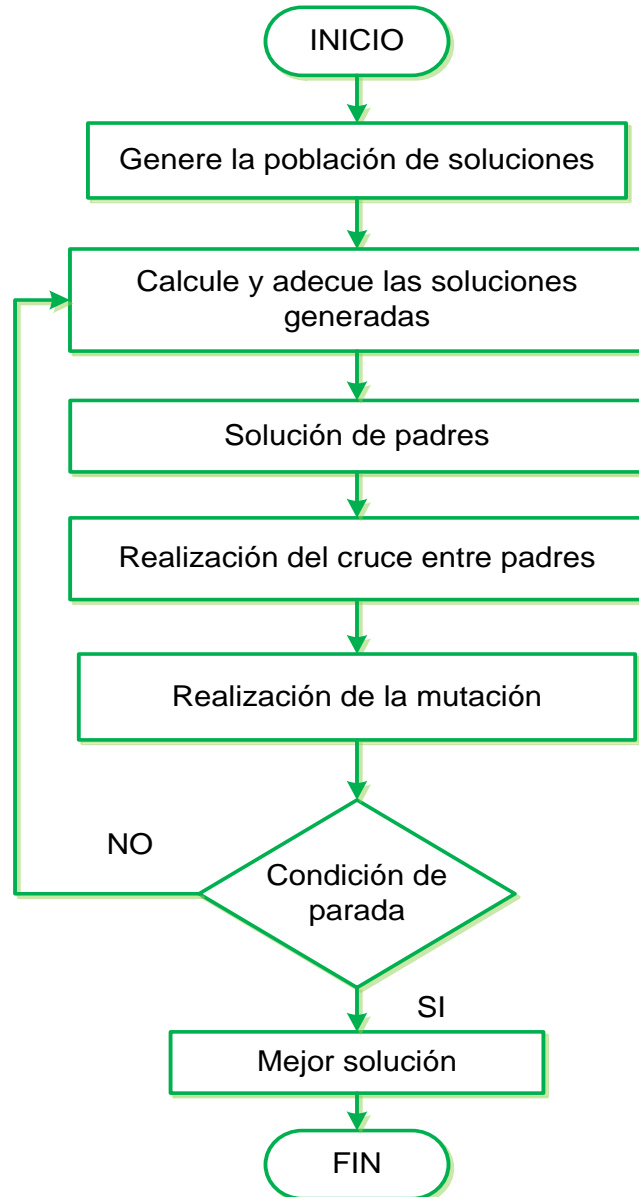
5.3.4 Algoritmo Híbrido Genético

Es un algoritmo híbrido que consiste en combinar 2 o más técnicas para encontrar la solución a un PDP específico. Hay que tener en cuenta, que la hibridación de diferentes métodos heurísticos es algo relativamente nuevo. Más o menos desde hace 20 años se están realizando dichos planteamientos en los diferentes escenarios de la distribución de plantas. Se encuentran para formulaciones dinámicas y combinaciones operacionales, desde métodos sencillos hasta la utilización de software específico o los conocidos métodos computacionales (correspondientes a la situación específica de la planta, definen todo lo relacionado al modelo productivo) [9].

En este algoritmo híbrido genético, no se considera el operador de mutación común ya que cada vez que se usan las heurísticas al inicio del algoritmo se está realizando una mutación con una probabilidad del 100% tanto de ocurrencia como de mejora. Éste algoritmo va más allá de la analogía natural, en dónde los padres sólo pasan material genético a sus hijos. El nuevo algoritmo permite que los padres mejoren su material y de esta forma usar sus cromosomas mejorados en la reproducción, generando mejores descendencias [24].

Cuando se usa este algoritmo híbrido genético, se debe tener en cuenta que las condiciones y parámetros del algoritmo deben cambiar de acuerdo con los parámetros de cada heurística a utilizar.

Ilustración 17. Diagrama de Flujo-Algoritmo Genético



Fuente: Palacios, M.M. y Jaimes T. C., tesis de grado de la UIS, Bucaramanga (2011)

En este proyecto, el algoritmo híbrido genético utilizado busca soluciones locales por medio de la búsqueda Tabú (BT) y el recocido simulado (RS) y a partir de estos resultados aplicar el Algoritmo Genético (AG) para obtener la solución final.

Una vez obtenidas las soluciones locales se inicia a desarrollar la búsqueda final en el algoritmo genético, por medio de los siguientes pasos:

Paso 1 Padres. De manera aleatoria se aparean las soluciones iniciales y se forman parejas que estarán conformadas por un padre y una madre.

Paso 2 Cruce. Hacer el cruce de los padres (las instalaciones), el cual consiste:

- Si un objeto es asignado en la misma ubicación tanto para el padre como para la madre, este objeto va a ser ubicado de igual forma en el hijo.
- La ubicación de los objetos no asignados va a ser llevada a cabo de izquierda a derecha. Se procede a seleccionar un objeto no asignado, de forma aleatoria se define si se usa la ubicación de éste dada en la madre o el padre y se procede a ubicar. Una vez un objeto ha sido asignado, no se tendrá en cuenta para una futura selección.
- Los objetos restantes son asignados en los lugares sobrantes.

Ejemplo:

Ilustración 18. Ejemplo AHG Parte 1

Padre	5	3	4	7	1	8	2	6
Madre	6	4	1	7	2	3	5	8

Fuente: Palacios, M.M. y Jaimes T. C., tesis de grado de la UIS, Bucaramanga (2011)

Para generar el primer hijo se empieza ubicando las instalaciones iguales en la misma ubicación (Ver ilustración 19).

Ilustración 19. Ejemplo AHG Parte 2a

Hijo 1				7				
---------------	--	--	--	---	--	--	--	--

Fuente: Palacios, M.M. y Jaimes T. C., tesis de grado de la UIS, Bucaramanga (2011)

Después, las instalaciones restantes se empiezan a ubicar de la primera a la última empezando por el padre y continuando con la madre, y así sucesivamente (padre, madre, padre, madre) hasta llenar toda la configuración.

En este caso, la tercera casilla queda vacía debido a que la instalación numero 4 ya está incluida en la distribución, entonces se deja el espacio y se sigue buscando en el padre otra instalación hasta encontrar una que sirva (Ver Ilustración 20).

Ilustración 20. Ejemplo AHG Parte 2b

Padre	5	3	4	7	1	8	2	6
Madre	6	4	1	7	2	3	5	8
Hijo 1	5	4		7	1	3	2	8

Fuente: Palacios, M.M. y Jaimes T. C., tesis de grado de la UIS, Bucaramanga (2011)

Por último, en el espacio que quedó se ubica de forma aleatoria las instalaciones que sobraron; en este caso sólo fue la instalación 6, entonces el Hijo 1 es el siguiente (Ver Ilustración 21).

Ilustración 21. Ejemplo AHG Parte 3

Hijo 1	5	4	6	7	1	3	2	8
---------------	---	---	---	---	---	---	---	---

Fuente: Palacios, M.M. y Jaimes T. C., tesis de grado de la UIS, Bucaramanga (2011)

Para generar el segundo hijo, la configuración de llenado cambia y se empieza ubicando las instalaciones iguales, pero las demás instalaciones empiezan

llenándose con la madre, siguiendo con el padre, madre, padre y así hasta llenar toda la configuración (Ver Ilustración 22)

Ilustración 22. Ejemplo AHG parte 4

Hijo 2				7				
---------------	--	--	--	---	--	--	--	--

Hijo 2	6	3	1	7		8	5	
---------------	---	---	---	---	--	---	---	--

Hijo 2	6	3	1	7	2	8	5	4
---------------	---	---	---	---	---	---	---	---

Fuente: Palacios, M.M. y Jaimes T. C., tesis de grado de la UIS, Bucaramanga (2011)

Paso 3 Evaluar. Se evalúan los hijos en la función Z y del total de soluciones (los padres y los hijos procreados) se escogen las mejores soluciones para regresar a la población inicial. Éstos pasos se repiten según la cantidad de iteraciones que se deseen implementar.

5.4 REGULARIZACIÓN DE LOS DEPARTAMENTOS

Para la regularización de los departamentos se proponen cuatro Algoritmos de forma propuestos por Lee, G-C. And Kim, Y-D. (2000), los cuales convierten un diseño dado de departamentos con forma irregular en un nuevo diseño con departamentos de forma regular, conservando sus posiciones relativas y sin deteriorar la calidad de la solución medida en términos de la DTT y la RA. Con la regularización de los departamentos se logra aportar un cambio necesario en la búsqueda de soluciones reales por parte de herramientas computacionales al abordar el problema de distribución de plantas con departamentos de áreas desiguales, en particular en este estudio, las soluciones propuestas por el Algoritmo Híbrido Genético AHG. El método utilizado por los algoritmos propuestos en este estudio se basa en divisiones verticales y horizontales del espacio total de

la planta, en el cual se conservan las unidades de área de cada departamento, sin embargo, cada algoritmo utiliza diferentes métodos para determinar la dirección y posición de los cortes.

Para ver si las formas de los diseños resultantes son mejores que en los propuestos por el AHG, se compararon los diseños en cuanto a la medida de la relación de aspecto, Ω_i , introducido por Bozer et al. (1994) [10]. Para cada departamento i , Ω_i es definida como $\Omega_i = P_i / 4 \sqrt{A_i}$, donde P_i y A_i denotan el perímetro y el área del departamento i , respectivamente. Tenga en cuenta que $\Omega_i \geq 1$, y los departamentos con mejores formas (más cerca a un cuadrado) tienen valores más pequeños de Ω_i .

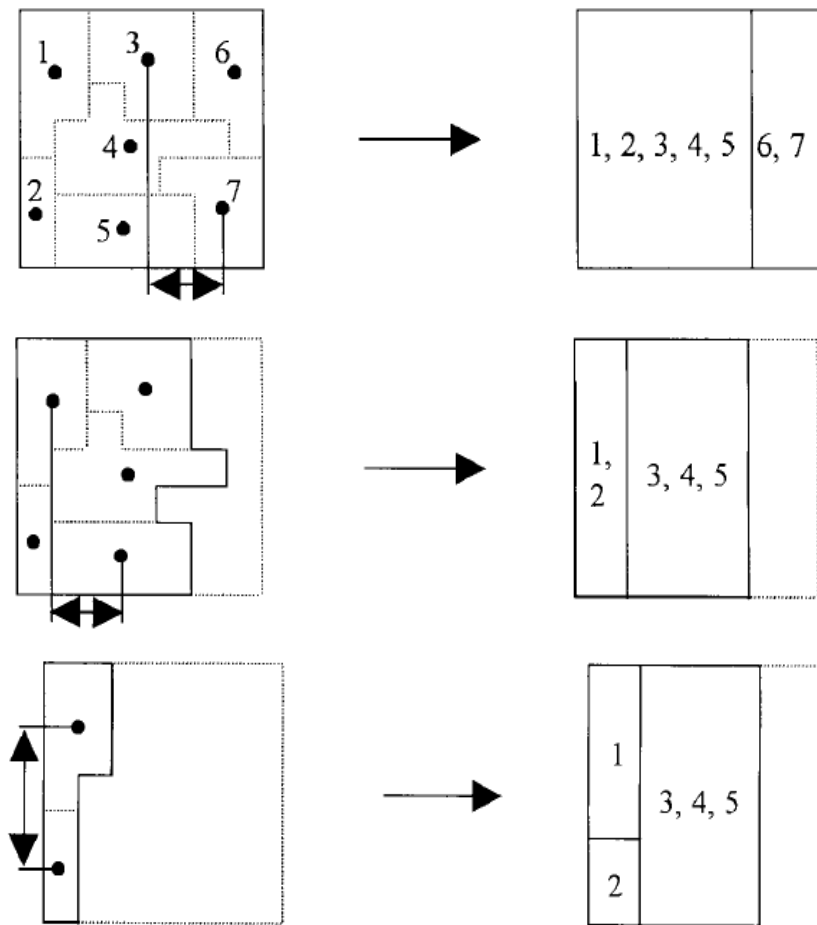
5.4.1 Algoritmo de forma con distancias entre los centroides (AF - DC):

El primer algoritmo AF-DC examina y divide los centroides de los departamentos de un diseño dado así: se enumeran en orden ascendente los valores de las coordenadas X y Y de los centroides de los departamentos, se seleccionan dos departamentos que son adyacentes en una de las dos listas (para las coordenadas X y para las coordenadas Y) que tienen el mayor intervalo entre todos los pares de departamentos adyacentes, se dividen los departamentos en dos grupos por un corte entre los mismos, si el intervalo más grande se asocia con las coordenadas de X, se realiza un corte vertical agrupando los departamentos con centroides que se encuentran a la izquierda del intervalo más grande. Del mismo modo, si el intervalo más grande se asocia con las coordenadas de Y, se realiza un corte horizontal agrupando los departamentos con centroides que se encuentran por encima del intervalo más grande. Este proceso se repite para cada división del área de la planta hasta que no se necesiten más particiones. La ubicación de un corte en un intervalo más grande puede disminuir la cantidad de cambios en las posiciones de los departamentos cuando un diseño dado por el AHG se convierte en un nuevo diseño. Por lo tanto, la calidad de la solución (DTT)

se puede preservar relativamente bien con este algoritmo y se puede reducir la (RA) en búsqueda de un valor cercano a 1. [24]. (Ver ilustración 23)

5.4.2 Algoritmo de forma de Búsqueda (AF-B): El algoritmo es una extensión del AF-DC. Al igual que en el AF-DC, se utilizan los centroides de los departamentos para determinar el lugar de corte, pero el AF-DC sólo tiene en cuenta el mayor intervalo entre los centroides de dos departamentos, el AF-B por su parte también considera el segundo intervalo mas grande. Por lo tanto, se pueden considerar dos posiciones de corte en todo momento cuando se divide el área de una planta.

Ilustración 23. Construcción del nuevo diseño por AF-DC



1	3	6
	4	
2	5	7

Fuente: Lee, G-C. And Kim, Y-D. (2000). Algorithms for Adjusting Shapes of Departments in Block Layouts on the Grid-based Plane, p.5.

En general, el método de búsqueda genera n alternativas posibles de solución, luego las evalúa y por último escoge las más satisfactorias para cada nivel de búsqueda, donde n , representa la extensión de la búsqueda, siendo éste un parámetro ajustable. Para el estudio del AF-B, n se establece en 2, es decir, se consideran dos alternativas para realizar particiones adicionales en cada nivel de búsqueda. A su vez en el AF-B, la relación de aspecto (RA) se utiliza como medida para seleccionar las mejores alternativas en cada nivel de búsqueda. Puesto que un diseño completo correspondiente a una alternativa no se puede obtener a menos que la alternativa este en la parte inferior de la búsqueda, se debe estimarla RA con un cierto método y finalmente seleccionar una alternativa para realizar una partición adicional [24].

El procedimiento para el AF - DC se presenta a continuación: en el procedimiento, X_i , Y_i denotan, respectivamente, las coordenadas de X y de Y de los centroides del departamento i en un diseño determinado.

Procedimiento 1. (AF - DC)

Paso 0. Sea S el conjunto de todos los departamentos seleccionados. (Inicialmente, el total del área se asigna a los departamentos en S .)

Paso 1. Haga dos listas de los departamentos incluidos en S, L_x y L_y , clasificando en orden ascendente los valores de las coordenadas X y Y, de los centroides de los departamentos, respectivamente.

Paso 2. Sean $[n]$ y (n) los índices de los departamentos en las posiciones n en L_x y L_y , respectivamente. Sea $\hat{n} = \operatorname{argmax} \{X_{[i]} - X_{[i-1]}\}$ y $\hat{n} = \operatorname{argmax} \{Y_{(i)} - Y_{(i-1)}\}$. Si $X_{[n]} < Y_{(\hat{n})}$, vaya al paso 3a. De lo contrario, vaya al paso 3b.

Paso 3a. Partir S en dos conjuntos, es decir, el conjunto de los departamentos de i tal que $Y_i < Y_{(\hat{n})}$ y un conjunto con los otros departamentos. Trazar un corte horizontal que divide el área (para los departamentos en S) en dos, uno para los departamentos en el primer conjunto y el otro para los del último conjunto.

Paso 3b. Partir S en dos conjuntos, es decir, el conjunto de los departamentos de i tal que $X_i < X_{[n]}$ y un conjunto con el resto de los departamentos. Trazar un corte vertical que divide el piso (para los departamentos en S) en dos, uno para los departamentos en el primer conjunto y el otro para los del último conjunto.

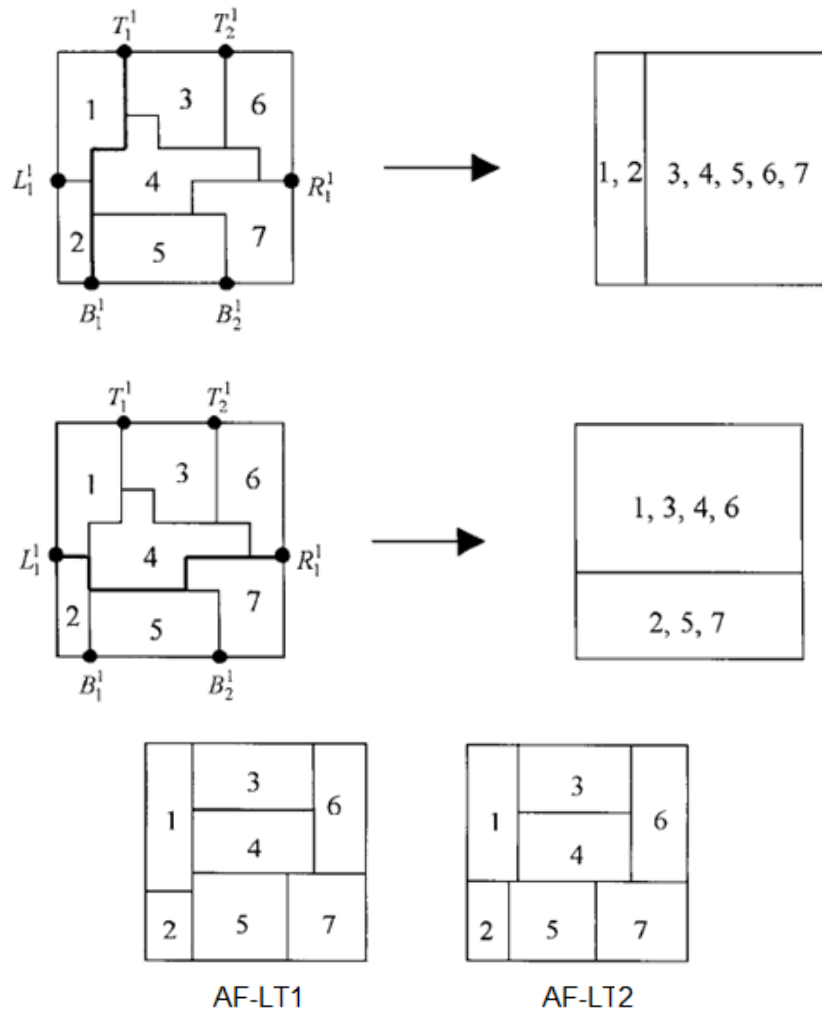
Paso 4. Si todavía hay conjuntos (generados en el paso 3) de departamentos para ser divididos, es decir, conjuntos con más de un departamento, seleccione uno arbitrariamente. Estando el conjunto S seleccionado, vaya al paso 1. De lo contrario, pare. (Ver ilustración 25)

Para el caso del AF-B el procedimiento es idéntico al AF-DC, excepto para el paso 2, el cual se da a continuación:

Paso 2. Sean $[n]$ y (n) los índices de los departamentos en las posiciones n en L_x y L_y , respectivamente. Sea $\hat{n} = \operatorname{argmax} \{X_{[i]} - X_{[i-1]}\}$ y $\hat{n} = \operatorname{argmax} \{Y_{(i)} - Y_{(i-1)}\}$. Si $X_{[n]} - X_{[n-1]} < Y_{(\hat{n})} - Y_{(\hat{n}-1)}$, vaya al paso 3a. De lo contrario, vaya al paso 3b. (Ver ilustración 26)

5.4.3 Algoritmos de forma utilizando líneas transversales (AF - LT1 y AF - LT2): A diferencia del AF - DC, la longitud de las líneas divisorias de los departamentos en un diseño de bloque dado se examinan para dividir los departamentos en dos grupos. Para la división, se introduce el concepto de una línea transversal. La línea transversal es el camino más corto (Entre dos puntos en lugares opuestos de un piso) que atraviesa el piso horizontal o verticalmente a lo largo de los límites de los departamentos.

Ilustración 24. Construcción del nuevo diseño por AF-LT1



Fuente: Lee, G-C. And Kim, Y-D. (2000). Algorithms for Adjusting Shapes of Departments in Block Layouts on the Grid-based Plane, p 8.

Los puntos en los cuales tres o más departamentos, incluyendo los límites del piso que se unen pueden convertirse en puntos finales de las líneas transversales.

En AF - LT1, una línea transversal con la longitud más corta entre todas las líneas transversales candidatas es seleccionada para dividir a los departamentos. Tenga en cuenta que las líneas transversales más cortas tienden a ser más como líneas rectas, por lo tanto, los centroides de las instalaciones en un nuevo diseño de bloque pueden que no se trasladen mucho de los que están en el diseño de bloque dado y el valor de la solución (DTT) del nuevo diseño puede ser similar a la del diseño dado.

En AF - LT2, por el contrario, se utilizan las coordenadas de los puntos finales¹⁹ de las líneas transversales para determinar la posición en la que un corte, se va a colocar en un nuevo diseño de bloque. Para una línea transversal horizontal, se tiene en cuenta la menor diferencia entre las coordenadas Y de dos puntos finales, mientras que para una línea transversal vertical, se tiene es en cuenta la menor diferencia entre las coordenadas X. Se selecciona la línea transversal con la mínima diferencia (ya sea en las coordenadas de X, o en las coordenadas de Y) para realizar el corte. Una vez que se selecciona una línea transversal, se hace un corte de la siguiente manera. Si una línea transversal horizontal (respectivamente, vertical) se selecciona, los departamentos ubicados por debajo de la línea transversal (a la izquierda) en el diseño de bloque original y los departamentos ubicados más arriba (a la derecha) son divididos por un corte horizontal (vertical). Este proceso de la colocación de un corte se repite para cada división del piso, hasta que no haya más líneas transversales en ninguna de las divisiones del piso [24]. Este proceso de la colocación de un corte se repite para cada división del piso, hasta que no haya más líneas transversales. El procedimiento para el AF - LT1 puede resumirse a continuación:

¹⁹Puntos finales o puntos de intersección entre departamentos en el borde de la planta.

Procedimiento (AF - LT1)

Paso 0. Sea S el conjunto de los departamentos seleccionados, es el conjunto de todos los departamentos. (Inicialmente, el total del piso se asigna a los departamentos de S).

Paso 1. Dibujar las líneas transversales entre todos los pares de dos puntos finales ubicados en lugares opuestos en el borde del piso (asignados a los departamentos en S) en el diseño original.

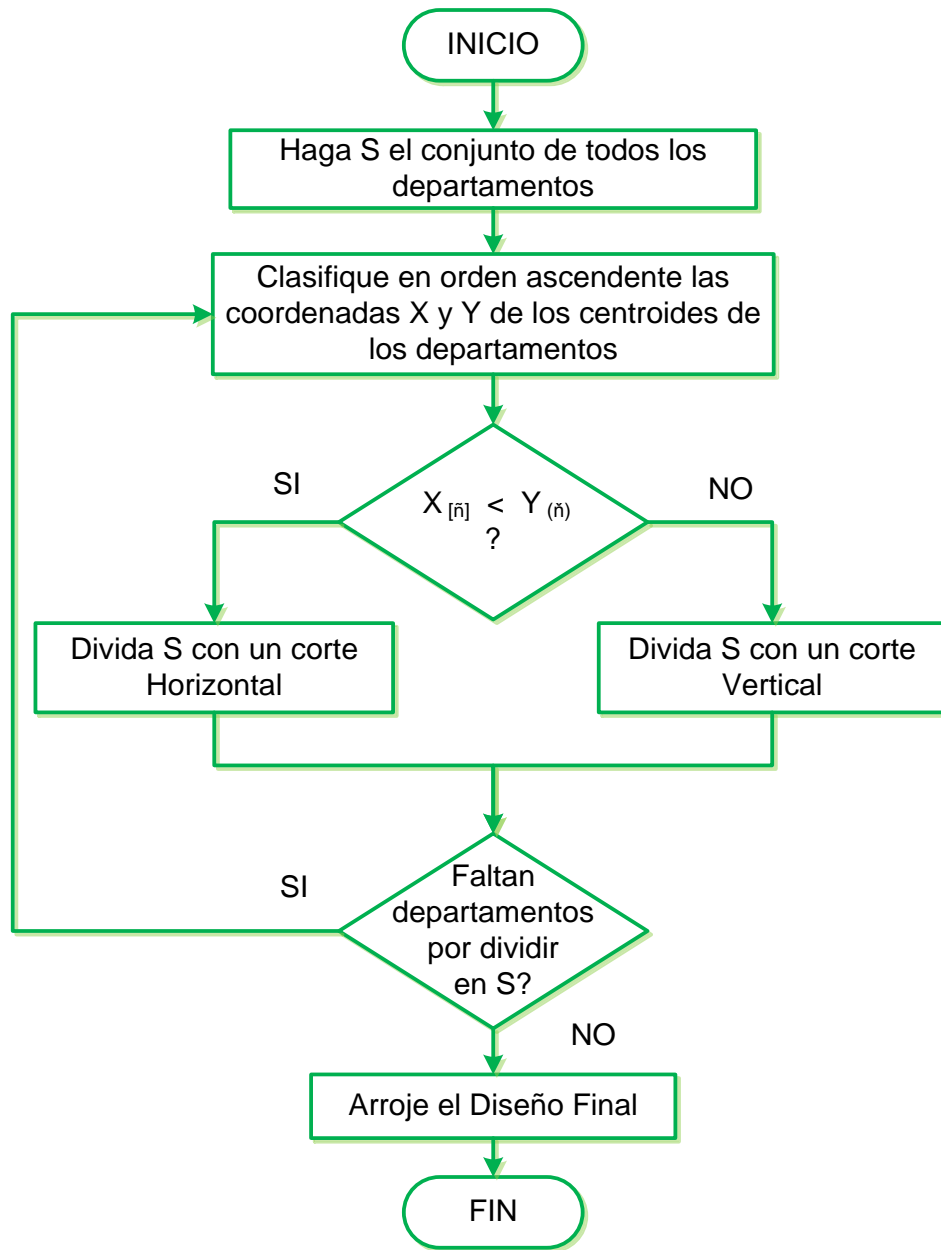
Paso 2. Seleccione una línea transversal con la longitud más corta. Si se selecciona una línea transversal horizontal, es decir, una que conecta dos puntos finales en el borde izquierdo y derecho del piso, vaya al paso 3a. De lo contrario, vaya al paso 3b.

Paso 3a. Divida S en dos conjuntos, un conjunto de departamentos situados debajo de la línea transversal seleccionada y un conjunto de departamentos ubicado por encima de la línea transversal seleccionada. Dibuje un corte horizontal que divide el piso (para los departamentos en S) en dos, uno para los departamentos de la primera serie y el otro para los departamentos en el conjunto final.

Paso 3b. Divida S en dos conjuntos, un conjunto de departamentos situados a la izquierda de la línea transversal seleccionada y un conjunto de departamentos ubicado a la derecha de la línea transversal seleccionada. Dibuje un corte vertical que divide el piso (para los departamentos en S) en dos, uno para los departamentos de la primera serie y el otro para los departamentos en el conjunto final.

Paso 4. Si todavía hay conjuntos (generados en el paso 3) de departamentos para

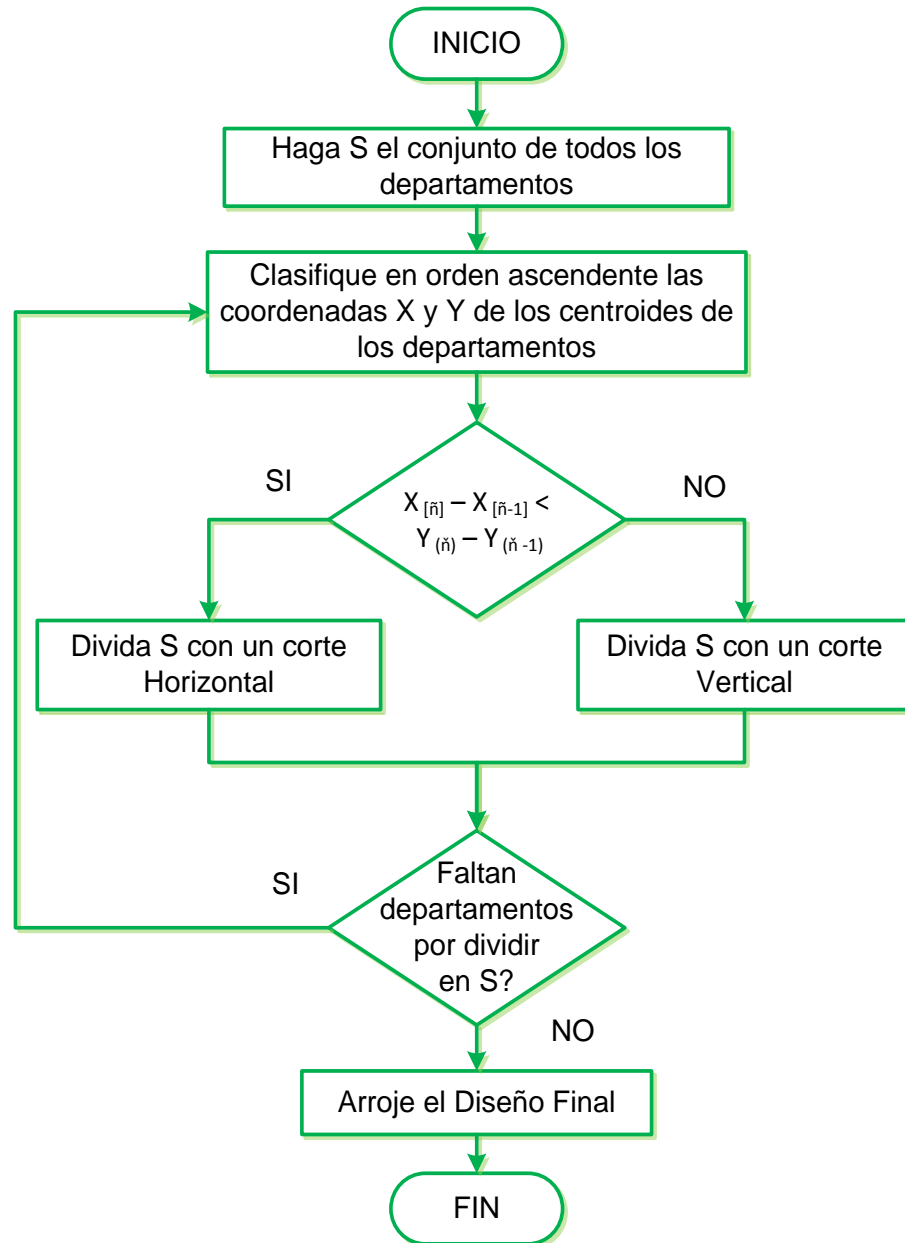
Ilustración 25. Diagrama de Flujo - Algoritmo de Forma con Distancia entre Centroides (AF-DC)



Fuente: Elaboración propia

ser divididos, es decir, conjuntos con más de un departamento, seleccione uno de forma arbitraria. Si se selecciona el conjunto S, vaya al paso 1. De lo contrario, pare. (Ver ilustración 27)

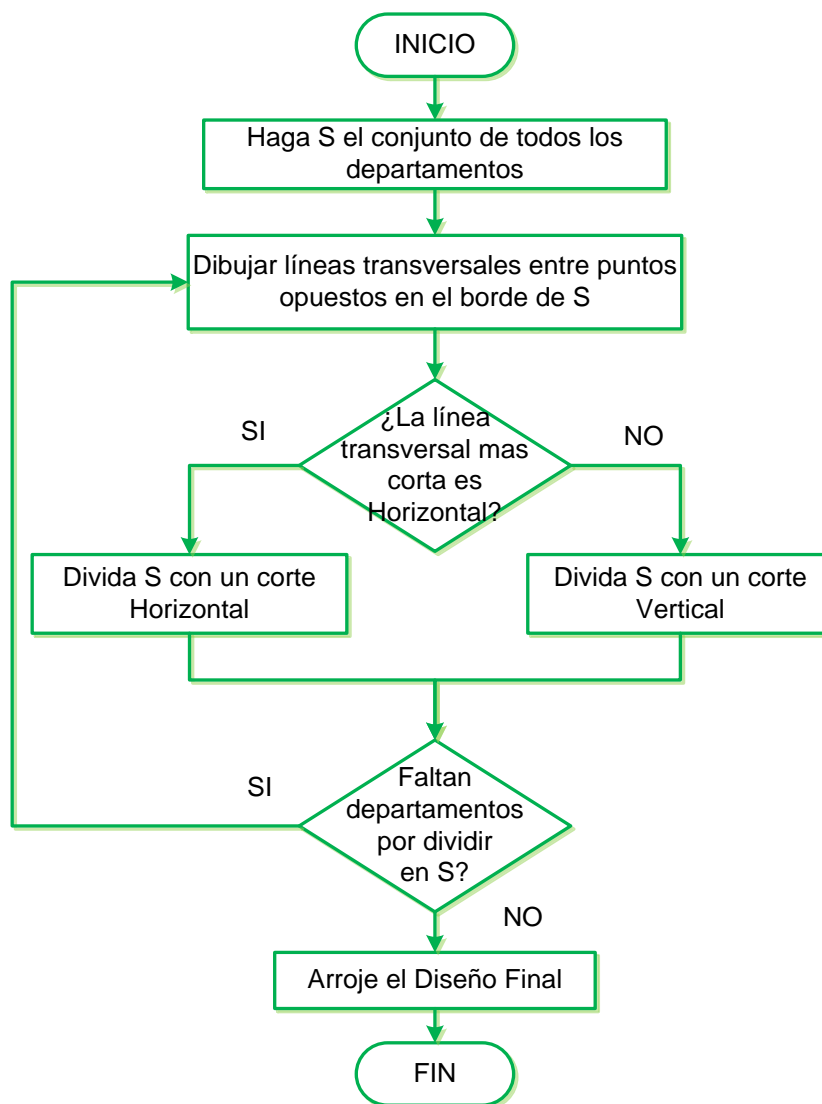
Ilustración 26. Diagrama de Flujo - Algoritmo de Forma de Búsqueda (AF-B)



Fuente: Elaboración propia

El procedimiento para el AF - LT2 es idéntico al del AF - LT1, excepto para el paso 2. El paso 2 del AF - LT2 se da a continuación:

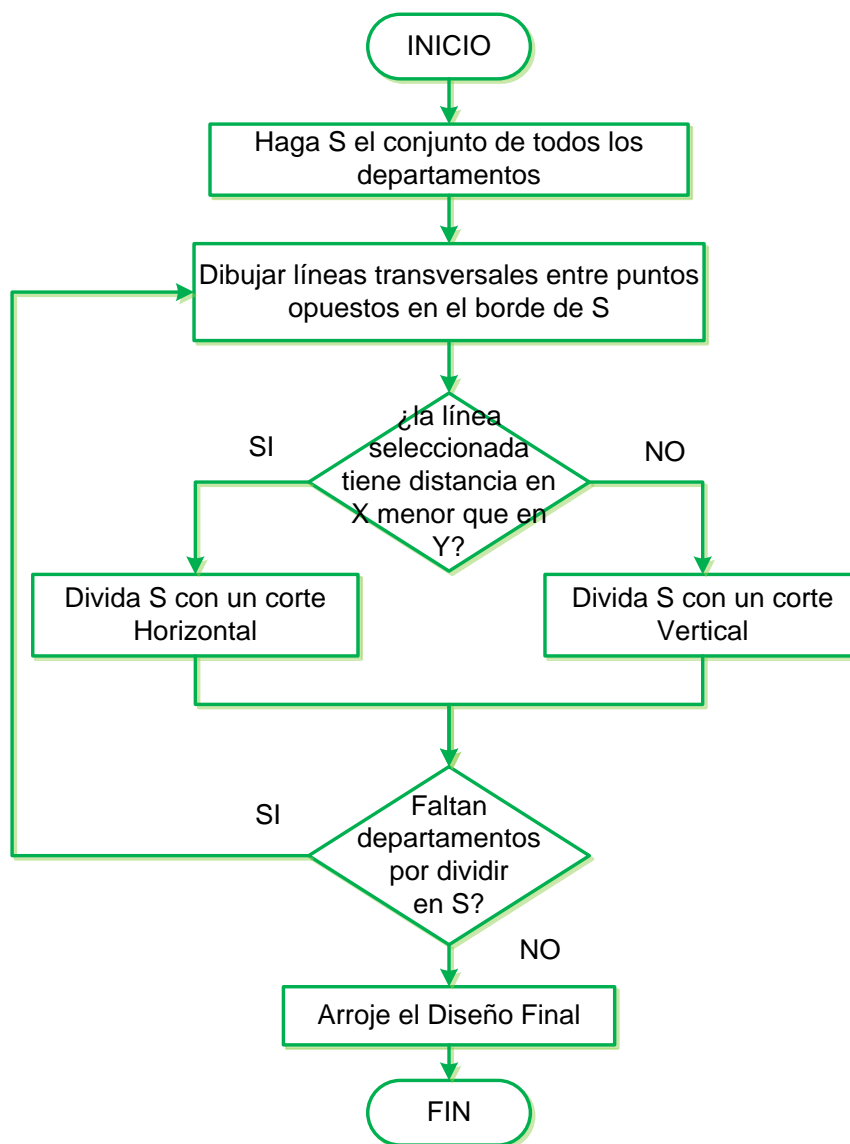
Ilustración 27. Diagrama de Flujo - Algoritmo de Forma con líneas transversales 1 (AF-LT1)



Fuente: Elaboración propia

Paso 2. (Del AF - LT2) Seleccione la línea transversal con la distancia mínima entre las coordenadas de Y por una línea horizontal, o la distancia mínima entre las coordenadas X por una línea vertical. Si se selecciona una línea transversal horizontal, vaya al paso 3a. De lo contrario, vaya al paso 3b. (Ver ilustración 28)

Ilustración 28. Diagrama de Flujo - Algoritmo de Forma con líneas transversales 1 (AF-LT2)



Fuente: Elaboración propia


6. MANUAL DEL PROGRAMA AF

Este manual es construido con el fin de orientar fácilmente a los usuarios de esta herramienta de aplicación. Para su construcción, se utilizó el programa MATLAB²⁰ en el que se codificaron cuatro algoritmos con el nombre “Algoritmos de forma”. Esta herramienta regulariza las formas de los departamentos de una solución dada al problema PDP de un solo nivel con áreas desiguales, sin importar el tamaño de las instalaciones. A continuación, se muestran los requerimientos que el usuario debe tener presentes para manejar el programa.

6.1 REQUERIMIENTOS DEL SISTEMA

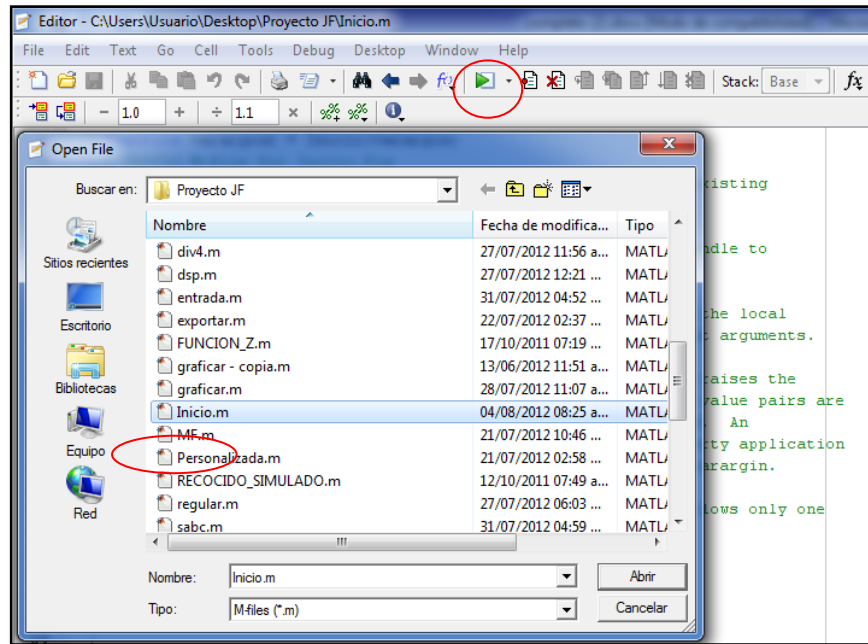
Los requerimientos necesarios para el correcto funcionamiento del programa son los que se necesitan para instalar la aplicación MATLAB 2010.

6.2 PROGRAMA AF

El usuario deberá abrir el software MATLAB y cargar la carpeta Regularización, una vez cargada, se podrá dar inicio al programa AF dando click en el archivo inicio.m seguido de otro click en el comando Run . (Ver ilustración 29 y 30). Teniendo abierto el programa AF el usuario deberá oprimir el botón de Solución Planteada (ver ilustración 30).

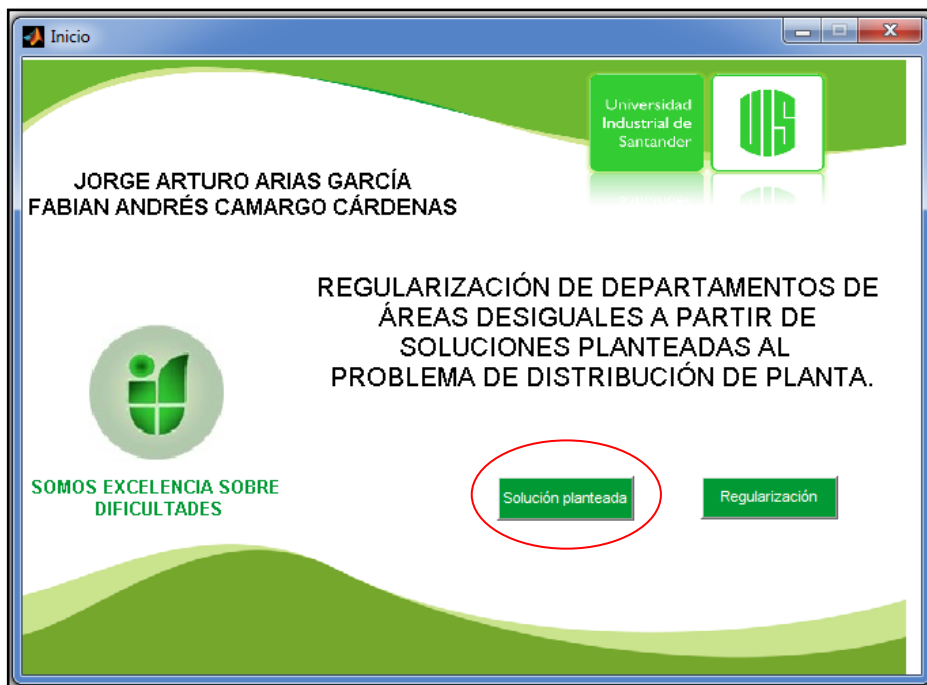
²⁰ MATLAB, (abreviatura de MATrixLABoratory, "laboratorio de matrices") es un software matemático que ofrece un entorno de desarrollo integrado (IDE) con un lenguaje de programación propio (lenguaje M). Está disponible para las plataformas Unix, Windows y Mac OS X.

Ilustración 29. Vista de MATLAB



Fuente: Programa desarrollado por los autores

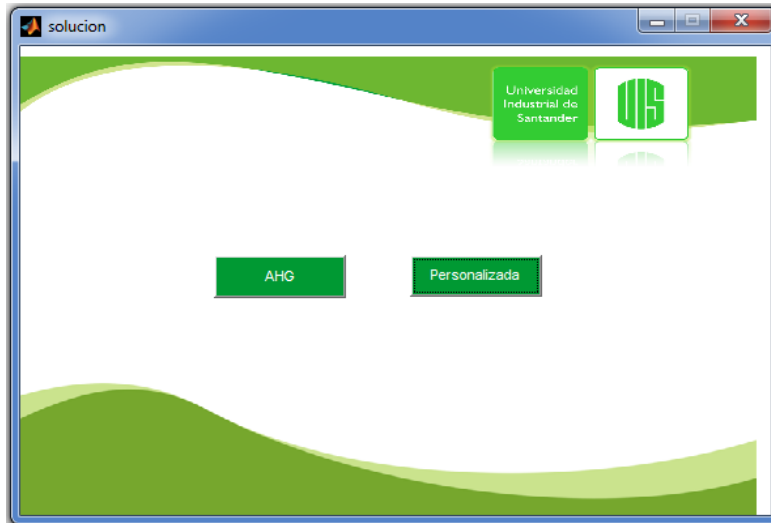
Ilustración 30. Vista del programa AF



Fuente: Programa desarrollado por los autores

En esta pantalla llamada solución, hay dos opciones AHG y Personalizada:

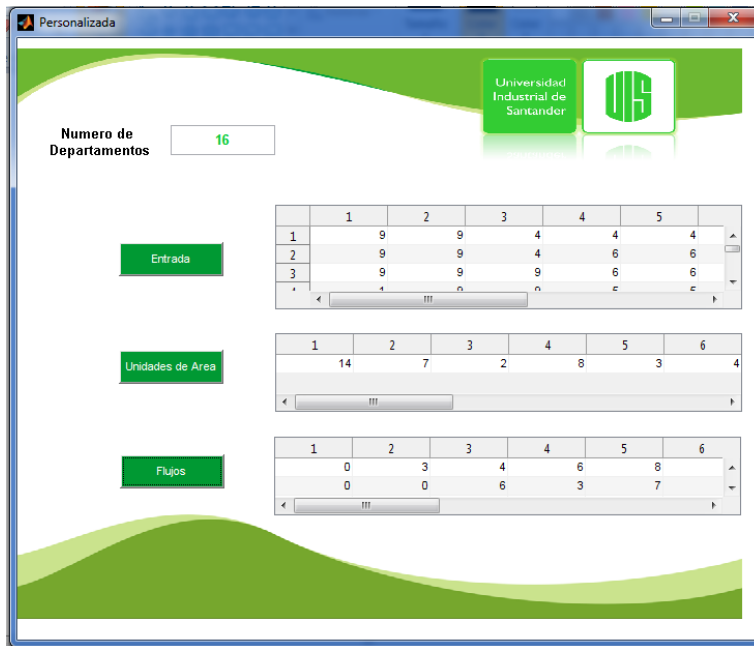
Ilustración 31. Vista ventana solución planteada



Fuente: Programa desarrollado por los autores

En la opción personalizada, el usuario podrá importar los datos de Entrada, Unidades de Área y Flujos de los departamentos a trabajar.

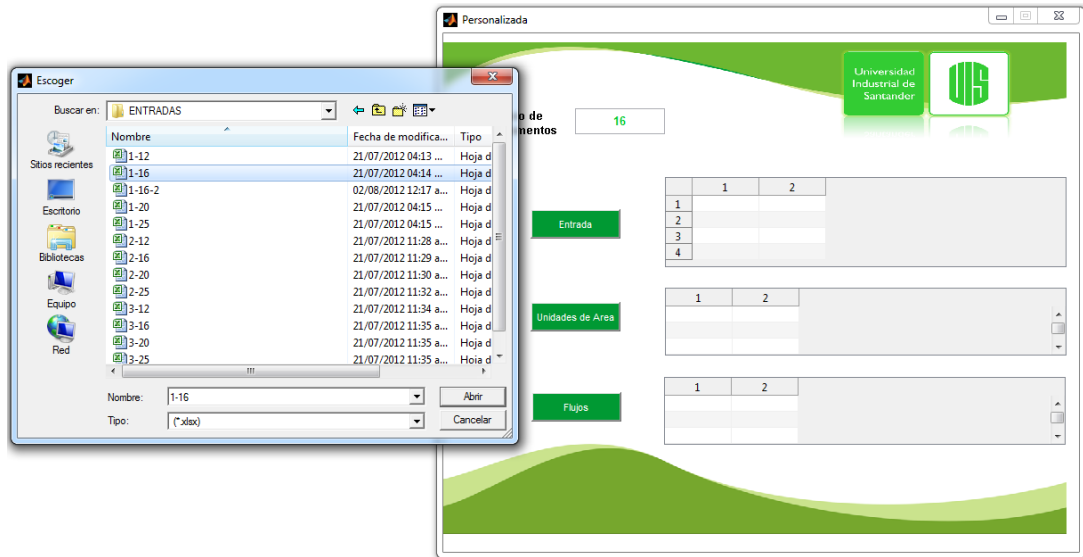
Ilustración 32. Opción Personalizada



Fuente: Programa desarrollado por los autores

Para importar los datos de Entrada, se da clic en el botón “Entradas” para luego seleccionar la carpeta con el mismo nombre y finalmente abrir la solución deseada de acuerdo al número de departamentos.

Ilustración 32a. Personalizada: Entradas



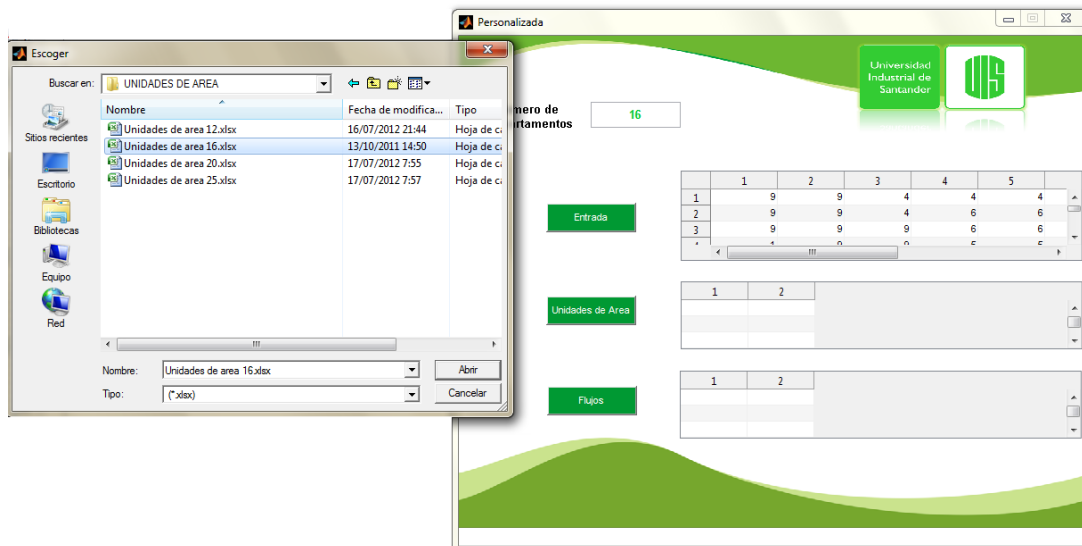
Fuente: Programa desarrollado por los autores

Para importar los datos de Unidades de Área, se realiza el mismo proceso que para abrir las entradas, pero en este caso se debe seleccionar la carpeta llamada “Unidades de Área”.

De la misma manera para importar los datos de Flujo, se debe realizar el mismo proceso que para abrir las entradas y las unidades de área, pero en este caso se debe seleccionar la carpeta llamada “Flujos”.

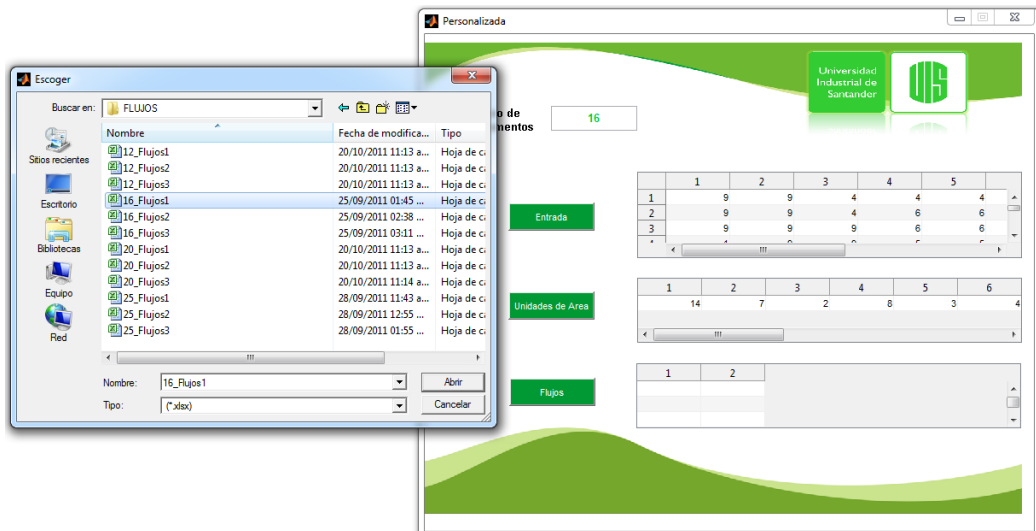
Después de importar los datos de Entrada, Unidades de Área y Flujos, el usuario debe cerrar la ventana actual con nombre “Personalizada”, a continuación aparecerá la ventana con nombre “Solución” la cual también se debe cerrar.

Ilustración 32b. Personalizada: Unidades de Área



Fuente: Programa desarrollado por los autores

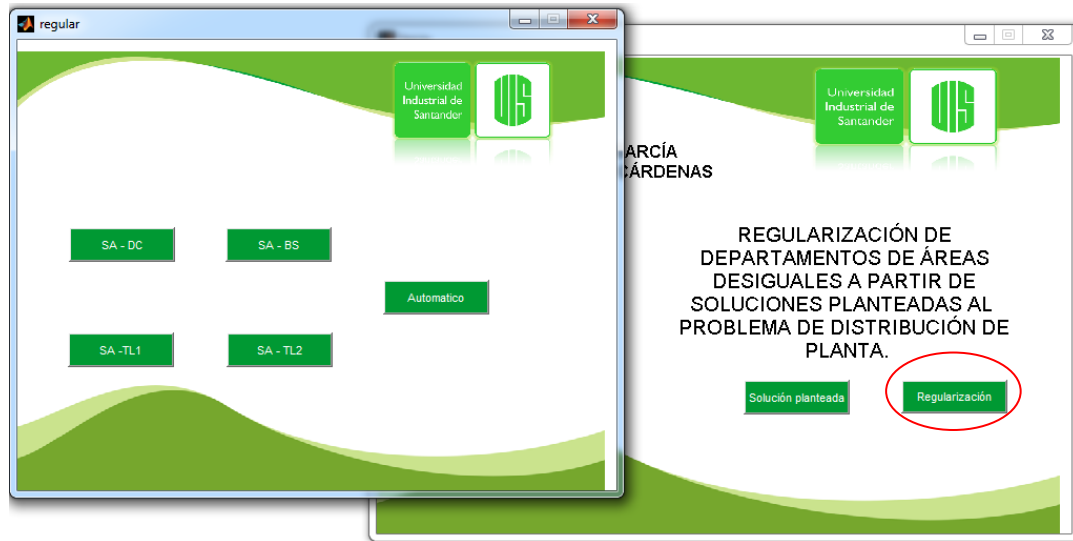
Ilustración 32c. Personalizada: Flujos



Fuente: Programa desarrollado por los autores

Luego de este proceso se ve la ventana inicial, en donde ahora se oprime el botón “Regularización”.

Ilustración 33. Regularización



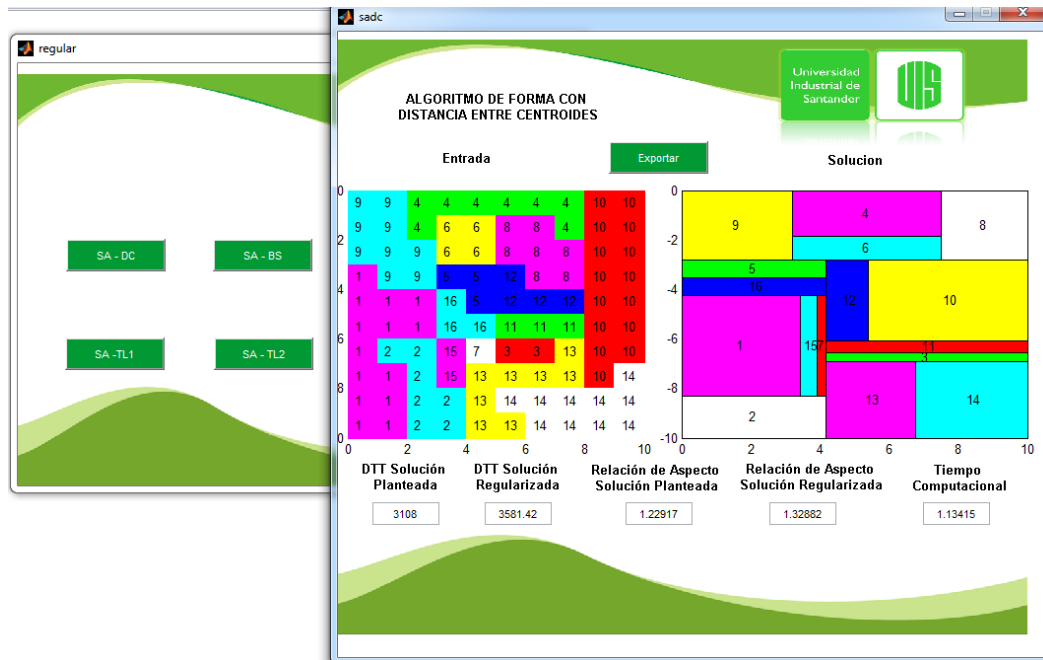
Fuente: Programa desarrollado por los autores

En ese instante el programa va a mostrar cinco opciones diferentes para regularizar la forma de la solución planteada al PDP (entradas), estas son: AF-DC, AF-B, AF-LT1, AF-LT2 y Automático, que es la mejor regularización entre las cuatro opciones posibles.

Allí el usuario podrá elegir con cual de los cuatro métodos quiere regularizar la forma de los departamentos en una solución al problema del PDP. Si se decide regularizar por algún algoritmo en específico, como por ejemplo el AF-DC; se elige el botón correspondiente y el programa luego de un periodo de tiempo, mostrará las formas de los departamentos ya regularizados, la DDT de la solución planteada, la DDT de la solución regularizada, la relación de aspecto entre ambos y el tiempo computacional que tardó el programa en regularizar los departamentos.

En ese momento se pueden conservar los valores característicos de los departamentos, dando clic en exportar, (Ver Anexo D) luego en guardar y seleccionando la carpeta llamada “resultados”.

Ilustración 33a. Regularización por el AF-DC

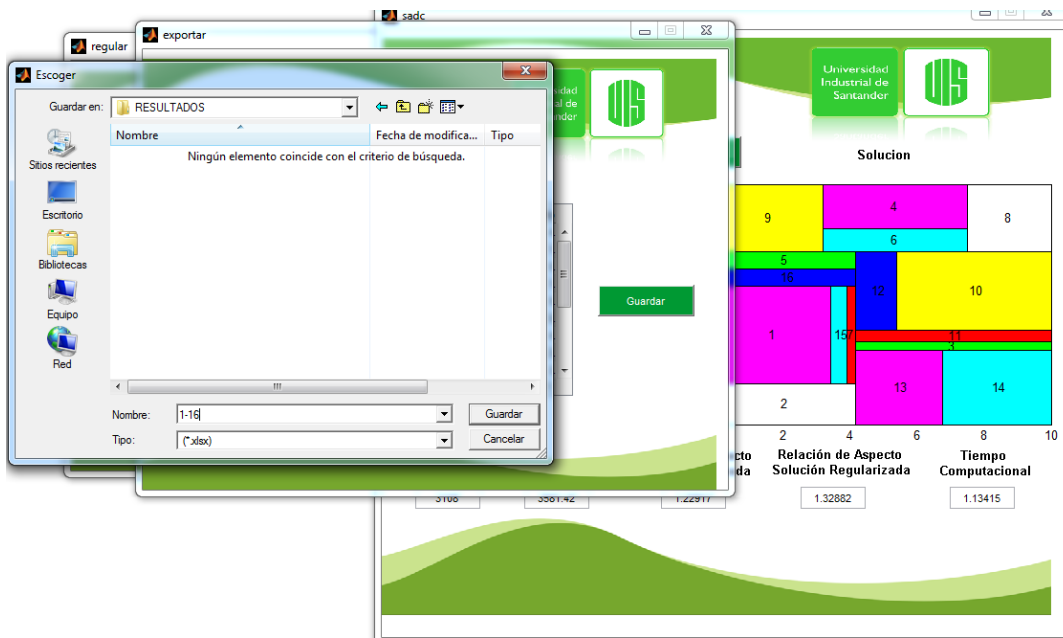


Fuente: Programa desarrollado por los autores

También podemos escoger la opción automático, la cual arrojará la mejor regularización luego de comparar los resultados obtenidos en las DTT y las relaciones de aspecto de los 4 algoritmos.

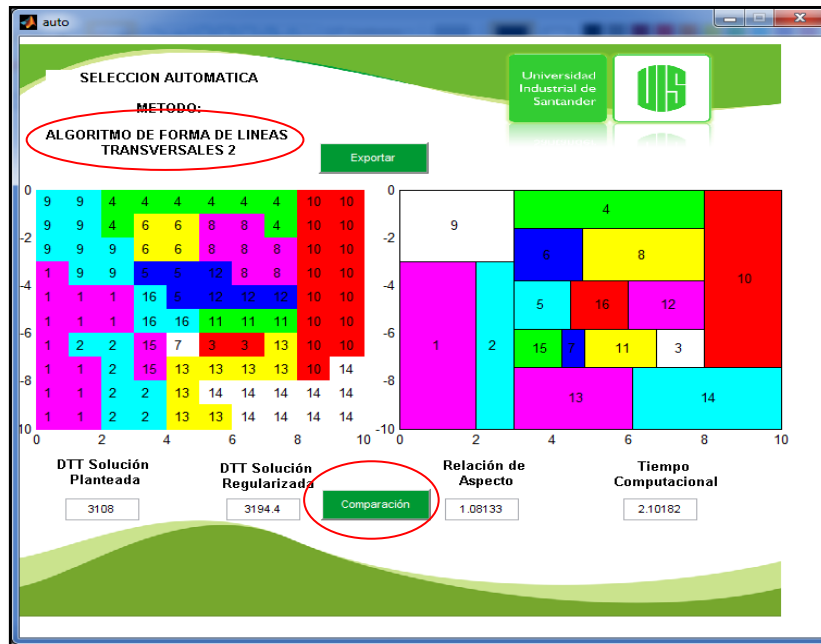
Al ver la regularización, nos muestra una comparación entre la DTT de la solución planteada y la DTT de la solución regularizada, también se puede observar la relación de aspecto y el tiempo computacional del mejor algoritmo.

Ilustración 34. Opción Exportar



Fuente: Programa desarrollado por los autores

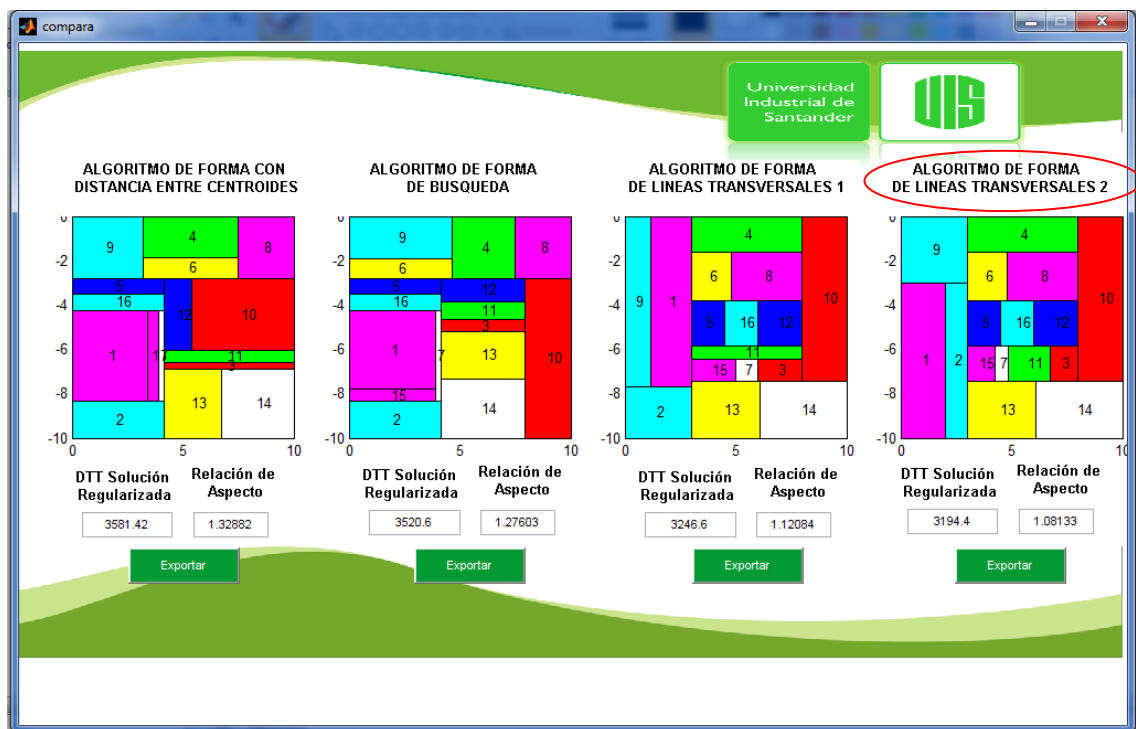
Ilustración 35. Opción Automático



Fuente: Programa desarrollado por los autores

Allí se muestran ahora dos opciones, una es exportar los valores característicos de cada departamento (ver Ilustración 34 y 35) y la otra opción es la comparación entre resultados, en donde se muestra la confrontación entre los 4 algoritmos, en donde efectivamente, se puede observar cual arrojó los mejores resultados. En esta fase del programa también se permite exportar los valores característicos de los departamentos en cada algoritmo (ver ilustración 36).

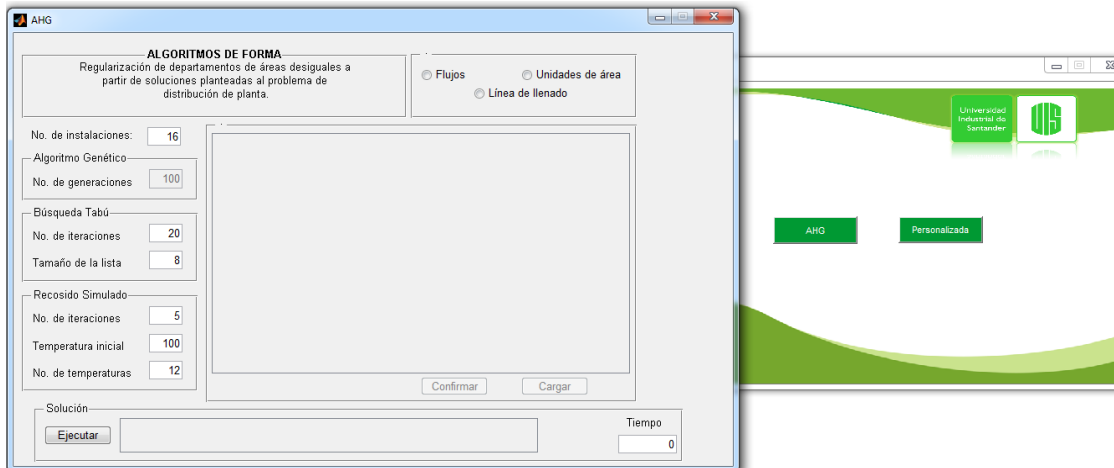
Ilustración 36. Comparación entre los cuatro Algoritmos de Forma



Fuente: Programa desarrollado por los autores

Si no se tienen datos de entrada se debe seleccionar la opción AHG en lugar de la opción personalizada en la ventana llamada solución (ver ilustración 32).

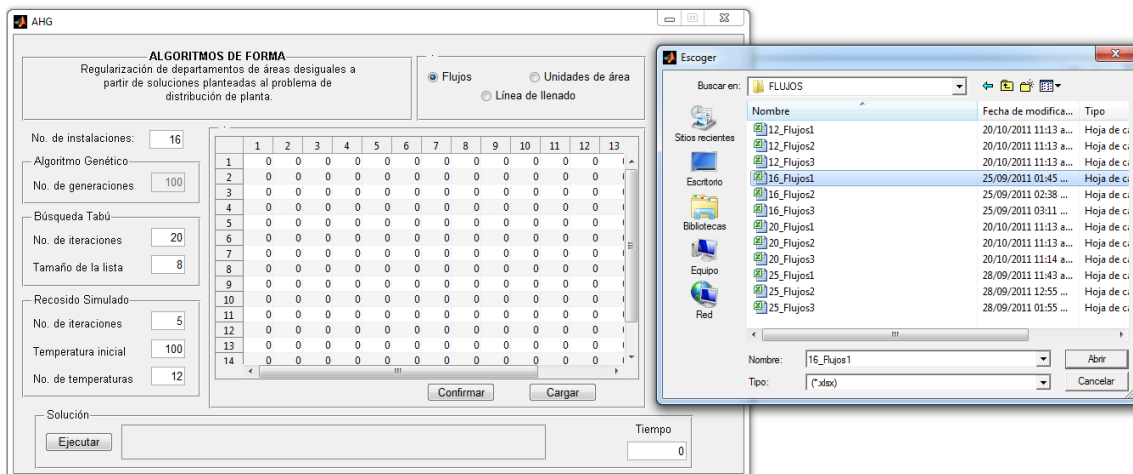
Ilustración 37. Opción AHG



Fuente: Programa desarrollado por los autores

Al elegir esta opción el usuario podrá importar la solución planteada por este algoritmo teniendo sugeridos los valores numéricos de cada uno de los factores que incorpora este algoritmo. Para poder ejecutar el programa se deben cargar 3 parámetros: matriz de flujos, unidades de área y líneas de llenado.

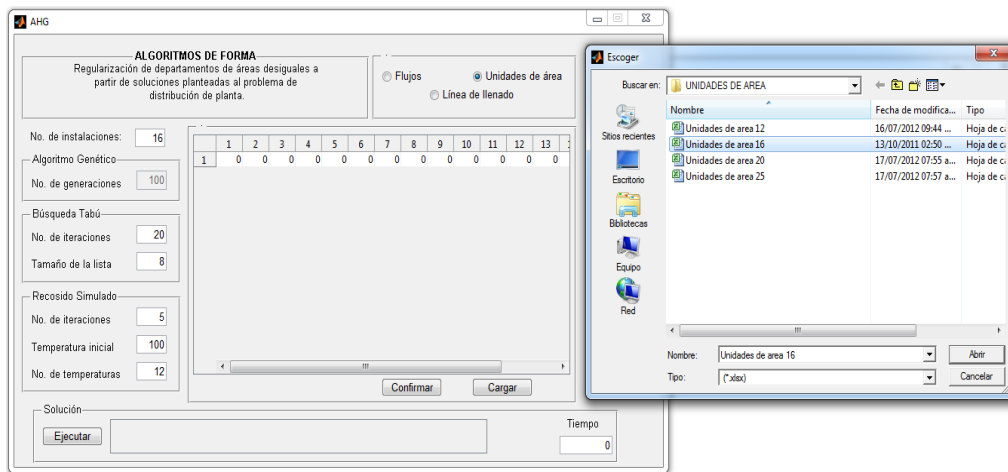
Ilustración 37a. AHG: Flujos



Fuente: Programa desarrollado por los autores

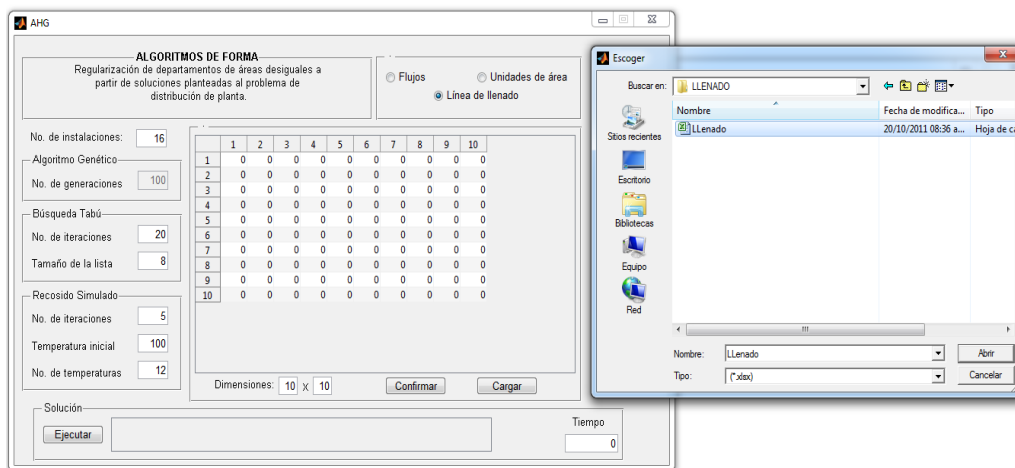
Se carga la matriz de flujos y se debe confirmar para posteriormente realizar el mismo proceso para las unidades de área y líneas de llenado. Finalmente damos clic en ejecutar luego de confirmar las líneas de llenado al igual que los otros dos parámetros, y esperamos a que el programa AHG nos arroje una solución cercana al óptimo. Al obtener los resultados, debemos guardarlos para disposición y comodidad de uso en el programa AF.

Ilustración 37b. AHG: Unidades de Área



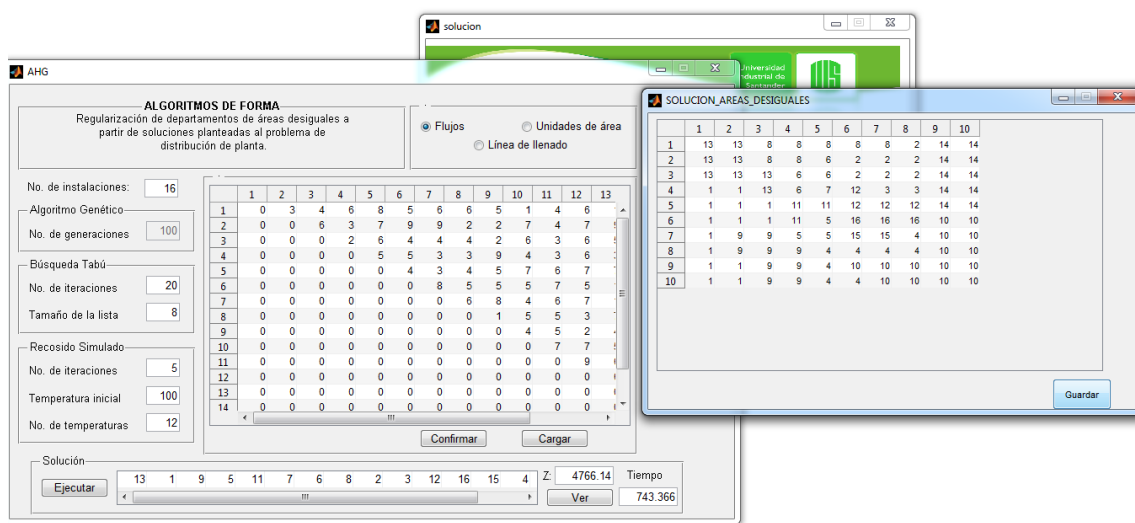
Fuente: Programa desarrollado por los autores

Ilustración 37c. AHG: Líneas de Llenado



Fuente: Programa desarrollado por los autores

Ilustración 38. Solución planteada por el AHG



Fuente: Programa desarrollado por los autores

Posteriormente se tienen que cerrar todas las ventanas del AHG, quedando abierta de esta manera la ventana solución; allí se debe seleccionar la opción personalizada nuevamente e importar los datos recién guardados en la carpeta “entradas” y hacer el procedimiento correspondiente en la ventana personalizada, explicado anteriormente (ver ilustración 32).

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Los Algoritmos de Forma se estudiaron partiendo de las soluciones planteadas por el AHG, evaluando la proximidad de los valores obtenidos frente a los valores establecidos y el incremento porcentual con respecto a los mismos bajo diferentes parámetros descritos a continuación:

Los Algoritmos de Forma se analizaron para 4 escenarios diferentes (12, 16, 20 y 25 departamentos) seleccionados de acuerdo con la disponibilidad de datos de los mismos en las librerías [30]. Aunque las soluciones óptimas para departamentos de áreas desiguales no se encuentran en dichas librerías, se utilizaron las

soluciones planteadas por el “Programa AHG” asumiendo que son datos muy cercanos a los óptimos. El experimento fue llevado a cabo en 3 ejercicios diferentes en donde las distribuciones de los departamentos y los datos arrojados por el AHG se utilizan como datos de entrada y como variables de medida en el “Programa AF” propuesto por Lee, G-C. And Kim, Y-D. (2000), y adaptado en este estudio.

Para comparar el rendimiento de los algoritmos sugeridos, se utilizó como variable de análisis el porcentaje de aumento de la Distancia Total de Transporte nueva, con respecto a la Distancia Total de Transporte original, que se calcula para cada problema así:

$$\text{Variable de análisis} = \text{Porcentaje de incremento} = \frac{T_{AF} - T_{AHG}}{T_{AHG}} * 100$$

Donde T_{AF}^{21} es la DTT nueva, arrojada por los algoritmos de Forma y T_{AHG}^{22} es la DTT arrojada por el algoritmo AHG con el cual se realizó la comparación en este estudio. Asimismo, se utilizará como criterio de selección la mejor Relación de Aspecto RA^{23} obtenida, es decir, aquella con valores cercanos o iguales a 1, utilizando como variable de análisis el porcentaje de reducción de la RA nueva, con respecto a la RA original, que se calcula para cada problema así:

$$\text{Variable de análisis} = \text{rendimiento} = \frac{RA_{AF} - RA_{AHG}}{RA_{AHG}} * 100$$

²¹ T_{AF} o Distancia Total de Transporte Nueva

²² T_{AHG} o Distancia Total de Transporte arrojada por el algoritmo AHG

²³RA o Relación de Aspecto.

Donde RA_{AF}^{24} es la RA nueva, arrojada por los algoritmos de Forma y RA_{AHG}^{25} es la RA arrojada por el algoritmo AHG con el cual se realizó la comparación en este estudio.

7.1 FACTORES UTILIZADOS EN EL ALGORITMO HÍBRIDO GENÉTICO (AHG)

Para obtener las soluciones planteadas por el Programa AHG se tuvieron presentes 3 metaheurísticas, las cuales requieren el número de generaciones del Algoritmo Genético, el número de iteraciones y lista tabú de la Búsqueda Tabú y el número de iteraciones y número de temperaturas del Recocido Simulado (Ver Tabla 5) y a su vez los datos requeridos para los tamaños de planta seleccionados: las líneas de llenado, las unidades de área y los flujos entre departamentos (Ver Anexo A)

En la tabla 5 se presentan los factores utilizados para cada una de las metaheurísticas requeridas por el Programa AHG en los 4 tamaños de planta seleccionados para el estudio. Dichos Factores fueron tomados en cuenta debido a que fueron los que mejores resultados arrojaron dentro de las combinaciones consideradas en el estudio del AHG. [32]

7.2 ANÁLISIS ENTRE ALGORITMOS DE FORMA

En este análisis se desea comparar los cuatro Algoritmos de Forma de acuerdo a sus características de funcionamiento, evaluando los valores de DTT y RA obtenidos para cada uno de ellos de acuerdo al escenario planteado, lo cual se puede verificar en los diagramas de regularización de departamentos arrojados por el programa AF. (Ver Anexo B)

²⁴ RA_{AF} o Relación de Aspecto Nueva.

²⁵ RA_{AHG} o Relación de Aspecto arrojada por el algoritmo AHG.

Tabla 5. Factores de entrada del AHG

FACTORES	DEPARTAMENTOS			
	12	16	20	25
No. de generaciones	100	100	70	80
No. de iteraciones BT	100	60	100	60
Lista tabú	10	8	10	8
No. de iteraciones RS	20	15	20	15
No. De temperaturas	14	14	14	14

Fuente: Palacios, M.M. y Jaimes T. C., tesis de grado de la UIS, Bucaramanga (2011)

7.2.1 ESCENARIO DE 12 DEPARTAMENTOS

Para el escenario de 12 departamentos se obtuvieron valores de la DTT muy cercanos a los planteados por el AHG, en donde el **AF-LT1** arrojó el mejor resultado para el ejercicio 1, el **AF-B** lo hizo para el ejercicio 2, y el **AF-LT2** arrojó el mejor resultado para el ejercicio 3, además, se tiene que el **AF-LT2** obtuvo un incremento promedio de 2,7% y fue el de mejor desempeño, seguido por el **AF-LT1** y el **AF-B** con un incremento de 3,2% y el AF-DC con un incremento promedio de 6,6% (ver tabla 6a). De igual forma la diferencia de rendimientos entre los cuatro algoritmos es muy pequeña, ya que los cuatro incrementos promedio no superan el 7%.

En este mismo escenario se puede observar que se obtuvieron valores de RA muy cercanos a 1, en donde el **AF-DC** alcanzó la mejor reducción de la RA para los ejercicios 1 y 2, mientras el **AF-B** obtuvo la mejor reducción para el ejercicio 3, siendo el ejercicio 1 el único valor que se aproximó a 1. (Ver tabla 10b).

Tabla 6a. Resumen del desempeño de los Algoritmos de Forma: 12 Dptos.

ALGORITMOS DE FORMA	EJERCICIOS PROPUESTOS			INCREMENTO PROMEDIO%
	1	2	3	
AHG	1959	990	15991,5	
AF-DC	2066,24	1050,07	17305,5	6,6%
	5,5%	6,1%	8,2%	
AF-B	2045,19	972,816	16572,5	3,2%
	4,4%	-1,7%	3,6%	
AF-LT1	1990,31	1009,53	16934,6	3,2%
	1,6%	2%	5,9%	
AF-LT2	2079,49	989,739	16300,8	2,7%
	6,2%	0%	1,9%	

Fuente: Elaboración propia

Además el **AF-DC** obtuvo un rendimiento promedio de 7,2% siendo el mejor desempeño, seguido por el **AF-B** con un rendimiento de 6,0%, el AF-LT2 con 3,1% y el AF-LT1 con 2,6%. Cabe recordar que los mejores resultados son aquellos que se aproximen o sean iguales a 1, lo cual representa departamentos más cuadrados. Los incrementos porcentuales muestran el rendimiento de los algoritmos de forma en la reducción de la RA.

Tabla 6b. Resumen del desempeño de los Algoritmos de Forma: 12 Dptos.

ALGORITMOS DE FORMA	EJERCICIOS PROPUESTOS			RENDIMIENTO PROMEDIO%
	1	2	3	
AHG	1,223	1,202	1,230	
AF-DC	1,085	1,179	1,126	7,2%
	-11,3%	-1,9%	-8,5%	
AF-B	1,132	1,182	1,122	6,0%
	-7,5%	-1,7%	-8,8%	
AF-LT1	1,149	1,189	1,240	2,6%
	-6,1%	-1,0%	0,8%	
AF-LT2	1,150	1,220	1,208	3,1%
	-6,0%	1,6%	-1,8%	

Fuente: Elaboración propia

7.2.2 ESCENARIO DE 16 DEPARTAMENTOS

Para el escenario de 16 departamentos se obtuvieron valores de la DTT muy cercanos a los planteados por el AHG, en donde el **AF-LT2** arrojó el mejor resultado para el ejercicio 1, el **AF-DC** arrojó el mejor resultado para el ejercicio 2 y el **AF-LT1** arrojó el mejor resultado para el ejercicio 3, además, se tiene que el **AF-LT1** obtuvo un incremento promedio de 4,1% y fue el de mejor desempeño, seguido por el **AF-LT2** con un incremento promedio de 5,6%, el **AF-DC** con un incremento promedio de 7% y el AF-B con un incremento promedio de 9,5% (ver tabla 7a). De igual forma la diferencia de rendimientos entre los cuatro algoritmos es muy pequeña, ya que los cuatro incrementos porcentuales no superan el 10%.

En este mismo escenario se puede observar que se obtuvieron valores de RA muy cercanos a 1, en donde el **AF-LT2** alcanzó la mejor reducción de la RA para el ejercicio 1, mientras el **AF-DC** obtuvo las mejores reducciones para los ejercicios 2 y 3, obteniendo en los 3 ejercicios valores cercanos a 1. (Ver tabla 7b).

Tabla 7a. Resumen del desempeño de los Algoritmos de Forma: 16 Dptos.

ALGORITMOS DE FORMA	EJERCICIOS PROPUESTOS			INCREMENTO PROMEDIO%
	1	2	3	
AHG	3108	2043,5	1789,5	
AF-DC	3581,42	2096,85	1844,34	7,0%
	15,2%	2,6%	3,1%	
AF-B	3520,6	2227,07	1898,67	9,5%
	13,3%	9%	6,1%	
AF-LT1	3246,6	2157,01	1830,76	4,1%
	4,5%	5,6%	2,3%	
AF-LT2	3194,4	2161,93	1937,3	5,6%
	2,8%	5,8%	8,3%	

Fuente: Elaboración propia

Además el **AF-DC** obtuvo un rendimiento promedio de 6,9% siendo el mejor desempeño, seguido por el **AF-LT2** con un rendimiento de 5,2%, el AF-LT1 con

5,2% y el AF-B con 2,8%. Cabe recordar que los mejores resultados son aquellos que se aproximen o sean iguales a 1, lo cual representa departamentos más cuadrados. Los incrementos porcentuales muestran el rendimiento de los algoritmos de forma en la reducción de la RA.

Tabla 7b. Resumen del desempeño de los Algoritmos de Forma: 16 Dptos.

ALGORITMOS DE FORMA	EJERCICIOS PROPUESTOS			RENDIMIENTO PROMEDIO%
	1	2	3	
AHG	1,229	1,141	1,140	
AF-DC	1,329	1,079	1,058	
	8,1%	-5,5%	-7,2%	6,9%
AF-B	1,276	1,136	1,092	
	3,8%	-0,5%	-4,2%	2,8%
AF-LT1	1,121	1,080	1,123	
	-8,8%	-5,4%	-1,5%	5,2%
AF-LT2	1,081	1,144	1,178	
	-12%	0,2%	3,3%	5,2%

Fuente: Elaboración propia

7.2.3 ESCENARIO DE 20 DEPARTAMENTOS

Para el escenario de 20 departamentos se obtuvieron valores de la DTT muy cercanos a los planteados por el AHG, en donde el **AF-LT1** arrojó los mejores resultados para los ejercicio 1 y 3, por su lado el **AF-LT2** arrojó el mejor resultado para el ejercicio 2, además, se tiene que el **AF-LT1** obtuvo un incremento promedio de 1,9% y fue el de mejor desempeño, seguido por el AF-B con un incremento promedio de 2,5%, el AF-DC con un incremento porcentual promedio de 2,7% y el **AF-LT2** con un incremento promedio de 4,7% (ver tabla 8a). De igual forma la diferencia de rendimientos entre los cuatro algoritmos es muy pequeña, ya que los cuatro incrementos no superan el 5%.

Tabla 8a. Resumen del desempeño de los Algoritmos de Forma: 20 Dptos.

ALGORITMOS DE FORMA	EJERCICIOS PROPUESTOS			INCREMENTO PROMEDIO%
	1	2	3	
AHG	5407	3307,5	53534	
AF-DC	5625,72 4%	3369,13 1,9%	54644,6 2,1%	2,7%
AF-B	5591,31 3,4%	3436,31 3,9%	53447,3 -0,2%	2,5%
AF-LT1	5530,62 2,3%	3435,1 3,9%	53243 -0,5%	1,9%
AF-LT2	5619,26 3,9%	3258,51 -1,5%	58124,4 8,6%	4,7%

Fuente: Elaboración propia

Para el escenario de 20 departamentos se puede observar que se obtuvieron valores de RA muy cercanos a 1, en donde el **AF-DC** alcanzó la mejor reducción de la RA para todos los ejercicios, para los ejercicios 1 y 2 (ver tabla 8b). Además, el **AF-DC** obtuvo el mejor desempeño con un rendimiento promedio de 8,3%, seguido por el AF-B con un rendimiento de 4,1%, el AF-LT2 con 3,5% y el AF-LT1 con 3%. Cabe recordar que los mejores resultados son aquellos que se aproximen o sean iguales a 1, lo cual representa departamentos más cuadrados. Los incrementos porcentuales muestran el rendimiento de los algoritmos de forma en la reducción de la RA.

Tabla 8b. Resumen del desempeño de los Algoritmos de Forma: 20 Dptos.

ALGORITMOS DE FORMA	EJERCICIOS PROPUESTOS			RENDIMIENTO PROMEDIO%
	1	2	3	
AHG	1,204	1,191	1,167	
AF-DC	1,060 -12%	1,081 -9,3%	1,127 -3,5%	8,3%
AF-B	1,096 -9%	1,202 0,8%	1,138 -2,5%	4,1%
AF-LT1	1,120 -7%	1,209 1,5%	1,161 -0,5%	3%
AF-LT2	1,111 -7,7%	1,176 -1,3%	1,151 -1,4%	3,5%

Fuente: Elaboración propia

7.2.4 ESCENARIO DE 25 DEPARTAMENTOS

Para el escenario de 25 departamentos se obtuvieron valores de la DTT muy cercanos a los planteados por el AHG, en donde el **AF-LT1** arrojó los mejores resultados para los ejercicios 1 y 3, por su lado el **AF-DC** arrojó el mejor resultado para el ejercicio 2, además, se tiene que el **AF-B** obtuvo un incremento promedio menor de 1,6% y fue el de mejor desempeño, seguido por el **AF-DC** con un incremento promedio de 1,8%, el **AF-LT2** con un incremento promedio de 2,8% y el **AF-LT1** con un incremento promedio de 4,1% (ver tabla 9a). De igual forma la diferencia entre los cuatro es muy pequeña, ya que los cuatro incrementos porcentuales promedio no superan el 5%.

Tabla 9a. Resumen del desempeño de los Algoritmos de Forma: 25 Dptos.

ALGORITMOS DE FORMA	EJERCICIOS PROPUESTOS			INCREMENTO PROMEDIO%
	1	2	3	
AHG	4603,5	85012	7,19E+10	
AF-DC	4663,82	85238	6,92E+06	
	1,3%	0,3%	-3,8%	1,8%
AF-B	4669,82	85774,6	7,01E+06	
	1,4%	0,9%	-2,5%	1,6%
AF-LT1	4616,06	88203,5	6,61E+06	
	0,3%	3,8%	-8,1%	4,1%
AF-LT2	4628,91	88619,8	7,44E+06	
	0,6%	4,2%	3,5%	2,8%

Fuente: Elaboración propia

Para este escenario, nuevamente se obtuvieron valores de RA muy cercanos a 1, en donde el algoritmo **AF-DC** alcanzó la mayor reducción de la RA para los ejercicios 1 y 3, mientras el **AF-B** alcanzó la mejor reducción de la RA en el ejercicio 2, (ver tabla 9b). Además, el **AF-DC** obtuvo el mejor desempeño con un rendimiento de 6,8%, seguido por el **AF-B** con 5,5%, el **AF-LT2** con 2,8% y el **AF-LT1** con 2,4%. Cabe recordar que los mejores resultados son aquellos que se aproximen o sean iguales a 1, lo cual representa departamentos más cuadrados.

Tabla 9b. Resumen del desempeño de los Algoritmos de Forma: 25 Dptos.

ALGORITMOS DE FORMA	EJERCICIOS PROPUESTOS			RENDIMIENTO PROMEDIO%
	1	2	3	
AHG	1,163	1,173	1,176	
AF-DC	1,085	1,129	1,060	
	-6,8%	-3,8%	-9,9%	6,8%
AF-B	1,157	1,085	1,078	
	-0,6%	-7,5%	-8,3%	5,5%
AF-LT1	1,152	1,195	1,125	
	-1,0%	1,9%	-4,3%	2,4%
AF-LT2	1,117	1,137	1,161	
	-4,0%	-3,1%	-1,2%	2,8%

Fuente: Elaboración propia

7.3 ANÁLISIS ENTRE EJERCICIOS

En el análisis para cada ejercicio se evidencia cuáles son los algoritmos que alcanzan los mejores valores en la relación de aspecto RA y a su vez los valores de la DTT más cercanos a la DTT planteada por el diseño original AHG, para cada uno de los escenarios establecidos:

7.3.1 EJERCICIO 1

En el ejercicio 1, se puede observar que el AF-DC obtuvo las mejores reducciones de la relación de aspecto RA para los escenarios de 12, 20 y 25 departamentos, mientras que el AF-LT2 lo hizo para el escenario de 16 departamentos, con los mejores rendimientos de 9,5% y 7,4% respectivamente. (Ver tabla 10a.)

Además, se puede ver que el AF-LT1 obtuvo los valores más cercanos a la DTT propuesta por el diseño original AHG para los escenarios de 12, 16 y 25 departamentos, mientras el AF-LT2 lo hizo en el escenario de 16 departamentos, con incrementos promedio de 2,2% y 3,4% respectivamente. (Ver tabla 10b)

Tabla 10a. Reducciones de RA en el ejercicio 1

No Dptos.	DISEÑO ORIGINAL	AF-DC	AF-B	AF-LT1	AF-LT2
12	1,223	1,085	1,132	1,149	1,150
16	1,229	1,329	1,276	1,121	1,081
20	1,204	1,060	1,096	1,120	1,111
25	1,163	1,085	1,157	1,152	1,117
	Rendimiento%	9,5%	5,2%	5,7%	7,4%

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10b. Valores de la DTT: ejercicio 1

No Dptos.	DISEÑO ORIGINAL	AF-DC	AF-B	AF-LT1	AF-LT2
12	1959	2066,24	2045,19	1990,31	2079,49
16	3108	3581,42	3520,6	3246,6	3194,4
20	5407	5625,72	5591,31	5530,62	5619,26
25	4603,5	4663,82	4669,82	4616,06	4628,91
	Incremento %	6,5%	5,6%	2,2%	3,4%

Fuente: Elaboración propia

7.3.2 EJERCICIO 2

En el ejercicio 2, se puede observar que el AF-DC obtuvo las mejores reducciones de la relación de aspecto RA para los escenarios de 12, 16 y 20 departamentos, mientras que el AF-B lo hizo para el escenario de 25 departamentos, con los mejores rendimientos de 5,1% y 2,6% respectivamente.

Tabla 11a. Reducciones de RA: ejercicio 2

No Dptos.	DISEÑO ORIGINAL	AF-DC	AF-B	AF-LT1	AF-LT2
12	1,202	1,179	1,182	1,189	1,220
16	1,141	1,079	1,136	1,080	1,144
20	1,191	1,081	1,202	1,209	1,176
25	1,173	1,129	1,085	1,195	1,137
	RENDIMIENTO%	5,1%	2,6%	2,5%	1,6%

Fuente: Elaboración propia

Además, se puede ver que los valores más cercanos a la DTT propuesta por el diseño original AHG, se lograron así: el AF-DC lo hizo en los escenarios de 16 y 25 departamentos, el LT2 para el escenario de 20 departamentos y el AF-B para el escenario de 12 departamentos, con incrementos promedio de 2,7%,2,9% y 3,9 respectivamente.

Tabla 11b. Valores de la DTT: ejercicio 2

No Dptos.	DISEÑO ORIGINAL	AF-DC	AF-B	AF-LT1	AF-LT2
12	990	1050,07	972,816	1009,53	989,739
16	2043,5	2096,85	2227,07	2157,01	2161,93
20	3307,5	3369,13	3436,31	3435,1	3258,51
25	85012	85238	85774,6	88203,5	88619,8
	Incremento%	2,7%	3,9%	3,8%	2,9%

Fuente: Elaboración propia

7.3.3 EJERCICIO 3

En el ejercicio 3, se puede observar que el AF-DC obtuvo las mejores reducciones de la relación de aspecto RA para los escenarios de 16, 20 y 25 departamentos, mientras que el AF-B lo hizo para el escenario de 12 departamentos, con los mejores rendimientos de 7,3% y 6% respectivamente.

Tabla 12a. Reducciones de RA: ejercicio 3

No Dptos.	DISEÑO ORIGINAL	AF-DC	AF-B	AF-LT1	AF-LT2
12	1,230	1,126	1,122	1,240	1,208
16	1,140	1,058	1,092	1,123	1,178
20	1,167	1,127	1,138	1,161	1,151
25	1,176	1,060	1,078	1,125	1,161
	RENDIMIENTO%	7,3%	6%	1,8%	2%

Fuente: Elaboración propia

Además, se puede ver que los valores más cercanos a la DTT propuesta por el diseño original AHG se lograron así: el AF-LT1 para los escenarios de 16, 20 y 25 departamentos, y el AF-LT2 lo hizo para el escenario de 12 departamentos, con incrementos promedio de 4,2% y 5,5% respectivamente.

Tabla 12b. Valores de la DTT: ejercicio 3

No Dptos.	DISEÑO ORIGINAL	AF-DC	AF-B	AF-LT1	AF-LT2
12	15991,5	17305,5	16572,5	16934,6	16300,8
16	1789,5	1844,34	1898,67	1830,76	1937,3
20	53534	54644,6	53447,3	53243	58124,4
25	71939000000	6,91532e+006	7,01268e+006	6,60599e+006	7,44342e+006
	Incremento%	4,3%	3,1%	4,2%	5,575%

Fuente: Elaboración propia

En general, se puede concluir que el algoritmo con un mayor rendimiento en la obtención de valores cercanos a 1 en la relación de aspecto RA fue el AF-DC en los 3 ejercicios aunque no para los mismos escenarios, asimismo llegó a mejorar en 9 oportunidades la RA original, seguido por el algoritmo AF-B quien obtuvo buenos valores para los ejercicios 2 y 3 en los escenarios de 25 y 12 departamentos respectivamente y finalmente el algoritmo AF-LT2 aportó el mejor valor en el ejercicio 1 para el escenario de 16 departamentos.

Por otro lado, los valores más cercanos en la DTT se obtienen por todos los algoritmos así: el AF-LT1 en 6 oportunidades siendo el mejor en el ejercicio 1, el AF-LT2 en 3 oportunidades aportando en todos los ejercicios por lo menos un valor muy cercano a 1, el AF-DC y el AF-B en 1 oportunidad cada uno.

7.4 TIEMPO COMPUTACIONAL

Los experimentos se realizaron para todos los escenarios en un computador Dell Inspiron, con procesador Intel(R) Core(TM) i3 inside™ y 4,00 GB de RAM. Los tiempos registrados (en segundos) para cada algoritmo, en cada escenario y para los tres ejercicios seleccionados de acuerdo con los parámetros establecidos en el estudio, se encuentran disponibles en el Anexo C.

Los tiempos computacionales obtenidos por el Programa AF no superaron los 2 segundos y a medida que se aumentaron el número de departamentos a distribuir, el tiempo de solución no presentó grandes variaciones. Los algoritmos AF-DC y AF-B no fueron superiores a 1 segundo en arrojar una solución para todos los escenarios seleccionados, por su parte los algoritmos AF-LT1 y AF-LT2 no fueron superiores a los 2 segundos en arrojar una solución para todos los escenarios seleccionados, lo cual evidencia que el programa emplea mayor tiempo dependiendo del algoritmo usado y no del número de departamentos a regularizar.

Como se pudo apreciar en el capítulo anterior, los incrementos promedios obtenidos por los algoritmos en términos de la DTT en todos los escenarios no superan el 7% respecto del valor original y los rendimientos en la reducción de la RA por parte de los cuatro algoritmos arrojó valores muy cercanos a 1, con lo cual podemos garantizar excelentes resultados por parte del programa AF implementando un tiempo computacional no superior a los 2 segundos.

CONCLUSIONES

- El problema de distribución de plantas ha sido estudiado por diferentes autores teniendo en cuenta los escenarios más cercanos a las necesidades planteadas por las empresas de manufactura y de servicios. Para este problema se partió de soluciones para instancias pequeñas por medio de criterios cualitativos y métodos exactos, luego cuando la cantidad de departamentos a distribuir era considerable y en vista de la complejidad del problema se optó por las heurísticas, actualmente se vuelve necesario el uso de metaheurísticas como alternativas de solución para alcanzar buenas distribuciones que garanticen la minimización de costos en un tiempo computacional razonable.
- Los resultados arrojados por los cuatro algoritmos en la regularización de los departamentos para los ejercicios considerados fueron los siguientes:
 - ✓ En general los incrementos porcentuales obtenidos variaron entre 0% y 16% con respecto al valor de referencia de la DTT, además se observa que todos los algoritmos mejoraron dichos valores en el escenario de 25 departamentos. (Ver anexo B).
 - ✓ Los valores más cercanos a la DTT se obtuvieron con los siguientes incrementos promedio: para el escenario de 12 departamentos variaron del 2,7% al 6,6%, para 16 departamentos variaron del 4,1% al 9,5% y en los escenarios de 20 y 25 departamentos variaron del 1,9% al 4,7% y de 1,6 al 4,1% respectivamente.
 - ✓ De igual forma se obtuvieron los valores más cercanos a 1 en la RA con los siguientes rendimientos promedio: para el escenario de 12 departamentos variaron de 3,1% a 7,2%, para 16 departamentos variaron de 2,8% a 6,9%,

para 20 departamentos variaron de 3% a 8,3%, y para 25 departamentos variaron de 2,4% a 6,8%.

- ✓ En el primer ejercicio considerado, el AF-DC obtuvo en 3 ocasiones los valores más cercanos a 1 para la RA, con un rendimiento porcentual promedio de 9,5%, pero obtuvo valores de DTT con respecto a los de referencia con un incremento porcentual promedio de 6,5%, sin embargo, el AF-LT1 obtuvo en 3 ocasiones los valores de DTT más cercanos a los de referencia con un incremento porcentual promedio de 2,2%, pero los valores obtenidos en la RA no estuvieron tan cerca a 1, con un rendimiento porcentual promedio de 5,7%, por lo cual ambos son buenas opciones de elección. Cabe resaltar que los algoritmos AF-LT2 y AF-B también obtuvieron valores interesantes para ser elegidos.

- ✓ En el segundo ejercicio considerado, el AF-DC obtuvo en 3 ocasiones los valores más cercanos a 1 para la RA, con un rendimiento porcentual promedio de 5,1%, y obtuvo en 2 ocasiones los valores de DTT más cercanos a los de referencia con un incremento porcentual promedio de 2,7% lo cual lo hace una muy buena opción de elección. Cabe resaltar que los algoritmos AF-B, AF-LT2 y AF-LT1 también obtuvieron valores interesantes para ser elegidos.

- ✓ En el tercer ejercicio considerado, el AF-DC obtuvo en 3 ocasiones los valores más cercanos a 1 para la RA, con un rendimiento porcentual promedio de 7,3%, y obtuvo valores de DTT con respecto a los de referencia con un incremento porcentual promedio de 4,3% muy parecido al incremento porcentual promedio 4,2% del AF-LT1 el cual obtuvo en 3 ocasiones los valores de DTT más cercanos a los de referencia, aunque los valores que obtuvo en la RA no estuvieron tan cerca a 1, con un rendimiento porcentual promedio de 1,8%, lo cual hace del AF-DC una muy buena opción de elección, seguido por el AF-B con un rendimiento

porcentual promedio de 6% para los valores obtenidos de RA, el AF-LT1 parece ser buena opción y de la misma forma el AF-LT2.

- Según los resultados obtenidos en los ejercicios considerados para este estudio, se puede concluir que el usuario puede elegir la mejor opción a su propio criterio ya que los valores de la DTT y RA que presentan los algoritmos propuestos son interesantes según las necesidades de la planta a distribuir.
- Se puede concluir que el programa desarrollado puede modificar satisfactoriamente las formas de los departamentos a partir de una distribución determinada en un tiempo de cálculo no superior a los 2 segundos para todos los escenarios seleccionados, lo cual evidencia que el programa emplea mayor tiempo dependiendo del algoritmo usado y no del número de departamentos a regularizar. Además, con los algoritmos propuestos, un diseño de planta que tiene una solución de buena calidad en términos de DTT o relación de aspecto, pero tiene departamentos de formas irregulares se puede convertir fácilmente en un diseño que mantiene o mejora una buena solución de calidad y en la que todos los departamentos son de formas regulares.

9. RECOMENDACIONES

- El usuario puede elegir en base a su propio criterio el algoritmo que se adapte mejor a las condiciones o necesidades de la planta a distribuir, para los ejercicios tenidos en cuenta y en los escenarios estudiados, considerando que al correr los cuatro algoritmos se obtienen valores muy cercanos entre los mismos, en un tiempo computacional que no supera los 2 segundos.
- El material y la herramienta presentes en este trabajo se desarrollaron con la seria intención de continuar la línea de investigación planteada por estudios previos en la Universidad Industrial de Santander, por ello, se recomienda su utilización en actividades de clase de las asignaturas involucradas con el tema.
- Este estudio puede extenderse en muchas direcciones, como por ejemplo, teniendo en cuenta el diseño de departamentos fijos tales como los ascensores, escaleras, puntos de entrada y de salida de los departamentos, así como los pasillos existentes entre los mismos, y plantas multinivel.
- Se propone la divulgación de los estudios realizados en este campo, en las empresas de la industria santandereana, para que se implementen las herramientas desarrolladas de una manera económica y asequible, como se propuso en este estudio desde un comienzo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Abbas Afshar, Honey-Bees Mating Optimization (HBMO) Algorithm. A New Heuristic Approach for Water Resources Optimization. *Water Resources Management*, 2006; p. 661–680. Disponible en: <http://www.springerlink.com/content/q31334641xq42qqx/> [citado el 6 de agosto de 2012]
- [2] ABBASS H.A., A Monogenous MBO Approach to Satisfiability. *Proc. of the International Conference on Computational Intelligence for Modeling Control and Automation*; 2001. Disponible en: http://www.google.com.co/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0CEsQFjAA&url=http%3A%2F%2Fciteseerx.ist.psu.edu%2Fviewdoc%2Fdownload%3Fdoi%3D10.1.1.14.9327%26rep%3Drep1%26type%3Dpdf&ei=H10fUPyyOoaq6QGb4DwAQ&usg=AFQjCNFt_iKCPzA_cWIYUv-AA5Qvhydq3Q&sig2=IXxjOBtwy4BJU21-ADh1Bw [citado el 6 de agosto de 2012]
- [3] Alan R. McKendall Jr., Artak Hakobyan, Heuristics for the dynamic facility layout problem with unequal-area departments *European Journal of Operational Research*, Volume 201, Issue 1, 16 February 2010, Pages 171-182. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0377221709001246> [citado el 6 de agosto de 2012]
- [4] Armour, G. C., & Buffa, E. S. (1963). A heuristic algorithm and simulation approach to relative allocation of facilities. *Management Science*, 9(2), 294–300. Disponible en: <http://www.jstor.org/discover/10.2307/2627408?uid=3737808&uid=2&uid=4&sid=21101131886947> [citado el 6 de agosto de 2012]
- [5] Azadivar, F., & Wang, J. (2000). Facility layout optimization using simulation and genetic algorithms. *International Journal of Production Research*, 38(17), 4369–4383. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540050205154> [citado el 6 de agosto de 2012]
- [6] Calderón, E.V. y Duarte, M.T., 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, (Tesis Pregrado); Universidad Industrial de Santander, 2010.
- [7] Chase, R.B., Jacobs, R., y Aquilano, N.J., Administración de la producción y operaciones: Para una ventaja competitiva. 10 ed. México: McGraw Hill, 1997; p. 206 – 239. Disponible en: <http://www.casadellibro.com/libro-administracion-de-la-produccion-y-operaciones-para-una-ventaja-co-mpetitiva-incluye-cd-rom/9789701044681/1022806> [citado el 6 de agosto de 2012]
- [8] Chwif, L., Pereira Barretto, M.R. y Moscato, L.A., A solution to the facility layout problem using simulated annealing. En: *Computers en Industry*. Vol. 2, No. 36 (1998); p. 125-132 Disponible en: http://pessoal.utfpr.edu.br/lcar/arquivos/Chwif_CII_1998.pdf [citado el 6 de agosto de 2012]

- [9] Drira, A., Pierreval, H., y Hajri-Gabouj S. (2007). "Facility layout problems: A Survey". ELSEVIER Annual Reviews in Control 31, 255-267. Disponible en: http://gavilan.uis.edu.co/~garavito/pdfs/Flp_Asurvey.pdf [citado 27 de agosto de 2012].
- [10] Evans, G. W., Wilhlem, M. R., & Karwowsky, W. (1987). A layout design heuristic employing the theory of fuzzy sets. International Journal of Production Research, 25, 1431-1450.
Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207548708919924> [citado el 6 de agosto de 2012]
- [11] Glover, F., "Future paths for integer programming and links to artificial intelligence". Computers & Operations Research. Vol. 3, No. 1 (1986); pg. 533 – 549. Disponible en: <http://dl.acm.org/citation.cfm?id=15311> [citado el 6 de agosto de 2012]
- [12] Glover, F., "Tabu Search: A Tutorial". INTERFACES, Vol. 20, No. 4, July-August 1990, pp. 74-9429. Disponible en: <http://interfaces.journal.informs.org/content/20/4/74.abstract> [citado el 6 de agosto de 2012]
- [13] GUEREQUETA, R. y VALLECILLO, A. Técnicas de diseño de algoritmos. 2Ed. Publicaciones de la Universidad de Málaga, 2000; Capítulo 7.
- [14] Heragu, S. S. (1997). Facilities design. Boston: BWS. Disponible en: <http://www.amazon.com/gp/search?index=books&linkCode=qs&keywords=0595359388> [citado el 6 de agosto de 2012]
- [15] Holland, J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems, The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975. Disponible en: <http://www.amazon.com/Adaptation-Natural-Artificial-Systems-Introductory/dp/0262581116> [citado el 6 de agosto de 2012]
- [16] Jae-Gon Kim and Marc Goetschalckx. (2003), an integrated design Algorithm for Detailed Layouts Based on the Contour Distance, article. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540412331333432> [citado el 6 de agosto de 2012]
- [17] Kim, J-G. And Kim, Y-D., 1998, A Space Partitioning Method for Facility Layout Problems with Shape Constraints, II E Transactions, 30, 947-957. Disponible en: <http://www.springerlink.com/content/f71w1upu95ulxkha/> [citado el 6 de agosto de 2012]
- [18] Kim, J-G. And Kim, Y-D., 2000, Layout planning for facilities with fixed shapes and I/O points. International Journal of Production Research, 38, 4635-4653. Disponible en: <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00207540050205550#preview> [citado el 6 de agosto de 2012]
- [19] Kochhar, J.S., Heragu, S.S. and Foster, B., A Genetic Algorithm for Unequal Area Facility Layout Problem," Computers and Operations Research, 25, 583-594, 1998. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054897001007> [citado el 6 de agosto de 2012]

[20] KOMARUDIN, KUAN YEOW, WONG., Applying Ant System for solving Unequal Area Facility Layout Problems. European Journal of Operational Research. Vol. 202, 2010; p. 730–746.

[21] Konz, S., Diseño de Instalaciones Industriales. Primera Edición. México D.F: Editorial Limusa-Noriega Editores S.A., 2007. Capítulo 3.

[22] Koopmans, T.C. y Beckmann, M, Assignment problems and the location of economic activities. En: Econometría Vol. 1, No. 25 (1957); p. 53-76. Disponible en: http://athens.src.uchicago.edu/jenni/atbarbar/assignment_references/Koopmans_Beckmann_ECA57_Assignment%20Problems%20and%20the%20Location%20of%20Economic%20Activities.pdf [citado el 6 de agosto de 2012]

[23] Kyu-Yeul Lee, Seong-Nam Han, Myung Roh (2003), An improved genetic algorithm for facility layout problems having inner structure walls and passages, Computers & Operations Research, 30, 117–138. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305054801000855> [citado el 6 de agosto de 2012]

[24] Lee, G-C. And Kim, Y-D. (2000), Algorithms for Adjusting Shapes of Departments in Block Layouts on the Grid-based Plane, Omega, The International Journal of Management Science, 28, 111-122. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0305048399000341> [citado el 6 de agosto de 2012]

[25] Lee, Y. H., & Lee, M. H. (2002). A shape-based block layout approach to facility layout problems using hybrid genetic algorithm. Computers & Industrial Engineering, 42, 237–248. Disponible en Portal: http://www.researchgate.net/publication/222785850_A_shape-based_block_layout_approach_to_facility_layout_problems_using_hybrid_genetic_algorithm [citado el 6 de agosto de 2012]

[26] Lieberman, G. y Hillier, F., Introducción a la Investigación de Operaciones, Octava edición. México D.F: McGraw-hill, 2006, capítulo 13: Metaheurística. Disponible en: <http://elbloggerperu.blogspot.com/2010/03/introduccion-la-investigacion-de.html> [citado el 6 de agosto de 2012]

[27] MELLER, R.D., CHEN, W., SHERALI, H.D., Applying the sequence-pair representation to optimal facility layout designs. Operations Research Letters. Vol. 35, No. 5, 2007; p. 651–659. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167637706001222> [citado el 6 de agosto de 2012]

[28] MELLER, R.D., GAU, K.Y., The facility layout problem: Recent and emerging trends and perspectives. Journal of Manufacturing Systems. Vol. 15, No. 5, 1996; p. 351–366. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0278612596841987> [citado el 6 de agosto de 2012]

[29] Meller, R.D., Narayan, V., y Vence, P.H., Optimal facility layout design. En: operations research letters. Vol. 5, No. 23 (1999); p. 117-127. Disponible en:

<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167637798000248> 0278612596841987
[citado el 6 de agosto de 2012]

[30] Muther, R. Systematic layout planning. Second Edition. Boston: Cahners Books, 1973.

[31] Optimization Problems: Simulated Annealing. High performance Computing II. Lecture 38. April 26, 2002.
Disponible: <http://www.physics.buffalo.edu/phy516/Files/Topic6/apr26.pdf> [citado 27 de agosto de 2012].

[32] Palacios, M.M. y Jaimes T. C., Solución del problema de distribución de plantas (FLP) para instalaciones de áreas desiguales mediante un algoritmo híbrido genético. (Tesis Pregrado); Universidad Industrial de Santander, 2011.

[33] QAPLIB-A Quadratic Assignment Problem Library. Disponible: <http://www.seas.upenn.edu/qaplib/inst.html> [citado: 27 de agosto de 2012].

[34] QuadraticAssignmentProblem.
Disponible: <http://www.cs.berkeley.edu/~ejr/GSI/cs267-s04/homework-0/results/sonesh/>
[citado 27 de agosto 2012]

[35] Skorin-Kapov, J., "Tabu search applied to the quadratic assignment problem". ORSA J on computing. Vol. 2, (1990); pg 33 – 45.

[36] Tam, K.Y., Li "A simulated annealing algorithm for allocating space to manufacturing cells." International Journal of Production Research, 1992 30, 63-87.

[37] Tompkins, J. A., White, J. A., Bozer, Y. A., Frazelle, E. H., Tanchoco, J. M., & Trevino, J. (1996). Facilities planning. New York: Wiley.

ANEXO A
EJERCICIOS DE REFERENCIA
DATOS DE ENTRADA

1. LÍNEAS DE LLENADO UTILIZADAS EN EL AHG

1.1 ESCENARIOS DE 12, 16, 20, 25 DEPARTAMENTOS (ÁREA TOTAL 10X10)
EJERCICIOS 1, 2, 3

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

2. DISTRIBUCIONES ARROJADAS POR EL ALGORITMO HÍRIDO GENÉTICO

2.1 ESCENARIOS DE 12 DEPARTAMENTOS

EJERCICIO 1

Matriz de Solución AHG

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

Tiempo: 317.662

Distribución Propuesta:

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

EJERCICIO 2

Matriz de Solución AHG

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

Tiempo: 290.026

Distribución Propuesta:

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

EJERCICIO 3

Matriz de Solución AHG

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

10	10	9	9	2	1	1	1	1	1
10	10	9	9	1	1	1	1	1	1

Tiempo: 208.571

Distribución Propuesta:

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

2.2 ESCENARIOS DE 16 DEPARTAMENTOS

EJERCICIO 1

Matriz de Solución AHG

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

Tiempo: 1202.31

Distribución Propuesta:

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

EJERCICIO 2

Matriz de Solución AHG

9	9	13	13	13	13	13	13	14	14
9	9	2	2	2	5	13	13	14	14
9	9	9	2	2	5	5	6	14	14
8	9	9	2	2	6	6	6	14	14

8	8	8	11	7	15	15	16	14	14
8	8	8	11	11	4	16	16	12	12
10	10	10	3	3	4	4	4	12	12
10	10	10	10	4	4	4	4	1	1
10	10	10	10	1	1	1	1	1	1
10	10	10	10	1	1	1	1	1	1

Tiempo: 819.572

Distribución Propuesta:

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

EJERCICIO 3

Matriz de Solución AHG

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

Tiempo: 796.683

Distribución Propuesta:

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

2.3 ESCENARIOS DE 20 DEPARTAMENTOS

EJERCICIO 1

Matriz de Solución AHG

13	13	4	4	4	4	4	4	1	1
13	13	4	4	6	17	17	17	1	1

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

Tiempo: 6877.99

Distribución Propuesta:

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

EJERCICIO 2

Matriz de Solución AHG

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

Tiempo: 12893.8

Distribución Propuesta:

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

3.3 EJERCICIO 3

3.3.1 Solución Propuesta por el AHG

Matriz de Solución AHG

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

Tiempo: 5781.39

Distribución Propuesta:

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

2.4 ESCENARIOS DE 25 DEPARTAMENTOS

EJERCICIO 1

Matriz de Solución AHG

13	13	21	21	21	21	21	6	6	
13	13	17	17	17	16	16	16	6	6
13	13	13	17	17	23	23	23	20	20
4	4	13	24	24	5	5	5	20	11
4	4	4	10	10	7	3	3	11	11
19	19	19	10	15	25	25	25	14	14
19	8	8	9	15	22	22	22	14	14
19	8	8	9	12	12	12	12	2	2
19	8	9	9	18	18	18	1	1	2
8	8	9	9	18	18	18	18	1	2

Tiempo: 24250.9

Distribución Propuesta:

13	4	19	8	9	15	10	24	17	21	16	23	5	7	3	25	22	12	18	1	2	14	11	20	6
----	---	----	---	---	----	----	----	----	----	----	----	---	---	---	----	----	----	----	---	---	----	----	----	---

EJERCICIO 2

Matriz de Solución AHG

4	4	19	19	19	19	19	19	18	18
4	4	14	14	14	20	20	20	18	18
4	6	6	25	14	1	1	1	18	18
17	6	6	25	25	11	24	24	18	12
17	17	17	15	15	11	11	16	12	12
13	13	17	23	23	3	16	16	12	5
13	8	8	22	23	3	7	2	5	5
13	8	8	22	21	2	2	2	9	9
13	13	8	22	21	21	21	10	9	9
13	13	8	8	21	21	10	10	9	9

Tiempo: 39849.5

Distribución Propuesta:

4	6	17	13	8	22	23	15	25	14	19	20	1	24	11	16	3	7	2	21	10	9	5	12	18
---	---	----	----	---	----	----	----	----	----	----	----	---	----	----	----	---	---	---	----	----	---	---	----	----

EJERCICIO 3

Matriz de Solución

6	6	12	7	16	16	16	15	5	5
6	6	12	12	12	3	3	15	5	9
14	14	14	24	24	25	25	25	9	9
10	10	14	20	20	23	23	23	9	9
10	11	11	1	20	2	2	2	18	9
4	4	11	1	1	21	21	2	18	18
4	19	19	13	13	21	21	21	18	18
4	19	13	13	17	17	17	21	18	18
4	19	13	13	17	22	22	8	8	8
19	19	13	13	17	22	8	8	8	8

Tiempo: 10325.7

Distribución Propuesta:

6	14	10	11	4	19	13	1	20	24	12	7	16	15	3	25	23	2	21	17	22	8	18	9	5
---	----	----	----	---	----	----	---	----	----	----	---	----	----	---	----	----	---	----	----	----	---	----	---	---

3. UNIDADES DE ÁREA UTILIZADAS EN EL AHG Y EN LOS ALGORITMOS DE FORMA

3.1 ESCENARIO DE 12 DEPARTAMENTOS (EJERCICIOS 1, 2, 3)

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

3.2 ESCENARIO DE 16 DEPARTAMENTOS (EJERCICIOS 1, 2, 3)

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

3.3 ESCENARIO DE 20 DEPARTAMENTOS (EJERCICIOS 1, 2, 3)

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

3.4 ESCENARIO DE 25 DEPARTAMENTOS (EJERCICIOS 1, 2, 3)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25
3	4	2	5	3	4	1	7	6	3	3	4	8	4	2	3	5	7	6	3	6	3	3	2	3

4. MATRIZ DE FLUJOS UTILIZADAS EN EL AHG Y EN LOS ALGORITMOS DE FORMA

4.1 ESCENARIO DE 12 DEPARTAMENTOS

EJERCICIO 1 [Had12]

0	3	4	6	8	5	6	6	5	1	4	6
0	0	6	3	7	9	9	2	2	7	4	7
0	0	0	2	6	4	4	4	2	6	3	6
0	0	0	0	5	5	3	3	9	4	3	6
0	0	0	0	0	4	3	4	5	7	6	7
0	0	0	0	0	0	8	5	5	5	7	5
0	0	0	0	0	0	0	6	8	4	6	7
0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	5	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	5	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

EJERCICIO 2 [Nug12]

0	5	2	4	1	0	0	6	2	1	1	1
0	0	3	0	2	2	2	0	4	5	0	0
0	0	0	0	0	0	0	5	5	2	2	2
0	0	0	0	5	2	2	10	0	0	5	5
0	0	0	0	0	10	0	0	0	5	1	1
0	0	0	0	0	0	5	1	1	5	4	0
0	0	0	0	0	0	0	10	5	2	3	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	10	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

EJERCICIO 3 [Tai12a]

0	21	95	82	56	41	6	25	10	4	63	6
0	0	44	40	75	79	0	89	35	9	1	85
0	0	0	84	12	0	26	91	11	35	82	26
0	0	0	0	69	56	86	45	91	59	18	76
0	0	0	0	0	39	18	57	36	61	36	21
0	0	0	0	0	0	71	11	29	82	82	6
0	0	0	0	0	0	0	71	8	77	74	30
0	0	0	0	0	0	0	0	89	76	76	40
0	0	0	0	0	0	0	0	0	93	56	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	50	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	36
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.2 ESCENARIO 16 DEPARTAMENTOS

EJERCICIO 1 [Had16]

0	3	4	6	8	5	6	6	5	1	4	6	1	5	4	5
0	0	6	3	7	9	9	2	2	7	4	7	9	6	3	2
0	0	0	2	6	4	4	4	2	6	3	6	5	6	2	6
0	0	0	0	5	5	3	3	9	4	3	6	3	4	7	8

0	0	0	0	0	4	3	4	5	7	6	7	7	3	3	3
0	0	0	0	0	0	8	5	5	5	7	5	1	8	5	4
0	0	0	0	0	0	0	6	8	4	6	7	1	8	5	6
0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	5	3	7	5	9	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	5	2	4	5	4	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	7	5	6	5	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	6	5	1	8
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	5	4	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	7	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

EJERCICIO 2 [Nug16a]

0	0	5	0	5	2	10	3	1	5	5	5	0	0	5	4
0	0	3	10	5	1	5	1	2	4	2	5	0	10	10	3
0	0	0	2	0	5	2	4	4	5	0	0	0	5	1	0
0	0	0	0	1	0	5	2	1	0	10	2	2	0	2	1
0	0	0	0	0	5	6	5	2	5	2	0	5	1	1	1
0	0	0	0	0	0	5	2	1	6	0	0	10	0	2	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	10	2	2	5	1
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	10	10	2	0	10	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	5	5	0	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	5	1	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	2	5	1	10
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	10	5	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

EJERCICIO 3 [Nug16b]

0	0	5	0	2	10	3	1	5	5	0	0	4	4	0	0
0	0	3	10	1	5	1	2	2	5	0	10	3	0	5	10
0	0	0	2	5	2	4	4	0	0	0	5	0	0	5	0

0	0	0	0	0	5	2	1	10	2	2	0	1	5	2	5
0	0	0	0	0	5	2	1	0	0	10	0	0	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	5	10	2	2	1	2	1	0
0	0	0	0	0	0	0	1	10	10	2	0	2	5	2	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	5	5	5	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	2	5	10	0	2	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	10	0	1	1	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	1	5	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.3 ESCENARIO 20 DEPARTAMENTOS

EJERCICIO 1 [Had20]

0	3	4	6	8	5	6	6	5	1	4	6	1	5	4	5	6	8	9	4
0	0	6	3	7	9	9	2	2	7	4	7	9	6	3	2	6	6	5	6
0	0	0	2	6	4	4	4	2	6	3	6	5	6	2	6	5	7	6	5
0	0	0	0	5	5	3	3	9	4	3	6	3	4	7	8	3	2	5	5
0	0	0	0	0	4	3	4	5	7	6	7	7	3	3	3	4	4	5	5
0	0	0	0	0	0	8	5	5	5	7	5	1	8	5	4	3	3	6	4
0	0	0	0	0	0	0	6	8	4	6	7	1	8	5	6	7	6	3	9
0	0	0	0	0	0	0	0	1	5	5	3	7	5	9	4	4	4	5	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	5	2	4	5	4	5	4	7	5	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7	7	5	6	5	5	6	10	6	7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	9	6	5	1	8	5	3	4	6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	5	4	5	4	6	8	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	7	4	5	2	3	7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	3	2	4	8	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	5	6	7	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	8	7	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	7	7
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

EJERCICIO 2 [Nug20]

0	0	5	0	5	2	10	3	1	5	5	5	0	0	5	4	4	0	0	1	
0	0	3	10	5	1	5	1	2	4	2	5	0	10	10	3	0	5	10	5	
0	0	0	2	0	5	2	4	4	5	0	0	0	5	1	0	0	5	0	0	
0	0	0	0	1	0	5	2	1	0	10	2	2	0	2	1	5	2	5	5	
0	0	0	0	0	5	6	5	2	5	2	0	5	1	1	1	5	2	5	1	
0	0	0	0	0	0	5	2	1	6	0	0	10	0	2	0	1	0	1	5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	10	2	2	5	2	1	0	10	
0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	10	10	2	0	10	2	5	2	2	10	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	3	5	5	0	5	0	0	0	2	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	0	5	1	0	0	5	5	2	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	2	5	1	10	0	2	2	5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	10	5	0	1	1	2	5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	1	0	0	0	5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	1	5	5	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	5	10	10	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	2	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

EJERCICIO 3 [Rou20]

0	78	22	43	86	8	99	5	32	89	19	69	33	89	46	66	57	7	17	26
0	0	2	81	24	83	92	36	31	73	96	5	57	2	39	29	26	58	45	80
0	0	0	38	50	32	66	73	6	8	68	16	21	1	70	17	54	17	50	20
0	0	0	0	53	75	40	8	63	30	30	10	47	36	34	37	33	36	78	92
0	0	0	0	0	41	29	68	52	83	51	52	57	75	10	37	98	42	58	14
0	0	0	0	0	0	68	44	0	56	82	23	84	90	8	4	63	69	75	65
0	0	0	0	0	0	0	46	64	79	4	64	85	99	29	1	39	80	94	93
0	0	0	0	0	0	0	0	74	19	56	34	11	54	52	75	3	28	6	74
0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	14	95	81	98	15	64	31	92	26	77
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	43	49	80	71	35	60	88	52	18	50
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	74	53	61	66	57	88	26	62
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	19	21	10	6	53	56	58	37
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	65	85	59	57	0	46
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61	96	58	8	17	43
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	93	61	78	90
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	79	21	95	3
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	61	60	20
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80	39
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	80
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

4.4 ESCENARIO 25 DEPARTAMENTOS

EJERCICIO 1[Nug25]

0	3	2	0	0	10	5	0	5	2	0	0	2	0	5	3	0	1	10	0	2	1	1	1	0	
0	0	4	0	10	0	0	2	2	1	5	0	0	0	0	0	1	6	1	0	2	2	5	1	10	
0	0	0	3	4	5	5	5	1	4	0	4	0	4	0	3	2	5	5	2	0	0	3	1	0	
0	0	0	0	0	0	2	2	0	6	2	5	2	5	1	1	1	2	2	4	2	0	2	2	5	
0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	2	0	5	0	2	1	0	2	
0	0	0	0	0	0	10	10	5	10	6	0	0	10	2	10	1	5	5	2	5	0	2	0	1	
0	0	0	0	0	0	0	1	3	5	0	0	2	4	5	10	6	0	5	5	5	0	5	5	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	10	2	5	2	0	3	0	0	0	4	0	5	0	5	2	2	5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	6	0	1	5	5	5	2	3	5	0	2	10	10	1	5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	2	1	0	0	0	0	6	6	4	5	3	2	2	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	4	2	1	0	6	2	1	5	0	0	1	5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	1	0	3	10	0	0	4	0	0	4	2	5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	5	0	1	0	5	0	0	0	5	1	1	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	2	0	2	5	0	5	2	5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	6	3	5	0	0	5
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	5	1	5	2	1	2	10	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	2	1	1	5	6	5	5	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	5	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5	4	4	5	0	2	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4	4	1	0	2	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	10	1
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	0	0	0	0	0	2
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

EJERCICIO 2 [Tai25a]

0	21	95	82	56	41	6	25	10	4	63	6	44	40	75	79	0	89	35	9	1	85	84	12	0
0	0	26	91	11	35	82	26	69	56	86	45	91	59	18	76	39	18	57	36	61	36	21	71	11
0	0	0	29	82	82	6	71	8	77	74	30	89	76	76	40	93	56	1	50	4	36	27	85	2
0	0	0	0	1	15	11	35	11	20	21	61	80	58	21	76	72	44	85	94	90	51	3	48	29
0	0	0	0	0	90	66	41	15	83	96	74	45	65	40	54	83	14	71	77	36	53	37	26	87
0	0	0	0	0	0	76	91	13	29	11	77	32	87	67	94	79	2	10	99	56	70	99	60	4
0	0	0	0	0	0	0	56	2	60	72	74	46	13	20	86	4	77	15	89	48	14	89	44	59
0	0	0	0	0	0	0	0	22	57	63	6	0	62	41	62	46	25	75	76	40	66	58	30	68
0	0	0	0	0	0	0	0	0	78	91	13	59	49	85	84	8	38	41	56	39	53	77	50	30
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	58	55	19	85	52	34	53	40	69	12	85	72	7	49	46
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	87	58	17	68	27	21	6	67	26	82	44	35	3	62
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	8	51	1	91	39	87	72	45	96	7	87	68	33
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	21	90	45	47	25	30	43	97	33	35	61
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	42	36	43	7	84	6	0	0	48	62	59
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29	94	82	29	3	3	51	67	39	15

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	66	42	23	62	62	28	76	66	82
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	98	35	15	17	77	44	26	76
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	86	60	62	62	83	91	57
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	62	36	2	2	43	65
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	37	49	61	5	34
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	53	96	82	48
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	28	31	75
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	95
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	7
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

EJERCICIO 3 [Tai25b]

0	4	9	3	362	0	1	5476	53	0	63	0	0	0	1	1	0	193	0	8	5713	16	7328	6602	0
0	0	0	224	0	0	639	18903	0	955	0	10	678	992	0	0	253	0	6557	13210	1	0	180	0	6
0	0	0	5	589	43	134	7	0	313	1	406	7280	11	17	121	1	35750	0	0	0	1079	99	12	0
0	0	0	0	9687	0	115	31	0	15485	47	1	116	0	2	1858	256	0	0	25326	0	25715	9	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	47827	0	2862	0	3839	1	41	45654	53531	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	125	16	31971	3001	0	13	389	539	0	0	0	12025	0	635	5806	4	2	0
0	0	0	0	0	0	0	3	44943	0	0	0	34014	0	0	0	0	8	33	1	0	0	2951	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	168	0	0	19	4	6	0	270	0	3231	0	9125	0	2	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	7	46004	0	1	0	37165	0	0	0	1610	0	0	283	7437
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6342	0	7	0	63	1	0	0	85	3	305	0	0	56045
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	39870	7	135	15740	276	28	0	0	0	50543	0	3346	4	5868
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	69	0	0	1	43	0	0	0	0	1	0	9364	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2314	0	0	0	0	2	1	0	0	31	5	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	27718	15	2989	0	3	0	5176	6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	48579	82	1	110	1	2871	610	16575	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	597	316	176	2	3876	0	17	1906	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4791	1769	4	0	0	30	22140	488
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2	218	8144	0	69	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	33	0	1	1	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	827	0	0	2
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	159	1	0	6
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	54970	18	13
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	27	1
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

ANEXO B
RESULTADOS GENERALES PROGRAMA AF

1. DISTANCIA TOTAL DE TRANSPORTE (DTT)

ESCENARIO DE 12 DEPARTAMENTOS

EJERCICIOS PROPUESTOS	DTT PLANTEADO AHG	DTT OBTENIDO POR AF	MEJOR ALGORITMO	INCREMENTO %
1	1959	1990,31	TL1	1,6
2	990	972,816	B	-1,7
3	15991,5	16300,8	TL2	1,9

ESCENARIO DE 16 DEPARTAMENTOS

EJERCICIOS PROPUESTOS	DTT PLANTEADO AHG	DTT OBTENIDO POR AF	MEJOR ALGORITMO	INCREMENTO %
1	3108	3194,4	TL2	2,8
2	2043,5	2096,85	DC	2,6
3	1789,5	1830,76	TL1	2,3

ESCENARIO 20 DEPARTAMENTOS

EJERCICIOS PROPUESTOS	DTT PLANTEADO AHG	DTT OBTENIDO POR AF	MEJOR ALGORITMO	INCREMENTO %
1	5407	5530,62	TL1	2,3
2	3307,5	3258,51	TL2	-1,5
3	53534	53243	TL1	-0,5

ESCENARIO DE 25 DEPARTAMENTOS

EJERCICIOS PROPUESTOS	DTT PLANTEADO AHG	DTT OBTENIDO POR AF	MEJOR ALGORITMO	INCREMENTO %
1	4603,5	4616,06	TL1	0,3
2	85012	85238	DC	0,3
3	71939000000	6,60599e+006	TL1	-8,1

DISTANCIA TOTAL DE TRANSPORTE (DTT) OBTENIDAS

No Dptos.	AF-DC	AF-B	AF-TL1	AF-TL2	EJERCICIO
12	2066,24	2045,19	1990,31	2079,49	1
	1050,07	972,816	1009,53	989,739	2
	17305,5	16572,5	16934,6	16300,8	3
16	3581,42	3520,6	3246,6	3194,4	1
	2096,85	2227,07	2157,01	2161,93	2
	1844,34	1898,67	1830,76	1937,3	3
20	5625,72	5591,31	5530,62	5619,26	1
	3369,13	3436,31	3435,1	3258,51	2
	54644,6	53447,3	53243	58124,4	3
25	4663,82	4669,82	4616,06	4628,91	1
	85238	85774,6	88203,5	88619,8	2
	6,91532e+006	7,01268e+006	6,60599e+006	7,44342e+006	3

PORCENTAJES DE INCREMENTO

No Dptos.	AF-DC	AF-B	AF-TL1	AF-TL2	EJERCICIO
12	5,5	4,4	1,6	6,2	1
	6,1	-1,7	2	0	2
	8,2	3,6	5,9	1,9	3
16	15,2	13,3	4,5	2,8	1
	2,6	9	5,6	5,8	2
	3,1	6,1	2,3	8,3	3
20	4	3,4	2,3	3,9	1
	1,9	3,9	3,9	-1,5	2
	2,1	-0,2	-0,5	8,6	3
25	1,3	1,4	0,3	0,6	1
	0,3	0,9	3,8	4,2	2
	-3,8	-2,5	-8,1	3,5	3

2. RELACIÓN DE ASPECTO (RA)

ESCENARIO DE 12 DEPARTAMENTOS

EJERCICIOS PROPUESTOS	RA PROPUESTA AHG	RA OBTENIDA POR AF	MEJOR ALGORITMO	INCREMENTO %
1	1,22311	1,0853	DC	-11,3
2	1,20161	1,17874	DC	-1,9
3	1,23002	1,12229	B	-8,8

ESCENARIO DE 16 DEPARTAMENTOS

EJERCICIOS PROPUESTOS	RA PROPUESTA AHG	RA OBTENIDA POR AF	MEJOR ALGORITMO	INCREMENTO %
1	1,22917	1,08133	TL2	-12,0
2	1,14149	1,07896	DC	-5,5
3	1,1401	1,05769	DC	-7,2

ESCENARIO 20 DEPARTAMENTOS

EJERCICIOS PROPUESTOS	RA PROPUESTA AHG	RA OBTENIDA POR AF	MEJOR ALGORITMO	INCREMENTO %
1	1,20425	1,05981	DC	-12,0
2	1,19145	1,08116	DC	-9,3
3	1,16703	1,12666	DC	-3,5

ESCENARIO DE 25 DEPARTAMENTOS

EJERCICIOS PROPUESTOS	RA PROPUESTA AHG	RA OBTENIDA POR AF	MEJOR ALGORITMO	INCREMENTO %
1	1,16348	1,0847	DC	-6,8
2	1,17317	1,08536	B	-7,5
3	1,17565	1,05962	DC	-9,9

RELACIONES DE ASPECTO (RA) OBTENIDAS

No Dptos.	AF-DC	AF-B	AF-TL1	AF-TL2	EJERCICIO
12	1,0853	1,13168	1,14904	1,1495	1
	1,17874	1,18178	1,1894	1,22038	2
	1,12568	1,12229	1,24033	1,20815	3
16	1,32882	1,27603	1,12084	1,08133	1
	1,07896	1,13618	1,08011	1,14387	2
	1,05769	1,09235	1,1229	1,17796	3
20	1,05981	1,09566	1,12038	1,11147	1
	1,08116	1,20153	1,20919	1,17591	2
	1,12666	1,13777	1,1611	1,15106	3
25	1,0847	1,15661	1,15215	1,11738	1
	1,12893	1,08536	1,1949	1,13666	2
	1,05962	1,07778	1,12522	1,16129	3

PORCENTAJES DE REDUCCIÓN

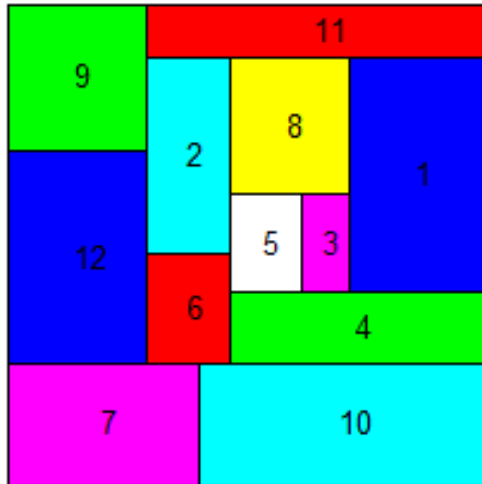
No Dptos.	AF-DC	AF-B	AF-TL1	AF-TL2	EJERCICIO
12	-11,3	-7,5	-6,1	-6	1
	-1,9	-1,7	-1	1,6	2
	-8,5	-8,8	0,8	-1,8	3
16	8,1	3,8	-8,8	-12	1
	-5,5	-0,5	-5,4	0,2	2
	-7,2	-4,2	-1,5	3,3	3
20	-12	-9	-7	-7,7	1
	-9,3	0,8	1,5	-1,3	2
	-3,5	-2,5	-0,5	-1,4	3
25	-6,8	-0,6	-1	-4	1
	-3,8	-7,5	1,9	-3,1	2
	-9,9	-8,3	-4,3	-1,2	3

2. DISTRIBUCIONES

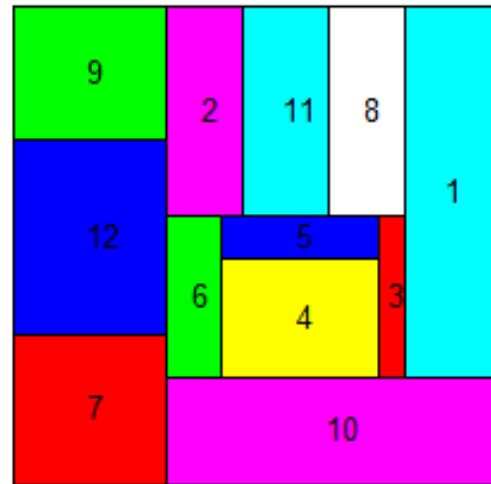
ESCENARIO 12 DEPARTAMENTOS

EJERCICIO 1

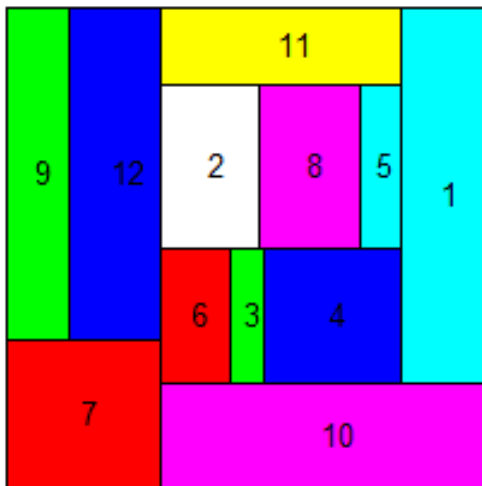
ALGORITMO DE FORMA CON
DISTANCIA ENTRE CENTROIDES



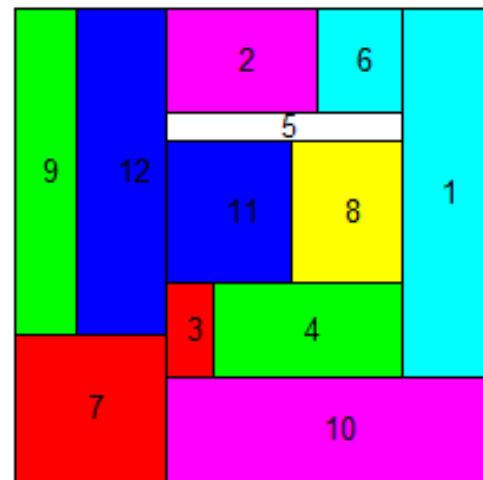
ALGORITMO DE FORMA
DE BUSQUEDA



ALGORITMO DE FORMA
DE LINEAS TRANSVERSALES 1

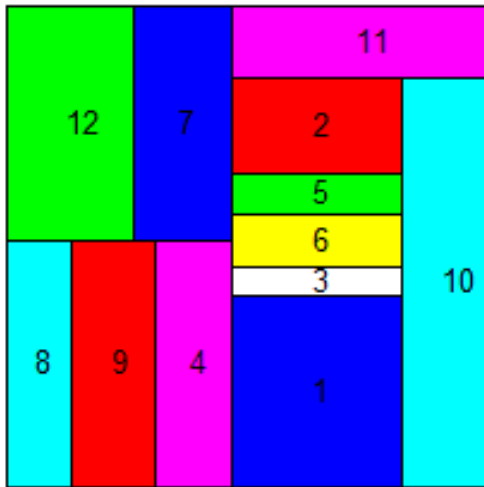


ALGORITMO DE FORMA
DE LINEAS TRANSVERSALES 2



EJERCICIO 2

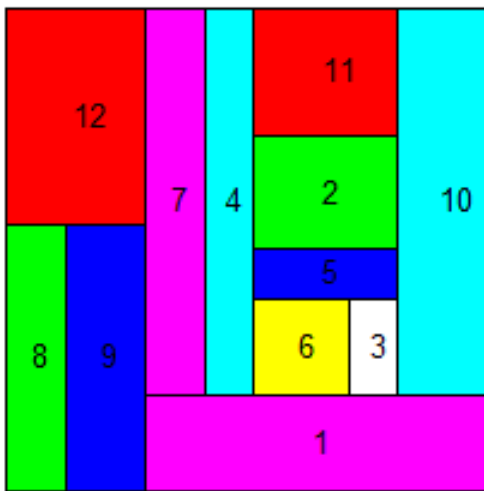
**ALGORITMO DE FORMA CON
DISTANCIA ENTRE CENTROIDES**



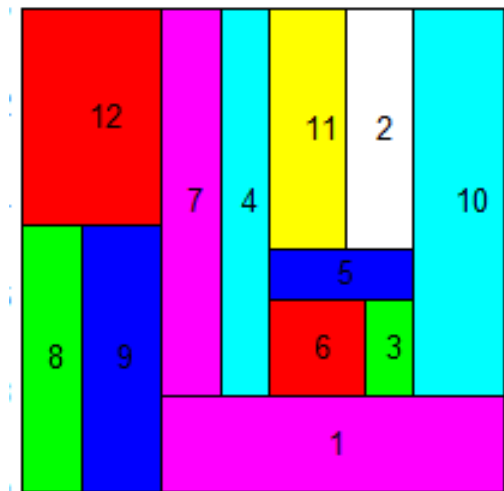
**ALGORITMO DE FORMA
DE BUSQUEDA**



**ALGORITMO DE FORMA
DE LINEAS TRANSVERSALES 1**

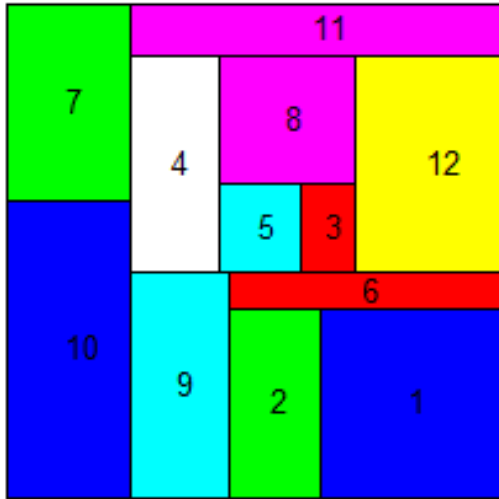


**ALGORITMO DE FORMA
DE LINEAS TRANSVERSALES 2**

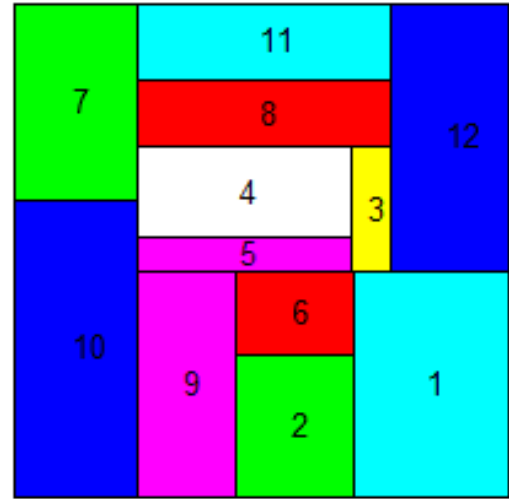


EJERCICIO 3

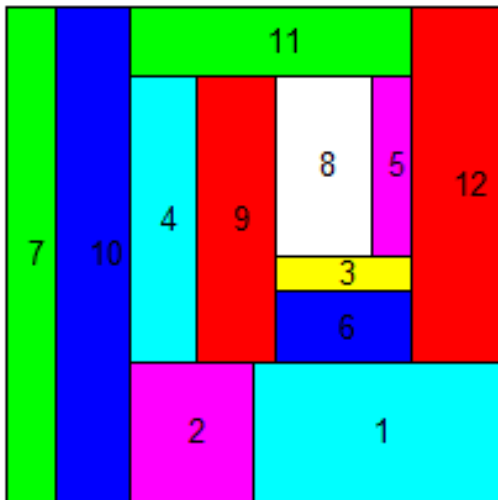
**ALGORITMO DE FORMA CON
DISTANCIA ENTRE CENTROIDES**



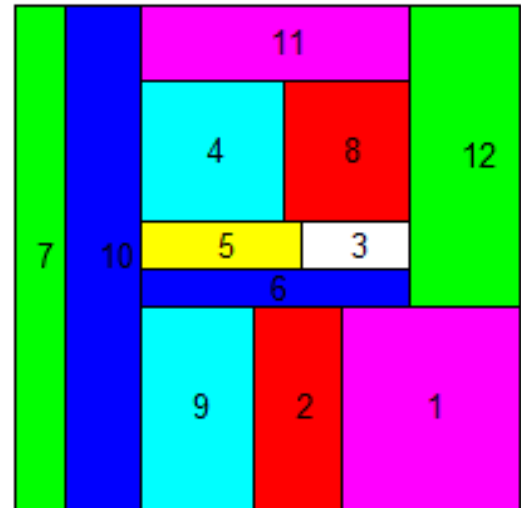
**ALGORITMO DE FORMA
DE BUSQUEDA**



**ALGORITMO DE FORMA
DE LINEAS TRANSVERSALES 1**



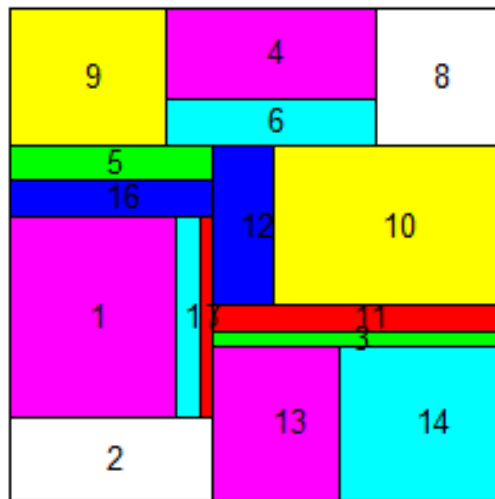
**ALGORITMO DE FORMA
DE LINEAS TRANSVERSALES 2**



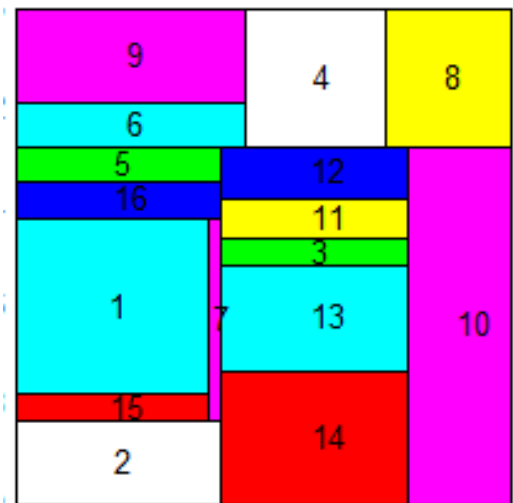
ESCENARIO DE 16 DPTOS

EJERCICIO 1

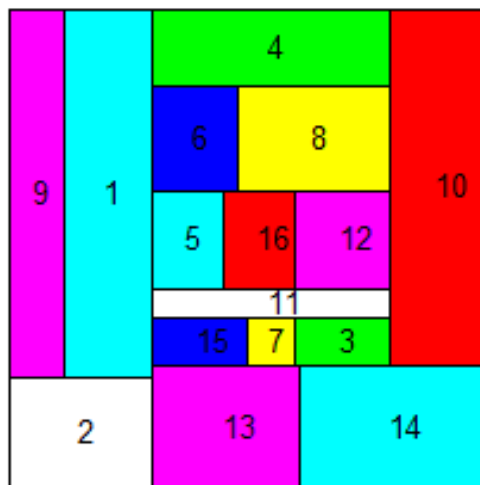
ALGORITMO DE FORMA CON DISTANCIA ENTRE CENTROIDES



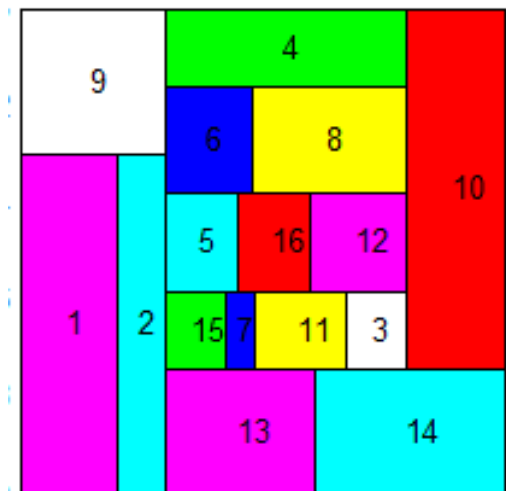
ALGORITMO DE FORMA DE BUSQUEDA



ALGORITMO DE FORMA DE LINEAS TRANSVERSALES 1

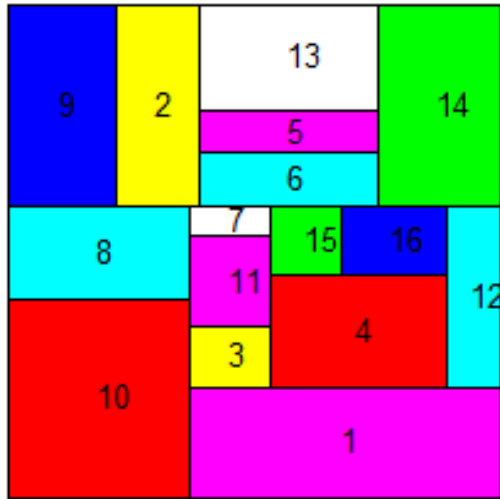


ALGORITMO DE FORMA DE LINEAS TRANSVERSALES 2

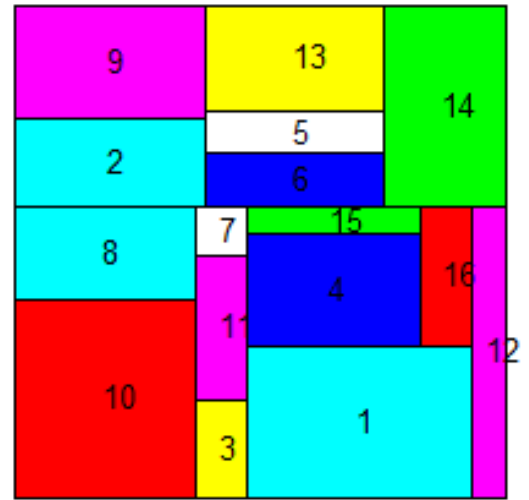


EJERCICIO 2

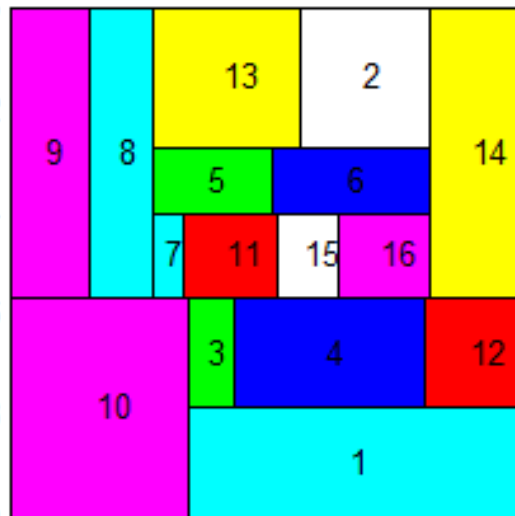
**ALGORITMO DE FORMA CON
DISTANCIA ENTRE CENTROIDES**



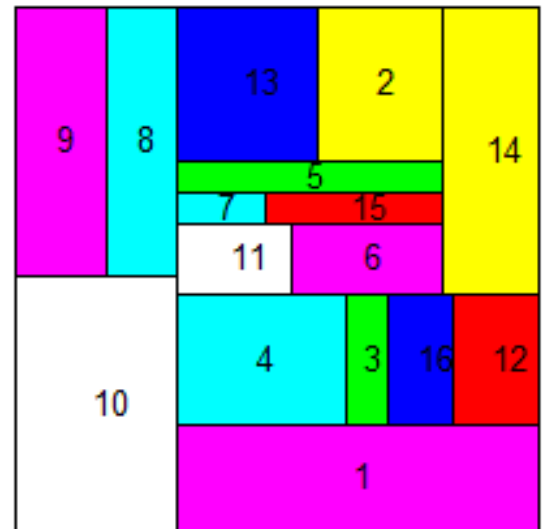
**ALGORITMO DE FORMA
DE BUSQUEDA**



**ALGORITMO DE FORMA
DE LINEAS TRANSVERSALES 1**

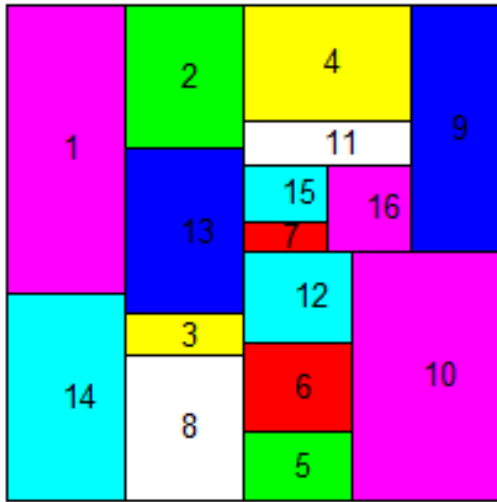


**ALGORITMO DE FORMA
DE LINEAS TRANSVERSALES 2**

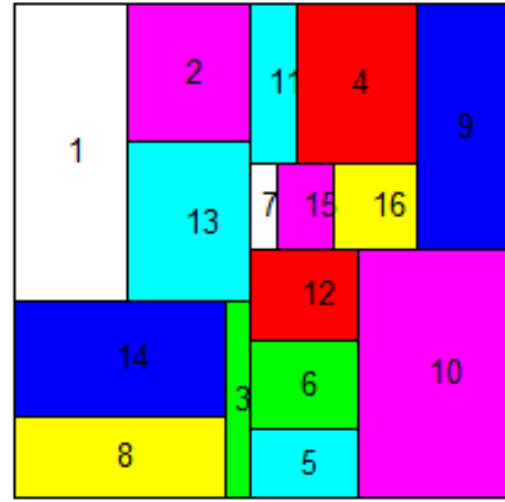


EJERCICIO 3

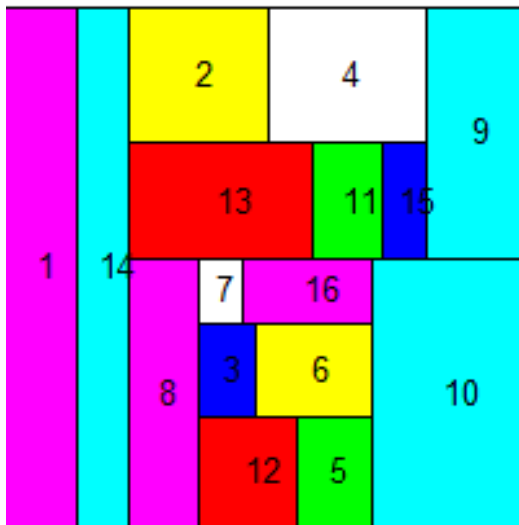
ALGORITMO DE FORMA CON
DISTANCIA ENTRE CENTROIDES



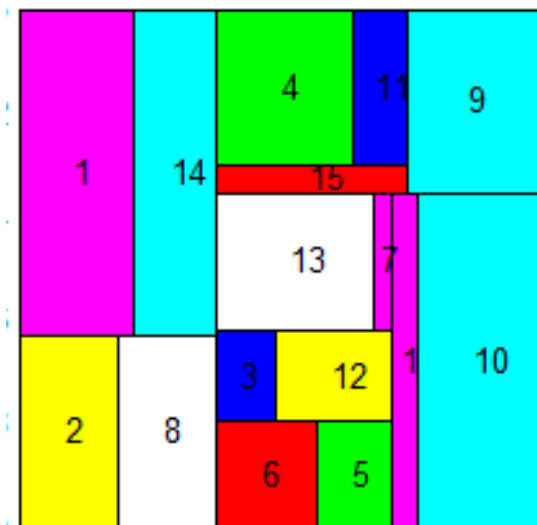
ALGORITMO DE FORMA
DE BUSQUEDA



ALGORITMO DE FORMA
DE LINEAS TRANSVERSALES 1



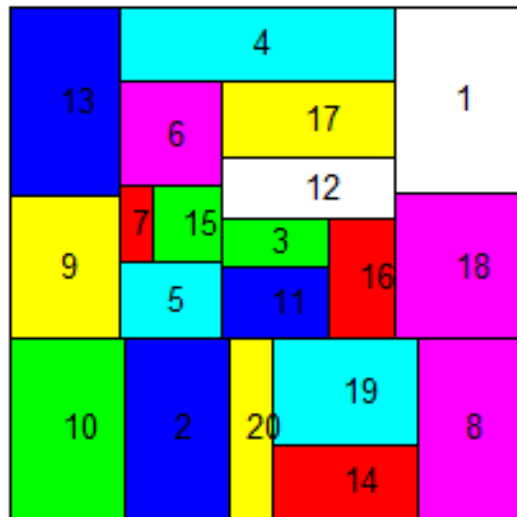
ALGORITMO DE FORMA
DE LINEAS TRANSVERSALES 2



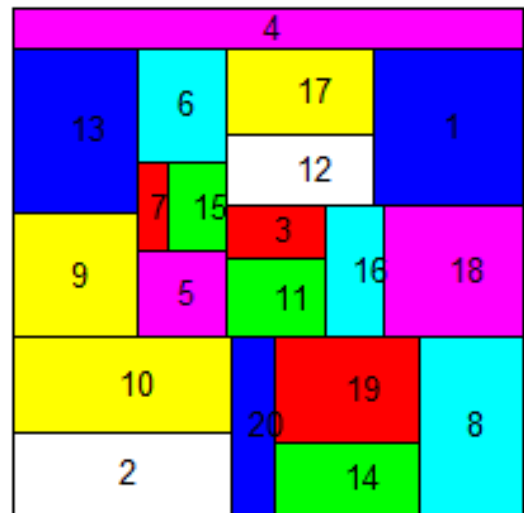
ESCENARIO DE 20 DPTOS

EJERCICIO 1

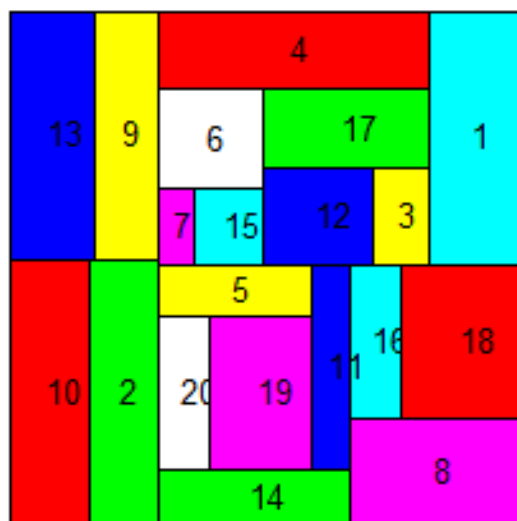
ALGORITMO DE FORMA CON DISTANCIA ENTRE CENTROIDES



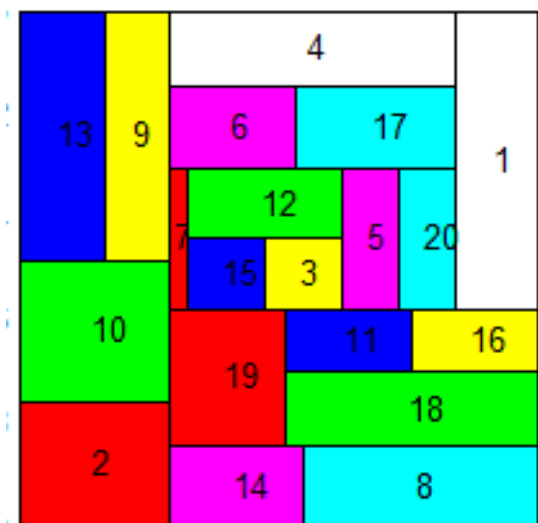
ALGORITMO DE FORMA DE BUSQUEDA



ALGORITMO DE FORMA DE LINEAS TRANSVERSALES 1

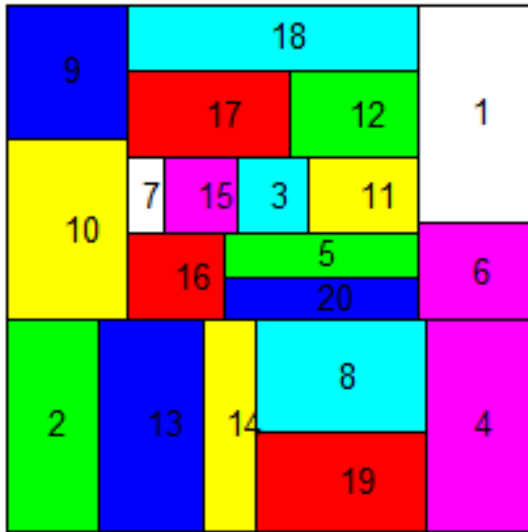


ALGORITMO DE FORMA DE LINEAS TRANSVERSALES 2

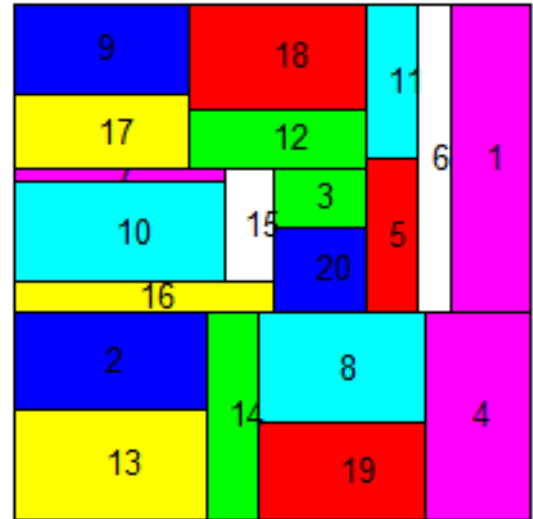


EJERCICIO 2

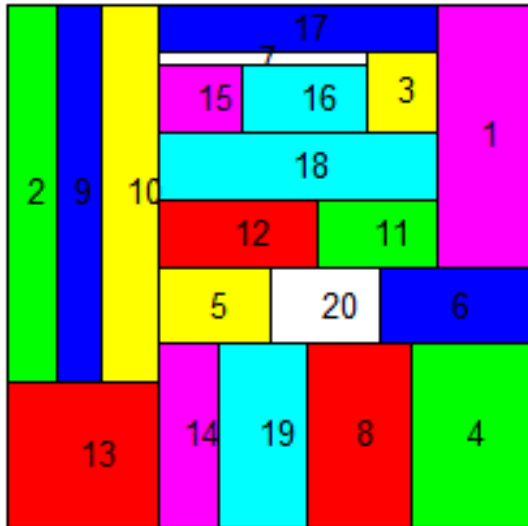
ALGORITMO DE FORMA CON
DISTANCIA ENTRE CENTROIDES



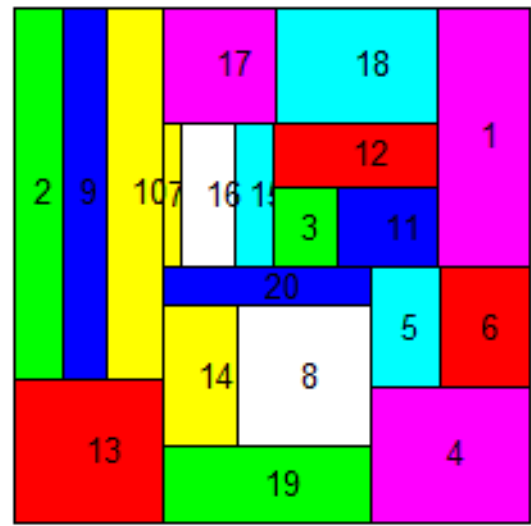
ALGORITMO DE FORMA
DE BUSQUEDA



ALGORITMO DE FORMA
DE LINEAS TRANSVERSALES 1

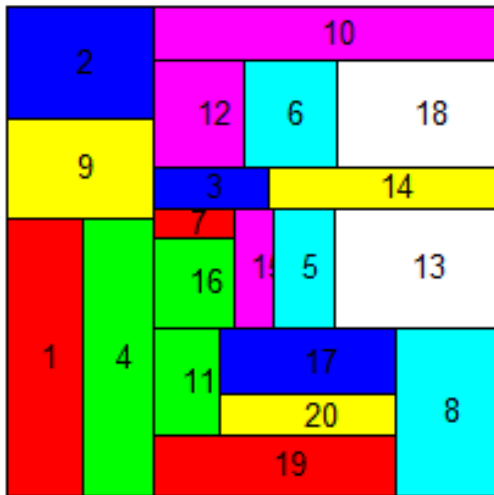


ALGORITMO DE FORMA
DE LINEAS TRANSVERSALES 2

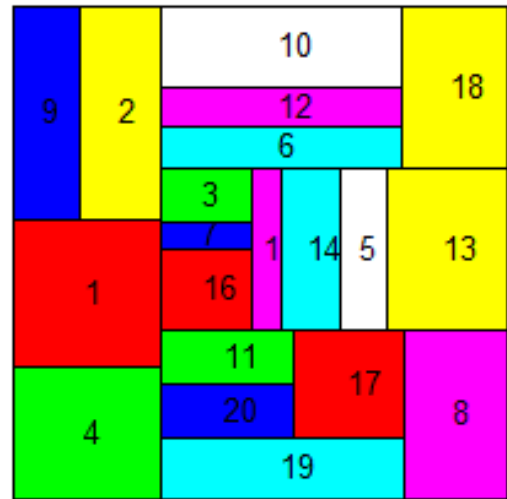


EJERCICIO 3

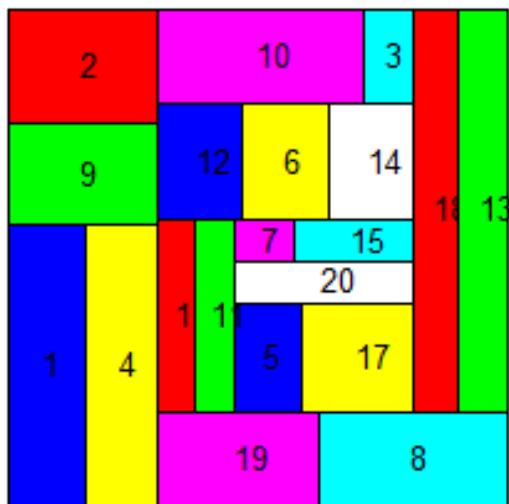
ALGORITMO DE FORMA CON DISTANCIA ENTRE CENTROIDES



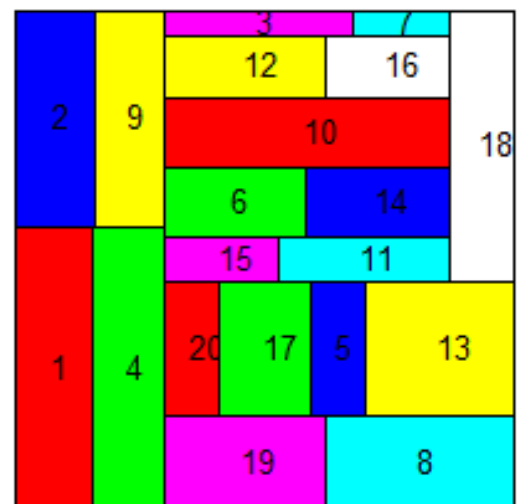
ALGORITMO DE FORMA DE BUSQUEDA



ALGORITMO DE FORMA DE LINEAS TRANSVERSALES 1



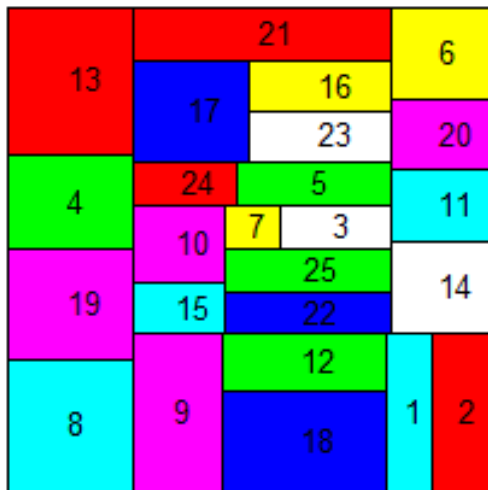
ALGORITMO DE FORMA DE LINEAS TRANSVERSALES 2



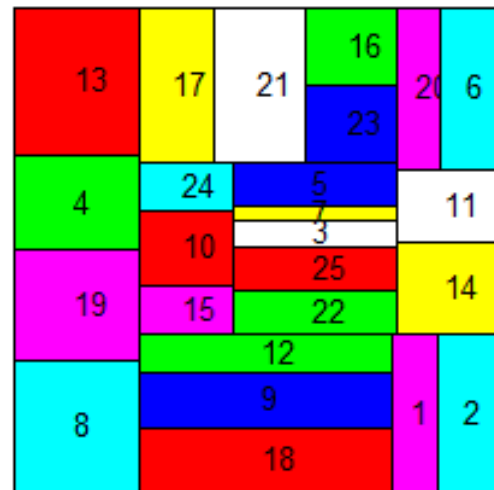
ESCENARIO DE 25 DPTOS

EJERCICIO 1

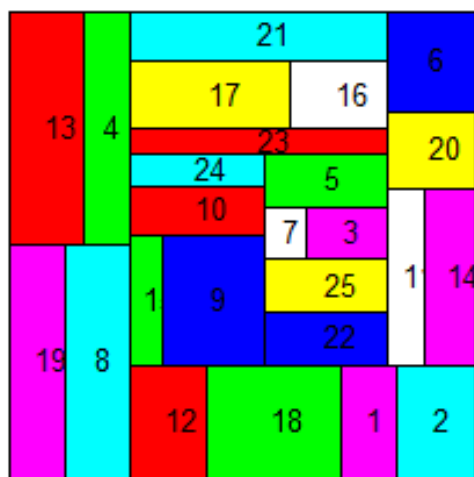
ALGORITMO DE FORMA CON DISTANCIA ENTRE CENTROIDES



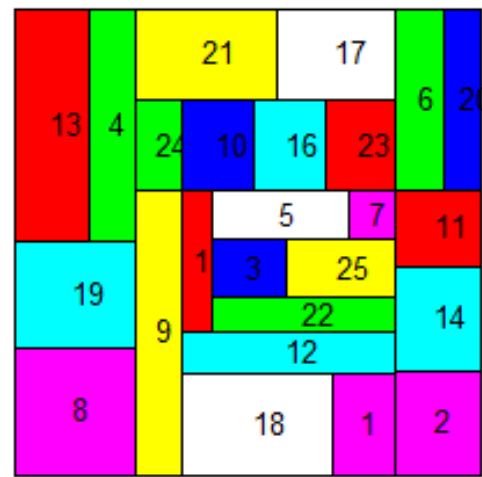
ALGORITMO DE FORMA DE BUSQUEDA



ALGORITMO DE FORMA DE LINEAS TRANSVERSALES 1



ALGORITMO DE FORMA DE LINEAS TRANSVERSALES 2

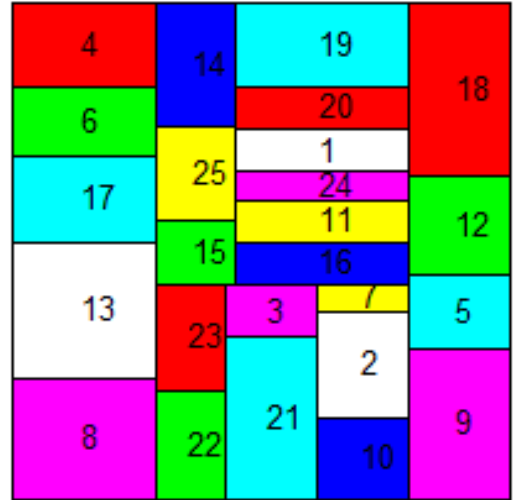


EJERCICIO 2

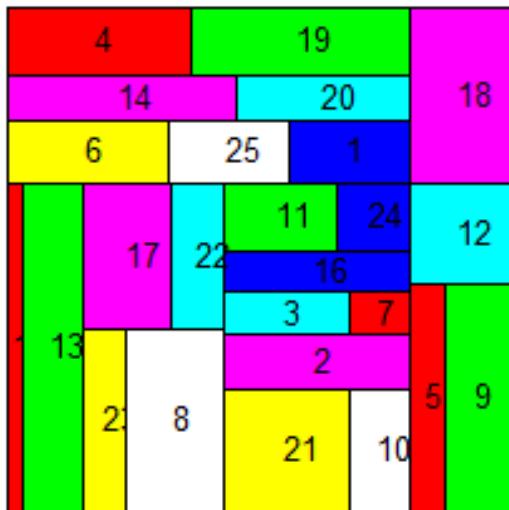
ALGORITMO DE FORMA CON DISTANCIA ENTRE CENTROIDES



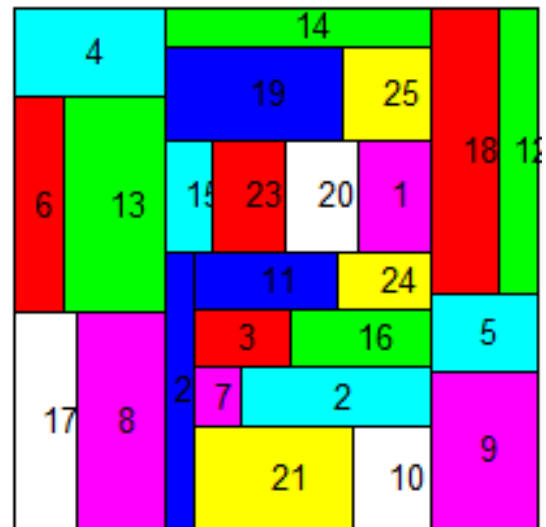
ALGORITMO DE FORMA DE BUSQUEDA



ALGORITMO DE FORMA DE LINEAS TRANSVERSALES 1

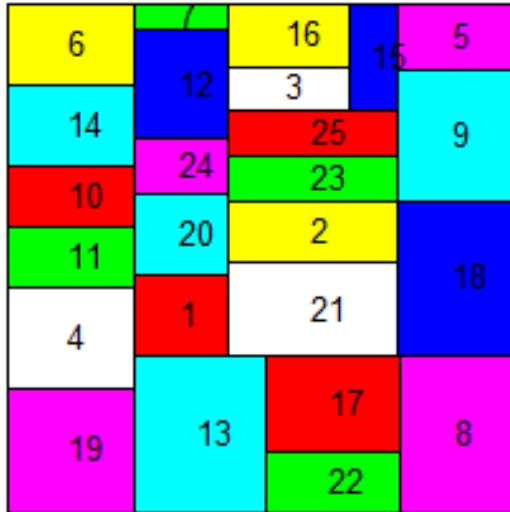


ALGORITMO DE FORMA DE LINEAS TRANSVERSALES 2

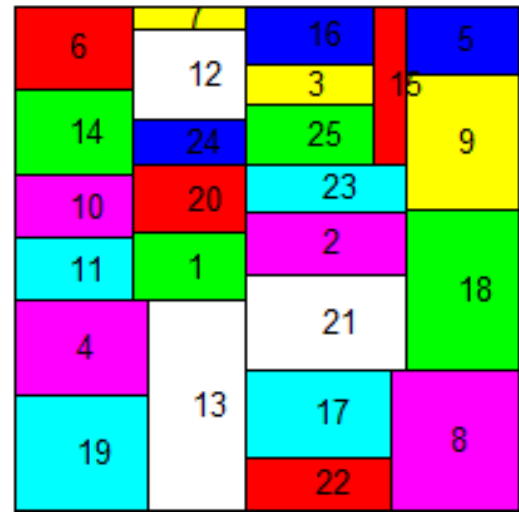


EJERCICIO 3

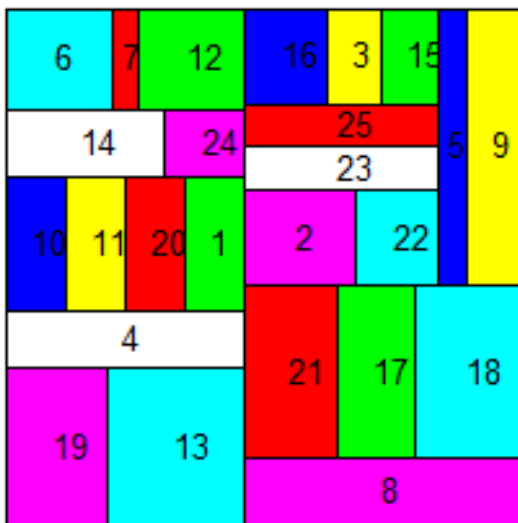
**ALGORITMO DE FORMA CON
DISTANCIA ENTRE CENTROIDES**



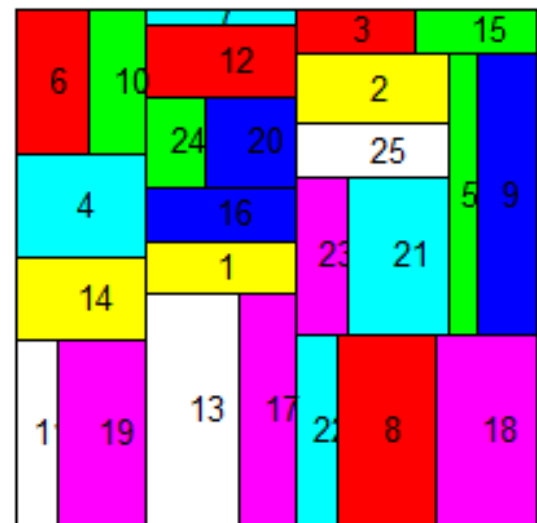
**ALGORITMO DE FORMA
DE BUSQUEDA**



**ALGORITMO DE FORMA
DE LINEAS TRANSVERSALES 1**



**ALGORITMO DE FORMA
DE LINEAS TRANSVERSALES 2**



ANEXO C
TIEMPOS COMPUTACIONALES

No Dptos.	AF-DC	AF-B	AF-TL1	AF-TL2	EJERCICIO
12	0,11203	0,31054	1,25192	1,41593	1
	0,101137	0,307727	1,30389	1,28943	2
	0,112881	0,309146	1,22056	1,3226	3
16	0,135646	0,471223	1,41193	1,35593	1
	0,153136	0,411654	1,71931	1,46033	2
	0,156314	0,379448	1,30867	1,2892	3
20	0,231108	0,554557	1,45406	1,56204	1
	0,176284	0,575179	1,52881	1,47021	2
	0,200777	0,544266	1,2825	1,39775	3
25	0,270087	0,74016	1,53161	1,45076	1
	0,259128	0,817323	1,56918	1,45695	2
	0,254915	0,854312	1,42894	1,40693	3

ANEXO D

RESULTADOS PARA EXPORTAR

ESCENARIO DE 12 DPTOS

EJERCICIO 1

AF – DC

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	8,563	3,567	2,875	4,870	1,035
2	3,797	3,158	1,727	4,052	1,092
3	6,632	4,987	0,986	2,029	1,066
4	7,330	6,751	5,339	1,498	1,209
5	5,400	4,987	1,479	2,029	1,013
6	3,797	6,342	1,727	2,316	1,011
7	2,000	8,750	4,000	2,500	1,028
8	5,893	2,552	2,464	2,841	1,003
9	1,467	1,534	2,933	3,068	1,000
10	7,000	8,750	6,000	2,500	1,097
11	6,467	0,566	7,067	1,132	1,449
12	1,467	5,284	2,933	4,432	1,021

AF - B

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	9,102	3,897	1,796	7,794	1,282
2	3,996	2,198	1,592	4,397	1,132
3	7,909	6,095	0,589	3,397	1,409
4	5,996	6,559	3,238	2,471	1,009
5	5,996	4,860	3,238	0,927	1,202
6	3,789	6,095	1,177	3,397	1,144
7	1,600	8,438	3,200	3,125	1,000
8	7,408	2,198	1,592	4,397	1,132
9	1,600	1,406	3,200	2,813	1,002
10	6,600	8,897	6,800	2,206	1,163
11	5,702	2,198	1,820	4,397	1,099
12	1,600	4,844	3,200	4,063	1,007

AF – TL1

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	9,102	3,897	1,796	7,794	1,282
2	4,230	3,298	2,060	3,397	1,031
3	4,987	6,395	0,715	2,798	1,242
4	6,774	6,395	2,859	2,798	1,000
5	7,762	3,298	0,883	3,397	1,236
6	3,915	6,395	1,430	2,798	1,057
7	1,600	8,438	3,200	3,125	1,000
8	6,291	3,298	2,060	3,397	1,031
9	0,655	3,438	1,309	6,875	1,364
10	6,600	8,897	6,800	2,206	1,163
11	5,702	0,799	5,004	1,599	1,167
12	2,255	3,438	1,891	6,875	1,216

AF – TL2

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	9,102	3,897	1,796	7,794	1,282
2	4,792	1,099	3,184	2,198	1,017
3	3,700	6,795	1,001	1,998	1,060
4	6,202	6,795	4,003	1,998	1,061
5	5,702	2,498	5,004	0,600	1,618
6	7,294	1,099	1,820	2,198	1,004
7	1,600	8,438	3,200	3,125	1,000
8	7,036	4,297	2,335	2,998	1,008
9	0,655	3,438	1,309	6,875	1,364
10	6,600	8,897	6,800	2,206	1,163
11	4,534	4,297	2,669	2,998	1,002
12	2,255	3,438	1,891	6,875	1,216

EJERCICIO 2

AF – DC

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	6,467	8,019	3,533	3,962	1,002
2	6,467	2,500	3,533	1,981	1,042
3	6,467	5,755	3,533	0,566	1,449
4	3,917	7,447	1,567	5,106	1,180
5	6,467	3,915	3,533	0,849	1,265
6	6,467	4,906	3,533	1,132	1,166
7	3,678	2,447	2,043	4,894	1,097
8	0,685	7,447	1,371	5,106	1,224
9	2,252	7,447	1,763	5,106	1,145
10	9,117	5,755	1,767	8,491	1,324
11	7,350	0,755	5,300	1,509	1,204
12	1,328	2,447	2,657	4,894	1,047

AF – B

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	6,600	8,158	3,800	3,684	1,000
2	6,600	3,026	3,800	1,842	1,066
3	6,600	6,053	3,800	0,526	1,530
4	2,350	5,745	4,700	1,702	1,132
5	6,600	4,342	3,800	0,789	1,325
6	6,600	5,263	3,800	1,053	1,213
7	2,350	1,064	4,700	2,128	1,080
8	2,350	7,340	4,700	1,489	1,170
9	2,350	9,043	4,700	1,915	1,102
10	9,250	5,000	1,500	10,000	1,485
11	6,600	1,053	3,800	2,105	1,044
12	2,350	3,511	4,700	2,766	1,035

AF – TL1

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	6,450	9,014	7,100	1,972	1,212
2	6,637	3,847	2,989	2,342	1,007
3	7,633	7,025	0,996	2,007	1,062
4	4,644	4,014	0,996	8,028	1,595
5	6,637	5,519	2,989	1,004	1,153
6	6,139	7,025	1,993	2,007	1,000
7	3,523	4,014	1,246	8,028	1,466
8	0,634	7,241	1,269	5,517	1,282
9	2,084	7,241	1,631	5,517	1,191
10	9,066	4,014	1,868	8,028	1,278
11	6,637	1,338	2,989	2,676	1,002
12	1,450	2,241	2,900	4,483	1,024

AF – TL2

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	6,450	9,014	7,100	1,972	1,212
2	7,434	2,509	1,395	5,018	1,212
3	7,633	7,025	0,996	2,007	1,062
4	4,644	4,014	0,996	8,028	1,595
5	6,637	5,519	2,989	1,004	1,153
6	6,139	7,025	1,993	2,007	1,000
7	3,523	4,014	1,246	8,028	1,466
8	0,634	7,241	1,269	5,517	1,282
9	2,084	7,241	1,631	5,517	1,191
10	9,066	4,014	1,868	8,028	1,278
11	5,939	2,509	1,594	5,018	1,169
12	1,450	2,241	2,900	4,483	1,024

EJERCICIO 3

AF – DC

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	8,162	8,096	3,676	3,808	1,000
2	5,404	8,096	1,838	3,808	1,067
3	6,500	4,550	1,091	1,833	1,034
4	3,409	3,267	1,818	4,400	1,099
5	5,136	4,550	1,636	1,833	1,002
6	7,243	5,829	5,515	0,725	1,560
7	1,250	2,000	2,500	4,000	1,028
8	5,682	2,350	2,727	2,567	1,000
9	3,493	7,733	1,985	4,533	1,086
10	1,250	7,000	2,500	6,000	1,097
11	6,250	0,533	7,500	1,067	1,514
12	8,523	3,267	2,955	4,400	1,020

AF – B

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	8,456	7,733	3,088	4,533	1,018
2	5,699	8,558	2,426	2,885	1,004
3	7,228	4,198	0,788	2,538	1,176
4	4,667	3,852	4,334	1,846	1,092
5	4,667	5,121	4,334	0,692	1,451
6	5,699	6,291	2,426	1,648	1,019
7	1,250	2,000	2,500	4,000	1,028
8	5,061	2,245	5,122	1,367	1,226
9	3,493	7,733	1,985	4,533	1,086
10	1,250	7,000	2,500	6,000	1,097
11	5,061	0,781	5,122	1,562	1,182
12	8,811	2,733	2,378	5,467	1,088

AF – TL1

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	7,500	8,600	5,000	2,800	1,042
2	3,750	8,600	2,500	2,800	1,002
3	6,814	5,389	2,761	0,724	1,232
4	3,190	4,302	1,380	5,795	1,268
5	7,780	3,216	0,828	3,622	1,285
6	6,814	6,476	2,761	1,449	1,052
7	0,500	5,000	1,000	10,000	1,739
8	6,400	3,216	1,933	3,622	1,050
9	4,657	4,302	1,553	5,795	1,225
10	1,750	5,000	1,500	10,000	1,485
11	5,347	0,702	5,694	1,405	1,255
12	9,097	3,600	1,806	7,200	1,249

AF – TL2

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	8,250	8,000	3,500	4,000	1,002
2	5,625	8,000	1,750	4,000	1,087
3	6,767	4,781	2,133	0,938	1,086
4	3,922	2,906	2,844	2,813	1,000
5	4,100	4,781	3,200	0,938	1,194
6	5,167	5,625	5,333	0,750	1,521
7	0,500	5,000	1,000	10,000	1,739
8	6,589	2,906	2,489	2,813	1,002
9	3,625	8,000	2,250	4,000	1,042
10	1,750	5,000	1,500	10,000	1,485
11	5,167	0,750	5,333	1,500	1,208
12	8,917	3,000	2,167	6,000	1,133

ESCENARIO DE 16 DPTOS

EJERCICIO 1

AF – DC

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	1,716	6,280	3,431	4,080	1,004
2	2,083	9,160	4,167	1,680	1,105
3	7,083	6,743	5,833	0,343	2,184
4	5,357	0,933	4,286	1,867	1,088
5	2,083	3,160	4,167	0,720	1,411
6	5,357	2,333	4,286	0,933	1,305
7	4,044	6,280	0,245	4,080	2,163
8	8,750	1,400	2,500	2,800	1,002
9	1,607	1,400	3,214	2,800	1,002
10	7,697	4,429	4,605	3,257	1,015
11	7,083	6,314	5,833	0,514	1,832
12	4,781	4,429	1,228	3,257	1,121
13	5,463	8,457	2,593	3,086	1,004
14	8,380	8,457	3,241	3,086	1,000
15	3,676	6,280	0,490	4,080	1,616
16	2,083	3,880	4,167	0,720	1,411

AF – B

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	1,961	6,025	3,922	3,570	1,001
2	2,083	9,160	4,167	1,680	1,105
3	6,042	4,933	3,750	0,533	1,514
4	6,071	1,400	2,857	2,800	1,000
5	2,083	3,160	4,167	0,720	1,411
6	2,321	2,369	4,643	0,862	1,376
7	4,044	6,280	0,245	4,080	2,163
8	8,750	1,400	2,500	2,800	1,002
9	2,321	0,969	4,643	1,938	1,097
10	8,958	6,400	2,083	7,200	1,198
11	6,042	4,267	3,750	0,800	1,313
12	6,042	3,333	3,750	1,067	1,204
13	6,042	6,267	3,750	2,133	1,040
14	6,042	8,667	3,750	2,667	1,015
15	1,961	8,065	3,922	0,510	1,567
16	2,083	3,880	4,167	0,720	1,411

AF – TL1

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	2,087	3,833	1,826	7,667	1,269
2	1,500	8,833	3,000	2,333	1,008
3	6,985	6,927	1,992	1,004	1,059
4	5,490	0,803	4,981	1,606	1,164
5	3,747	4,819	1,494	2,008	1,011
6	3,906	2,710	1,811	2,208	1,005
7	5,490	6,927	0,996	1,004	1,000
8	6,396	2,710	3,170	2,208	1,016
9	0,587	3,833	1,174	7,667	1,473
10	8,990	3,714	2,019	7,429	1,220
11	5,490	6,124	4,981	0,602	1,612
12	6,985	4,819	1,992	2,008	1,000
13	4,556	8,714	3,111	2,571	1,005
14	8,056	8,714	3,889	2,571	1,021
15	3,996	6,927	1,992	1,004	1,059
16	5,241	4,819	1,494	2,008	1,011

AF – TL2

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	1,000	6,500	2,000	7,000	1,203
2	2,500	6,500	1,000	7,000	1,512
3	7,358	6,625	1,245	1,606	1,008
4	5,490	0,803	4,981	1,606	1,164
5	3,747	4,819	1,494	2,008	1,011
6	3,906	2,710	1,811	2,208	1,005
7	4,556	6,625	0,623	1,606	1,114
8	6,396	2,710	3,170	2,208	1,016
9	1,500	1,500	3,000	3,000	1,000
10	8,990	3,714	2,019	7,429	1,220
11	5,802	6,625	1,868	1,606	1,003
12	6,985	4,819	1,992	2,008	1,000
13	4,556	8,714	3,111	2,571	1,005
14	8,056	8,714	3,889	2,571	1,021
15	3,623	6,625	1,245	1,606	1,008
16	5,241	4,819	1,494	2,008	1,011

EJERCICIO 2

AF – DC

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	6,864	8,884	6,271	2,232	1,136
2	3,049	2,050	1,707	4,100	1,097
3	4,547	7,156	1,636	1,223	1,011
4	7,137	6,639	3,545	2,257	1,026
5	5,732	2,597	3,659	0,820	1,293
6	5,732	3,553	3,659	1,093	1,188
7	4,547	4,406	1,636	0,611	1,124
8	1,864	5,039	3,729	1,877	1,059
9	1,098	2,050	2,195	4,100	1,049
10	1,864	7,989	3,729	4,023	1,001
11	4,547	5,628	1,636	1,834	1,002
12	9,455	5,934	1,091	3,668	1,190
13	5,732	1,093	3,659	2,187	1,033
14	8,780	2,050	2,439	4,100	1,034
15	6,074	4,805	1,418	1,411	1,000
16	7,846	4,805	2,127	1,411	1,021

AF – B

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	7,034	8,470	4,576	3,059	1,020
2	1,951	3,203	3,902	1,794	1,076
3	4,237	9,017	1,017	1,967	1,055
4	6,506	5,804	3,520	2,273	1,024
5	5,732	2,597	3,659	0,820	1,293
6	5,732	3,553	3,659	1,093	1,188
7	4,237	4,592	1,017	0,983	1,000
8	1,864	5,039	3,729	1,877	1,059
9	1,951	1,153	3,902	2,306	1,035
10	1,864	7,989	3,729	4,023	1,001
11	4,237	6,558	1,017	2,950	1,145
12	9,661	7,050	0,678	5,900	1,644
13	5,732	1,093	3,659	2,187	1,033
14	8,780	2,050	2,439	4,100	1,034
15	6,506	4,384	3,520	0,568	1,445
16	8,794	5,520	1,056	2,841	1,125

AF – TL1

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	6,744	8,925	6,512	2,150	1,157
2	6,977	1,379	2,538	2,758	1,001
3	3,953	6,775	0,930	2,150	1,089
4	6,279	6,775	3,721	2,150	1,038
5	3,972	3,402	2,331	1,287	1,044
6	6,692	3,402	3,108	1,287	1,099
7	3,109	4,873	0,604	1,655	1,130
8	2,193	2,850	1,228	5,700	1,309
9	0,789	2,850	1,579	5,700	1,213
10	1,744	7,850	3,488	4,300	1,005
11	4,318	4,873	1,813	1,655	1,001
12	9,070	6,775	1,860	2,150	1,003
13	4,257	1,379	2,901	2,758	1,000
14	9,123	2,850	1,754	5,700	1,179
15	5,828	4,873	1,209	1,655	1,012
16	7,339	4,873	1,813	1,655	1,001

AF – TL2

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	6,550	8,986	6,900	2,029	1,193
2	6,998	1,475	2,373	2,950	1,006
3	6,753	6,739	0,812	2,464	1,158
4	4,724	6,739	3,247	2,464	1,010
5	5,642	3,245	5,084	0,590	1,638
6	6,732	4,819	2,905	1,377	1,071
7	3,947	3,835	1,695	0,590	1,142
8	2,422	2,581	1,356	5,161	1,232
9	0,872	2,581	1,744	5,161	1,151
10	1,550	7,581	3,100	4,839	1,025
11	4,189	4,819	2,179	1,377	1,026
12	9,188	6,739	1,624	2,464	1,022
13	4,456	1,475	2,712	2,950	1,001
14	9,092	2,754	1,816	5,507	1,158
15	6,489	3,835	3,389	0,590	1,407
16	7,768	6,739	1,218	2,464	1,063

EJERCICIO 3

AF – DC

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	1,200	2,917	2,400	5,833	1,100
2	3,600	1,458	2,400	2,917	1,005
3	3,600	6,667	2,400	0,833	1,143
4	6,500	1,176	3,400	2,353	1,017
5	5,900	9,318	2,200	1,364	1,029
6	5,900	7,727	2,200	1,818	1,005
7	5,650	4,706	1,700	0,588	1,144
8	3,600	8,542	2,400	2,917	1,005
9	9,100	2,500	1,800	5,000	1,133
10	8,500	7,500	3,000	5,000	1,033
11	6,500	2,794	3,400	0,882	1,236
12	5,900	5,909	2,200	1,818	1,005
13	3,600	4,583	2,400	3,333	1,014
14	1,200	7,917	2,400	4,167	1,038
15	5,650	3,824	1,700	1,176	1,017
16	7,350	4,118	1,700	1,765	1,000

AF – B

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	1,159	3,021	2,317	6,042	1,117
2	3,559	1,410	2,483	2,819	1,002
3	4,547	8,021	0,505	3,958	1,578
4	6,964	1,618	2,473	3,235	1,009
5	5,900	9,318	2,200	1,364	1,029
6	5,900	7,727	2,200	1,818	1,005
7	5,083	4,118	0,567	1,765	1,166
8	2,147	9,185	4,295	1,630	1,120
9	9,100	2,500	1,800	5,000	1,133
10	8,500	7,500	3,000	5,000	1,033
11	5,264	1,618	0,927	3,235	1,202
12	5,900	5,909	2,200	1,818	1,005
13	3,559	4,431	2,483	3,222	1,009
14	2,147	7,206	4,295	2,328	1,047
15	5,933	4,118	1,133	1,765	1,025
16	7,350	4,118	1,700	1,765	1,000

AF – TL1

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	0,700	5,000	1,400	10,000	1,523
2	3,742	1,304	2,684	2,608	1,000
3	4,316	6,981	1,104	1,811	1,031
4	6,618	1,304	3,067	2,608	1,003
5	6,367	8,943	1,420	2,113	1,020
6	5,973	6,981	2,209	1,811	1,005
7	4,178	5,472	0,828	1,207	1,018
8	3,082	7,434	1,364	5,132	1,228
9	9,076	2,434	1,849	4,868	1,120
10	8,538	7,434	2,923	5,132	1,040
11	6,603	3,738	1,327	2,260	1,036
12	4,711	8,943	1,893	2,113	1,002
13	4,170	3,738	3,539	2,260	1,025
14	1,900	5,000	1,000	10,000	1,739
15	7,709	3,738	0,885	2,260	1,112
16	5,835	5,472	2,485	1,207	1,066

AF – TL2

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	1,108	3,158	2,217	6,316	1,140
2	0,950	8,158	1,900	3,684	1,055
3	4,368	7,067	1,137	1,760	1,024
4	5,132	1,501	2,664	3,002	1,002
5	6,479	8,974	1,461	2,053	1,014
6	4,774	8,974	1,949	2,053	1,000
7	7,021	4,868	0,379	2,639	1,509
8	2,850	8,158	1,900	3,684	1,055
9	8,732	1,774	2,536	3,548	1,014
10	8,838	6,774	2,325	6,452	1,133
11	6,964	1,501	0,999	3,002	1,155
12	6,073	7,067	2,273	1,760	1,008
13	5,316	4,868	3,031	2,639	1,002
14	3,008	3,158	1,583	6,316	1,249
15	5,632	3,275	3,664	0,546	1,488
16	7,443	6,774	0,465	6,452	1,997

ESCENARIO DE 20 DPTOS

EJERCICIO 1

AF – DC

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	8,769	1,828	2,462	3,656	1,020
2	3,286	8,250	2,000	3,500	1,039
3	5,208	4,612	2,119	0,944	1,083
4	4,846	0,743	5,385	1,486	1,215
5	3,151	5,748	1,994	1,504	1,010
6	3,151	2,489	1,994	2,006	1,000
7	2,486	4,244	0,665	1,504	1,085
8	9,000	8,250	2,000	3,500	1,039
9	1,077	5,107	2,154	2,786	1,008
10	1,143	8,250	2,286	3,500	1,023
11	5,208	5,792	2,119	1,416	1,020
12	5,843	3,550	3,390	1,180	1,143
13	1,077	1,857	2,154	3,714	1,037
14	6,571	9,300	2,857	1,400	1,064
15	3,483	4,244	1,330	1,504	1,002
16	6,903	5,320	1,271	2,360	1,048
17	5,843	2,223	3,390	1,475	1,088
18	8,769	5,078	2,462	2,844	1,003
19	6,571	7,550	2,857	2,100	1,012
20	4,714	8,250	0,857	3,500	1,258

AF – B

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	8,553	2,355	2,895	3,109	1,001
2	2,143	9,183	4,286	1,633	1,119
3	5,175	4,427	1,930	1,036	1,049
4	5,000	0,400	10,000	0,800	1,909
5	3,333	5,645	1,754	1,710	1,000
6	3,333	1,940	1,754	2,280	1,009
7	2,749	3,935	0,585	1,710	1,147
8	9,000	8,250	2,000	3,500	1,039
9	1,228	5,279	2,456	2,443	1,000
10	2,143	7,433	4,286	1,867	1,088
11	5,175	5,723	1,930	1,555	1,006
12	5,658	3,218	2,895	1,382	1,069
13	1,228	2,429	2,456	3,257	1,010
14	6,571	9,300	2,857	1,400	1,064
15	3,626	3,935	1,170	1,710	1,018
16	6,719	5,205	1,158	2,591	1,082
17	5,658	1,664	2,895	1,727	1,034
18	8,649	5,205	2,702	2,591	1,000
19	6,571	7,550	2,857	2,100	1,012
20	4,714	8,250	0,857	3,500	1,258

AF – TL1

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	9,087	2,465	1,826	4,930	1,126
2	2,223	7,414	1,353	5,172	1,233
3	7,637	3,999	1,074	1,862	1,038
4	5,537	0,758	5,274	1,517	1,201
5	4,399	5,430	2,998	1,001	1,154
6	3,926	2,492	2,051	1,950	1,000
7	3,242	4,198	0,684	1,463	1,073
8	8,324	8,956	3,353	2,088	1,028
9	2,279	2,414	1,243	4,828	1,239
10	0,773	7,414	1,547	5,172	1,188
11	6,273	6,931	0,749	4,003	1,372
12	6,026	3,999	2,149	1,862	1,003
13	0,829	2,414	1,657	4,828	1,146
14	4,774	9,466	3,747	1,067	1,204
15	4,267	4,198	1,367	1,463	1,001
16	7,150	6,421	1,006	2,983	1,151
17	6,563	2,292	3,223	1,551	1,068
18	8,827	6,421	2,347	2,983	1,007
19	4,899	7,431	1,999	3,002	1,021
20	3,400	7,431	0,999	3,002	1,155

AF – TL2

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	9,221	2,887	1,559	5,775	1,222
2	1,450	8,793	2,900	2,414	1,004
3	5,486	5,098	1,478	1,353	1,001
4	5,671	0,722	5,541	1,444	1,235
5	6,779	4,421	1,108	2,707	1,101
6	4,131	2,256	2,463	1,624	1,022
7	3,085	4,421	0,369	2,707	1,538
8	7,741	9,225	4,518	1,549	1,147
9	2,279	2,414	1,243	4,828	1,239
10	1,450	6,207	2,900	2,759	1,000
11	6,357	6,392	2,429	1,235	1,058
12	4,747	3,744	2,955	1,353	1,077
13	0,829	2,414	1,657	4,828	1,146
14	4,191	9,225	2,582	1,549	1,033
15	4,008	5,098	1,478	1,353	1,001
16	8,786	6,392	2,429	1,235	1,058
17	6,902	2,256	3,079	1,624	1,052
18	7,571	7,730	4,858	1,441	1,190
19	4,021	7,113	2,242	2,676	1,004
20	7,887	4,421	1,108	2,707	1,101

EJERCICIO 2

AF – DC

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	8,917	2,077	2,167	4,154	1,053
2	0,875	8,000	1,750	4,000	1,087
3	5,083	3,636	1,375	1,455	1,000
4	9,000	8,000	2,000	4,000	1,061
5	6,000	4,773	3,667	0,818	1,295
6	8,917	5,077	2,167	1,846	1,003
7	2,677	3,636	0,688	1,455	1,071
8	6,375	7,077	3,250	2,154	1,021
9	1,167	1,286	2,333	2,571	1,001
10	1,167	4,286	2,333	3,429	1,019
11	6,802	3,636	2,063	1,455	1,015
12	6,611	2,091	2,444	1,636	1,020
13	2,750	8,000	2,000	4,000	1,061
14	4,250	8,000	1,000	4,000	1,250
15	3,708	3,636	1,375	1,455	1,000
16	3,250	5,182	1,833	1,636	1,002
17	3,861	2,091	3,056	1,636	1,049
18	5,083	0,636	5,500	1,273	1,280
19	6,375	9,077	3,250	1,846	1,040
20	6,000	5,591	3,667	0,818	1,295

AF – B

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	9,250	3,000	1,500	6,000	1,250
2	1,875	6,933	3,750	1,867	1,061
3	5,934	3,776	1,798	1,112	1,029
4	9,000	8,000	2,000	4,000	1,061
5	7,333	4,500	1,000	3,000	1,155
6	8,167	3,000	0,667	6,000	1,667
7	2,060	3,341	4,120	0,243	2,181
8	6,375	7,077	3,250	2,154	1,021
9	1,708	0,878	3,417	1,756	1,056
10	2,060	4,433	4,120	1,942	1,072
11	7,333	1,500	1,000	3,000	1,155
12	5,125	2,634	3,417	1,171	1,147
13	1,875	8,933	3,750	2,133	1,040
14	4,250	8,000	1,000	4,000	1,250
15	4,577	4,312	0,915	2,185	1,096
16	2,518	5,702	5,035	0,596	1,626
17	1,708	2,488	3,417	1,463	1,091
18	5,125	1,024	3,417	2,049	1,033
19	6,375	9,077	3,250	1,846	1,040
20	5,934	5,166	1,798	1,668	1,001

AF – TL1

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	9,113	2,535	1,775	5,070	1,141
2	0,483	3,621	0,967	7,241	1,551
3	7,559	1,690	1,331	1,502	1,002
4	8,864	8,239	2,272	3,521	1,024
5	3,965	5,775	2,130	1,408	1,021
6	8,580	5,775	2,840	1,408	1,062
7	4,897	1,064	3,994	0,250	2,122
8	6,734	8,239	1,988	3,521	1,041
9	1,381	3,621	0,829	7,241	1,647
10	2,348	3,621	1,105	7,241	1,475
11	7,084	4,413	2,282	1,315	1,038
12	4,421	4,413	3,043	1,315	1,089
13	1,450	8,621	2,900	2,759	1,000
14	3,468	8,239	1,136	3,521	1,164
15	3,699	1,815	1,598	1,252	1,007
16	5,696	1,815	2,396	1,252	1,053
17	5,563	0,469	5,325	0,939	1,401
18	5,563	3,099	5,325	1,315	1,255
19	4,888	8,239	1,704	3,521	1,067
20	6,095	5,775	2,130	1,408	1,021

AF – TL2

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	9,113	2,535	1,775	5,070	1,141
2	0,483	3,621	0,967	7,241	1,551
3	5,669	4,288	1,278	1,565	1,005
4	8,479	8,685	3,043	2,629	1,003
5	7,609	6,221	1,304	2,300	1,041
6	9,131	6,221	1,739	2,300	1,010
7	3,078	3,662	0,355	2,817	1,586
8	5,666	7,165	2,582	2,711	1,000
9	1,381	3,621	0,829	7,241	1,647
10	2,348	3,621	1,105	7,241	1,475
11	7,267	4,288	1,917	1,565	1,005
12	6,628	2,879	3,195	1,252	1,112
13	1,450	8,621	2,900	2,759	1,000
14	3,638	7,165	1,475	2,711	1,047
15	4,675	3,662	0,710	2,817	1,247
16	3,788	3,662	1,065	2,817	1,121
17	4,009	1,127	2,219	2,254	1,000
18	6,672	1,127	3,106	2,254	1,013
19	4,929	9,261	4,057	1,479	1,130
20	4,929	5,440	4,057	0,739	1,385

EJERCICIO 3

AF – DC

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	0,794	7,167	1,588	5,667	1,209
2	1,500	1,167	3,000	2,333	1,008
3	4,167	3,714	2,333	0,857	1,128
4	2,294	7,167	1,412	5,667	1,251
5	6,088	5,357	1,235	2,429	1,058
6	5,800	2,214	1,867	2,143	1,002
7	3,824	4,446	1,647	0,607	1,127
8	8,979	8,286	2,042	3,429	1,034
9	1,500	3,333	3,000	2,000	1,021
10	6,500	0,571	7,000	1,143	1,439
11	3,676	7,681	1,352	2,218	1,031
12	3,933	2,214	1,867	2,143	1,002
13	8,353	5,357	3,294	2,429	1,012
14	7,667	3,714	4,667	0,857	1,381
15	5,059	5,357	0,824	2,429	1,150
16	3,824	5,661	1,647	1,821	1,001
17	6,155	7,265	3,606	1,387	1,116
18	8,367	2,214	3,267	2,143	1,022
19	5,479	9,395	4,958	1,210	1,259
20	6,155	8,374	3,606	0,832	1,281

AF – B

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	1,500	5,833	3,000	3,000	1,000
2	2,192	2,167	1,615	4,333	1,124
3	3,913	3,833	1,826	1,095	1,033
4	1,500	8,667	3,000	2,667	1,002
5	7,109	4,929	0,913	3,286	1,212
6	5,435	2,875	4,870	0,821	1,423
7	3,913	4,655	1,826	0,548	1,187
8	8,979	8,286	2,042	3,429	1,034
9	0,692	2,167	1,385	4,333	1,167
10	5,435	0,821	4,870	1,643	1,151
11	4,352	7,126	2,705	1,109	1,101
12	5,435	2,054	4,870	0,821	1,423
13	8,783	4,929	2,435	3,286	1,011
14	6,043	4,929	1,217	3,286	1,126
15	5,130	4,929	0,609	3,286	1,377
16	3,913	5,750	1,826	1,643	1,001
17	6,831	7,681	2,254	2,218	1,000
18	8,935	1,643	2,130	3,286	1,024
19	5,479	9,395	4,958	1,210	1,259
20	4,352	8,235	2,705	1,109	1,101

AF – TL1

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	0,794	7,167	1,588	5,667	1,209
2	1,500	1,167	3,000	2,333	1,008
3	7,642	0,969	1,032	1,939	1,050
4	2,294	7,167	1,412	5,667	1,251
5	5,224	7,035	1,354	2,216	1,030
6	5,579	3,102	1,719	2,327	1,011
7	5,149	4,681	1,204	0,831	1,017
8	8,115	9,071	3,769	1,857	1,063
9	1,500	3,333	3,000	2,000	1,021
10	5,063	0,969	4,126	1,939	1,072
11	4,161	6,204	0,774	3,878	1,343
12	3,860	3,102	1,719	2,327	1,011
13	9,509	4,071	0,982	8,143	1,613
14	7,298	3,102	1,719	2,327	1,011
15	6,954	4,681	2,407	0,831	1,145
16	3,387	6,204	0,774	3,878	1,343
17	7,030	7,035	2,257	2,216	1,000
18	8,588	4,071	0,860	8,143	1,701
19	4,615	9,071	3,231	1,857	1,039
20	6,353	5,512	3,611	0,831	1,282

AF – TL2

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	0,794	7,167	1,588	5,667	1,209
2	0,808	2,167	1,615	4,333	1,124
3	4,904	0,263	3,807	0,525	1,532
4	2,294	7,167	1,412	5,667	1,251
5	6,500	6,786	1,105	2,714	1,103
6	4,428	3,853	2,855	1,401	1,064
7	7,759	0,263	1,904	0,525	1,214
8	8,115	9,071	3,769	1,857	1,063
9	2,308	2,167	1,385	4,333	1,167
10	5,855	2,452	5,711	1,401	1,257
11	6,997	4,991	3,426	0,876	1,242
12	4,632	1,138	3,263	1,226	1,122
13	8,526	6,786	2,947	2,714	1,001
14	7,283	3,853	2,855	1,401	1,064
15	4,142	4,991	2,284	0,876	1,117
16	7,487	1,138	2,447	1,226	1,060
17	5,026	6,786	1,842	2,714	1,019
18	9,355	2,714	1,289	5,429	1,270
19	4,615	9,071	3,231	1,857	1,039
20	3,553	6,786	1,105	2,714	1,103

ESCENARIO DE 25 DPTOS

EJERCICIO 1

AF – DC

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	8,304	8,378	0,925	3,243	1,203
2	9,383	8,378	1,233	3,243	1,119
3	6,786	4,567	2,283	0,876	1,117
4	1,300	4,038	2,600	1,923	1,011
5	6,330	3,660	3,197	0,938	1,194
6	8,964	0,965	2,072	1,931	1,001
7	5,074	4,567	1,142	0,876	1,009
8	1,300	8,654	2,600	2,692	1,000
9	3,525	8,378	1,850	3,243	1,040
10	3,551	4,917	1,903	1,577	1,004
11	8,964	4,102	2,072	1,448	1,016
12	6,146	7,346	3,392	1,179	1,143
13	1,300	1,538	2,600	3,077	1,004
14	8,964	5,792	2,072	1,931	1,001
15	3,551	6,231	1,903	1,051	1,044
16	6,475	1,642	2,906	1,032	1,137
17	3,811	2,158	2,422	2,065	1,003
18	6,146	8,968	3,392	2,064	1,031
19	1,300	6,154	2,600	2,308	1,002
20	8,964	2,654	2,072	1,448	1,016
21	5,264	0,563	5,328	1,126	1,317
22	6,215	6,319	3,425	0,876	1,242
23	6,475	2,675	2,906	1,032	1,137
24	3,666	3,660	2,131	0,938	1,085
25	6,215	5,443	3,425	0,876	1,242

AF – B

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	8,304	8,378	0,925	3,243	1,203
2	9,383	8,378	1,233	3,243	1,119
3	6,245	4,677	3,365	0,594	1,400
4	1,300	4,038	2,600	1,923	1,011
5	6,245	3,636	3,365	0,892	1,229
6	9,408	1,689	1,184	3,378	1,141
7	6,245	4,231	3,365	0,297	1,831
8	1,300	8,654	2,600	2,692	1,000
9	5,221	8,092	5,242	1,145	1,304
10	3,581	4,974	1,963	1,528	1,008
11	8,964	4,102	2,072	1,448	1,016
12	5,221	7,138	5,242	0,763	1,501
13	1,300	1,538	2,600	3,077	1,004
14	8,964	5,792	2,072	1,931	1,001
15	3,581	6,247	1,963	1,019	1,054
16	6,988	0,798	1,880	1,595	1,003
17	3,384	1,595	1,567	3,191	1,064
18	5,221	9,332	5,242	1,335	1,243
19	1,300	6,154	2,600	2,308	1,002
20	8,372	1,689	0,888	3,378	1,232
21	5,107	1,595	1,880	3,191	1,035
22	6,245	6,311	3,365	0,892	1,229
23	6,988	2,393	1,880	1,595	1,003
24	3,581	3,700	1,963	1,019	1,054
25	6,245	5,419	3,365	0,892	1,229

AF – TL1

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	7,739	8,784	1,233	2,432	1,058
2	9,178	8,784	1,644	2,432	1,019
3	7,262	4,752	1,776	1,126	1,026
4	2,100	2,500	1,000	5,000	1,342
5	6,818	3,626	2,664	1,126	1,094
6	9,075	1,081	1,850	2,162	1,003
7	5,930	4,752	0,888	1,126	1,007
8	1,900	7,500	1,400	5,000	1,209
9	4,404	6,182	2,165	2,772	1,008
10	4,043	4,276	2,886	1,040	1,133
11	8,546	5,676	0,793	3,784	1,321
12	3,422	8,784	1,644	2,432	1,019
13	0,800	2,500	1,600	5,000	1,167
14	9,471	5,676	1,057	3,784	1,210
15	2,961	6,182	0,722	2,772	1,235
16	7,109	1,802	2,081	1,441	1,017
17	4,334	1,802	3,469	1,441	1,098
18	5,683	8,784	2,878	2,432	1,004
19	0,600	7,500	1,200	5,000	1,266
20	9,075	2,973	1,850	1,622	1,002
21	5,375	0,541	5,550	1,081	1,354
22	6,818	7,005	2,664	1,126	1,094
23	5,375	2,793	5,550	0,541	1,758
24	4,043	3,410	2,886	0,693	1,265
25	6,818	5,878	2,664	1,126	1,094

AF – TL2

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	7,508	8,916	1,384	2,168	1,025
2	9,100	8,889	1,800	2,222	1,006
3	5,038	5,573	1,581	1,265	1,006
4	2,100	2,500	1,000	5,000	1,342
5	5,729	4,435	2,965	1,012	1,148
6	8,714	1,944	1,029	3,889	1,229
7	7,706	4,435	0,988	1,012	1,000
8	1,300	8,654	2,600	2,692	1,000
9	3,094	6,964	0,988	6,071	1,441
10	4,382	2,946	1,527	1,964	1,008
11	9,100	4,722	1,800	1,667	1,001
12	5,894	7,398	4,612	0,867	1,370
13	0,800	2,500	1,600	5,000	1,167
14	9,100	6,667	1,800	2,222	1,006
15	3,918	5,446	0,659	3,036	1,306
16	5,909	2,946	1,527	1,964	1,008
17	6,927	0,982	2,545	1,964	1,008
18	5,202	8,916	3,228	2,168	1,020
19	1,300	6,154	2,600	2,308	1,002
20	9,614	1,944	0,771	3,889	1,345
21	4,127	0,982	3,055	1,964	1,024
22	6,224	6,585	3,953	0,759	1,360
23	7,436	2,946	1,527	1,964	1,008
24	3,109	2,946	1,018	1,964	1,054
25	7,014	5,573	2,372	1,265	1,050

EJERCICIO 2

AF – DC

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	6,378	2,138	3,243	0,925	1,203
2	6,842	6,362	2,317	1,727	1,011
3	5,220	6,146	0,927	2,158	1,091
4	1,338	1,684	2,676	1,869	1,016
5	9,000	6,250	2,000	1,500	1,010
6	1,338	3,366	2,676	1,495	1,043
7	6,842	5,283	2,317	0,432	1,374
8	3,039	8,108	1,850	3,784	1,065
9	9,000	8,500	2,000	3,000	1,021
10	7,459	8,613	1,081	2,775	1,113
11	5,730	3,371	1,946	1,542	1,007
12	9,000	4,500	2,000	2,000	1,000
13	1,057	8,108	2,114	3,784	1,043
14	3,716	1,711	2,081	1,922	1,001
15	4,077	4,849	1,359	1,472	1,001
16	6,378	4,604	3,243	0,925	1,203
17	1,699	4,849	3,398	1,472	1,089
18	9,000	1,750	2,000	3,500	1,039
19	4,000	0,375	8,000	0,750	1,786
20	6,378	1,213	3,243	0,925	1,203
21	5,838	8,613	2,162	2,775	1,008
22	4,360	8,108	0,793	3,784	1,321
23	2,378	5,901	4,757	0,631	1,555
24	7,351	3,371	1,297	1,542	1,004
25	3,716	3,393	2,081	1,442	1,017

AF – B

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	6,241	2,985	3,517	0,853	1,262
2	7,073	7,304	1,855	2,157	1,003
3	5,218	6,225	1,855	1,078	1,037
4	1,450	0,862	2,900	1,724	1,034
5	9,000	6,250	2,000	1,500	1,010
6	1,450	2,414	2,900	1,379	1,070
7	7,073	5,956	1,855	0,539	1,197
8	1,450	8,793	2,900	2,414	1,004
9	9,000	8,500	2,000	3,000	1,021
10	7,073	9,191	1,855	1,618	1,002
11	6,241	4,407	3,517	0,853	1,262
12	9,000	4,500	2,000	2,000	1,000
13	1,450	6,207	2,900	2,759	1,000
14	3,691	1,264	1,583	2,527	1,027
15	3,691	5,054	1,583	1,264	1,006
16	6,241	5,260	3,517	0,853	1,262
17	1,450	3,966	2,900	1,724	1,034
18	9,000	1,750	2,000	3,500	1,039
19	6,241	0,853	3,517	1,706	1,066
20	6,241	2,132	3,517	0,853	1,262
21	5,218	8,382	1,855	3,235	1,039
22	3,595	8,922	1,391	2,157	1,024
23	3,595	6,765	1,391	2,157	1,024
24	6,241	3,696	3,517	0,569	1,445
25	3,691	3,475	1,583	1,895	1,004

AF – TL1

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	6,800	2,875	2,400	1,250	1,054
2	6,154	7,021	3,692	1,083	1,194
3	5,538	6,073	2,462	0,813	1,158
4	1,818	0,688	3,636	1,375	1,121
5	8,333	7,750	0,667	4,500	1,491
6	1,600	2,875	3,200	1,250	1,113
7	7,385	6,073	1,231	0,813	1,022
8	3,338	8,194	1,938	3,611	1,049
9	9,333	7,750	1,333	4,500	1,191
10	7,385	8,781	1,231	2,438	1,059
11	5,415	4,177	2,215	1,354	1,030
12	9,000	4,500	2,000	2,000	1,000
13	0,923	6,750	1,231	6,500	1,367
14	2,286	1,813	4,571	0,875	1,362
15	0,154	6,750	0,308	6,500	2,407
16	6,154	5,260	3,692	0,813	1,300
17	2,404	4,944	1,731	2,889	1,033
18	9,000	1,750	2,000	3,500	1,039
19	5,818	0,688	4,364	1,375	1,171
20	6,286	1,813	3,429	0,875	1,242
21	5,538	8,781	2,462	2,438	1,000
22	3,788	4,944	1,038	2,889	1,134
23	1,954	8,194	0,831	3,611	1,282
24	7,262	4,177	1,477	1,354	1,001
25	4,400	2,875	2,400	1,250	1,054

AF – TL2

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	7,305	3,627	1,391	2,157	1,024
2	6,187	7,463	3,627	1,103	1,182
3	4,373	6,360	1,813	1,103	1,031
4	1,450	0,862	2,900	1,724	1,034
5	9,000	6,250	2,000	1,500	1,010
6	0,483	3,793	0,967	4,138	1,276
7	3,920	7,463	0,907	1,103	1,005
8	2,054	7,931	1,692	4,138	1,102
9	9,000	8,500	2,000	3,000	1,021
10	7,244	9,007	1,511	1,985	1,009
11	4,827	5,257	2,720	1,103	1,104
12	9,636	2,750	0,727	5,500	1,557
13	1,933	3,793	1,933	4,138	1,073
14	5,450	0,392	5,100	0,784	1,471
15	3,364	3,627	0,927	2,157	1,090
16	6,640	6,360	2,720	1,103	1,104
17	0,604	7,931	1,208	4,138	1,195
18	8,636	2,750	1,273	5,500	1,280
19	4,600	1,667	3,400	1,765	1,054
20	5,914	3,627	1,391	2,157	1,024
21	4,978	9,007	3,022	1,985	1,022
22	3,183	7,353	0,567	5,294	1,692
23	4,523	3,627	1,391	2,157	1,024
24	7,093	5,257	1,813	1,103	1,031
25	7,150	1,667	1,700	1,765	1,000

EJERCICIO 3

AF – DC

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	3,438	6,133	1,875	1,600	1,003
2	6,029	4,516	3,309	1,209	1,129
3	5,562	1,685	2,374	0,842	1,137
4	1,250	6,600	2,500	2,000	1,006
5	8,849	0,652	2,301	1,304	1,041
6	1,250	0,800	2,500	1,600	1,025
7	3,438	0,267	1,875	0,533	1,204
8	8,859	8,467	2,283	3,067	1,011
9	8,849	2,607	2,301	2,607	1,002
10	1,250	3,800	2,500	1,200	1,068
11	1,250	5,000	2,500	1,200	1,068
12	3,438	1,600	1,875	2,133	1,002
13	3,804	8,467	2,609	3,067	1,003
14	1,250	2,400	2,500	1,600	1,025
15	7,224	1,053	0,950	2,106	1,080
16	5,562	0,632	2,374	1,264	1,050
17	6,413	7,892	2,609	1,917	1,012
18	8,842	5,422	2,316	3,022	1,009
19	1,250	8,800	2,500	2,400	1,000
20	3,438	4,533	1,875	1,600	1,003
21	6,029	6,027	3,309	1,813	1,046
22	6,413	9,425	2,609	1,150	1,085
23	6,037	3,460	3,324	0,903	1,220
24	3,438	3,200	1,875	1,067	1,040
25	6,037	2,557	3,324	0,903	1,220

AF – B

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	3,493	5,192	2,215	1,355	1,030
2	6,192	4,710	3,185	1,256	1,110
3	5,874	1,570	2,548	0,785	1,178
4	1,332	6,808	2,663	1,877	1,015
5	8,892	0,677	2,215	1,354	1,030
6	1,193	0,839	2,385	1,677	1,016
7	3,493	0,226	2,215	0,452	1,333
8	8,740	8,611	2,520	2,778	1,001
9	8,892	2,708	2,215	2,708	1,005
10	1,193	3,983	2,385	1,258	1,052
11	1,193	5,241	2,385	1,258	1,052
12	3,493	1,355	2,215	1,806	1,005
13	3,632	7,935	1,937	4,130	1,073
14	1,193	2,516	2,385	1,677	1,016
15	7,466	1,570	0,637	3,140	1,335
16	5,874	0,589	2,548	1,178	1,075
17	6,040	8,090	2,880	1,736	1,032
18	8,892	5,642	2,215	3,160	1,016
19	1,332	8,874	2,663	2,253	1,003
20	3,493	3,838	2,215	1,355	1,030
21	6,192	6,280	3,185	1,884	1,035
22	6,040	9,479	2,880	1,042	1,132
23	6,192	3,611	3,185	0,942	1,191
24	3,493	2,709	2,215	0,903	1,102
25	5,874	2,551	2,548	1,178	1,075

AF – TL1

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	4,025	4,565	1,150	2,609	1,085
2	5,664	4,431	2,128	1,880	1,002
3	6,728	0,940	1,064	1,880	1,041
4	2,300	6,413	4,600	1,087	1,272
5	8,603	2,685	0,559	5,370	1,712
6	1,022	0,978	2,044	1,957	1,000
7	2,300	0,978	0,511	1,957	1,234
8	7,300	9,352	5,400	1,296	1,265
9	9,441	2,685	1,117	5,370	1,324
10	0,575	4,565	1,150	2,609	1,085
11	1,725	4,565	1,150	2,609	1,085
12	3,578	0,978	2,044	1,957	1,000
13	3,286	8,478	2,629	3,043	1,003
14	1,533	2,609	3,067	1,304	1,093
15	7,792	0,940	1,064	1,880	1,041
16	5,398	0,940	1,596	1,880	1,003
17	7,150	7,037	1,500	3,333	1,081
18	8,950	7,037	2,100	3,333	1,027
19	0,986	8,478	1,971	3,043	1,024
20	2,875	4,565	1,150	2,609	1,085
21	5,500	7,037	1,800	3,333	1,048
22	7,526	4,431	1,596	1,880	1,003
23	6,462	3,088	3,724	0,806	1,308
24	3,833	2,609	1,533	1,304	1,003
25	6,462	2,282	3,724	0,806	1,308

AF – TL2

DEPARTAMENTO	COORDENADA X DEL CENTROIDE	COORDENADA Y DEL CENTROIDE	ANCHO	ALTO	RELACIÓN DE ASPECTO
1	3,950	5,000	2,900	1,034	1,136
2	6,872	1,549	2,944	1,359	1,076
3	6,550	0,435	2,300	0,870	1,121
4	1,250	3,800	2,500	2,000	1,006
5	8,620	3,587	0,552	5,435	1,728
6	0,714	1,400	1,429	2,800	1,057
7	3,950	0,172	2,900	0,345	1,622
8	7,159	8,152	1,894	3,696	1,056
9	9,448	3,587	1,104	5,435	1,335
10	1,964	1,400	1,071	2,800	1,118
11	0,417	8,200	0,833	3,600	1,280
12	3,950	1,034	2,900	1,379	1,070
13	3,392	7,759	1,785	4,483	1,108
14	1,250	5,600	2,500	1,600	1,025
15	8,850	0,435	2,300	0,870	1,121
16	3,950	3,966	2,900	1,034	1,136
17	4,842	7,759	1,115	4,483	1,252
18	9,053	8,152	1,894	3,696	1,056
19	1,667	8,200	1,667	3,600	1,075
20	4,530	2,586	1,740	1,724	1,000
21	7,363	4,776	1,963	3,057	1,025
22	5,806	8,152	0,812	3,696	1,301
23	5,891	4,776	0,981	3,057	1,166
24	3,080	2,586	1,160	1,724	1,020
25	6,872	2,738	2,944	1,019	1,144