

**SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA DINÁMICO
(DFLP) PARA INSTALACIONES DE ÁREAS IGUALES MEDIANTE EL HÍBRIDO
BÚSQUEDA TABÚ - ALGORITMO GENÉTICO.**

**DANIEL ENRIQUE ANDRADE PEÑA
LUIS FERNANDO RODRÍGUEZ JIMÉNEZ**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE ESTUDIOS INDUSTRIALES Y EMPRESARIALES
BUCARAMANGA
2016**

**SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA DINÁMICO
(DFLP) PARA INSTALACIONES DE ÁREAS IGUALES MEDIANTE EL HÍBRIDO
BÚSQUEDA TABÚ - ALGORITMO GENÉTICO.**

**DANIEL ENRIQUE ANDRADE PEÑA
LUIS FERNANDO RODRÍGUEZ JIMÉNEZ**

**Trabajo de grado para optar al título de
INGENIERO INDUSTRIAL**

**Director:
CARLOS EDUARDO DÍAZ BOHÓRQUEZ
Ingeniero Industrial, MS.c**

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

2016

DEDICATORIA

A mis padres y hermana por el amor y apoyo incondicional en todos los momentos de mi vida, sin ellos jamás me sería posible cumplir mis metas,

A Andi por hacerme una mejor persona y por brindarme el regalo de su compañía.

Finalmente a toda mi familia y amigos, en especial a mi tía por tanto tiempo y afecto que dedicó en mí y por siempre sentir orgullo de mis logros, los cuales son suyos también por ser parte fundamental de quien soy.

Daniel Enrique

DEDICATORIA

*A Dios por motivar en mí todas las actitudes y fortalezas para
enfrentarme a esta gran etapa,*

*A Mis padres y hermanos en especial a mi madre por ser la
impulsadora de todos mis sueños a pesar de las adversidades,*

*A mis amigos quienes me apoyan y fortalecen en los momentos más
cruciales y celebran todos mis triunfos,*

*A todos los que con su ejemplo incitan buenos aportes en mi vida y
contribuyen con lo que soy hoy en día.*

Luis Fernando

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a grupo de investigación OPALO por el apoyo humano y por hacer parte de la construcción del conocimiento y acompañamiento durante las actividades realizadas en la investigación.

Agradecemos a nuestro director Carlos Díaz por la confianza y gestión durante la ejecución de este proyecto y por compartir sus experiencias como investigador.

Un agradecimiento especial a Carlos Muñoz por su aporte y disponibilidad durante las etapas del proyecto.

Por último, a todos nuestros familiares y amigos por su colaboración y compañerismo a lo largo de nuestro proceso de formación profesional.

CONTENIDO

pag.

| | |
|--|----|
| INTRODUCCIÓN..... | 16 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA | 18 |
| 2. OBJETIVOS..... | 19 |
| 2.1. Objetivo General | 19 |
| 2.2. Objetivos específicos | 19 |
| 3. CARACTERISTICAS DE LA PLANTA..... | 20 |
| 3.1. TIPO DE DISTRIBUCIÓN | 21 |
| 3.1.1. Distribución por proceso..... | 21 |
| 3.1.2. Distribución por producto | 22 |
| 3.1.3. Distribución por centro de trabajo..... | 22 |
| 3.1.4. Distribución por posición fija..... | 23 |
| 3.2. FLUJO DEL PROCESO | 23 |
| 3.3. CARACTERÍSTICAS ESPACIALES DE LOS DEPARTAMENTOS | 27 |
| 3.3.1. Características de forma | 27 |
| 3.3.2. Características de área | 29 |
| 4. PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA DINAMICO | 30 |
| 4.1. EVOLUCIÓN HISTORICA..... | 31 |
| 5. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTAS DINÁMICO (DFLP)..... | 33 |
| 6. MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA DFLP | 36 |
| 6.1. Algoritmos óptimos (exactos) | 36 |
| 6.1.1. Programación dinámica..... | 36 |
| 6.1.2. Branch & Bound | 38 |
| 6.1.3. Algoritmo de plano de corte..... | 40 |
| 6.1.4. Algoritmo “cut tree” | 41 |
| 6.1.5. Craft..... | 42 |
| 6.2. MODELOS HEURÍSTICOS (SUB-ÓPTIMOS)..... | 43 |

| | | |
|-------|--|----|
| 6.3 | METAHEURÍSTICAS | 45 |
| 6.3.1 | Búsqueda tabú..... | 46 |
| 6.3.2 | Algoritmos genéticos..... | 51 |
| 6.3.3 | Colonia de hormigas..... | 53 |
| 7. | HIBRIDO BÚSQUEDA TABÚ – ALGORITMO GENÉTICO (HBG) | 55 |
| 8. | RESULTADOS..... | 62 |
| 8.1. | EFEECTO DE LOS PARAMETROS..... | 63 |
| 8.2. | ANÁLISIS DEL HIBRIDO BUSQUEDA TABÚ – ALGORITMO GENÉTICO..... | 70 |
| 8.1.1 | Escenario de 6 departamentos..... | 72 |
| 8.1.2 | Escenario de 15 departamentos..... | 75 |
| 8.1.3 | Escenario de 30 departamentos..... | 77 |
| 8.3 | TIEMPO COMPUTACIONAL | 80 |
| 9. | CONCLUSIONES | 82 |
| 10. | RECOMENDACIONES | 84 |
| | BIBLIOGRAFÍA..... | 85 |
| | ANEXOS..... | 89 |

LISTA DE ILUSTRACIONES

| | Pág. |
|---|-------------|
| Ilustración 1. Distribución línea simple | 24 |
| Ilustración 2. Distribución multilínea..... | 24 |
| Ilustración 3. Distribución circular cerrada | 25 |
| Ilustración 4. Distribución de campo abierto | 25 |
| Ilustración 5. Diagrama de distribución vertical | 26 |
| Ilustración. 6 Retroceso y Bypassing | 27 |
| Ilustración 7. Forma de departamentos..... | 28 |
| Ilustración 8. Diagrama de flujo búsqueda tabú | 48 |
| Ilustración 9. Diagrama de flujo Algoritmo Genético | 52 |
| Ilustración 10 Ejemplo de solución (6 departamentos y 5 periodos) | 55 |
| Ilustración 11 Ejemplo selección aleatoria de un periodo..... | 56 |
| Ilustración 12. Ejemplo parte 1..... | 57 |
| Ilustración 13. Ejemplo parte 2a..... | 57 |
| Ilustración 14. Ejemplo parte 2b..... | 58 |
| Ilustración 15. Ejemplo parte 3..... | 58 |
| Ilustración 16. Ejemplo parte 4..... | 59 |
| Ilustración 17. Diagrama de flujo Híbrido (TS y GA) | 60 |
| Ilustración 18 Diagrama de Pareto (15 departamentos)..... | 67 |
| Ilustración 19 Gráfica de efectos principales (15 departamentos)..... | 67 |
| Ilustración 20 Diagrama de Pareto (30 departamentos)..... | 69 |
| Ilustración 21 Gráfica de efectos principales (30 departamentos)..... | 69 |
| Ilustración 22 Dimensión matricial de los 3 tamaños de planta | 71 |
| Ilustración 23 Distribución Óptima (6 departamentos, problema 1)..... | 73 |
| Ilustración 24 Distribución Óptima (6 departamentos, problema 2)..... | 73 |
| Ilustración 25 Distribución Óptima (6 departamentos, problema 3)..... | 74 |
| Ilustración 26 . Mejor distribución encontrada por el Híbrido (15 departamentos, problema 1)..... | 76 |
| Ilustración 27 Mejor distribución encontrada por el Híbrido (15 departamentos, problema 2)..... | 76 |
| Ilustración 28 Mejor distribución encontrada por el Híbrido (15 departamentos, problema 3)..... | 77 |
| Ilustración 29 Mejor distribución encontrada por el Híbrido (30 departamentos, problema 1)..... | 78 |
| Ilustración 30 Mejor distribución encontrada por el Híbrido (30 departamentos, problema 2)..... | 79 |
| Ilustración 31 . Mejor distribución encontrada por el Híbrido (30 departamentos, problema 3)..... | 80 |

LISTA DE TABLAS

| | Pág. |
|--|-------------|
| Tabla 1 Parámetros usados en el experimento..... | 63 |
| Tabla 2 ANOVA para 15 departamentos | 66 |
| Tabla 3 ANOVA para 30 departamentos | 68 |
| Tabla 4 Comparación de soluciones 6 departamentos..... | 72 |
| Tabla 5 Análisis Escenario de 6 departamentos | 73 |
| Tabla 6 Comparación de soluciones 15 departamentos | 75 |
| Tabla 7 Análisis Escenario de 15 departamentos | 75 |
| Tabla 8 Comparación de soluciones 30 departamentos | 77 |
| Tabla 9 Análisis Escenario de 30 departamentos | 78 |
| Tabla 10 Comparación de tiempos computacionales | 81 |

LISTA DE ANEXOS

| | Pág. |
|-----------------------------------|-------------|
| ANEXO A. Datos de entrada..... | 90 |
| ANEXO B. Modelo en Matlab..... | 110 |
| ANEXO C. Artículo científico..... | 120 |

RESUMEN

TÍTULO: SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA DINÁMICO (DFLP) PARA INSTALACIONES DE ÁREAS IGUALES MEDIANTE EL HÍBRIDO BÚSQUEDA TABÚ - ALGORITMO GENÉTICO*.

AUTORES: DANIEL ENRIQUE ANDRADE PEÑA, LUIS FERNANDO RODRÍGUEZ JIMÉNEZ**

PALABRAS CLAVE: Problema de distribución de plantas (FLP), Problema de distribución de plantas dinámico (DFLP), meta-heurísticas, búsqueda tabú, algoritmo genético, MATLAB.

DESCRIPCION: En el presente trabajo se aborda el problema de distribución de planta dinámico DFLP, solucionado mediante el híbrido de dos metaheurísticas: búsqueda tabú y algoritmo genético. Se realiza una documentación y revisión bibliográfica del DFLP a través del tiempo y se define la estructura básica para resolver el problema. Posteriormente se procede a seleccionar y aplicar el método de solución. Se sugieren algunos como algoritmos óptimos, métodos heurísticos y métodos meta-heurísticos. Los dos primero suelen llegar a soluciones óptimas cuando se trabaja el problema con pocos periodos, instalaciones, departamentos y restricciones; a medida que estos aumentan, la complejidad de los problemas también lo hace, es por esto que se tiene la necesidad de incursionar en los métodos meta-heurísticos los cuales brindan buenas soluciones en tiempos computacionales razonables.

El híbrido presentado en este trabajo aprovecha la efectividad de los dos métodos mencionados anteriormente: Búsqueda Tabú (TS) y Algoritmo Genético (GA); el primero se encarga de buscar soluciones locales efectivas con las cuales se arman las "cadenas" de los algoritmos genéticos para encontrar la solución global del problema.

Con la información recopilada se diseña y desarrolla una herramienta computacional en MATLAB capaz de solucionar el problema. Finalmente se realiza una comparación con los resultados obtenidos por otros autores por medio de métodos diferentes para el mismo problema

* Proyecto de grado

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

ABSTRACT

TITLE: SOLUTION FOR THE DYNAMIC FACILITY LAYOUT PROBLEM (DFLP) FOR FACILITIES WITH EQUAL AREAS THROUGH THE HYBRID TABU SEARCH-GENETIC ALGORITHM*.

AUTHORS: DANIEL ENRIQUE ANDRADE PEÑA, LUIS FERNANDO RODRÍGUEZ JIMÉNEZ**

KEYWORDS: Facility layout problem (FLP), Dynamic facility layout problem (DFLP), Meta-heuristics, Tabu search, Genetic algorithm, MATLAB.

DESCRIPTION: This thesis addresses the Dynamic Facility Layout Problem (DFLP), solved by the hybrid of two meta-heuristics: Tabu search and Genetic algorithm. A documentation and literature review for the DFLP across the time is performed and the basic structure to solve the problem is defined. Then proceed to select and implement a solution method. Some methods are suggested as optimal algorithms, heuristics methods and meta-heuristics methods. The first two usually achieve optimum solutions when the problem just works with a few numbers of facilities, departments and constraints. As they increase, the problem complexity also does, is for this that is necessary to dabble in meta-heuristics methods which give good solutions in reasonable computational times.

The hybrid that appears in this Project, uses the effectiveness of the two methods mentioned above: Tabu Search (TS) and Genetic Algorithm (GA); the first is in charge of finding effective local solutions which are the ones that makes the “strings” used by the Genetic Algorithm to find the global problem solution.

Based on the gather information a software tool is designed and developed in MATLAB programming, able to solve the problem. Finally a comparison with results obtained by other authors with different methods to the same problem takes place.

* Degree Work

** Faculty of Physico-Mechanical Engineering. School of industrial and business Studies. Director: Carlos Eduardo Díaz Bohórquez

INTRODUCCIÓN

Uno de los problemas de mayor impacto sobre los costos y otros factores relevantes de muchas industrias es la Distribución de Planta (FLP, por sus siglas en inglés). Por esto es uno de los problemas más contemplados para la mayoría de sistemas de manufactura (Singh, S. P. & Sharma, 2005).¹

Sin embargo en los entornos corporativos rápidamente cambiantes las fábricas de hoy en día están pasando por períodos de expansión y declive. Cambios rápidos de una línea de productos a otro y/o suspender las líneas de producción existentes suele ser común, especialmente en las industrias de alta tecnología. Para mantenerse al día con el ritmo, la distribución de las instalaciones tiene que ser adaptable a los cambios (Gary Yu-Hsin Chen. 2013)²; el diseño tiene que ser suficientemente flexible para adaptarse a los cambios en el diseño de productos, diseño de procesos, y diseño de programación de actividades (Tompkins et al., 2003)³. Es por esta razón que es de gran importancia evolucionar el sistema de distribución de planta clásico (FLP) a una distribución de planta dinámica que tenga en cuenta y optimice estos cambios de la industria que se verán reflejados en la eficiencia de la planta.

A fin de explorar nuevas herramientas de solución al problema de distribución de planta dinámico se plantea un algoritmo híbrido que combinará búsqueda tabú con un algoritmo genético, con el fin de validar la herramienta se compara la solución con las existentes en la literatura, obtenidas por diferentes métodos y de esta forma buscar alternativas de solución al problema y al entorno empresarial. En el capítulo

¹SINGH SP, SHARMA RRK. A review of different approaches to the facility layout problems. Int J Adv Manuf Technol. [Online]. 2006 30:425–433.[Consultado 10 marzo 2016]

² CHEN GYH. A new data structure of solution representation in hybrid ant colony optimization for large dynamic facility layout problems. Int J Prod Econ. 2013. 142(2):362–371.[Consultado 11 marzo 2016]

³ TOMPKINS J.A., WHITE J.A., BOZER Y.A, TANCHOCO J.M.A., 2003. Facilities Planning, 3rd. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken NJ. 2003. [Consultado 11 marzo 2016]

uno se presentan las generalidades del proyecto, en el dos se muestra la evolución histórica que ha tenido el DFLP, en el tres las características de la planta, en el cuatro se muestra la formulación del problema, en el cinco se pueden observar los métodos de solución al DFLP, en el seis se define el método planteado en este proyecto, finalmente en el capítulo siete se muestran los resultados obtenidos para luego concluir y realizar las respectivas recomendaciones.

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema de distribución de plantas dinámico (DFLP) surge con la necesidad de ubicar un sistema productivo por un horizonte de tiempo determinado en las instalaciones disponibles, y esto se da debido a que las organizaciones actualmente deben ser capaces de responder rápidamente a cambios en la demanda y al volumen de producción por lo que permanecer con una misma distribución podría generar en un mediano o largo plazo ineficiencia en el sistema, lo que sugiere un aumento en los costos.

En su planteamiento, se deben examinar las características del espacio disponible y los requerimientos operativos y logísticos de la empresa con el fin de encontrar una distribución adecuada por un periodo de tiempo que permita reducir sus costos y lograr una mayor eficiencia en su proceso productivo.

El problema a tratar en el presente proyecto considera una instalación y los departamentos a distribuir se considerarán de áreas iguales.

Para dar solución al problema planteado el proyecto aplicará un híbrido entre las metaheurísticas “búsqueda tabú-algoritmo genético” la cual permitirá encontrar en primera instancia un conjunto de las mejores soluciones arrojadas por búsqueda tabú, para posteriormente encontrar la mejor solución global a través del algoritmo genético. Todo esto con parámetros previamente establecidos que aseguren que el proceso iterativo derive en una solución de alta calidad al acercarse al óptimo global del problema sin demandar demasiado tiempo computacional, logrando así un uso versátil del algoritmo. El valor del costo total arrojado establecerá la calidad de la solución.

2. OBJETIVOS

2.1. OBJETIVO GENERAL

Diseñar un algoritmo que dé solución al problema de distribución de planta dinámica (DFLP) utilizando un híbrido entre los métodos búsqueda tabú y algoritmo genético.

2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Revisión en la literatura sobre el problema de distribución de planta y las soluciones planteadas mediante meta-heurísticas.
- Formular el algoritmo híbrido para el problema de distribución de planta dinámico (DFLP).
- Programar el algoritmo híbrido en Matlab.
- Evaluar los resultados obtenidos con los presentados en otros trabajos de la literatura.

3. CARACTERISTICAS DE LA PLANTA

El problema que surge a partir de diseñar o distribuir una planta optima, de acuerdo con las características y restricciones que cada empresa tiene, recibe el nombre de FLP por sus siglas en inglés.

Con el tiempo las empresas se fueron dando cuenta que transcurrido un tiempo sus distribuciones eran menos eficientes y esto era debido a que las demandas cambiaban lo que generaba que los flujos entre departamentos no se mantuvieran constantes, de allí nace el problema de distribución de plantas dinámico DFLP por sus siglas en ingles.

Es importante que se tengan claros dos conceptos que están implícitos; instalaciones y departamentos. El primer término hace referencia al espacio físico disponible en la planta, en el que será ubicado uno de los departamentos definidos. El segundo, se refiere a toda aquella facilidad identificada como centro de trabajo, departamento, máquina o grupo de máquinas que pertenezcan al proceso productivo de la empresa.

Dentro de una planta, bien sea de manufactura o de servicios, resulta indispensable una localización adecuada de los departamentos que se tengan, para facilitar la comunicación y/o el transporte entre ellos. Cabe destacar que dicho transporte representa un costo que podría variar en cada periodo como parte de la operación, el cual debe estar bajo control. Sin embargo, a mayor número de instalaciones dentro de la planta, se incrementa la complejidad del problema FLP para organizar los flujos, debido a los espacios que debe haber entre áreas. Es indispensable que no haya superposición entre las instalaciones y los flujos entre estas se faciliten.

Después de planificar e identificar la distribución para cada periodo de tiempo, 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 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 dentro de esos departamentos en una instalación de producción de manera que permitan un flujo de trabajo ininterrumpido. 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.

3.1.1. Distribución por proceso. Una de las más comunes, la cual consiste en colocar los departamentos juntos, Si la comunicación y/o transporte entre ellos es muy elevada. Todas las operaciones del mismo proceso están agrupadas (máquinas afines que tienen funciones iguales o parecidas se ubican en un mismo departamento). Esta distribución tiene como ventaja que minimiza el tiempo inactivo de las maquinas. Se puede usar cuando las maquinas sean muy costosas o de difícil traslado, se fabriquen gran variedad de productos, hay grandes variaciones en los tiempos necesarios en las diferentes operaciones y la demanda de un producto sea baja o intermitente⁴.

⁴ 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. [Consultado 11 marzo 2016]

3.1.2. Distribución por producto. Ésta distribución se lleva acabo organizando los departamentos en una secuencia operativa necesaria para la fabricación de un producto, transportando el material a través de los departamentos. Al garantizar un movimiento rectilíneo del material, esta distribución permite duplicar equipo o departamentos y tener tiempos más rápidos de ciclo, aunque las líneas de transferencia son costosas e inflexibles y obstaculizan el espacio cuando se requieren cambios en el flujo del producto. Si una parte de la línea se para, toda la línea podría permanecer inactiva hasta haber corregido el problema⁵. Se debe usar cuando se desea fabricar grandes cantidades de piezas o productos, cuando el diseño esté más o menos estandarizado, la demanda del producto es razonablemente estable y se puede mantener sin dificultad el equilibrio de las operaciones y la continuidad del flujo de material²⁷.

3.1.3. Distribución por centro de trabajo. La idea es agrupar máquinas diferentes en centros de trabajos, para fabricar sobre productos que tienen formas y necesidades de procesamiento similares. La distribución por centros de trabajo o también conocida distribución por celdas, se parece a la distribución por proceso, ya que se diseñan los centros de trabajo para realizar un conjunto de procesos específicos. También es semejante a la distribución por producto, pues los centros de trabajo se dedican a una gama limitada de productos. El objetivo general es obtener los beneficios de una distribución por producto en la producción de un tipo de taller de trabajo. Estos beneficios incluyen mejores relaciones humanas, experiencia mejorada del trabajador, menos inventario en proceso y menos manejo de material, preparación rápida de la maquinaria.²⁷

⁵ NAHMIAS S., Análisis de la producción y las operaciones. Tercera Edición. Compañía editorial Continental, 2004. [Consultado 11 Febrero 2016]

3.1.4. Distribución por posición fija. Esta distribución se da cuando los productos son demasiado grandes para poder moverlos, así que el producto permanece fijo y la distribución se basa en el tamaño y la forma de éste. Todas las herramientas, maquinaria, hombres y demás piezas de material van al producto y son ubicadas de manera concéntrica alrededor de él con el orden de su utilización y dificultad de movimiento. Se debe usar cuando las operaciones de formación o tratamiento de material necesiten solo de herramientas manuales o máquinas sencillas, sólo se fabrique una o unas cuantas piezas de un artículo, el costo de trasladar la pieza principal de material sea alto, se necesite un alto nivel de trabajo especializado o se decida asignar la responsabilidad de la calidad a un solo trabajador²⁷.

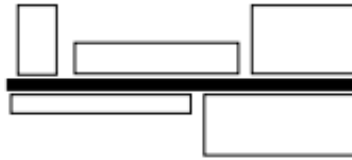
3.2. FLUJO DEL PROCESO

Por medio de éste, se garantiza la entrada y salida de material de cada una de las instalaciones. Se realiza a través de bandas transportadoras, rodillos, AGV (Vehículos Guiados Automatizados), robots entre otros. Cabe resaltar la importancia de escoger estos equipos de acuerdo con la distribución dada, para optimizar a su vez la utilización de los espacios dentro de la planta. De acuerdo con lo anterior, Amine Driara et ál (2007)⁶ propone las siguientes distribuciones:

a) Distribución Línea 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 1)

⁶ DRIRA A., PIERREVAL, H., y HAJRI-Gabouj S.. "Facility layout problems: A Survey". ELSEVIER Annual Reviews in Control 31, 255-267. 2007. [Consultado 11 Febrero 2016]

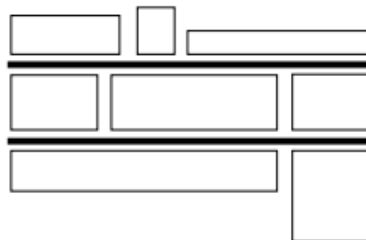
Ilustración 1. Distribución línea simple



Fuente: PALACIOS, Melissa y JAIMES, Christian Camilo. Alternativa de solución al problema de distribución de planta (flp) para instalaciones de áreas iguales y desiguales mediante un algoritmo híbrido genético. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, 2012

- b) Distribución Multilínea: 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 Ilustración2)

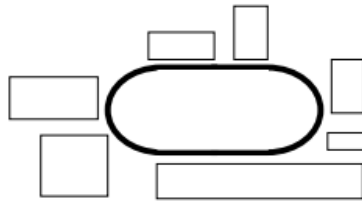
Ilustración 2. Distribución multilínea



Fuente: PALACIOS, Melissa y JAIMES, Christian Camilo. Alternativa de solución al problema de distribución de planta (flp) para instalaciones de áreas iguales y desiguales mediante un algoritmo híbrido genético. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, 2012

- 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 3).

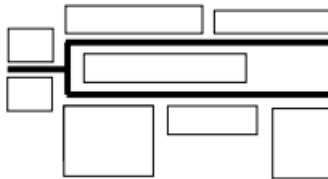
Ilustración 3. Distribución circular cerrada



Fuente: PALACIOS, Melissa y JAIMES, Christian Camilo. Alternativa de solución al problema de distribución de planta (flp) para instalaciones de áreas iguales y desiguales mediante un algoritmo híbrido genético. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, 2012

- d) Distribución de Campo Abierto: se caracteriza por que 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 4).

Ilustración 4. Distribución de campo abierto

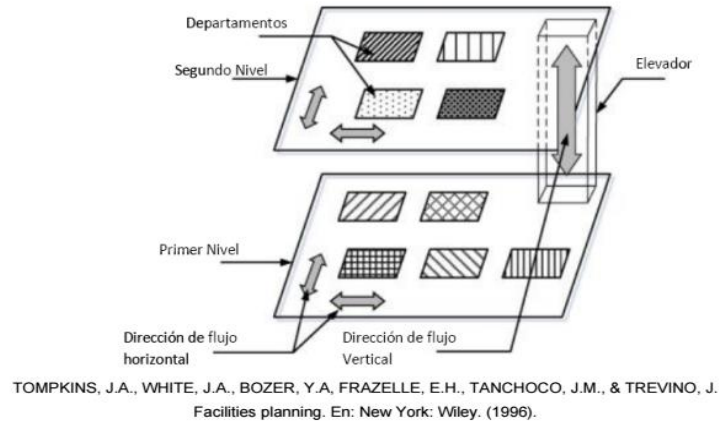


Fuente: PALACIOS, Melissa y JAIMES, Christian Camilo. Alternativa de solución al problema de distribución de planta (flp) para instalaciones de áreas iguales y desiguales mediante un algoritmo híbrido genético. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, 2012

- e) Distribución Vertical: cuando en una sola planta no es posible distribuir todas las instalaciones de la empresa, se hace necesario plantear distribuciones que involucren otros pisos o niveles de planta. De este modo, se puede dar un flujo de material, horizontal (en un mismo piso), o vertical que involucre otros niveles. Se utilizan elevadores para optimizar los flujos entre niveles. Por lo tanto, en este tipo de distribución entran más restricciones a ser

consideradas, tales como: la capacidad y número de elevadores necesarios, la superficie y el número de niveles (Ver Ilustración 5).

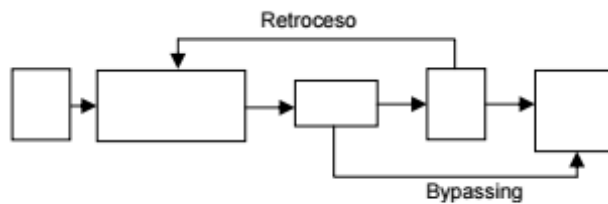
Ilustración 5. Diagrama de distribución vertical



Un problema común al que se tienen que enfrentar las distribuciones anteriormente mencionadas es el retroceso y el bypassing. (Ver Ilustración 6) 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 alternos contrarios al flujo normal lineal de producción.

Por otro lado, el bypassing se presenta cuando el producto se puede saltar determinado proceso, porque así está estipulado en su línea de producción, esto agiliza tiempos en manejos de materiales y de producción.

Ilustración. 6 Retroceso y Bypassing



Fuente: PALACIOS, Melissa y JAIMES, Christian Camilo. Alternativa de solución al problema de distribución de planta (flp) para instalaciones de áreas iguales y desiguales mediante un algoritmo híbrido genético. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, 2012

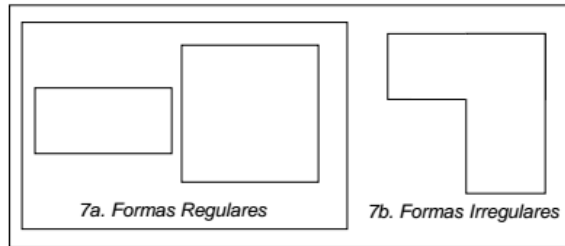
3.3. CARACTERÍSTICAS ESPACIALES DE LOS DEPARTAMENTOS

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 (2010)⁷.

3.3.1. Características de forma. Un departamento puede tener una forma regular o irregular. Las formas regulares son las conocidas como cuadrados o rectángulos definidas únicamente por el ancho y largo. (Ver Ilustración 7a.) Por ende, todas aquellas que no son lo anterior son las formas irregulares (Ver Ilustración 7b)

⁷ CALDERÓN MANTILLA Erika Viviana y DUARTE SÁNCHEZ Mónica Tatiana; Alternativas de solución al problema de distribución de planta (FLP) de un solo nivel y departamentos iguales o desiguales, por medio del análisis de métodos metaheurísticos, (Tesis Pregrado); Universidad Industrial de Santander, 2010. [Consultado 7 Noviembre 2015]

Ilustración 7. Forma de departamentos



Fuente PALACIOS, Melissa y JAIMES, Christian Camilo. Alternativa de solución al problema de distribución de planta (flp) para instalaciones de áreas iguales y desiguales mediante un algoritmo híbrido genético. Trabajo de grado Ingeniero Industrial. Bucaramanga: Universidad industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, 2012

Cuando se tienen departamentos de formas irregulares, Lee & Kim (2000) proponen diferentes algoritmos para modificar las formas a un diseño de bloque dado según esos departamentos. Con los algoritmos sugeridos, el área a distribuir se divide en bloques; únicamente vertical y/o horizontalmente, donde los departamentos tendrán ahora formas rectangulares, sin algún cambio significativo en la posición relativa de los mismos. Se pueden dar distribuciones con departamentos demasiado largos o pequeños, ambas son inaceptables. Por lo tanto, los autores proponen otros algoritmos para modificar las formas de los departamentos, tal como se planteó anteriormente: lograr formas regulares a partir de formas irregulares. Algunos de los algoritmos propuestos fueron:

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

3.3.2. 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 distribución de planta. En el caso de áreas iguales con las que se trabajará en este proyecto, el problema se considera de asignación cuadrática o QAP (por sus siglas en inglés) y para áreas desiguales, recibe el nombre de problema del conjunto de cobertura (SCP).

De acuerdo con Kyu-Yeul Lee et ál (1982)⁸ 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 operación³⁰.

⁸ BARTHOLDI J.J. Y PLATZMAN L.K., "An Onlong planar travelling salesman heuristic based on Space filling curves". Operation research letters. Vol. 1, No. 4 (1982); p. 121-125. [Consultado 20 Diciembre 2015]

4. PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA DINAMICO

El problema de distribución dinámica de las instalaciones (DFLP) se ocupa de la disposición de los departamentos para minimizar la suma de los costos de manejo de materiales y re-diseño, considerando períodos múltiples.

Los problemas de diseño de las instalaciones son cruciales ya que el manejo de los costos de los materiales está directamente relacionados con la ubicación de los departamentos en las instalaciones. Modelos de instalaciones dinámicos pueden proporcionar resultados más eficientes para satisfacer las necesidades de los entornos cambiantes, considerando períodos múltiples en lugar de diseños estáticos.

En un diseño estático, se considera un solo período y el objetivo principal es localizar los departamentos de manera que en total del costo de manejo de material que resulta de la serie de flujos entre máquinas, se reduzca al mínimo. Sin embargo, en la aplicación, debido a algunas fluctuaciones de la demanda entre dos períodos consecutivos, cambios menores en los lugares de la máquina pueden resultar con beneficios notables. Las decisiones de reubicar las máquinas están influenciadas por el equilibrio entre los costos de re-diseño y de manejo. Por lo general dos casos extremos pueden surgir. Uno de ellos es el caso en que los costos de re-diseño, como resultado de la reubicación, son muy altos y los administradores pueden no estar dispuestos a reubicar las máquinas. Por el contrario, los costos de re-diseño pueden ser relativamente bajos en comparación con los costos de manipulación y es preferible una relocalización para reaccionar a las nuevas condiciones. DFLP se encuentra entre estos dos casos. (Ulutas, Berna, 2015)⁹

⁹ ULUTAS Berna. A. ATTILA Islier, Dynamic facility layout problem in footwear industry, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 36, July 2015, Pages 55–61. [Consultado 11 marzo 2016]

4.1. EVOLUCIÓN HISTÓRICA

El problema de Distribución de Planta ha sido abordado desde diferentes puntos de vista: hay diversidad de artículos que proponen bien sea un análisis dinámico, estático, de 1 solo nivel o múltiples entre otros. A continuación se hará un breve recuento a partir de las investigaciones más sobresalientes al respecto:

En 1957 Koopman y Beckman¹⁰ fueron de los primeros en considerar el FLP a partir de un diseño estático, donde definieron dicho problema como algo común en toda planta productiva cuyo objetivo es minimizar los costos de transporte de material entre instalaciones.

En 1999 Meller¹¹ considero que en el FLP se debía hallar un arreglo plano ortogonal de n departamentos, iguales o desiguales donde éstos no se superpongan entre ellos dentro de una superficie rectangular, con el fin de minimizar la distancia recorrida entre estos, de acuerdo al flujo del producto.

Lee and Lee en el 2000¹² consideraron el FLP como una distribución de departamentos con áreas desiguales y de diferentes tamaños en un espacio dado, el cual estaría limitado por el largo o ancho de la planta, de manera tal que se minimice el costo de manejo de material y espacio ocioso.

Dos años después, Shayan y Chitilappilly¹³ propusieron estudiar el FLP como un problema de optimización que realice las distribuciones más eficientemente, basándose en la interacción entre los departamentos y los sistemas de manejos de material.

¹⁰ KOOPMANS T.C y BECKMANN M. "Assignment problems and the location of economic activities". *Econometrica*. Vol. 1, No. 25 (1957). [Consultado 11 marzo 2016]

¹¹ RUSSELL D Meller. "An iterative facility layout algorithm". *International Journal of Production Research*, 1999. [Consultado 11 marzo 2016]

¹² LEE, Y. H., Y LEE, M. H. "A shape-based block layout approach to facility layout problems using hybrid genetic algorithm". *Computers&Industrial Engineering*, 2002. 42, 237–248. [Consultado 10 marzo 2016]

¹³ SHAYAN E, & A. "Chitilappilly Genetic algorithm for facilities layout problems based on slicing tree structure". *International Journal of Production Research* Volume 42, Issue 19, 2004. [Consultado 11 marzo 2016]

Ciertos casos de la vida real demostraron las variaciones de flujo de materiales que se dan en ciertos períodos de tiempo. Por ello, Kouvelis (1992)¹⁴ habla de una distribución dinámica, conociendo a fondo esas variaciones o “estaciones” y lo recomienda siempre y cuando sea rentable.

Tompkins en 2003³ empezaba a plantear que el diseño de una planta tiene que ser 'suficientemente flexible para adaptarse a los cambios en el diseño de productos, diseño de procesos, y diseño de programación de actividades

Gary Yu-Hsin Chen en 2013² planteaba que los entornos corporativos rápidamente cambiantes en las fábricas de hoy en día estaban pasando por períodos de expansión y declive. Cambios rápidos de una línea de productos a otro y/o suspender las líneas de producción existentes suele ser común, especialmente en las industrias de alta tecnología. Para mantenerse al día con el ritmo, la distribución de las instalaciones tiene que ser adaptable a los cambios.

¹⁴ KOUVELIS, KURAWARWALA AA, GUTIERREZ GJ. “Algorithms for robust single and multiple period layout planning for manufacturing systemsP” - European journal of operational research, 1992. [Consultado 11 Abril 2016]

5. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTAS DINÁMICO (DFLP)

Después de definir las características de los departamentos y la distribución a utilizar, es necesario formular el problema por medio de un modelo matemático para poder solucionarlo, teniendo presente todas las relaciones entre los diferentes elementos.

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 DFLP son las siguientes:

- Minimización de los costos de adaptación de los departamentos.
- Minimización del costo del espacio entre departamentos.
- Minimización del flujo de material.
- Minimización del costo de manejo y manipulación del material.
- Minimización del número de retrocesos y bypassing.
- Minimización de costos de reorganizar las instalaciones de un periodo a otro.

La función objetivo, debe estar 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
- Ubicación de cada instalación en una única localización en cada periodo
- Puntos de entrada y salida de material establecidos
- Distancia mínimas entre instalaciones

Éste problema de optimización es considerado de asignación cuadrática (QAP). La planta se divide en bloques rectangulares de la misma área y forma, a cada bloque se le asigna una instalación.

A continuación se muestra la formulación matemática planteada por Balakrishnan, Cheng, & Wong, (2003)¹⁵:

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{t=1}^P \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f_{tik} d_{tjl} X_{tij} X_{tkl} \\ & + \sum_{t=2}^P \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n A_{tijl} Y_{tijl} \end{aligned} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n X_{tij} = 1, \quad j = 1, \dots, n, \quad t = 1, \dots, P, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{tij} = 1, \quad j = 1, \dots, n, \quad t = 1, \dots, P, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Y_{tijl} = & X_{(t-1)ij} X_{til}, \\ & i, j, l = 1, \dots, n, \quad t = 2, \dots, P, \end{aligned} \quad (4)$$

Donde P es el número de departamentos del diseño, f_{tik} el flujo del departamento i hasta k en el periodo t, d_{tjl} la distancia entre la instalación j y l en el periodo t, X_{tij} es una variable binaria [0,1] que determina si se ubica el departamento i en la instalación j en el periodo t, A_{tijl} es el costo de cambiar el departamento i de la localización j a la localización l en el periodo de tiempo t y Y_{tijl} es una variable binaria [0,1] que determina el cambio del departamento i de la instalación j a la l en el periodo de tiempo t. La función objetivo (1) representa la sumatoria de los costos de

¹⁵ BALAKRISHNAN, J, CHENG C. H., y WONG, K. F. "FACOPT: A user friendly FACility layout OPTimization system". Computers & Operations Research, 2003. 30(11), 1625–1641. [Consultado 15 marzo 2016]

flujo por cada par de instalaciones para cada periodo y el costo de reordenar en el periodo de tiempo t . La Ecuación (2) asegura que cada instalación contiene un solo departamento en el periodo de tiempo $t+1$, la Ecuación (3) garantiza que cada departamento está ubicado únicamente en una instalación en cada periodo, y la ecuación (4) establece que la variable toma un valor de 1 solo si el departamento cambia de ubicación en el periodo t . Usualmente el problema de FLP y DFLP 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.

6. MÉTODOS DE SOLUCIÓN PARA DFLP

6.1. Algoritmos óptimos (exactos)

Rosenblatt en 1986 propuso un modelo de diseño dinámico. (Rosenblatt 1986, 76-86)¹⁶ Este es el primer artículo sobre el problema distribución de instalaciones dinámico (DFLP). Para resolver el problema, Rosenblatt propuso un modelo de programación dinámica. Lacksonen y Ensore (1993, 503 a 517)¹⁷ utilizaron cinco algoritmos heurístico/óptimos modificados para resolver los problemas de diseño dinámicos no tan grandes:

- Modelo basado en el algoritmo de programación dinámica
- Modelo basado en el algoritmo “branch and bound”
- Modelo basado en una modificación del algoritmo de plano de corte
- Modelo basado en árboles cortados
- Modelo basado en CRAFT

6.1.1. Programación dinámica. Existe una serie de problemas cuyas soluciones pueden ser expresadas recursivamente en términos matemáticos, y posiblemente la manera más natural de resolverlos es mediante un algoritmo recursivo. Sin embargo, el tiempo de ejecución de la solución recursiva, normalmente de orden exponencial y por tanto impracticable, puede mejorarse substancialmente mediante la Programación Dinámica. En el diseño Divide y Vencerás se ve cómo para resolver un problema se divide en sub-problemas independientes, los cuales se resuelven de manera recursiva para combinar finalmente las soluciones y así resolver el

¹⁶ ROSENBLATT MJ. The dynamics of plant layout. Manag Sci. 1986 32:76–86. [Consultado 15 marzo 2016]

¹⁷ LACKSONEN TA, ENSORE EE. Quadratic assignment algorithms for the dynamic layout problems. Int J Prod. 1993. Res 31:503–517. [Consultado 15 marzo 2016]

problema original. El inconveniente se presenta cuando los sub-problemas obtenidos no son independientes sino que existe solapamiento entre ellos; entonces es cuando una solución recursiva no resulta eficiente por la repetición de cálculos que conlleva. En estos casos es cuando la Programación Dinámica puede ofrecer una solución aceptable. La eficiencia de esta técnica consiste en resolver los sub-problemas una sola vez, guardando sus soluciones en una tabla para su futura utilización. La Programación Dinámica no sólo tiene sentido aplicarla por razones de eficiencia, sino porque además presenta un método capaz de resolver de manera eficiente problemas cuya solución ha sido abordada por otras técnicas y ha fracasado. Donde tiene mayor aplicación la Programación Dinámica es en la resolución de problemas de optimización. En este tipo de problemas se pueden presentar distintas soluciones, cada una con un valor, y lo que se desea es encontrar la solución de valor óptimo (máximo o mínimo). La solución de problemas mediante esta técnica se basa en el llamado principio de óptimo enunciado por Bellman en 1957 y que dice: “En una secuencia de decisiones óptima toda sub-secuencia ha de ser también óptima”. Se observa que aunque este principio parece evidente no siempre es aplicable y por tanto es necesario verificar que se cumple para el problema en cuestión. Un ejemplo claro para el que no se verifica este principio aparece al tratar de encontrar el camino de coste máximo entre dos vértices de un grafo ponderado.

En el modelo del DFLP de Rosenblatt (1957)¹⁸ se considera la naturaleza dinámica de la demanda en localizar almacenes. Las decisiones de localización se hacen generalmente sobre la base de los horizontes de veinte años o más. Por lo tanto, los cambios en la demanda durante ese tiempo (naturaleza dinámica) pueden ser importantes. En el plan dinámico, la ubicación de almacén para cada período es diferente de la ubicación que se habría utilizado si la demanda de ese período se consideró de forma aislada (ubicación estática). El objetivo en este caso es comparar los costos de la reubicación del almacén en contra de los costes de

distribución guardados. Sweeney y Tatham (1976)¹⁸ proporcionan un procedimiento para llegar a percibir el problema de localización dinámica de instalación que nos permite eliminar algunas de las localizaciones estáticas o estados que serían necesarios en cada período. La regla es aplicable a la disposición dinámica también. Una desventaja de este método es que se requiere una buena solución factible antes de que la regla se pueda aplicar efectivamente. El DFLP es similar a la ubicación del almacén dinámico. La comparación aquí está entre el costo de flujo de manejo de materiales dentro de la instalación y los gastos de desplazamiento para los departamentos que pueden necesitar ser reubicados dentro de la instalación.

6.1.2. Branch & Bound. El algoritmo de “Branch & Bound” o de Ramificación y Poda. Este algoritmo se utiliza para hallar una solución óptima en distintos problemas como los de asignación cuadrática (QAP).¹⁹

Este método está basado en un árbol de búsquedas, donde en cada etapa todas las posibles soluciones del problema son particionadas en dos subconjuntos, cada una representada por nodos en un árbol de decisiones. Esta ramificación se realiza para reducir la cantidad de búsquedas que conducen a la solución óptima. Después de ramificar se calculan las cotas para cada uno de los dos subconjuntos. En el próximo espacio de soluciones que se busque se debe escoger uno de ellos, que es el mínimo de las dos cotas a ser comparadas. Este proceso se repite iterativamente. Entonces, solamente dentro de los subconjuntos de soluciones se

¹⁸ SWEENEY, D. S. and TATHAM, R. L., An improved long run model for multiple warehouse location. *Management Science*, 1976, 22(7), 758±758. [Consultado 15 marzo 2016]

¹⁹ RUSSELL Meller D. KAI-YIN Gau,. The Facility Layout Problem: Recent and Emerging Trends and Perspectives. *Journal of Manufacturing Systems*, Junio. 1996. 15, 351-366. 2015, [Consultado 16 marzo 2016]

buscará la cota que sea más baja que el valor de la cota inicial o de arranque (C. N. Kulkarni 2013).²⁰

Esta forma de ramificar y acotar la solución permite descartar un buen número de subconjuntos de solución, esto evita realizar una búsqueda infructuosa.

En el modelo planteado por Lacksonen y Ensore (1993)¹⁷ basado en el algoritmo de Pardalos y Crouse (1989)²¹, este método emplea los resultados de un algoritmo de plano de corte como un límite superior. El procedimiento se ejecuta como una heurística mediante el almacenamiento en los mejores nodos y termina después de analizar un cierto número de nodos.

²⁰ KULKARNI C. N. Dr. TALIB M.I., Dr. R. S. Jahagirdar Simulation Methodology for Facility Layout Problems. The International Journal Of Engineering And Science, 2, 24-30. 2013. [Consultado 12 marzo 2016]

²¹ PARDOLOS P. H. and CROUSE J. V., A parallel algorithm for the QAP. Proceedings of the 1989 Supercomputer Conference, ACM Press, New York, 1989, pp. 351± 360. [Consultado 15 marzo 2016]

6.1.3. Algoritmo de plano de corte. En forma general, para desarrollar un algoritmo de planos de corte, primero se busca una descripción parcial de la capsula convexa del conjunto de las soluciones factibles enteras o desigualdades válidas fuertes para este conjunto. Luego es necesario el diseño de rutinas de separación para las familias de desigualdades encontradas. Estas rutinas toman como entrada una solución y retornan restricciones de estas familias violadas por este punto, si es que existe alguna. El problema de separación, en algunos casos, puede ser NP-difícil o tener complejidad alta, lo que lleva en la práctica a utilizar algoritmos heurísticos, o sea, que es posible que no sean capaces de encontrar una desigualdad violada aunque exista. La estrategia que se utilice para decidir la búsqueda en las diferentes familias es clave para la performance del algoritmo. El esquema básico de un algoritmo de planos de corte es el siguiente. Se le llama PEM al problema entero mixto que queremos resolver, PL (P) a la relajación lineal del problema P y x^P la solución óptima de esta relajación.

El algoritmo de planos de corte puede no resolver el problema de forma óptima, ya sea por no encontrar desigualdades válidas violadas o porque el tiempo consumido excede el tiempo disponible. Sin embargo, puede ser utilizado para generar buenas cotas inferiores del valor óptimo del problema. Además, muchas veces a partir de la solución óptima de la relajación actual es posible encontrar buenas soluciones enteras mediante una heurística, brindando una cota superior del valor óptimo.

Lacksonen y Enscore (1993)¹⁹ se basan en el enfoque de Bukard, R. E. and Bonniger, T. (1983)²² este método combina planos de corte con una rutina de intercambio. En cada iteración, una rutina de asignación e intercambio se implementa, el proceso se repite para diferentes soluciones de partida. Por simplicidad, la rutina de asignación no tiene en cuenta los intercambios de

²² BUKARD R. E. and BONNIGER, T., A heuristic for quadratic Boolean program with applications to quadratic assignment problems. European, 1983. [Consultado 15 marzo 2016]

departamento entre períodos de tiempo. Esto se realiza mediante la rutina de intercambio.

6.1.4 Algoritmo “cut tree”. Introducido por Gomory y Hu (1961)²³ y también conocido como árboles Gomory-Hu, representan la estructura de todos los cortes s-t de grafos no dirigidos en una forma compacta. “Cut Tree” tiene muchas aplicaciones. Todos los algoritmos conocidos para la construcción de “Cut Tree” utilizan una subrutina de corte mínimo s-t. La forma más eficiente actualmente conocido para encontrar un corte mínimo s-t es utilizando un algoritmo de flujo máximo.

Gomory y Hu mostraron la forma de resolver el problema del árbol usando $n - 1$ cálculos de corte mínimos y las contracciones del grafo. Gusfield (1990)²⁴ propuso un algoritmo que no utiliza el grafo de contracción; todos los $n-1$ mínimos de corte s-t se llevan a cabo en el grafo de entrada. El algoritmo de Gusfield es muy simple y puede ser implementado mediante la adición de unas pocas líneas de código a un caudal máximo. El rendimiento computacional de los algoritmos para los problemas estrechamente relacionados, el problema de flujo máximo y el (por ejemplo, sobre todos los pares s, t) problema de corte mínimo se ha estudiado ampliamente. La mayoría de los problemas que caben en la memoria RAM de un ordenador moderno

“Cut Tree” parece más difícil, porque hay que resolver $n - 1$ problemas de corte mínimo s-t. Por lo tanto, el rendimiento computacional de algoritmos “Cut Tree” es de gran interés.

²³ GOMORY R. E. and HU T. C. Multi-terminal network flows. J. SIAM, 9:551–570, 1961. [Consultado 18 marzo 2016]

²⁴ GUSFIELD D. Very Simple Methods for All Pairs Network Flow Analysis. SIAM Journal on Computing, 19:143–155, 1990. [Consultado 15 Junio 2016]

El modelo de Lacksonen y Enscore (1993)¹⁹ se basan en la investigación de Montreuil, B. and Ratli (1989)²⁵, en donde cada departamento en cada periodo de tiempo está representado por un nodo y arcos representan el flujo de materiales y el reordenamiento de la instalación.

Los arcos del Cut Tree se convierten entonces manualmente en diseños. Este diseño manual se introduce en un algoritmo de intercambio para obtener mejores resultados.

6.1.5 Craft. Computerized Relative Allocation of Facilities Technique (CRAFT) es una herramienta que se utiliza para ayudar a mejorar el formato actual de las instalaciones. La instalación se ha mejorado mediante el canje de dos o más departamentos para ayudar a organizar la instalación óptima de una planta (Heragu 1997, 195)²⁶.

CRAFT se utiliza cuando el número de departamentos es grande, ya que el cálculo manual sería casi imposible de hacer. CRAFT se utiliza, básicamente, con el enfoque de diseño del proceso, que también se conoce como un diseño funcional que utiliza generalmente en los talleres de trabajo o de una instalación de producción por lotes. CRAFT utiliza un algoritmo de intercambio de pares que no puede devolver el resultado óptimo debido a que la solución final depende de la disposición inicial de la planta. En lugar de examinar todas las posibles permutas, CRAFT considera el canje de departamentos adyacentes o parejas que tienen la misma área.

En el modelo de Lacksonen y Enscore (1993)¹⁹ cada ejecución del algoritmo se inicia con ocho diseños aleatorios. Luego pares de departamentos se analizan para

²⁵ MONTREUIL, B. and RATLIÉ, H. D., Utilizing cut trees as design skeletons for facilities layout. IIE Transactions, 1989, 21(2), 136±143. [Consultado 19 mayo 2016]

²⁶ HERAGU, Multi-objective evaluation of dynamic facility layout using ant colony optimization, 1997, 195. [Consultado 15 marzo 2016]

intercambios a los largo de todos los bloques consecutivos de tiempo en un método basado en CRAFT. Esto convierte el intercambio de pares estático en uno dinámico.

6.2 MODELOS HEURÍSTICOS (SUB-ÓPTIMOS)

Urban (1993, 57-63)²⁷ propuso un procedimiento de intercambio de pendiente escarpada por pares combinado con el concepto de ventanas de pronóstico.

Balakrishnan, Cheng y Conway propusieron una mejora del procedimiento de las ventanas de pronóstico de Urban (1993)¹⁰ para resolver el problema de diseño dinámico, complementando con el método Backward. También aplicaron la heurística de Urban a la programación dinámica.

En el área de las Heurísticas genéticas y evolucionarias, existen artículos por Conway y Venkataraman (1994)²⁸, Balakrishnan y Cheng (2000)²⁹, y Dunker, Radons y WestKämper (2005)³⁰ para la solución de los diseños instalaciones de tamaño desiguales, así como Kochhar y Heragu's DHOPE para resolver DFLP multi-pisos. (1999)³¹.

La suposición de que los flujos de materiales se pueden determinar de antemano "puede no ser realista en entornos inciertos y volátiles, donde los cambios en la

²⁷ URBAN Timothy L.. A heuristic for the dynamic facility layout problem. IIE Transactions 25, 1993 no. 4: 57-63. [Consultado 15 marzo 2016]

²⁸ CONWAY Daniel G. and VENKATARAMANAN M.A... Genetic search and the dynamic facility layout problem, Computers in Operations Research, 199421: 955-960. [Consultado 15 Febrero 2016]

²⁹ BALAKRISHNAN Jaydeep, CHUN HUNG Cheng, and CONWAY Daniel G.. An improved pair-wise exchange heuristic for the dynamic plant layout problem. International Journal of Production Research 38, no. 13: 3067-3077.2000. [Consultado 15 marzo 2016]

³⁰ KOCHHAR J.S. and HERAGU S. S.. Facility layout design in a changing environment. International Journal of Production Research 37, no. 11: 2429-2446. 1999. [Consultado 17 marzo 2016]

³¹ KRISHNAN Krishna K., S. HOSSEIN Cheraghi and CHANDAN N. Nayak.. Dynamic from-between chart: a new tool for solving dynamic facility layout problems, International Journal of Industrial and Systems Engineering 1, no. 1/2:182–200. 2006. [Consultado 15 marzo 2016]

mezcla y el volumen pueden ser conocidos solamente justo antes de la revisión del ciclo de producción." (Heragu 1997, 195)⁹. Krishnan, Cheraghi y Nayak propusieron una nueva herramienta para el problema de diseño dinámico llamado "Dynamic From Between Chart (DFBC)", "que se puede utilizar para capturar la relación dinámica entre las máquinas en cualquier instante y vigilar continuamente el volumen del producto y el flujo entre las máquinas". (2006, 185)¹⁴. El from-between chart es diferente del tradicional from-to charts, el cual captura solo una 'instantánea' del flujo de materiales al comienzo del periodo. Ellos validan la herramienta utilizando el algoritmo genético.

Kuppusamy en su tesis de maestría propuso tres variantes basadas en el modelo recocido simulado. SA I es una adaptación de recocido simulado para el problema de diseño dinámico. SA II es igual SA I pero con estrategia de recalentamiento. La tercera heurística, SA COMBO, es la combinación de la heurística de intercambio de pares con ventanas de tiempo, SA y la heurística de intercambio por pares con pase atrasado. (2001)³²

Liu (2005) también presentó tres modelos basados en la búsqueda tabú. TS basic es la adaptación de la heurística búsqueda tabú para el problema de diseño dinámico. TS incorpora memoria basada en frecuencia y la estrategia diversificación / intensificación con la búsqueda tabú. La heurística búsqueda tabú probabilístico (PTS) selecciona discretamente candidatos para búsqueda tabú.³³.

Jin Shang (2002) y McKendall (2006)³⁴ proponen tres variantes de modelos de optimización de Colonia de Hormigas de para resolver el problema dinámico distribución de las instalaciones. El primero (HAS I) se deriva de forma HAS-QAP de Gambardella con la adaptación para el problema distribución de las instalaciones

³² KUPPUSAMY Saravanan. Simulated annealing heuristics for the dynamic facility layout problem. Master's thesis, West Virginia University. 2001. [Consultado 17 marzo 2016]

³³ LIU Wen-Hsing. Tabu search for the dynamic facility layout problem. Master's thesis, West Virginia University. 2005. [Consultado 16 marzo 2016]

dinámica. La segunda heurística (HAS II) combina las ideas de HAS I y la meta-heurística simulado recocido. La tercera heurística (HAS III) suma la estrategia vista prospectiva/retrospectiva a la heurística de intercambio por parejas (búsqueda local). Los modelos del autor habían obtenido buenos resultados con los dos conjuntos de datos de entrada de Lacksonen y Ensore (1993) y Balakrishnan y Cheng (2000)¹². En resumen, la principal diferencia entre los tres algoritmos es la búsqueda/optimización local – HAS I utiliza un descenso al azar de la heurística de intercambio por pares; HAS II utiliza el recocido simulado (SA) como la búsqueda local; HAS III utiliza un descenso al azar de la heurística de intercambio por pares con la estrategia vista prospectiva/retrospectiva (McKendall and Shang 2006, 790-803)¹⁷.

6.3 METAHEURÍSTICAS

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.

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. La metaheurística se ha convertido en una de las técnicas más importantes para solución de problemas de optimización.

El uso de estos métodos metaheurísticos, surge a partir de la necesidad de solucionar el problema FLP y posteriormente DFLP, no solo para instalaciones pequeñas, sino también en los casos donde el número de instalaciones a distribuir es muy grande. A pesar de que los métodos utilizados en las metaheurísticas no generen soluciones óptimas, si logran definir una distribución factible y cercana a ésta. A continuación se explicaran los métodos metaheurísticos más usados para la solución del DFLP haciendo énfasis en búsqueda tabú y algoritmo genético por ser los de mayor interés para este proyecto:

6.3.1 Búsqueda tabú. La técnica de Búsqueda Tabú o TS (Por sus siglas en inglés, Tabu Search), es un algoritmo meta-heurístico que se utiliza para resolver problemas de optimización combinatoria. Fue definida y formalizada por Glover en 1986. Es una técnica diseñada para gestionar un algoritmo de búsqueda local integrado. Utiliza de forma explícita la historia de la búsqueda para escapar de los óptimos locales e implementar una estrategia de exploración. Su principal característica se basa de hecho en el uso de mecanismos inspirados en la memoria humana³⁵.

El proceso desarrollado en una búsqueda tabú comienza con una solución inicial y luego inicia una búsqueda en la vecindad de la solución actual. Por ello, lo primero

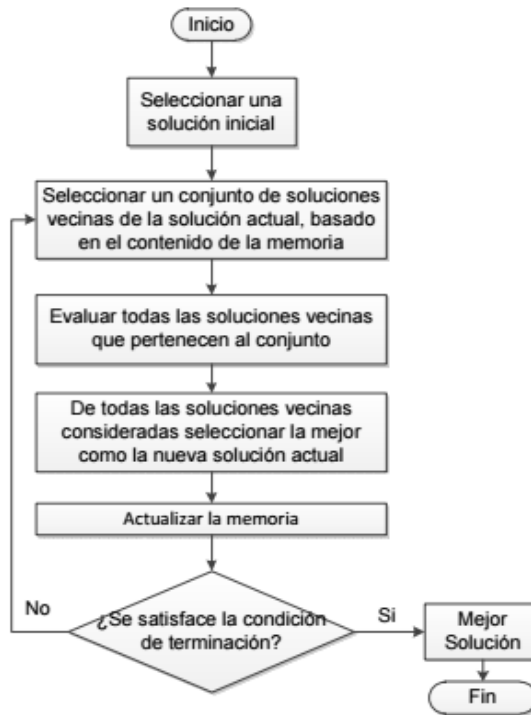
³⁵ LOU Y. Liang, & WEN C. Chao. The strategies of tabu search technique for facility layout optimization. *Automation in Construction*, 17, pp.657-669. 2008. [Consultado 20 marzo 2016]

que se debe definir es una solución viable al problema y ciertos parámetros como el tamaño de la vecindad, de la lista tabú, los criterios de búsqueda y de parada.

Cuando se inicia la búsqueda se genera un conjunto de soluciones de la vecindad a través de un cambio predefinido a la solución actual. A continuación, la mejor solución se selecciona entre el conjunto actual de soluciones vecinas y esto se convierte en la nueva solución actual. Una vez más, se genera un nuevo conjunto de soluciones vecinas de la nueva solución actual y el proceso se repite hasta que se cumplan los criterios de parada. La lista tabú registra las últimas soluciones encontradas (o algunos atributos de ellas) y prohíbe que estas soluciones (o soluciones que contienen uno de estos atributos) sean visitadas otra vez, siempre y cuando se encuentren en la lista. Las soluciones tabú pueden dejar de serlo sobre la base de una memoria cambiante, debe haber una forma de “olvido estratégico”, es decir que una solución o atributo pueda salir de la lista tabú antes de que se cumpla su plazo. Esto se implementa a través del Criterio de aspiración, el cual permite que un movimiento sea admisible aunque esté clasificado como tabú. De ésta manera se logra restringir algunos movimientos para prevenir que la búsqueda caiga en un ciclo y lograr que el proceso abandone los óptimos locales en busca del óptimo global. El tamaño o longitud de la lista tabú controla la memoria del proceso de búsqueda. Si la longitud de la lista es baja, La búsqueda se concentra en pequeñas áreas del espacio de búsqueda. Por el contrario, una longitud alta fuerza a que el proceso de búsqueda explore regiones más grandes, ya que prohíbe volver a visitar un mayor número de soluciones³⁶.

³⁶ BOZORGI Najmeh; ABEDZADEH, MOSTAFA & ZEINALI. Mohsen. Tabu search heuristic for efficiency of dynamic facility layout problem. *Manufacture Technology*, 77, pp.689-703. 2015. [Consultado 15 Febrero 2016]

Ilustración 8. Diagrama de flujo búsqueda tabú



Básicamente la metodología búsqueda tabú está compuesto por 4 principales 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.

- **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 aspiración³⁷.
- **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.
- **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.

³⁷ GLOVER, F, "Tabu Search: A Tutorial". INTERFACES, Vol. 20, No. 4, July August 1990, pp. 74-9429. [Consultado 15 Febrero 2016]

- 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.

En el método propuesto por Kaku y Mazzola (1997)³⁸, un intercambio por parejas se utiliza para evaluar movimientos candidatos en una búsqueda local de vecindario. Una lista tabú se mantiene para evitar el ciclismo y en cada iteración del 'mejor' movimiento no tabú se lleva a cabo si el resultado es una mejor solución. El procedimiento se detiene cuando la solución no mejora después de una serie de movimientos o si se llega a un límite de iteraciones. Las estrategias de diversificación se utilizan para garantizar que las regiones diferentes del espacio de búsqueda sean exploradas para mejores soluciones. Las estrategias de intensificación permiten que el procedimiento para hacer más búsquedas en un vecindario, por manipulaciones tales como la reducción de la longitud de la lista tabú, también resultaron útiles. El algoritmo tiene dos etapas. Diversificación permite una serie de soluciones de partida. La búsqueda tabú a continuación, genera buenas soluciones que se introducen en la segunda etapa para una búsqueda más intensiva. La mejor solución que se encuentra en la segunda etapa es la solución final. Experimentos computacionales muestran que el procedimiento de búsqueda tabú proporcionó soluciones que eran tan buenas o ligeramente mejores que las mejores soluciones para el diferentes algoritmos en Lacksonen y Enscore (1993)¹⁹. Problemas con 30 departamentos y 5 períodos tomaron aproximadamente 3 horas en un promedio de resolver en un PC Pentium 200 Mhz.

³⁸ KAKU B. K. and MAZZOLA J. B., A tabu-search heuristic for the dynamic plant layout problem. *INFORMS Journal on Computing*. (forthcoming), 1997. [Consultado 15 Febrero 2016]

6.3.2 Algoritmos genéticos. 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.

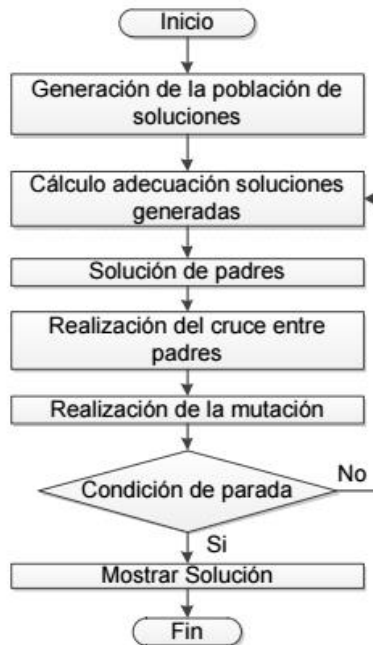
Trabaja con una población completa de soluciones de prueba en cada iteración. Después utiliza la analogía con la teoría biológica de la evolución, sobre todo el concepto de la supervivencia del más apto, para descartar algunas de las soluciones de prueba (en especial las más pobres) y reemplazarlas con otras nuevas. En este proceso de reemplazo tiene pares de miembros sobrevivientes que transfieren algunas de sus características a pares de nuevos miembros como si fueran padres que reproducen hijos³⁹. Esas características que pasan de generación en generación son las conocidas como soluciones viables que se organizan cada una en un 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:

- **Selección.** 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.

³⁹ LIEBERMAN G. y HILLIER F., Introducción a la Investigación de Operaciones, Octava edición. México D.F.:McGraw-hill, 2006, capítulo 13: Metaheurística. [Consultado 15 marzo 2016]

Ilustración 9. Diagrama de flujo Algoritmo Genético



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 solución⁴⁰.

- **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.

⁴⁰ HOLLAND J. H. Adaptation in Natural and Artificial Systems, The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975. [Consultado 15 Febrero 2016]

Conway y Venkataramanan (1994)²⁸ examinan la idoneidad de los algoritmos genéticos (GA) para el DFLP. En su procedimiento, para un problema de 6 departamentos y 5 periodos, una cadena en la población consistiría en $n \times t$, o 30 dígitos, que representa todos los departamentos de cada período. También habría $n!$ o 720 cadenas en la población. Para cruzar, se seleccionan dos cadenas fuertes de la población. A continuación, se genera una posición de empalme al azar y las cuerdas se dividen. Las sub-cadenas son entonces intercambiadas. Dado que estos intercambios pueden crear soluciones no factibles (por ejemplo, dos apariciones del departamento 5 en un mismo período), permutas adicionales de dígitos se realiza para garantizar su viabilidad. Se deja que la cadena con un menor coste sobreviva a la siguiente generación. En las pruebas, donde el cruce se realizó con capacidad para 100 generaciones utilizando tamaños de población de hasta 800, el algoritmo obtiene buenos resultados en comparación con la programación dinámica para problemas de seis y nueve departamento. No se dieron tiempos de cálculo.

6.3.3 Colonia de hormigas. El algoritmo de Colonia de Hormigas o ACO (por sus siglas en inglés, Ant Colony Optimization) fue introducido primero por Dorigo(2009) y luego fue formalizado como una meta-heurística por Dorigo & Di Caro. Es un enfoque que se ha hecho muy popular en la literatura para resolver problemas de optimización combinatoria⁴¹.

La idea fundamental de la heurística de hormigas se basa en el comportamiento natural de las hormigas, las cuales tienen éxito en la búsqueda de los caminos más cortos desde su nido a las fuentes de alimento mediante la comunicación a través de una memoria colectiva que se da por medio de senderos de feromonas. Es decir, Cada hormiga toma en consideración los senderos (elección probabilística) de

⁴¹ UĞUR Aybars; AYDIN Doğan. An interactive simulation and analysis software for solving TSP using Ant Colony Optimization algorithms. *Advances in Engineering Software*, 40, pp.341-349. 2009. [Consultado 15 Febrero 2016]

feromonas que dejan todos los otros miembros de la colonia de hormigas que precedieron a su curso, esos rastros de feromonas son, en otras palabras, un olor dejado por cada hormiga en su camino. Esta feromona se evapora con el tiempo, y por lo tanto la elección probabilística para hormiga cambia con el tiempo.

Después de varios trayectos de hormigas, la ruta de acceso a la comida tendrá un rastro de feromonas mucho más alto y por lo tanto todas las hormigas seguirán el mismo camino.

Para adaptar éste fenómeno colectivo a los problemas de optimización combinatoria analógicamente se debe tener en cuenta que: el espacio de búsqueda de la hormiga se convierte en el espacio de las soluciones del problema, la cantidad de comida que se halle en una fuente de alimento se convierte en la evaluación de la función objetivo para la solución correspondiente, y los senderos de feromonas serían la memoria adaptativa del problema⁴². El algoritmo de Colonia de Hormigas ha sido planteado para solucionar algunas variaciones del FLP como por ejemplo, Baykasoglu, Dereli & Sabuncu (2004) formularon un algoritmo ACO para un DFLP con restricciones de presupuesto basadas en una demanda inestable que se desarrolla bajo unas condiciones industriales muy volátiles. En su investigación muestran que un ACO puede ser aplicado a éste tipo de problemas y para ello presentan diferentes ejemplos computacionales que muestran la efectividad de su algoritmo.

⁴² BAYKASOGLU Adil; DERELI Turkey; Sabuncu, Ibrahim. An ant colony algorithm for solving budget constrained and unconstrained dynamic facility layout problems. Omega 34, pp.385-396. 2006. [Consultado 15 marzo 2016]

7. HIBRIDO BÚSQUEDA TABÚ – ALGORITMO GENÉTICO (HBG)

El algoritmo planteado en este proyecto consiste en combinar 2 técnicas metaheurísticas (Búsqueda tabú y algoritmo genético) para encontrar la solución al problema de distribución de plantas dinámico (DFLP). A continuación se mostrara un ejemplo de la representación de una solución de un problema de 6 departamentos y 5 periodos con el fin de hacer más fácil la comprensión del método (Ver ilustración 10).

Ilustración 10 Ejemplo de solución (6 departamentos y 5 periodos)

| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------|---|---|---|---|---|-----------|---|---|---|---|---|-----------|---|---|---|---|---|-----------|---|---|---|---|---|-----------|---|---|---|---|---|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 2 | 3 | 5 | 4 | 6 | 1 | 2 | 5 | 6 | 3 | 1 | 4 | 3 | 2 | 5 | 4 | 6 | 1 | 4 | 1 | 5 | 6 | 3 | 2 |
| Periodo 1 | | | | | | Periodo 2 | | | | | | Periodo 3 | | | | | | Periodo 4 | | | | | | Periodo 5 | | | | | |

Los parámetros a utilizar en este híbrido son los siguientes:

- Parámetro 1: Ciclos de periodo. Se refiere a la cantidad de periodos seleccionados aleatoriamente para ser tratados con búsqueda tabú.
- Parámetro 2: Tamaño del vecindario. Se refiere al número de vecindarios a evaluar por cada ciclo de periodo.
- Parámetro 3: Número de intercambios a realizar en cada vecindario.
- Parámetro 4: Tamaño de la lista tabú. Numero de iteraciones en las que un intercambio está vetado.
- Parámetro 5: Porcentaje de soluciones tomadas de búsqueda tabú para la piscina del algoritmo genético.
- Parámetro 6: Tamaño de la piscina del algoritmo genético.(vale la pena aclarar que el tamaño de la piscina es constante).
- Parámetro 7: Número de apareamientos o cruces a realizar.

La metodología de búsqueda tabú se usa inicialmente con el fin de encontrar buenas soluciones por medio de los siguientes pasos:

Paso 1: Generar una solución inicial aleatoria para cada uno de los periodos (Ver ilustración 10).

Paso 2: Seleccionar aleatoriamente un periodo.

Ilustración 11 Ejemplo selección aleatoria de un periodo



Paso 3: Evaluar vecindario con la función objetivo.

Paso 4: Seleccionar mejor solución del vecindario y guardar el movimiento en la lista tabú.

Paso 5: Almacenar la cantidad de mejores soluciones (Según parámetro 5).

Ya obtenidas las mejores soluciones se inicia la búsqueda de la solución final en el algoritmo genético de la siguiente forma:

Paso 6: Llenar espacios vacíos en la piscina inicial con soluciones aleatorias.

Paso 7: Realizar la selección de padres mediante el método de torneo, el cual consiste en la selección aleatoria de soluciones dentro de la piscina para posteriormente ponerlos a competir obteniendo así los mejores padres y dando oportunidad a cada solución que se encuentre en la piscina .

Paso 8: Hacer el cruce de padres, esto se realiza de la siguiente forma:

Ilustración 12. Ejemplo parte 1

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

Para generar el primer hijo se empieza ubicando las instalaciones iguales en la misma ubicación

Ilustración 13. Ejemplo parte 2a

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

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, queda la tercera casilla vacía debido a que la instalación número 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

Ilustración 14. Ejemplo 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 |

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

Ilustración 15. Ejemplo parte 3

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

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

Ilustración 16. Ejemplo parte 4

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

Paso 9: Se procede a mutar los dos hijos, esto se hace seleccionando dos instalaciones aleatoriamente e intercambiando los departamentos allí ubicados, Aumentando así la diversificación y la cantidad de soluciones a evaluar.

Paso 10: Evaluar los hijos e hijos mutados en la función objetivo.

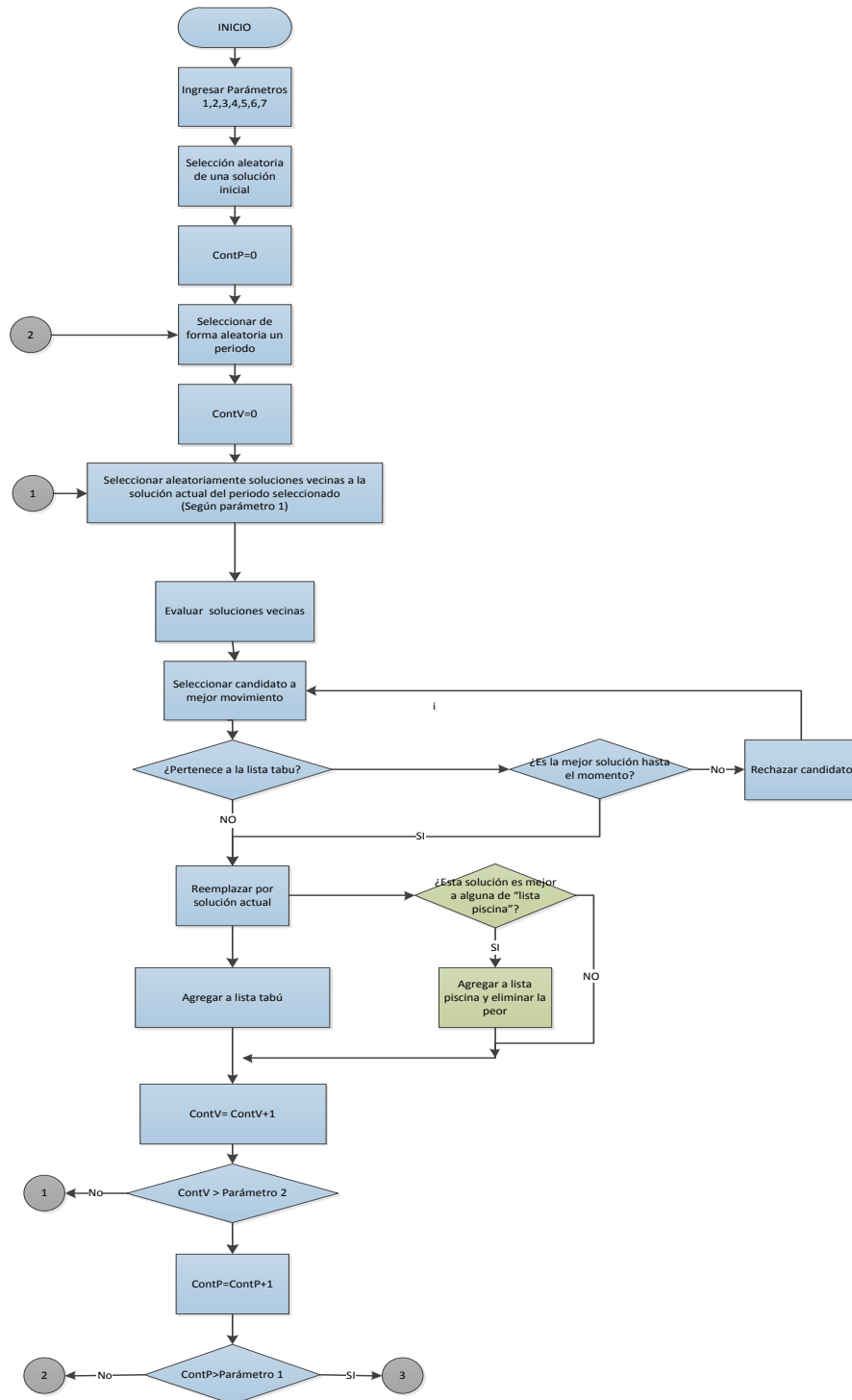
Paso 11: Comparar hijos e hijos mutados con las soluciones que se encuentran en la piscina, agregando así los hijos que representen una mejor solución que alguna en la piscina, y eliminando las peores soluciones de esta.

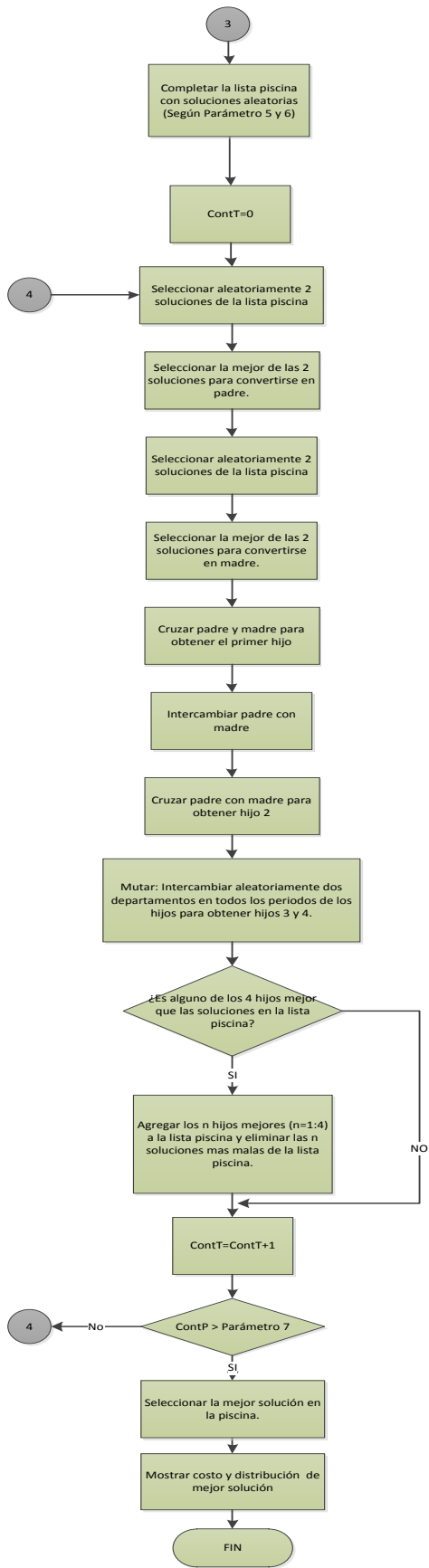
Paso 12: Selección de la mejor solución dentro de la piscina.

Paso 13: Mostrar la distribución de la mejor solución para cada uno de los periodos.

A continuación se puede observar el diagrama de flujo para este híbrido.

Ilustración 17. Diagrama de flujo Híbrido (TS y GA)





8. RESULTADOS

Con el fin de conocer el comportamiento del algoritmo planteado bajo diferentes condiciones y parámetros, se realizó el siguiente estudio:

Se identificaron los parámetros a utilizar en el algoritmo (número de ciclos aleatorios de periodo, número de vecindarios a evaluar, número de intercambios a evaluar por vecindario, lista tabú, número de soluciones tomadas de búsqueda tabú, número de soluciones dentro de la piscina, número de apareamientos).

Con el objeto de comparar la efectividad del algoritmo planteado con los encontrados en la literatura, se decidió analizar para 3 tamaños de plantas diferentes (6, 15, 30 departamentos con dimensiones 2x3, 3x5, 5x6 respectivamente), seleccionados de acuerdo a la disponibilidad de datos de entrada encontrados en la literatura (matrices de flujo, distancia, costos).

El experimento fue llevado a cabo mediante la aplicación del algoritmo programado en el software matlab, diseñado y desarrollado por los autores aplicando 3 problemas.

Como variable de análisis, se encontrara el error que el algoritmo presenta (5) en el problema de estudio con respecto a la solución óptima para el caso de 6 departamentos (Esto debido a que se tiene la solución óptima del problema), para las plantas de 15 y 30 departamentos el error se halla con respecto a la mejor solución obtenida (Las encontradas por los autores de este proyecto o en la literatura).

$$\text{Variable de análisis} = \text{Error} = \frac{Z_{\text{heurística}} - Z_{\text{óptimo}}}{Z_{\text{óptimo}}} \quad (5)$$

8.1. EFECTO DE LOS PARAMETROS

Para estudiar el efecto de los parámetros o factores sobre las plantas de 6 departamentos no se realiza un estudio debido a que las dos metaheurísticas convergen totalmente al momento de encontrar la mejor solución al problema⁴³.

Para las plantas con 15 y 30 departamentos se realizó un diseño de experimentos fraccionado (1/4), los parámetros o factores considerados fueron los siguientes:

- Parámetro 1: Ciclos de periodo.
- Parámetro 2: Número de vecindarios a evaluar.
- Parámetro 4: Tamaño de la lista tabú.
- Parámetro 5: Porcentaje de soluciones tomadas de búsqueda tabú para la piscina del algoritmo genético.
- Parámetro 6: Tamaño de la piscina del algoritmo genético.
- Parámetro 7: Número de apareamientos o cruces a realizar.

El parámetro 3 (Número de intercambios a realizar en cada vecindario) no se toma en cuenta para el diseño de experimentos debido a que se le asigna el total de intercambios posibles para cada tamaño de planta (15 y 30) con el fin de recorrer un mayor número de soluciones.

Tabla 1 Parámetros usados en el experimento

| Parámetros | Bajo | Alto | Bajo | Alto |
|---------------------------|------------------|------|------------------|------|
| | 15 departamentos | | 30 departamentos | |
| N. Ciclos de periodo | 100 | 1000 | 50 | 500 |
| #N. vecindarios a evaluar | 100 | 1000 | 50 | 500 |
| Tamaño de la lista tabú | 3 | 6 | 3 | 6 |

⁴³ LEE, Y. H., Y LEE, M. H. (2002). "A shape-based block layout approach to facility layout problems using hybrid genetic algorithm". Computers&Industrial Engineering, 42, 237–248. [Consultado 15 marzo 2016]

| % Sol Tabú | 20% | 80% | 20% | 80% |
|---------------|-----|------|-----|------|
| Piscina | 50 | 500 | 50 | 500 |
| Apareamientos | 500 | 5000 | 500 | 1000 |

El modelo estadístico planteado para 15 y 30 departamentos es:

$$\begin{aligned}
 Y_{ijklmng} = & M + A_i + B_j + C_k + D_l + E_m + F_n + AB_{ij} + \\
 & AC_{ik} + AD_{il} + AE_{im} + AF_{in} + BD_{jl} + BF_{jn} + ABF_{ijn} + ABD_{ijl} \\
 & + \varepsilon_{ijklmng}
 \end{aligned}
 \left\{ \begin{array}{l}
 i: 100, 1000 \\
 j: 100, 1000 \\
 k: 3, 6 \\
 l: 20\%, 80\% \\
 m: 50, 500 \\
 n: 500, 1000 \\
 g: 1, 2, 3, 4, 5
 \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned}
 Y_{ijklmng} = & M + A_i + B_j + C_k + D_l + E_m + F_n + AB_{ij} + \\
 & AC_{ik} + AD_{il} + AE_{im} + AF_{in} + BD_{jl} + BF_{jn} + ABF_{ijn} + ABD_{ijl} \\
 & + \varepsilon_{ijklmng}
 \end{aligned}
 \left\{ \begin{array}{l}
 i: 50, 500 \\
 j: 50, 500 \\
 k: 3, 6 \\
 l: 20\%, 80\% \\
 m: 50, 500 \\
 n: 500, 1000 \\
 g: 1, 2, 3, 4, 5
 \end{array} \right.$$

Donde M es el efecto del promedio global, A_i es el efecto del nivel i -ésimo del factor Número de ciclos de periodo, B_j es el efecto del nivel j -ésimo del factor Número de vecindarios a evaluar, C_k es el efecto del nivel k -ésimo del factor tamaño de lista tabú, D_l es el efecto del nivel l -ésimo del factor Porcentaje de soluciones tabú, E_m es el efecto del nivel m -ésimo del factor Tamaño de piscina, F_n es el efecto del nivel n -ésimo del factor Numero de apareamientos, AB_{ij} es el efecto de la interacción entre A_i y B_j , AC_{ik} es el efecto de la interacción entre A_i y C_k , AD_{il} es el efecto de la interacción entre A_i y D_l , AE_{im} es el efecto de la interacción entre A_i y E_m , AF_{in} es el efecto de la interacción entre A_i y F_n , BD_{jl} es el efecto de la interacción entre B_j y D_l , BF_{jn} es el efecto de

la interacción entre B_j y F_n , ABF_{ijn} es el efecto de la interacción entre A_i , B_j y F_n , ABD_{ijl} es el efecto de la interacción entre A_i , B_j y D_l , $\varepsilon_{ijklmng}$ es el componente de error.

El experimento busco probar los efectos de los tratamientos sobre la variable salida (Costo), de esta forma las hipótesis de interés fueron:

$$H_0 = A_{50} = A_{500} = 0$$

$$H_1 = \text{Al menos una } A_i \neq 0$$

$$H_0 = B_{50} = B_{500} = 0$$

$$H_1 = \text{Al menos una } B_j \neq 0$$

$$H_0 = C_3 = C_6 = 0$$

$$H_1 = \text{Al menos una } C_k \neq 0$$

$$H_0 = D_{20\%} = D_{80\%} = 0$$

$$H_1 = \text{Al menos una } D_l \neq 0$$

$$H_0 = E_{50} = E_{500} = 0$$

$$H_1 = \text{Al menos una } E_m \neq 0$$

$$H_0 = F_{500} = F_{1000} = 0$$

$$H_1 = \text{Al menos una } F \neq 0$$

$$H_0 = AB_{ij} = 0 \text{ para todo } i \text{ y } j$$

$$H_1 = \text{Al menos una } AB_{ij} \neq 0$$

$$H_0 = AC_{ik} = 0 \text{ para todo } i \text{ y } k$$

$$H_1 = \text{Al menos una } AC_i \neq 0$$

$$H_0 = AD_{il} = 0 \text{ para todo } i \text{ y } l$$

$$H_1 = \text{Al menos una } AD_{il} \neq 0$$

$$H_0 = AE_{im} = 0 \text{ para todo } i \text{ y } m$$

$$H_1 = \text{Al menos una } AE_{im} \neq 0$$

$$H_0 = AF_{in} = 0 \text{ para todo } i \text{ y } n$$

$$H_1 = \text{Al menos una } AF_{in} \neq 0$$

$$H_0 = BD_{jl} = 0 \text{ para todo } j \text{ y } l$$

$$H_1 = \text{Al menos una } BD_{jl} \neq 0$$

$$H_0 = BF_{jn} = 0 \text{ para todo } j \text{ y } n$$

$$H_1 = \text{Al menos una } BF_{jn} \neq 0$$

$$H_0 = ABD_{ijl} = 0 \text{ para todo } i, j \text{ y } l$$

$$H_1 = \text{Al menos una } ABD_{ijl} \neq 0$$

$$H_0 = ABF_{ijn}$$

$$= 0 \text{ para todo } i, j \text{ y } n$$

$$H_1 = \text{Al menos una } ABF_{ijn} \neq 0$$

Para los dos escenarios en los que se realizaron los experimentos (15 y 30), los resultados fueron similares al no presentar efecto significativo las interacciones entre los parámetros o factores. A continuación se presenta las tablas de análisis de varianza (ver tabla 2 y 3) y los diagrama de Pareto (ver ilustración 18 y 20) para el escenario de 15 y 30 departamentos.

Tabla 2 ANOVA para 15 departamentos

| Análisis de Varianza | | | | | |
|---|--------|---------------|---------------|------------|---------|
| Fuente | G L | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
| Modelo | 15 | 20982413 3 | 13988276 | 4,85 | 0 |
| Lineal | 6 | 20059492 8 | 33432488 | 11,59 | 0 |
| C. Periodo | 1 | 16322041 1 | 16322041 1 | 56,59 | 0 |
| N. Vecindarios | 1 | 21611205 | 21611205 | 7,49 | 0,008 |
| T.Lista tabú | 1 | 554778 | 554778 | 0,19 | 0,662 |
| P. Sol Tabú | 1 | 205 | 205 | 0 | 0,993 |
| T. Piscina | 1 | 15016445 | 15016445 | 5,21 | 0,026 |
| Apareamientos | 1 | 191884 | 191884 | 0,07 | 0,797 |
| Interacciones de 2 términos | 7 | 5993722 | 856246 | 0,3 | 0,953 |
| C. Periodo*N. Vecindarios | 1 | 1411930 | 1411930 | 0,49 | 0,487 |
| C. Periodo*T.Lista tabú | 1 | 1394 | 1394 | 0 | 0,983 |
| C. Periodo*P. Sol Tabú | 1 | 171125 | 171125 | 0,06 | 0,808 |
| C. Periodo*T. Piscina | 1 | 1199520 | 1199520 | 0,42 | 0,521 |
| C. Periodo*Apareamientos | 1 | 864032 | 864032 | 0,3 | 0,586 |
| N. Vecindarios*P. Sol Tabú | 1 | 2288261 | 2288261 | 0,79 | 0,376 |
| N. Vecindarios*Apareamientos | 1 | 57459 | 57459 | 0,02 | 0,888 |
| Interacciones de 3 términos | 2 | 3235483 | 1617741 | 0,56 | 0,573 |
| C. Periodo*N. Vecindarios*P. Sol Tabú | 1 | 84890 | 84890 | 0,03 | 0,864 |
| C. Periodo*N. Vecindarios*Apareamientos | 1 | 3150592 | 3150592 | 1,09 | 0,3 |
| Error | 64 | 18457900 8 | 2884047 | | |
| Total | 79 | 39440314 2 | | | |

Ilustración 18 Diagrama de Pareto (15 departamentos)

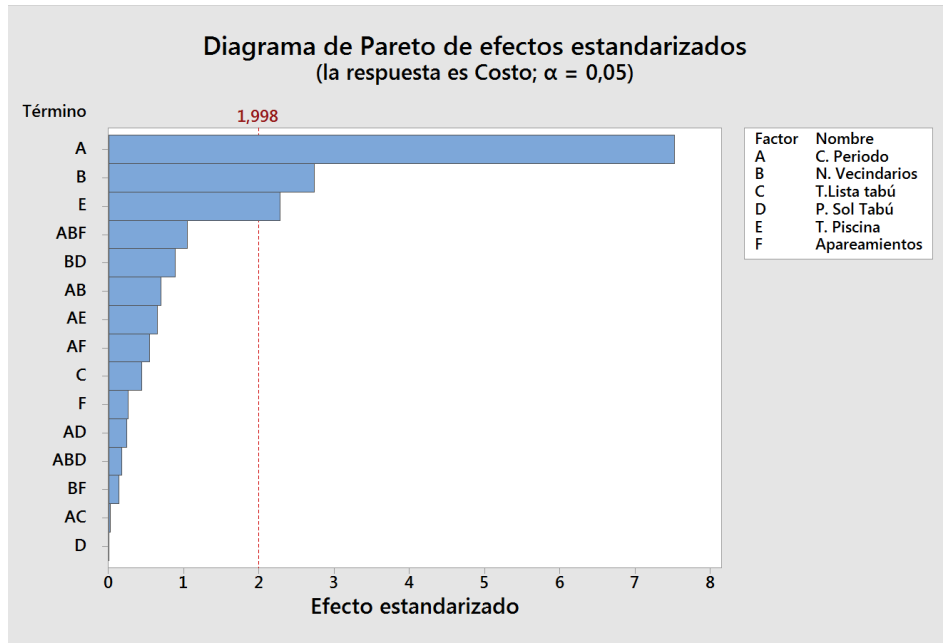
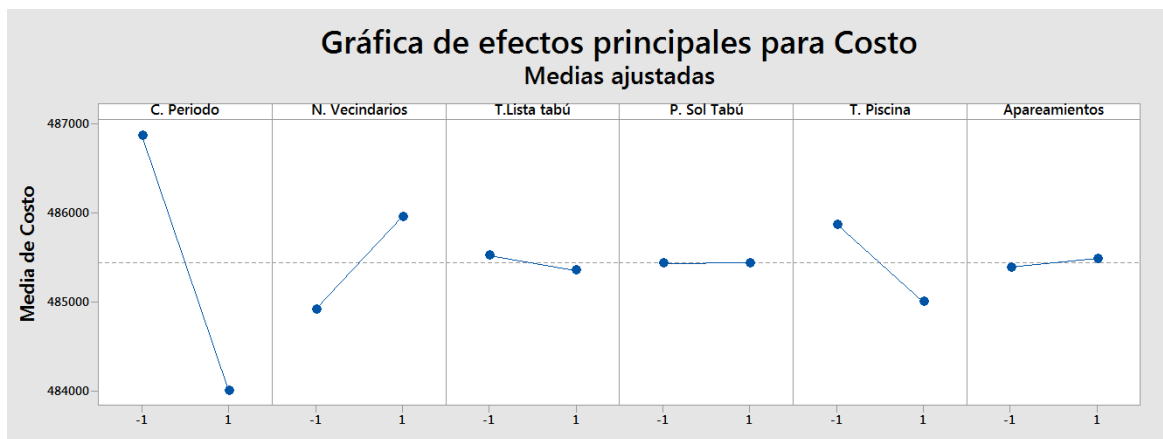


Ilustración 19 Grafica de efectos principales (15 departamentos)



De la tabla y los diagramas mostrados se puede inferir que los factores A, B y E (Numero de ciclos de periodo, Numero de vecindarios a evaluar y tamaño de la

piscina de soluciones), tienen un efecto significativo sobre la variable de salida (costo), por otro lado los factores restantes y las interacciones que puedan existir entre ellos no generan un efecto significativo.

Tabla 3 ANOVA para 30 departamentos

| Análisis de Varianza | | | | | |
|---|--------|----------------|----------------|------------|------------|
| Fuente | G L | SC Ajust. | MC Ajust. | Valor F | Valor p |
| Modelo | 15 | 125224283 9 | 83482856 | 22,6 | 0 |
| Lineal | 6 | 123844345 9 | 206407243 | 55,88 | 0 |
| C. Periodo | 1 | 121534183 7 | 121534183 7 | 329,02 | 0 |
| N. Vecindarios | 1 | 1984815 | 1984815 | 0,54 | 0,466 |
| T.Lista tabú | 1 | 4484519 | 4484519 | 1,21 | 0,275 |
| P. Sol Tabú | 1 | 216216 | 216216 | 0,06 | 0,81 |
| T. Piscina | 1 | 7955019 | 7955019 | 2,15 | 0,147 |
| Apareamientos | 1 | 8461054 | 8461054 | 2,29 | 0,135 |
| Interacciones de 2 términos | 7 | 12662660 | 1808951 | 0,49 | 0,839 |
| C. Periodo*N. Vecindarios | 1 | 1230328 | 1230328 | 0,33 | 0,566 |
| C. Periodo*T.Lista tabú | 1 | 2031713 | 2031713 | 0,55 | 0,461 |
| C. Periodo*P. Sol Tabú | 1 | 3712204 | 3712204 | 1 | 0,32 |
| C. Periodo*T. Piscina | 1 | 26245 | 26245 | 0,01 | 0,933 |
| C. Periodo*Apareamientos | 1 | 1857756 | 1857756 | 0,5 | 0,481 |
| N. Vecindarios*P. Sol Tabú | 1 | 2393282 | 2393282 | 0,65 | 0,424 |
| N. Vecindarios*Apareamientos | 1 | 1411133 | 1411133 | 0,38 | 0,539 |
| Interacciones de 3 términos | 2 | 1136719 | 568360 | 0,15 | 0,858 |
| C. Periodo*N. Vecindarios*P. Sol Tabú | 1 | 36680 | 36680 | 0,01 | 0,921 |
| C. Periodo*N. Vecindarios*Apareamientos | 1 | 1100040 | 1100040 | 0,3 | 0,587 |
| Error | 64 | 236403686 | 3693808 | | |
| Total | 79 | 148864652 4 | | | |

Ilustración 20 Diagrama de Pareto (30 departamentos)

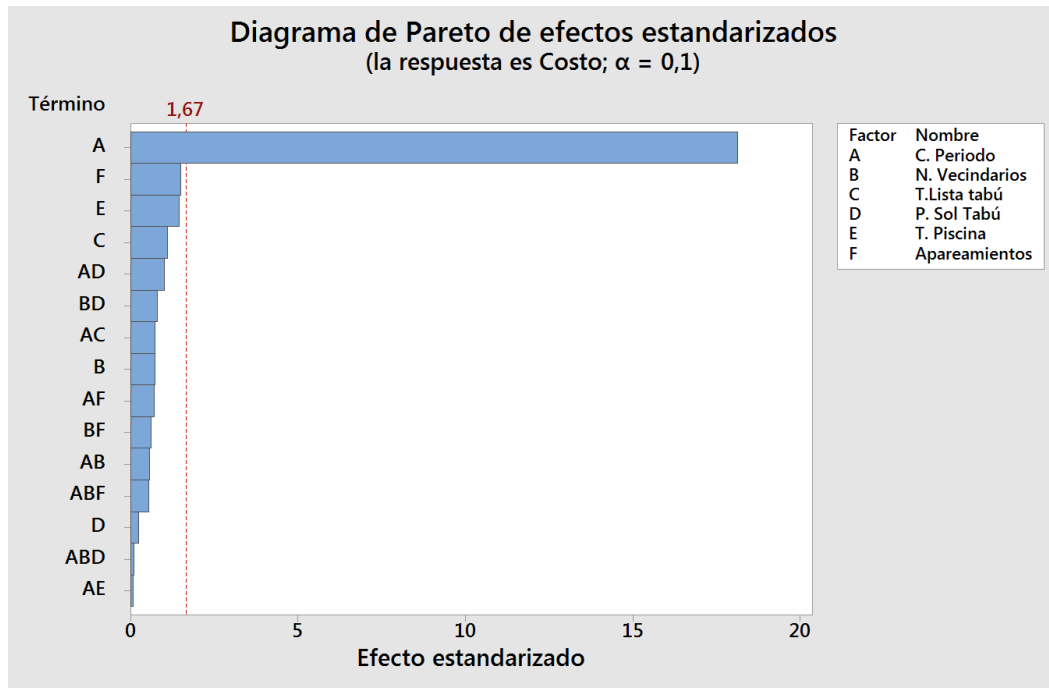
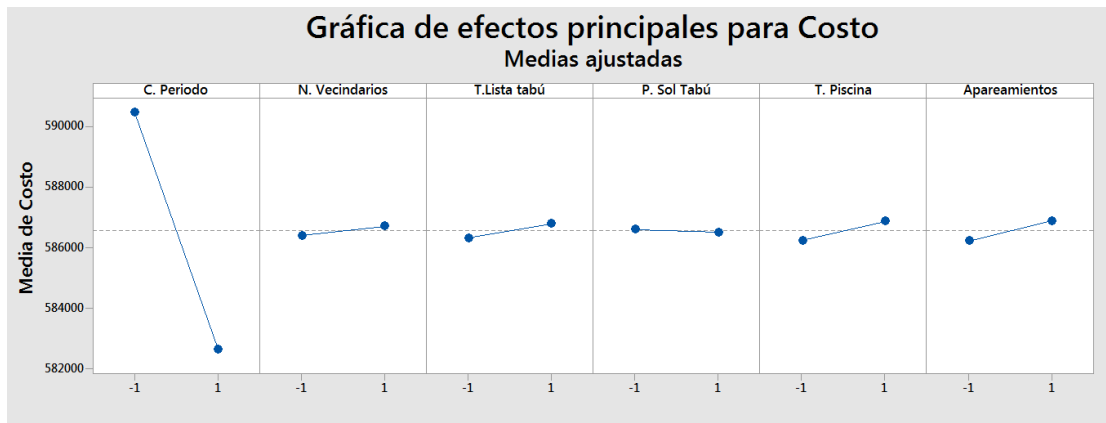


Ilustración 21 Grafica de efectos principales (30 departamentos)



De la tabla y los diagramas mostrados se puede inferir que los factores A (Numero de ciclos de periodo), tienen un efecto significativo sobre la variable de salida

(costo), por otro lado los factores restantes y las interacciones que pueda existir entre ellos no generan un efecto significativo.

En la ilustración 19 y 21 se puede observar el nivel que generó menor costo para cada uno de los factores o parámetros de forma independiente.

8.2. ANÁLISIS DEL HIBRIDO BUSQUEDA TABÚ – ALGORITMO GENÉTICO

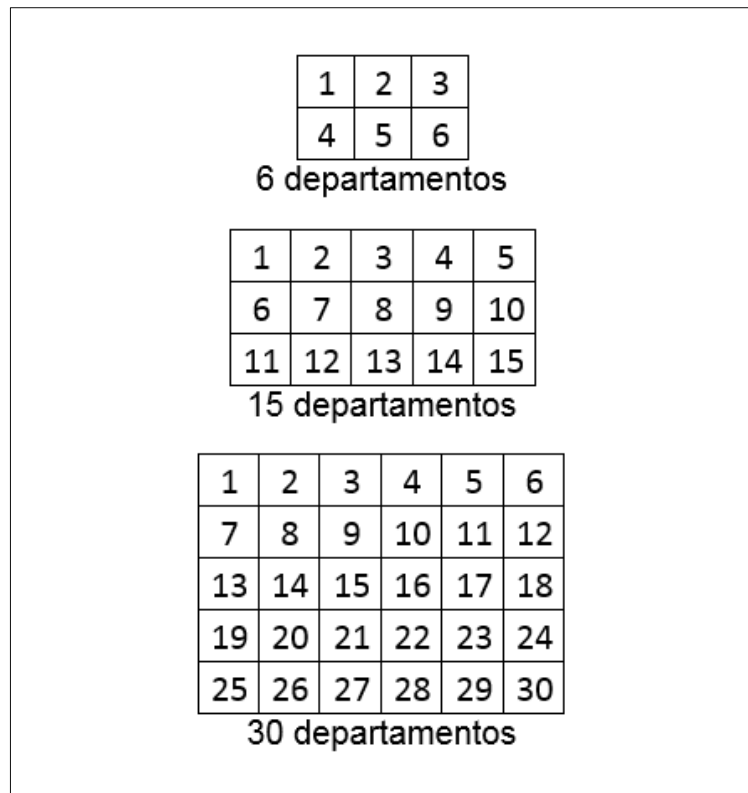
En esta tesis se trabajaron 3 problemas para 6, 15 y 30 departamentos con 5 periodos, para un total de 9 problemas, en los cuales se utilizó el conjunto de datos propuestos por Balakrishnan (1992)⁴⁴; en estos datos se encuentra el flujo de materiales entre departamentos para cada uno de los periodos y el costo de reacomodación el cual depende solo del departamento, es decir que no cambia en los diferentes periodos; los datos fueron generados computacionalmente a partir de una distribución uniforme. El flujo de materiales generado fue ajustado proporcionalmente de forma que la suma de los flujos totales de los periodos de un problema fuera equivalentes, esto se hizo para prevenir que algún periodo dominara sobre los otros. Los costos de reacomodación generados también fueron ajustados proporcionalmente de forma que el costo promedio de reacomodación fuera el 15% del costo promedio del flujo de materiales del departamento. El costo del flujo de materiales es de \$1 por unidad de material, es decir que los datos de flujo de materiales son al mismo tiempo los costos de flujo de materiales. Las distancias entre locaciones son rectangulares, entre los centroides de dos locaciones vecinas equivale a 1 unidad de distancia (Ver anexo A), se debe tener en cuenta que la instalación de 6 departamentos es 2x3 locaciones, la de 15 es de 3x5 y la de 30 de 5x6, tal y como se muestran en la en la ilustración 20.

⁴⁴ BALAKRISHNAN J. JACOBS, R.F., VENKATARAMANAN, M.A., 1992. Solutions for the constrained dynamic facility layout problem. *European Journal of Operations Research* 57 (2), 280–286. [Consultado 15 marzo 2016]

La diferencia entre los 3 problemas se encuentra en los rangos de la distribución uniforme y en el flujo total de materiales. Los datos descritos se pueden observar en el Anexo A.

Balakrishnan y Cheng (2003)¹⁵ utilizan este conjunto de datos para probar su algoritmo genético (NLGA). También compararon sus resultados con el algoritmo genético de Conway y Venkataramanan (CONGA)(1994)²⁸. Los resultados de la comparación entre NLGA y CONGA mostraron que NLGA tiene un mejor rendimiento. Erel también utiliza el mismo conjunto de datos para probar sus ocho implementaciones de programación dinámica (DP) y dos implementaciones de recocido simulado (SA).

Ilustración 22 Dimensión matricial de los 3 tamaños de planta



A continuación se presentara para cada uno de los tamaños de planta los problemas desarrollados con los hallazgos obtenidos mediante el algoritmo híbrido búsqueda tabú – algoritmo genético.

8.1.1 Escenario de 6 departamentos. Para el escenario de 6 departamentos se realizó la comparación con otras metaheurísticas implementadas por diferentes autores (Ver tabla 4) como Balakrishnan y Cheng (2003)¹⁵, Conway y Venkataramanan (1994)²⁸, en los 3 problemas se logró la solución óptima (Ver tabla 5). En las combinaciones que se hicieron se logró obtener un alto porcentaje de aciertos, y un error promedio muy bajo en algunas de las combinaciones.

Tabla 4 Comparación de soluciones 6 departamentos

| SOL OPTIMA | HBG | ACO | NLGA | CONGA | DP_10 | DP_10I | DP_5 | DP_5I | SA_EG_1 | SA_EG2 |
|------------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 106.419 | 106.419 | 106.419 | 106.419 | 108.976 | 106.419 | 106.419 | 106.419 | 106.419 | 106.419 | 106.419 |

| | | | | | | | | | | |
|---------|----------------|---------|---------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 104.834 | 104.834 | 104.834 | 104.834 | 105.17 | 104.834 | 104.834 | 104.834 | 104.834 | 104.834 | 104.834 |
| 104.32 | 104.32 | 104.32 | 104.32 | 104.52 | 104.32 | 104.32 | 104.32 | 104.32 | 104.32 | 104.32 |

Tabla 5 Análisis Escenario de 6 departamentos

| Problema | Solución Óptima | Mejor solución encontrada con el híbrido | % de acierto | Error promedio % |
|----------|-----------------|--|--------------|------------------|
| 1 | 106.419 | 106.419 | 53,2 | 1,23 |
| 2 | 104.834 | 104.834 | 26,6 | 0,77 |
| 3 | 104.320 | 104.320 | 30 | 0,53 |

Ilustración 23 Distribución Óptima (6 departamentos, problema 1)

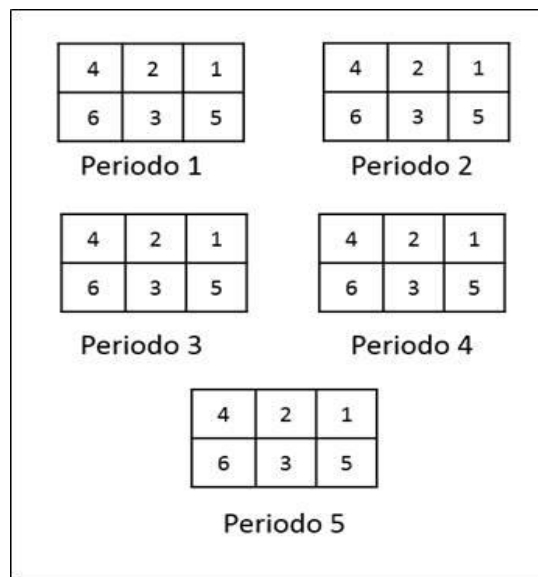


Ilustración 24 Distribución Óptima (6 departamentos, problema 2)

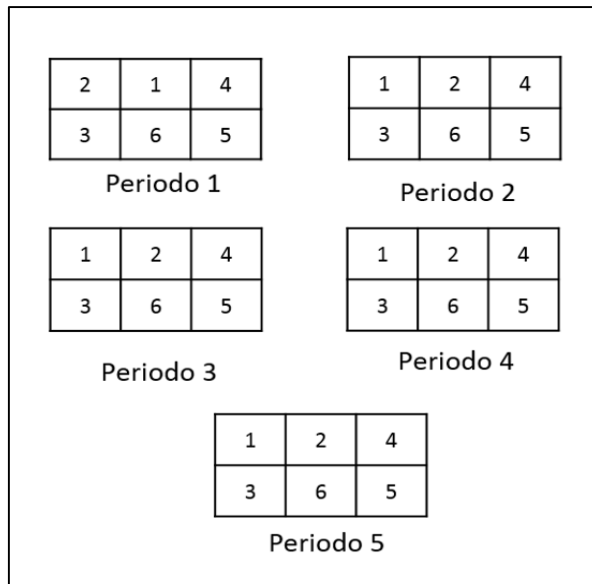
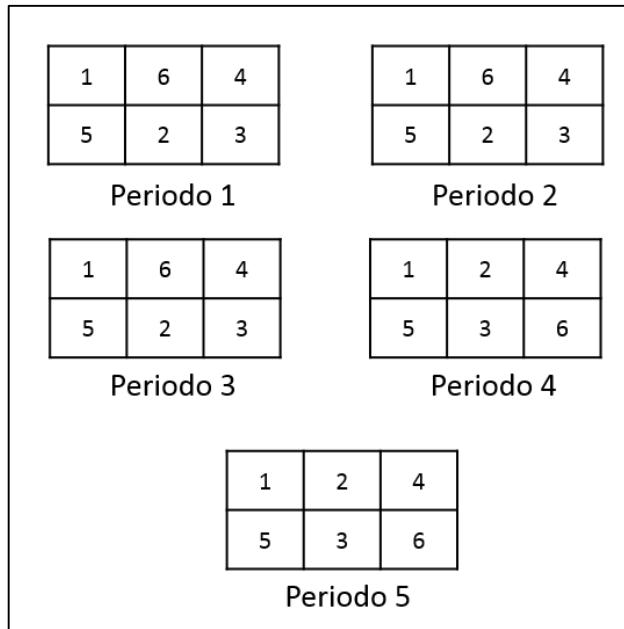


Ilustración 25 Distribución Óptima (6 departamentos, problema 3)



8.1.2 Escenario de 15 departamentos. Para el escenario de 15 departamentos se realizó la comparación con otras metaheurísticas implementadas por diferentes autores (Ver tabla 6) como Balakrishnan y Cheng (2003)¹⁵, Conway y Venkataramanan (1994)²⁸, en los problemas se logró encontrar soluciones muy cercanas a las existentes en la literatura (Ver tabla 7), superando en el Problema 2 al 90% de los resultados comparados y en el problema 3 el 76%, para el problema 1 logro encontrarse una mejor solución a la encontrada por los autores.

Tabla 6 Comparación de soluciones 15 departamentos

| MEJOR SOL | HBG | ACO | NLGA | CONGA | DP_10L | DP_10LI | DP_5L | DP_5LI | DP_10S | DP_10SI | DP_5S | DP_5SI | SA_EG_1 | SA_EG2 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 480.727 | 480.727 | 501.447 | 511.854 | 504.759 | 484.054 | 483.568 | 484.972 | 482.123 | 484.369 | 483.708 | 484.369 | 483.708 | 481.378 | 481.792 |
| 478.816 | 485.073 | 506.236 | 507.694 | 514.718 | 489.322 | 489.322 | 491.102 | 488.84 | 487.274 | 485.702 | 489.819 | 488.382 | 478.816 | 488.592 |
| 487.886 | 491.592 | 512.886 | 518.461 | 516.063 | 491.310 | 491.310 | 493.632 | 493.632 | 491.790 | 491.790 | 493.224 | 492.597 | 487.886 | 492.536 |

Tabla 7 Análisis Escenario de 15 departamentos

| Problema | Mejor solución de la literatura | Mejor solución encontrada con el híbrido | % de acierto | Error promedio % |
|----------|---------------------------------|--|--------------|------------------|
| 1 | 481.378 | 480.727 | 3,1 | 1,08 |
| 2 | 478.816 | 485.073 | 0 | 5,6 |
| 3 | 487.886 | 491.592 | 0 | 1,14 |

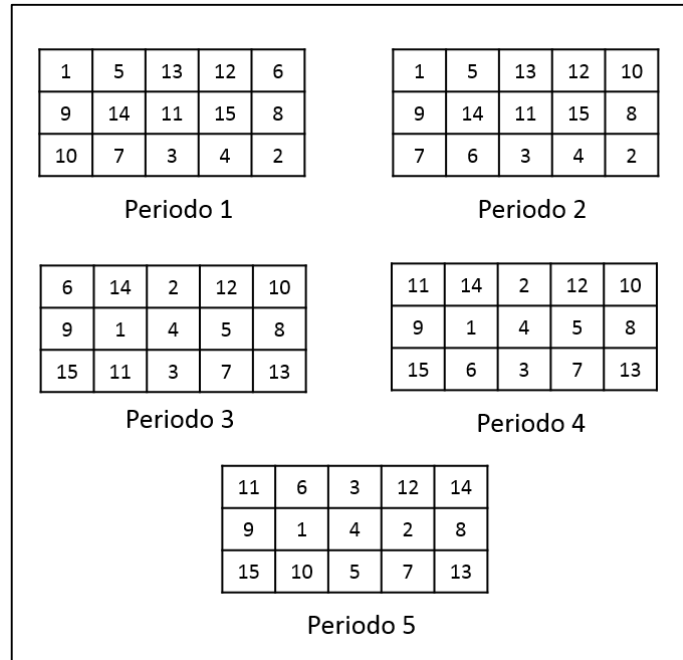
Ilustración 26 . Mejor distribución encontrada por el Híbrido (15 departamentos, problema 1)

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

Ilustración 27 Mejor distribución encontrada por el Híbrido (15 departamentos, problema 2)

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

Ilustración 28 Mejor distribución encontrada por el Híbrido (15 departamentos, problema 3)



8.1.3 Escenario de 30 departamentos. Para el escenario de 30 departamentos se realizó la comparación con otras metaheurísticas implementadas por diferentes autores (Ver tabla 8) como Balakrishnan y Cheng (2003)¹⁵, Conway y Venkataramanan (1994)²⁸, en los problemas se logró encontrar soluciones muy cercanas a las existentes en la literatura (Ver tabla 9), superando en el problema 2 al 69% de los resultados comparados, y en los problemas 1 y 3 logro encontrarse una mejor solución a la encontrada por los autores.

Tabla 8 Comparación de soluciones 30 departamentos

| MEJOR SOL | HBG | ACO | NLGA | CONGA | DP_10L | DP_10LI | DP_5L | DP_5LI | DP_10S | DP_10SI | DP_5S | DP_5SI | SA_EG_1 | SA_EG2 |
|-----------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 576.681 | 576.681 | 604.408 | 611.794 | 632.737 | 581.805 | 579.741 | 583.082 | 581.942 | 581.805 | 579.741 | 582.858 | 581.369 | 583.081 | 583.227 |
| 570.906 | 572.701 | 604.37 | 611.873 | 647.585 | 574.657 | 570.915 | 576.592 | 571.563 | 575.004 | 570.906 | 576.106 | 572.511 | 573.965 | 574.116 |
| 576.725 | 576.725 | 603.867 | 611.664 | 642.295 | 581.03 | 581.03 | 581.691 | 580.549 | 581.17 | 577.402 | 581.262 | 580.186 | 580.102 | 577.787 |

Tabla 9 Análisis Escenario de 30 departamentos

| Problema | Mejor solución de la literatura | Mejor solución encontrada con el híbrido | % de acierto | Error promedio % |
|----------|---------------------------------|--|--------------|------------------|
| 1 | 579.741 | 576.681 | 6,26 | 0,78 |
| 2 | 570.906 | 572.701 | 5,2 | 0,52 |
| 3 | 577.402 | 576.725 | 7,14 | 0,55 |

Ilustración 29 Mejor distribución encontrada por el Híbrido (30 departamentos, problema 1)

| | | | | | | | | | | | |
|-----------|----|----|----|----|----|-----------|----|----|----|----|----|
| 26 | 23 | 4 | 1 | 27 | 24 | 20 | 18 | 4 | 1 | 15 | 13 |
| 5 | 6 | 20 | 12 | 16 | 10 | 5 | 6 | 24 | 25 | 27 | 10 |
| 9 | 22 | 15 | 19 | 18 | 21 | 9 | 22 | 23 | 21 | 26 | 12 |
| 8 | 17 | 13 | 28 | 14 | 30 | 8 | 17 | 29 | 28 | 14 | 30 |
| 29 | 3 | 25 | 7 | 11 | 2 | 16 | 3 | 19 | 7 | 11 | 2 |
| Periodo 1 | | | | | | Periodo 2 | | | | | |
| 20 | 18 | 4 | 1 | 15 | 13 | 20 | 18 | 4 | 1 | 29 | 2 |
| 5 | 6 | 24 | 25 | 27 | 10 | 5 | 6 | 24 | 25 | 27 | 10 |
| 9 | 22 | 23 | 2 | 26 | 12 | 9 | 22 | 19 | 13 | 26 | 12 |
| 8 | 17 | 29 | 28 | 14 | 30 | 7 | 17 | 15 | 28 | 14 | 30 |
| 16 | 3 | 21 | 7 | 11 | 19 | 16 | 3 | 21 | 8 | 11 | 23 |
| Periodo 3 | | | | | | Periodo 4 | | | | | |
| 20 | 18 | 4 | 1 | 15 | 2 | | | | | | |
| 5 | 6 | 24 | 25 | 27 | 10 | | | | | | |
| 9 | 22 | 30 | 23 | 26 | 12 | | | | | | |
| 7 | 17 | 29 | 28 | 14 | 13 | | | | | | |
| 16 | 3 | 21 | 8 | 11 | 19 | | | | | | |
| Periodo 5 | | | | | | | | | | | |

Ilustración 30 Mejor distribución encontrada por el Híbrido (30 departamentos, problema 2)

| | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|
| 23 | 29 | 14 | 1 | 19 | 11 |
| 8 | 10 | 20 | 13 | 28 | 4 |
| 7 | 30 | 16 | 17 | 27 | 24 |
| 22 | 26 | 12 | 15 | 6 | 3 |
| 21 | 5 | 2 | 9 | 18 | 25 |

Periodo 1

| | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|
| 16 | 12 | 15 | 1 | 19 | 11 |
| 8 | 10 | 25 | 22 | 28 | 4 |
| 7 | 30 | 29 | 23 | 27 | 14 |
| 13 | 26 | 21 | 24 | 6 | 3 |
| 17 | 5 | 2 | 9 | 18 | 20 |

Periodo 2

| | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|
| 16 | 12 | 15 | 1 | 19 | 11 |
| 29 | 10 | 25 | 8 | 28 | 4 |
| 7 | 30 | 22 | 23 | 27 | 14 |
| 13 | 26 | 21 | 24 | 6 | 3 |
| 17 | 5 | 2 | 9 | 18 | 20 |

Periodo 3

| | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|
| 16 | 12 | 15 | 1 | 19 | 11 |
| 14 | 10 | 25 | 29 | 28 | 4 |
| 7 | 30 | 22 | 23 | 27 | 8 |
| 13 | 26 | 21 | 24 | 6 | 3 |
| 17 | 5 | 2 | 9 | 18 | 20 |

Periodo 4

| | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|
| 16 | 12 | 15 | 6 | 19 | 11 |
| 14 | 10 | 25 | 29 | 28 | 24 |
| 7 | 30 | 9 | 23 | 27 | 21 |
| 13 | 26 | 1 | 8 | 4 | 3 |
| 17 | 5 | 2 | 22 | 18 | 20 |

Periodo 5

Ilustración 31 . Mejor distribución encontrada por el Híbrido (30 departamentos, problema 3)

| | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|
| 27 | 9 | 16 | 25 | 28 | 30 |
| 4 | 23 | 7 | 18 | 8 | 5 |
| 3 | 10 | 20 | 19 | 22 | 29 |
| 24 | 12 | 14 | 17 | 15 | 13 |
| 1 | 6 | 11 | 26 | 21 | 2 |

Periodo 1

| | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|
| 17 | 19 | 16 | 25 | 20 | 11 |
| 4 | 23 | 7 | 18 | 8 | 5 |
| 3 | 10 | 27 | 21 | 22 | 29 |
| 15 | 12 | 28 | 9 | 24 | 13 |
| 1 | 6 | 30 | 26 | 14 | 2 |

Periodo 2

| | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|
| 17 | 19 | 27 | 25 | 20 | 11 |
| 18 | 4 | 7 | 6 | 8 | 23 |
| 3 | 10 | 1 | 2 | 22 | 29 |
| 15 | 12 | 5 | 9 | 24 | 13 |
| 16 | 21 | 30 | 26 | 28 | 14 |

Periodo 3

| | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|
| 17 | 19 | 27 | 25 | 20 | 11 |
| 18 | 4 | 7 | 6 | 8 | 23 |
| 3 | 10 | 1 | 2 | 22 | 29 |
| 15 | 28 | 5 | 9 | 24 | 13 |
| 16 | 21 | 30 | 26 | 12 | 14 |

Periodo 4

| | | | | | |
|----|----|----|----|----|----|
| 17 | 19 | 27 | 25 | 20 | 11 |
| 18 | 4 | 7 | 3 | 8 | 6 |
| 2 | 10 | 1 | 23 | 22 | 29 |
| 15 | 28 | 5 | 9 | 24 | 13 |
| 16 | 21 | 30 | 26 | 12 | 14 |

Periodo 5

8.3 TIEMPO COMPUTACIONAL

El experimento fue realizado para los escenarios de 6, 15 y 30 departamentos en un computador Hewlett- Packard ProDesk600 G1 SFF con procesador Intel® Core™ i5-4570 CPU 3.20 GHZ, memoria RAM de 8 GB, en la tabla 12 se puede observar la comparación de tiempos computacionales entre el híbrido planteado en este proyecto y los encontrados en la literatura.

Tabla 10 Comparación de tiempos computacionales

| | Tamaño de planta | Mejor solución encontrada por el Híbrido | Tiempo computacional en segundos (Híbrido) | Tiempo computacional en segundos (Autores literatura) |
|------------|------------------|--|--|---|
| Problema 1 | 6 Dep | 106.419 | 150 | 52 |
| | 15 Dep | 480.727 | 750 | 2 |
| | 30 Dep | 576.681 | 1100 | 23 |
| Problema 2 | 6 Dep | 104.834 | 150 | 52 |
| | 15 Dep | 485.813 | 750 | 2 |
| | 30 Dep | 572.701 | 1100 | 23 |
| Problema 3 | 6 Dep | 104.320 | 150 | 52 |
| | 15 Dep | 491.592 | 750 | 2 |
| | 30 Dep | 576.725 | 1100 | 23 |

De la anterior tabla podemos concluir que aunque el híbrido encuentra buenas soluciones los tiempos computacionales son mucho más grandes en comparación con los modelos planteados por otros autores, esto puede darse debido a la robustez del modelo programado, sin embargo hay que tener en cuenta que este tipo de decisiones son estratégicas (a largo plazo) lo que significa que dependiendo del caso podría despreciarse estos tiempos.

9. CONCLUSIONES

- A medida que se profundiza en la revisión literaria del DFLP se encuentran otras versiones o casos que se trabajan y/o se proponen para estudiar, por ejemplo DFLP con áreas desiguales, con más de un piso o con algún tipo de restricción ya sea en cuando a los tamaños de planta o presupuestos de dinero disponibles por periodo, esto se hace con el fin de acercarse cada vez más a escenarios reales que viven las empresas. Sin embargo estas variaciones mencionadas anteriormente cuenta con una mayor complejidad computacional, por lo cual se debe especular aún más en que metaheurística pueda tener un mejor comportamiento.
- La formulación del algoritmo debe estar enfocada a recorrer el mayor número de soluciones posibles debido a la gran cantidad (billones) de soluciones que cada problema tiene y las cuales aumentan dependiendo de instancias como el número de departamentos y de periodos.
- Existen métodos exactos para encontrar la solución óptima para el DFLP sin embargo estos métodos solo son viables en instancias pequeñas, por ende, las metaheurísticas son la mejor opción de solución ya que presentan un buen comportamiento independientemente de las instancias.
- EL DFLP es un problema de distribución de planta, por esto hace parte de las decisiones estratégicas de una empresa las cuales requieren de tiempo y cuidado para ser estudiadas ya que son definitivas en un lapso largo de tiempo. Por ello los tiempos computacionales presentados en este trabajo y en los demás artículos estudiados podrían ser despreciables en la realidad.
- Para cuestiones académicas se comparan los tiempos computacionales obtenidos con nuestro algoritmo con los obtenidos por otros autores, sin embargo esta comparación cuenta con un alto grado de incertidumbre ya que los tiempos

además de depender de la robustez del algoritmo también dependen de las características de los computadores en los cuales se ejecutaron. Adicionalmente vale la pena decir que una gran cantidad de autores no brinda información acerca de sus tiempos o de sus computadores.

- Los resultados obtenidos con el algoritmo fueron bastantes satisfactorios debido a que no solo se obtuvieron soluciones cercanas (en algunos casos) a las encontradas en la literatura sino también se logra mejorar algunas soluciones presentadas por autores reconocidos, lo que refleja la eficiencia del modelo planteado.
- Para realizar buenas distribuciones de planta en un periodo determinado, no hace falta invertir grandes cantidades de dinero, lo cual es la percepción que tienen muchas empresas. Gracias a herramientas tan sencillas como esta se puede obtener excelentes soluciones sin elevar en grandes proporciones los costos en cada periodo de tiempo.

10. RECOMENDACIONES

- Para futuras investigaciones se recomienda realizar un estudio más profundo sobre los parámetros usados en este proyecto (diseño de experimentos completo), esto con el fin de encontrar mejores soluciones.
- Dado que la distribución de planta es una decisión del área estratégica de las empresas, el uso del híbrido (búsqueda tabú - algoritmo genético) como solución al problema de distribución de planta dinámico, resulta ser una muy buena opción, así implique un mayor sacrificio de tiempo, ya que éste garantiza buenas soluciones.
- Implementar los proyectos de investigación en empresas locales, contribuyendo así al desarrollo.
- Aplicar el híbrido (Búsqueda tabú – Algoritmo genético) a otros problemas de optimización, con el fin de validar la eficiencia de modelo mostrada en este proyecto

BIBLIOGRAFÍA

BALAKRISHNAN, J, CHENG C. H., y WONG, K. F. “FACOPT: A user friendly Facility Layout Optimization system”. *Computers & Operations Research*, [en línea] 2003. Vol. 30, N° 11, 1625–1641. [Consultado 15 marzo 2016]

BALAKRISHNAN Jaydeep, CHUN HUNG Cheng, and CONWAY Daniel G.. An improved pair-wise exchange heuristic for the dynamic plant layout problem. *International Journal of Production Research* [en línea] 2003. Vol. 38, no. 13: 3067-3077.2000. [Consultado 15 marzo 2016]

BALAKRISHNAN J. JACOBS, R.F., VENKATARAMANAN, M.A Solutions for the constrained dynamic facility layout problem. *European Journal of Operations Research* [en línea] 1992. Vol. 57 N° 2, 280–286. [Consultado 15 marzo 2016]

BARTHOLDI J.J. Y PLATZMAN L.K., “An Onlong planar travelling salesman heuristic based on Space filling curves”. *Operation research letters*. [en línea] 1982. Vol. 1, No. 4; p. 121-125. [Consultado 20 Diciembre 2015]

BAYKASOGLU Adil; DERELI Turkey; SABUNCU, Ibrahim. An ant colony algorithm for solving budget constrained and unconstrained dynamic facility layout problems. *Omega* [en línea] 2006. Vol. 34, pp.385-396. [Consultado 15 marzo 2016]

BOZORGI Najmeh; ABEDZADEH, MOSTAFA & ZEINALI. Mohsen. Tabu search heuristic for efficiency of dynamic facility layout problem. *Manufacture Technology*, [en línea] 2015. 77, pp.689-703. [Consultado 15 Febrero 2016]

BURKARD Rainer E. and BONNIGER, Tilman. A heuristic for quadratic Boolean program with applications to quadratic assignment problems. *European Journal of Operational Research*. [en línea] August, 1983. Vol. 13 N° 4. p. 374-386 [Consultado 15 marzo 2016]

CALDERÓN MANTILLA Erika Viviana y DUARTE SÁNCHEZ Mónica Tatiana; Alternativas de solución al problema de distribución de planta (FLP) de un solo nivel y departamentos iguales o desiguales, por medio del análisis de métodos metaheurísticos, (Tesis Ingeniero Industrial) Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander, Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas, Escuela de Estudios Industriales y Empresariales, 2010.

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.

CHEN YU-HSIN, Gary. A new data structure of solution representation in hybrid ant colony optimization for large dynamic facility layout problems. *International Journal of Production Economics*. [en línea] April, 2013. Vol. 142 n° 2, 362–371 [Consultado 11 marzo 2016]

----- . Multi-objective evaluation of dynamic facility layout using ant colony optimization. Tesis Doctoral. Arlington, Texas, E.U.: The University of Texas at Arlington, Faculty of the Graduate School, December, 2007. [Consultado 15 marzo 2016]

CONWAY Daniel G. and VENKATARAMANAN M.A. Genetic search and the dynamic facility layout problem, *Computers in Operations Research* [en línea] 1994, N° 21: 955-960. [Consultado 15 Febrero 2016]

DRIRA Amine; PIERREVAL, Henri and HAJRI-GABOUI, Sonia. Facility layout problems: A Survey. *ELSEVIER Annual Reviews in Control* [en línea] 2007 N° 31, 255-267 [Consultado 11 Febrero 2016]

GOMORY, R. E. and HU, T. C. Multi-terminal network flows. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*. [en línea] December, 1961. Vol. 9 N° 4. 551–570. [Consultado 18 marzo 2016]

GLOVER, Fred. Tabu Search: A Tutorial. *Interfaces* [en línea] Vol. 20, No. 4, July August 1990, pp. 74-9429. [Consultado 15 Febrero 2016]

GUSFIELD D. Very Simple Methods for All Pairs Network Flow Analysis. *SIAM Journal on Computing* [en línea] 19:143–155, 1990. [Consultado 15 Junio 2016]

HOLLAND J. H. *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, The University of Michigan Press, Ann Arbor, MI, 1975. [Consultado 15 Febrero 2016]

KAKU B. K. and MAZZOLA J. B., A tabu-search heuristic for the dynamic plant layout problem. *INFORMS Journal on Computing*. (forthcoming), 1997. [Consultado 15 Febrero 2016]

KOCHHAR J.S. and HERAGU S. S.. Facility layout design in a changing environment. *International Journal of Production Research* [en línea] 1999. 37, no. 11: 2429-2446. [Consultado 17 marzo 2016]

KOUVELIS, KURAWARWALA AA, GUTIERREZ GJ. “Algorithms for robust single and multiple period layout planning for manufacturing systemsP” - *European journal of operational research* [en línea] 1992. [Consultado 11 Abril 2016]

KOOPMANS T.C y BECKMANN M. “Assignment problems and the location of economic activities”. *Econometrica*. [en línea] 1957. Vol. 1, No. 25 [Consultado 11 marzo 2016]

KRISHNAN Krishna K., S. HOSSEIN Cheraghi and CHANDAN N. Nayak.. Dynamic from-between chart: a new tool for solving dynamic facility layout problems, *International Journal of Industrial and Systems Engineering* [en línea] 2006. Vol. 1, no. 1/2:182–200. [Consultado 15 marzo 2016]

KULKARNI C. N. Dr. TALIB M.I., Dr. R. S. Jahagirdar Simulation Methodology for Facility Layout Problems. *The International Journal Of Engineering And Science*, [en línea] N° 2, 24-30. 2013. [Consultado 12 marzo 2016]

KUPPUSAMY Saravanan. Simulated annealing heuristics for the dynamic facility layout problem. Master’s thesis, West Virginia University. 2001. [Consultado 17 marzo 2016]

LACKSONEN TA, ENSCORE EE. Quadratic assignment algorithms for the dynamic layout problems. *Int J Prod.* [en línea] 1993. Res 31:503–517. [Consultado 15 marzo 2016]

LEE, Y. H., Y LEE, M. H. “A shape-based block layout approach to facility layout problems using hybrid genetic algorithm”. *Computers & Industrial Engineering*, [en línea] 2002. 42, 237–248. [Consultado 10 marzo 2016]

LIEBERMAN G. y HILLIER F., Introducción a la Investigación de Operaciones, Octava edición. México D.F:McGraw-hill, 2006, capítulo 13: Metaheurística. [Consultado 15 marzo 2016]

LIU Wen-Hsing. Tabu search for the dynamic facility layout problem. Master's thesis, West Virginia University. 2005. [Consultado 16 marzo 2016]

LOU Y. Liang, & WEN C. Chao. The strategies of tabu search technique for facility layout optimization. *Automation in Construction*. [en línea], 17, pp.657-669. 2008. [Consultado 20 marzo 2016]

PARDOLOS P. H. and CROUSE J. V., A parallel algorithm for the QAP. Proceedings of the 1989 Supercomputer Conference, ACM Press, New York, 1989, pp. 351± 360. [Consultado 15 marzo 2016]

MONTREUIL, B. and RATLIÉ, H. D., Utilizing cut trees as design skeletons for facilities layout. *IIE Transactions*, [en línea] 1989, 21(2), 136±143. [Consultado 19 mayo 2016]

NAHMIAS S., Análisis de la producción y las operaciones. Tercera Edición. Compañía editorial Continental, 2004. [Consultado 11 Febrero 2016]

ROSENBLATT MJ. The dynamics of plant layout. *Manag Sci*. [en línea] 1986 32:76–86. [Consultado 15 marzo 2016]

RUSSELL D Meller. “An iterative facility layout algorithm”. *International Journal of Production Research*, [en línea] 1999. [Consultado 11 marzo 2016]

RUSSELL Meller D. KAI-YIN Gau,. The Facility Layout Problem: Recent and Emerging Trends and Perspectives. *Journal of Manufacturing Systems* [en línea] Junio. 1996. 15, 351-366. 2015, [Consultado 16 marzo 2016]

SHAYAN E, & A. “Chittilappilly Genetic algorithm for facilities layout problems based on slicing tree structure”. *International Journal of Production Research* [en línea] 2004. Volume 42, Issue 19, [Consultado 11 marzo 2016]

SINGH SP, SHARMA RRK. A review of different approaches to the facility layout problems. *Int J Adv Manuf Technol.* [Online]. 2006 30:425–433.[Consultado 10 marzo 2016]

SWEENEY, D. S. and TATHAM, R. L., An improved long run model for multiple warehouse location. *Management Science*, [en línea] 1976, 22(7), 758±758. [Consultado 15 marzo 2016]

TOMPKINS J.A., WHITE J.A., BOZER Y.A, TANCHOCO J.M.A., *Facilities Planning*, 3ed. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken NJ. 2003. [Consultado 11 marzo 2016]

UĞUR Aybars; AYDIN Doğan. An interactive simulation and analysis software for solving TSP using Ant Colony Optimization algorithms. *Advances in Engineering Software*, 40, pp.341-349. 2009. [Consultado 15 Febrero 2016]

ULUTAS Berna. A. ATTILA Islier, Dynamic facility layout problem in footwear industry, *Journal of Manufacturing Systems*, Volume 36, July 2015, Pages 55–61. [Consultado 11 marzo 2016]

URBAN Timothy L.. A heuristic for the dynamic facility layout problem. *IIE Transactions* 25, 1993 no. 4: 57-63. [Consultado 15 marzo 2016]

ANEXOS

ANEXO A. Datos de entrada

1. Flujos entre departamentos

- 6 DEPS-PRB 1

Flujo de materiales entre departamentos

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|---|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| Periodo 1 | 1 | 0 | 90 | 689 | 194 | 165 | 494 |
| | 2 | 668 | 0 | 1324 | 811 | 241 | 206 |
| | 3 | 631 | 387 | 0 | 125 | 281 | 375 |
| | 4 | 80 | 495 | 615 | 0 | 222 | 221 |
| | 5 | 276 | 204 | 1127 | 490 | 0 | 676 |
| | 6 | 109 | 409 | 1780 | 394 | 200 | 0 |

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|---|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| Periodo 2 | 1 | 0 | 257 | 1632 | 330 | 117 | 285 |
| | 2 | 159 | 0 | 1309 | 297 | 803 | 404 |
| | 3 | 98 | 82 | 0 | 271 | 222 | 383 |
| | 4 | 110 | 404 | 1174 | 0 | 750 | 386 |
| | 5 | 73 | 507 | 1679 | 190 | 0 | 107 |
| | 6 | 152 | 487 | 355 | 646 | 315 | 0 |

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|---|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| Periodo 3 | 1 | 0 | 1112 | 505 | 422 | 414 | 132 |
| | 2 | 627 | 0 | 560 | 99 | 227 | 86 |
| | 3 | 373 | 2007 | 0 | 235 | 384 | 205 |
| | 4 | 482 | 1638 | 262 | 0 | 233 | 129 |
| | 5 | 223 | 1196 | 520 | 55 | 0 | 75 |
| | 6 | 200 | 782 | 271 | 292 | 235 | 0 |

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|---|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| Periodo 4 | 1 | 0 | 1348 | 490 | 447 | 186 | 169 |
| | 2 | 625 | 0 | 74 | 307 | 777 | 326 |
| | 3 | 114 | 1645 | 0 | 288 | 975 | 68 |
| | 4 | 156 | 578 | 447 | 0 | 554 | 212 |
| | 5 | 353 | 732 | 118 | 373 | 0 | 283 |
| | 6 | 328 | 1071 | 387 | 352 | 199 | 0 |

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|---|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| Periodo 5 | 1 | 0 | 159 | 1103 | 218 | 297 | 95 |
| | 2 | 631 | 0 | 1618 | 95 | 253 | 109 |
| | 3 | 552 | 213 | 0 | 432 | 397 | 141 |
| | 4 | 418 | 122 | 797 | 0 | 108 | 495 |
| | 5 | 115 | 154 | 1610 | 425 | 0 | 158 |
| | 6 | 167 | 214 | 2092 | 471 | 323 | 0 |

Costo de reordenamiento por departamento

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 898 | 911 | 627 | 538 | 738 | 977 |

- 6 DEPS – PROB 2

Flujo de materiales entre departamentos

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|---|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Periodo1 | 1 | 0 | 269 | 119 | 205 | 32 | 2821 |
| | 2 | 582 | 0 | 156 | 225 | 135 | 1110 |
| | 3 | 99 | 292 | 0 | 136 | 125 | 1794 |
| | 4 | 183 | 205 | 50 | 0 | 133 | 762 |
| | 5 | 355 | 242 | 147 | 65 | 0 | 2504 |
| | 6 | 533 | 367 | 86 | 137 | 114 | 0 |

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|---|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Periodo2 | 1 | 0 | 291 | 85 | 216 | 143 | 1403 |
| | 2 | 199 | 0 | 183 | 727 | 79 | 2042 |
| | 3 | 208 | 356 | 0 | 146 | 118 | 2028 |
| | 4 | 338 | 363 | 88 | 0 | 215 | 590 |
| | 5 | 239 | 735 | 401 | 445 | 0 | 764 |
| | 6 | 160 | 754 | 303 | 265 | 98 | 0 |

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|---|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| Periodo3 | 1 | 0 | 689 | 105 | 334 | 326 | 194 |
| | 2 | 83 | 0 | 297 | 531 | 656 | 182 |
| | 3 | 326 | 1669 | 0 | 77 | 642 | 257 |
| | 4 | 309 | 1396 | 441 | 0 | 190 | 78 |
| | 5 | 214 | 347 | 292 | 743 | 0 | 265 |
| | 6 | 354 | 1450 | 450 | 693 | 392 | 0 |

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|---|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| Periodo4 | 1 | 0 | 1446 | 245 | 562 | 350 | 249 |
| | 2 | 172 | 0 | 70 | 491 | 299 | 309 |
| | 3 | 50 | 2189 | 0 | 130 | 106 | 145 |
| | 4 | 91 | 2060 | 72 | 0 | 317 | 283 |
| | 5 | 291 | 577 | 365 | 695 | 0 | 239 |
| | 6 | 176 | 1551 | 76 | 313 | 59 | 0 |

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|----------|---|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| Periodo5 | 1 | 0 | 155 | 495 | 90 | 408 | 206 |
| | 2 | 967 | 0 | 78 | 321 | 407 | 411 |
| | 3 | 1234 | 194 | 0 | 263 | 628 | 598 |
| | 4 | 989 | 317 | 115 | 0 | 615 | 710 |
| | 5 | 734 | 220 | 427 | 323 | 0 | 531 |
| | 6 | 760 | 410 | 585 | 170 | 619 | 0 |

Costo de reordenamiento por departamento

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 604 | 574 | 522 | 675 | 748 | 922 |

- 6 DEPS-PROB 3

Flujo de materiales entre departamentos

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|---|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Periodo 1 | 1 | 0 | 167 | 505 | 472 | 302 | 1368 |
| | 2 | 323 | 0 | 594 | 577 | 401 | 914 |
| | 3 | 219 | 256 | 0 | 556 | 420 | 282 |
| | 4 | 258 | 133 | 359 | 0 | 399 | 2281 |
| | 5 | 283 | 125 | 152 | 102 | 0 | 726 |
| | 6 | 291 | 240 | 753 | 131 | 392 | 0 |

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|---|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Periodo 2 | 1 | 0 | 613 | 160 | 448 | 411 | 1649 |
| | 2 | 479 | 0 | 175 | 238 | 523 | 275 |
| | 3 | 96 | 339 | 0 | 436 | 292 | 613 |
| | 4 | 142 | 178 | 184 | 0 | 244 | 2044 |
| | 5 | 503 | 411 | 186 | 220 | 0 | 1401 |
| | 6 | 646 | 195 | 68 | 474 | 337 | 0 |

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|---|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| Periodo 3 | 1 | 0 | 554 | 185 | 28 | 210 | 177 |
| | 2 | 165 | 0 | 798 | 104 | 141 | 832 |
| | 3 | 120 | 2101 | 0 | 109 | 171 | 278 |
| | 4 | 124 | 1996 | 597 | 0 | 329 | 321 |
| | 5 | 57 | 1564 | 310 | 114 | 0 | 455 |
| | 6 | 44 | 1405 | 301 | 170 | 223 | 0 |

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|---|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| Periodo 4 | 1 | 0 | 2291 | 438 | 170 | 217 | 231 |
| | 2 | 431 | 0 | 283 | 202 | 201 | 26 |
| | 3 | 165 | 983 | 0 | 217 | 381 | 192 |
| | 4 | 118 | 3027 | 236 | 0 | 427 | 185 |
| | 5 | 162 | 1077 | 169 | 208 | 0 | 243 |
| | 6 | 374 | 946 | 59 | 59 | 267 | 0 |

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|---|-----|-----|------|-----|-----|-----|
| Periodo 5 | 1 | 0 | 478 | 1408 | 383 | 181 | 96 |
| | 2 | 44 | 0 | 3233 | 261 | 242 | 155 |
| | 3 | 216 | 544 | 0 | 339 | 232 | 444 |
| | 4 | 171 | 347 | 786 | 0 | 32 | 448 |
| | 5 | 192 | 328 | 539 | 232 | 0 | 220 |
| | 6 | 68 | 354 | 1578 | 243 | 188 | 0 |

Costo de reordenamiento por departamento

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 673 | 882 | 595 | 509 | 521 | 957 |

- 15 DPS-PROB 1

Flujo de materiales entre departamentos

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
|-----------|----|-----|-----|----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|
| Periodo 1 | 1 | 0 | 32 | 57 | 107 | 10 | 89 | 61 | 97 | 101 | 99 | 449 | 551 | 229 | 289 | 105 |
| | 2 | 128 | 0 | 24 | 134 | 73 | 41 | 14 | 57 | 15 | 190 | 262 | 443 | 536 | 528 | 486 |
| | 3 | 121 | 92 | 0 | 129 | 20 | 37 | 34 | 59 | 40 | 35 | 602 | 490 | 342 | 360 | 679 |
| | 4 | 15 | 28 | 25 | 0 | 68 | 81 | 19 | 136 | 92 | 54 | 344 | 537 | 349 | 215 | 640 |
| | 5 | 53 | 119 | 78 | 93 | 0 | 17 | 8 | 146 | 24 | 104 | 434 | 458 | 552 | 195 | 661 |
| | 6 | 21 | 18 | 54 | 73 | 28 | 0 | 42 | 26 | 80 | 21 | 604 | 717 | 351 | 107 | 860 |
| | 7 | 20 | 17 | 10 | 83 | 52 | 119 | 0 | 36 | 83 | 67 | 547 | 195 | 465 | 168 | 896 |
| | 8 | 126 | 72 | 73 | 119 | 74 | 87 | 14 | 0 | 57 | 90 | 803 | 117 | 488 | 660 | 651 |
| | 9 | 86 | 57 | 45 | 25 | 70 | 56 | 23 | 76 | 0 | 30 | 1045 | 584 | 312 | 200 | 483 |
| | 10 | 110 | 67 | 51 | 49 | 70 | 135 | 14 | 108 | 32 | 0 | 395 | 108 | 664 | 559 | 338 |
| | 11 | 45 | 97 | 33 | 44 | 19 | 150 | 36 | 151 | 70 | 175 | 0 | 124 | 795 | 130 | 195 |
| | 12 | 90 | 114 | 70 | 40 | 18 | 24 | 14 | 132 | 66 | 153 | 1038 | 0 | 797 | 437 | 138 |
| | 13 | 42 | 90 | 37 | 122 | 26 | 70 | 42 | 46 | 19 | 116 | 362 | 561 | 0 | 615 | 969 |
| | 14 | 81 | 14 | 54 | 28 | 61 | 139 | 27 | 59 | 79 | 32 | 157 | 180 | 201 | 0 | 605 |
| | 15 | 64 | 81 | 12 | 96 | 36 | 73 | 65 | 86 | 100 | 46 | 718 | 440 | 844 | 427 | 0 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
|-----------|----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|------|-----|------|----|-----|-----|-----|-----|
| Periodo 2 | 1 | 0 | 57 | 20 | 74 | 70 | 352 | 260 | 1214 | 334 | 1081 | 10 | 52 | 138 | 81 | 35 |
| | 2 | 98 | 0 | 46 | 105 | 15 | 114 | 495 | 1323 | 108 | 228 | 59 | 116 | 63 | 139 | 93 |
| | 3 | 54 | 71 | 0 | 64 | 36 | 256 | 491 | 319 | 341 | 764 | 71 | 106 | 152 | 19 | 82 |
| | 4 | 99 | 38 | 23 | 0 | 55 | 518 | 603 | 927 | 276 | 353 | 58 | 111 | 50 | 149 | 51 |
| | 5 | 42 | 59 | 42 | 76 | 0 | 225 | 606 | 409 | 374 | 329 | 84 | 100 | 147 | 135 | 124 |
| | 6 | 28 | 126 | 14 | 97 | 71 | 0 | 107 | 374 | 213 | 751 | 85 | 129 | 128 | 142 | 42 |
| | 7 | 12 | 38 | 62 | 99 | 19 | 278 | 0 | 323 | 242 | 1144 | 42 | 135 | 123 | 103 | 49 |
| | 8 | 86 | 108 | 52 | 57 | 64 | 522 | 513 | 0 | 405 | 509 | 37 | 91 | 45 | 101 | 102 |
| | 9 | 31 | 129 | 12 | 14 | 67 | 135 | 469 | 974 | 0 | 680 | 58 | 91 | 129 | 38 | 38 |
| | 10 | 108 | 89 | 44 | 67 | 48 | 549 | 427 | 705 | 65 | 0 | 50 | 50 | 141 | 41 | 125 |
| | 11 | 109 | 98 | 28 | 43 | 37 | 531 | 257 | 279 | 376 | 627 | 0 | 136 | 53 | 63 | 16 |
| | 12 | 50 | 129 | 14 | 87 | 30 | 548 | 309 | 324 | 344 | 256 | 10 | 0 | 121 | 120 | 34 |
| | 13 | 105 | 102 | 60 | 37 | 62 | 273 | 379 | 239 | 145 | 465 | 69 | 124 | 0 | 46 | 35 |
| | 14 | 26 | 126 | 54 | 103 | 43 | 343 | 546 | 382 | 86 | 599 | 69 | 63 | 150 | 0 | 86 |
| | 15 | 81 | 89 | 53 | 105 | 80 | 324 | 323 | 1022 | 157 | 859 | 83 | 14 | 60 | 84 | 0 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
|-----------|----|-----|----|----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Periodo 3 | 1 | 0 | 64 | 29 | 36 | 62 | 364 | 382 | 479 | 598 | 542 | 31 | 65 | 40 | 68 | 75 |
| | 2 | 103 | 0 | 77 | 91 | 155 | 312 | 483 | 233 | 231 | 697 | 99 | 82 | 149 | 133 | 17 |
| | 3 | 103 | 77 | 0 | 35 | 82 | 1090 | 530 | 326 | 106 | 253 | 31 | 84 | 157 | 115 | 72 |
| | 4 | 38 | 79 | 14 | 0 | 58 | 791 | 141 | 97 | 561 | 288 | 96 | 60 | 161 | 173 | 136 |
| | 5 | 65 | 25 | 41 | 77 | 0 | 891 | 1227 | 447 | 563 | 453 | 82 | 14 | 145 | 97 | 33 |
| | 6 | 22 | 82 | 78 | 24 | 74 | 0 | 238 | 727 | 406 | 914 | 116 | 102 | 118 | 78 | 129 |
| | 7 | 148 | 26 | 67 | 119 | 96 | 664 | 0 | 267 | 102 | 633 | 98 | 74 | 25 | 78 | 29 |
| | 8 | 107 | 66 | 52 | 101 | 47 | 713 | 483 | 0 | 185 | 623 | 56 | 23 | 96 | 162 | 75 |
| | 9 | 24 | 63 | 71 | 45 | 87 | 195 | 607 | 362 | 0 | 745 | 107 | 73 | 136 | 159 | 120 |
| | 10 | 110 | 81 | 12 | 115 | 33 | 496 | 332 | 167 | 611 | 0 | 78 | 55 | 83 | 137 | 102 |
| | 11 | 115 | 64 | 26 | 53 | 63 | 243 | 637 | 140 | 628 | 738 | 0 | 39 | 24 | 50 | 45 |
| | 12 | 79 | 33 | 49 | 63 | 33 | 183 | 717 | 274 | 562 | 611 | 100 | 0 | 23 | 59 | 74 |
| | 13 | 16 | 36 | 72 | 162 | 29 | 514 | 179 | 245 | 559 | 115 | 31 | 23 | 0 | 148 | 99 |
| | 14 | 27 | 58 | 40 | 115 | 143 | 520 | 576 | 192 | 272 | 447 | 29 | 36 | 25 | 0 | 20 |
| | 15 | 131 | 49 | 79 | 61 | 129 | 233 | 584 | 457 | 123 | 120 | 30 | 49 | 144 | 111 | 0 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
|-----------|----|----|-----|-----|-----|-----|------|------|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|----|
| Periodo 4 | 1 | 0 | 190 | 87 | 75 | 119 | 472 | 840 | 331 | 76 | 770 | 26 | 36 | 101 | 81 | 24 |
| | 2 | 51 | 0 | 47 | 21 | 81 | 760 | 420 | 578 | 184 | 595 | 56 | 40 | 59 | 118 | 66 |
| | 3 | 15 | 22 | 0 | 24 | 95 | 837 | 277 | 257 | 214 | 202 | 60 | 77 | 48 | 100 | 25 |
| | 4 | 52 | 151 | 23 | 0 | 29 | 750 | 516 | 502 | 158 | 471 | 26 | 11 | 118 | 47 | 49 |
| | 5 | 32 | 105 | 51 | 167 | 0 | 724 | 248 | 414 | 194 | 764 | 65 | 10 | 57 | 112 | 30 |
| | 6 | 27 | 42 | 156 | 117 | 154 | 0 | 267 | 556 | 36 | 123 | 46 | 36 | 139 | 178 | 49 |
| | 7 | 15 | 146 | 111 | 106 | 23 | 306 | 0 | 388 | 142 | 757 | 100 | 52 | 65 | 138 | 7 |
| | 8 | 40 | 96 | 95 | 39 | 32 | 727 | 1125 | 0 | 219 | 330 | 16 | 29 | 115 | 53 | 25 |
| | 9 | 8 | 113 | 117 | 123 | 24 | 827 | 318 | 553 | 0 | 639 | 26 | 79 | 135 | 74 | 28 |
| | 10 | 50 | 53 | 44 | 102 | 63 | 997 | 794 | 371 | 138 | 0 | 88 | 68 | 93 | 65 | 34 |
| | 11 | 48 | 182 | 22 | 110 | 42 | 217 | 1139 | 200 | 243 | 113 | 0 | 42 | 76 | 55 | 12 |
| | 12 | 22 | 37 | 122 | 195 | 72 | 1009 | 244 | 232 | 116 | 91 | 96 | 0 | 94 | 34 | 27 |
| | 13 | 6 | 211 | 64 | 184 | 128 | 174 | 369 | 363 | 216 | 182 | 56 | 64 | 0 | 79 | 55 |
| | 14 | 48 | 198 | 158 | 158 | 131 | 121 | 1105 | 536 | 119 | 599 | 54 | 68 | 27 | 0 | 32 |
| | 15 | 9 | 132 | 96 | 65 | 18 | 900 | 714 | 667 | 55 | 750 | 65 | 87 | 73 | 173 | 0 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
|-----------|----|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|
| Periodo 5 | 1 | 0 | 378 | 164 | 89 | 303 | 111 | 36 | 25 | 104 | 44 | 82 | 68 | 69 | 189 | 94 |
| | 2 | 233 | 0 | 420 | 68 | 280 | 170 | 63 | 65 | 23 | 53 | 44 | 116 | 30 | 150 | 243 |
| | 3 | 335 | 972 | 0 | 272 | 116 | 217 | 61 | 53 | 151 | 52 | 54 | 157 | 78 | 127 | 45 |
| | 4 | 693 | 797 | 295 | 0 | 446 | 56 | 13 | 44 | 84 | 47 | 76 | 68 | 22 | 170 | 38 |
| | 5 | 255 | 634 | 480 | 194 | 0 | 173 | 63 | 13 | 40 | 58 | 18 | 65 | 35 | 51 | 46 |
| | 6 | 838 | 771 | 77 | 179 | 552 | 0 | 39 | 70 | 36 | 58 | 115 | 149 | 17 | 101 | 147 |
| | 7 | 491 | 689 | 154 | 88 | 546 | 89 | 0 | 67 | 24 | 18 | 117 | 68 | 37 | 64 | 178 |
| | 8 | 810 | 331 | 230 | 303 | 645 | 147 | 63 | 0 | 21 | 39 | 122 | 86 | 62 | 181 | 72 |
| | 9 | 381 | 363 | 276 | 143 | 223 | 133 | 59 | 33 | 0 | 64 | 132 | 84 | 29 | 191 | 196 |
| | 10 | 937 | 705 | 416 | 207 | 672 | 149 | 48 | 29 | 151 | 0 | 100 | 52 | 47 | 49 | 169 |
| | 11 | 483 | 923 | 411 | 303 | 145 | 217 | 8 | 64 | 52 | 8 | 0 | 86 | 15 | 73 | 103 |
| | 12 | 1088 | 756 | 368 | 143 | 446 | 48 | 37 | 67 | 144 | 16 | 79 | 0 | 28 | 107 | 167 |
| | 13 | 793 | 314 | 425 | 185 | 596 | 96 | 24 | 75 | 103 | 41 | 95 | 116 | 0 | 101 | 96 |
| | 14 | 359 | 656 | 148 | 360 | 679 | 208 | 57 | 32 | 16 | 52 | 84 | 42 | 48 | 0 | 206 |
| | 15 | 975 | 601 | 328 | 168 | 379 | 176 | 40 | 50 | 19 | 62 | 31 | 127 | 30 | 205 | 0 |

Costo de reordenamiento por departamento

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 862 | 768 | 571 | 517 | 518 | 788 | 524 | 970 | 740 | 901 | 692 | 706 | 532 | 739 | 905 |

- 15 DEPS – PROB 2

Flujo de materiales entre departamentos

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-----------|----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Periodo 1 | 1 | 0 | 70 | 75 | 49 | 35 | 228 | 48 | 112 | 75 | 144 | 124 | 310 | 314 | 192 | 467 |
| | 2 | 257 | 0 | 29 | 99 | 19 | 158 | 77 | 379 | 21 | 96 | 312 | 567 | 281 | 79 | 395 |
| | 3 | 43 | 121 | 0 | 102 | 29 | 261 | 11 | 254 | 94 | 26 | 154 | 298 | 391 | 259 | 513 |
| | 4 | 81 | 184 | 20 | 0 | 53 | 104 | 65 | 66 | 22 | 122 | 253 | 369 | 211 | 664 | 891 |
| | 5 | 156 | 202 | 67 | 61 | 0 | 118 | 107 | 194 | 112 | 151 | 175 | 369 | 459 | 236 | 370 |
| | 6 | 235 | 122 | 15 | 118 | 24 | 0 | 100 | 56 | 23 | 71 | 326 | 569 | 335 | 436 | 236 |
| | 7 | 151 | 106 | 88 | 29 | 61 | 211 | 0 | 102 | 70 | 138 | 295 | 558 | 374 | 316 | 910 |
| | 8 | 197 | 58 | 50 | 134 | 89 | 52 | 103 | 0 | 61 | 117 | 46 | 455 | 758 | 636 | 411 |
| | 9 | 164 | 123 | 53 | 101 | 88 | 219 | 100 | 199 | 0 | 31 | 107 | 561 | 404 | 281 | 919 |
| | 10 | 115 | 39 | 86 | 27 | 25 | 54 | 29 | 128 | 65 | 0 | 68 | 143 | 687 | 340 | 753 |
| | 11 | 136 | 164 | 60 | 93 | 33 | 154 | 29 | 116 | 87 | 137 | 0 | 286 | 366 | 556 | 833 |
| | 12 | 206 | 151 | 40 | 18 | 73 | 108 | 61 | 194 | 39 | 175 | 348 | 0 | 497 | 178 | 212 |
| | 13 | 199 | 161 | 26 | 53 | 60 | 229 | 80 | 183 | 115 | 140 | 86 | 494 | 0 | 309 | 486 |
| | 14 | 260 | 103 | 64 | 57 | 19 | 152 | 75 | 51 | 98 | 104 | 307 | 370 | 427 | 0 | 104 |
| | 15 | 28 | 139 | 32 | 33 | 74 | 234 | 106 | 138 | 35 | 108 | 251 | 590 | 588 | 764 | 0 |

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-----------|----|-----|-----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|------|------|
| Periodo 2 | 1 | 0 | 197 | 22 | 57 | 48 | 47 | 169 | 85 | 59 | 44 | 112 | 551 | 194 | 502 | 315 |
| | 2 | 147 | 0 | 62 | 29 | 65 | 52 | 155 | 67 | 81 | 41 | 417 | 341 | 276 | 577 | 1110 |
| | 3 | 171 | 105 | 0 | 28 | 56 | 35 | 60 | 86 | 35 | 30 | 315 | 75 | 61 | 814 | 718 |
| | 4 | 143 | 168 | 80 | 0 | 130 | 84 | 36 | 55 | 87 | 61 | 124 | 605 | 361 | 824 | 787 |
| | 5 | 24 | 229 | 73 | 78 | 0 | 11 | 191 | 23 | 67 | 45 | 295 | 620 | 314 | 1005 | 163 |
| | 6 | 52 | 55 | 33 | 40 | 70 | 0 | 27 | 111 | 42 | 70 | 292 | 519 | 357 | 828 | 452 |
| | 7 | 164 | 69 | 38 | 18 | 109 | 47 | 0 | 79 | 96 | 9 | 359 | 129 | 214 | 273 | 928 |
| | 8 | 208 | 130 | 66 | 61 | 115 | 64 | 190 | 0 | 68 | 38 | 510 | 654 | 355 | 574 | 676 |
| | 9 | 87 | 37 | 50 | 64 | 85 | 49 | 226 | 57 | 0 | 43 | 440 | 224 | 144 | 960 | 467 |
| | 10 | 108 | 118 | 62 | 67 | 40 | 46 | 169 | 39 | 98 | 0 | 181 | 225 | 332 | 182 | 883 |
| | 11 | 35 | 70 | 59 | 55 | 135 | 13 | 69 | 70 | 86 | 70 | 0 | 112 | 345 | 967 | 534 |
| | 12 | 72 | 100 | 66 | 33 | 105 | 83 | 66 | 102 | 81 | 23 | 471 | 0 | 326 | 648 | 166 |
| | 13 | 149 | 105 | 33 | 72 | 55 | 14 | 87 | 23 | 54 | 49 | 369 | 554 | 0 | 612 | 751 |
| | 14 | 154 | 100 | 44 | 19 | 122 | 83 | 229 | 48 | 105 | 32 | 147 | 475 | 326 | 0 | 211 |
| | 15 | 217 | 120 | 19 | 16 | 148 | 50 | 130 | 82 | 48 | 60 | 276 | 566 | 274 | 130 | 0 |

| | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-----------|----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|------|-----|-----|
| Periodo 3 | 1 | 0 | 83 | 109 | 154 | 14 | 50 | 61 | 94 | 74 | 169 | 601 | 367 | 620 | 289 | 256 |
| | 2 | 76 | 0 | 115 | 68 | 60 | 29 | 132 | 163 | 8 | 38 | 789 | 192 | 1175 | 384 | 539 |
| | 3 | 19 | 96 | 0 | 48 | 103 | 38 | 71 | 150 | 13 | 52 | 669 | 479 | 243 | 115 | 396 |
| | 4 | 44 | 87 | 151 | 0 | 102 | 36 | 110 | 89 | 36 | 167 | 399 | 313 | 562 | 216 | 120 |
| | 5 | 48 | 69 | 145 | 38 | 0 | 53 | 99 | 159 | 58 | 65 | 720 | 451 | 661 | 440 | 136 |
| | 6 | 20 | 131 | 94 | 185 | 104 | 0 | 106 | 68 | 58 | 148 | 257 | 284 | 202 | 415 | 211 |
| | 7 | 81 | 96 | 148 | 82 | 18 | 19 | 0 | 31 | 79 | 53 | 386 | 371 | 231 | 247 | 487 |
| | 8 | 51 | 142 | 87 | 67 | 16 | 41 | 121 | 0 | 74 | 187 | 843 | 345 | 936 | 500 | 329 |
| | 9 | 15 | 155 | 40 | 129 | 76 | 45 | 51 | 160 | 0 | 206 | 697 | 256 | 1287 | 560 | 155 |
| | 10 | 31 | 38 | 25 | 64 | 108 | 88 | 147 | 48 | 87 | 0 | 286 | 231 | 655 | 124 | 551 |
| | 11 | 27 | 73 | 96 | 68 | 28 | 60 | 73 | 44 | 33 | 112 | 0 | 349 | 520 | 663 | 203 |
| | 12 | 30 | 150 | 113 | 116 | 101 | 73 | 51 | 129 | 57 | 38 | 235 | 0 | 866 | 82 | 295 |
| | 13 | 75 | 160 | 106 | 137 | 72 | 56 | 81 | 112 | 59 | 167 | 868 | 488 | 0 | 347 | 414 |
| | 14 | 40 | 69 | 146 | 176 | 61 | 94 | 79 | 78 | 75 | 37 | 170 | 307 | 146 | 0 | 174 |
| | 15 | 33 | 176 | 143 | 49 | 50 | 40 | 121 | 92 | 79 | 54 | 113 | 319 | 1114 | 587 | 0 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
|-----------|----|----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| Periodo 4 | 1 | 0 | 125 | 71 | 79 | 61 | 195 | 42 | 96 | 168 | 178 | 823 | 765 | 307 | 680 | 459 |
| | 2 | 67 | 0 | 24 | 17 | 184 | 72 | 11 | 110 | 39 | 74 | 199 | 578 | 117 | 703 | 1027 |
| | 3 | 20 | 46 | 0 | 88 | 104 | 49 | 19 | 26 | 43 | 140 | 396 | 235 | 236 | 489 | 228 |
| | 4 | 10 | 142 | 65 | 0 | 57 | 93 | 7 | 129 | 82 | 72 | 183 | 345 | 357 | 654 | 280 |
| | 5 | 43 | 29 | 51 | 85 | 0 | 29 | 17 | 190 | 97 | 235 | 284 | 111 | 211 | 348 | 970 |
| | 6 | 70 | 68 | 23 | 44 | 35 | 0 | 43 | 147 | 146 | 207 | 717 | 323 | 37 | 362 | 864 |
| | 7 | 24 | 163 | 54 | 34 | 70 | 73 | 0 | 185 | 96 | 109 | 336 | 133 | 318 | 390 | 911 |
| | 8 | 72 | 71 | 26 | 99 | 59 | 38 | 8 | 0 | 130 | 126 | 387 | 355 | 241 | 93 | 187 |
| | 9 | 38 | 101 | 71 | 106 | 126 | 213 | 37 | 202 | 0 | 50 | 530 | 152 | 342 | 417 | 277 |
| | 10 | 41 | 80 | 14 | 30 | 126 | 109 | 74 | 31 | 59 | 0 | 346 | 668 | 151 | 549 | 626 |
| | 11 | 48 | 27 | 50 | 103 | 99 | 166 | 76 | 42 | 162 | 131 | 0 | 380 | 311 | 335 | 840 |
| | 12 | 71 | 162 | 78 | 46 | 44 | 160 | 36 | 134 | 45 | 199 | 405 | 0 | 148 | 513 | 104 |
| | 13 | 32 | 167 | 90 | 53 | 137 | 219 | 58 | 145 | 168 | 183 | 259 | 492 | 0 | 391 | 378 |
| | 14 | 68 | 167 | 38 | 14 | 133 | 159 | 74 | 151 | 117 | 182 | 640 | 638 | 244 | 0 | 877 |
| | 15 | 26 | 107 | 82 | 27 | 128 | 162 | 9 | 153 | 123 | 78 | 632 | 602 | 212 | 347 | 0 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
|-----------|----|-----|-----|-----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|
| Periodo 5 | 1 | 0 | 526 | 222 | 488 | 1139 | 224 | 17 | 78 | 192 | 78 | 64 | 12 | 35 | 131 | 62 |
| | 2 | 281 | 0 | 376 | 661 | 672 | 182 | 97 | 56 | 161 | 38 | 86 | 58 | 32 | 219 | 102 |
| | 3 | 155 | 241 | 0 | 105 | 370 | 136 | 136 | 79 | 35 | 78 | 69 | 64 | 156 | 207 | 68 |
| | 4 | 390 | 497 | 93 | 0 | 831 | 232 | 68 | 60 | 234 | 64 | 28 | 26 | 96 | 166 | 84 |
| | 5 | 489 | 239 | 472 | 567 | 0 | 197 | 151 | 245 | 89 | 91 | 19 | 12 | 97 | 200 | 85 |
| | 6 | 404 | 74 | 172 | 342 | 587 | 0 | 84 | 96 | 118 | 21 | 27 | 60 | 117 | 99 | 114 |
| | 7 | 309 | 226 | 222 | 642 | 277 | 213 | 0 | 158 | 72 | 92 | 21 | 29 | 23 | 203 | 88 |
| | 8 | 386 | 233 | 72 | 434 | 369 | 77 | 41 | 0 | 32 | 88 | 64 | 63 | 120 | 32 | 86 |
| | 9 | 688 | 587 | 338 | 416 | 155 | 132 | 76 | 123 | 0 | 38 | 71 | 60 | 80 | 210 | 38 |
| | 10 | 490 | 403 | 263 | 675 | 742 | 159 | 86 | 187 | 156 | 0 | 68 | 13 | 87 | 48 | 22 |
| | 11 | 387 | 257 | 277 | 412 | 280 | 202 | 131 | 95 | 52 | 81 | 0 | 50 | 137 | 35 | 46 |
| | 12 | 278 | 439 | 137 | 372 | 274 | 241 | 81 | 235 | 95 | 32 | 39 | 0 | 138 | 162 | 47 |
| | 13 | 96 | 93 | 106 | 278 | 670 | 61 | 74 | 341 | 39 | 47 | 35 | 27 | 0 | 216 | 93 |
| | 14 | 428 | 345 | 370 | 620 | 856 | 175 | 58 | 278 | 109 | 124 | 67 | 14 | 62 | 0 | 69 |
| | 15 | 293 | 266 | 154 | 650 | 1055 | 192 | 117 | 424 | 166 | 18 | 80 | 66 | 96 | 138 | 0 |

Costo de reordenamiento por departamento

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 790 | 727 | 536 | 835 | 656 | 639 | 845 | 697 | 592 | 564 | 536 | 682 | 867 | 790 | 546 |

- 15 DEPS – PROB 3

Flujo de materiales entre departamentos

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
|-----------|----|----|----|-----|----|----|----|-----|-----|----|-----|------|-----|-----|-----|------|
| Periodo 1 | 1 | 0 | 17 | 75 | 22 | 71 | 43 | 29 | 74 | 86 | 186 | 627 | 565 | 165 | 524 | 1014 |
| | 2 | 55 | 0 | 50 | 52 | 90 | 20 | 109 | 105 | 55 | 151 | 411 | 307 | 187 | 131 | 593 |
| | 3 | 37 | 36 | 0 | 24 | 50 | 15 | 115 | 198 | 69 | 116 | 713 | 321 | 205 | 585 | 442 |
| | 4 | 44 | 30 | 125 | 0 | 42 | 17 | 149 | 143 | 46 | 173 | 455 | 500 | 227 | 451 | 807 |
| | 5 | 48 | 36 | 39 | 85 | 0 | 42 | 119 | 206 | 33 | 19 | 429 | 669 | 196 | 794 | 580 |
| | 6 | 50 | 35 | 78 | 77 | 58 | 0 | 179 | 79 | 11 | 144 | 464 | 641 | 101 | 403 | 811 |
| | 7 | 40 | 23 | 92 | 90 | 70 | 62 | 0 | 56 | 66 | 138 | 535 | 89 | 177 | 499 | 1121 |
| | 8 | 33 | 6 | 76 | 91 | 11 | 48 | 100 | 0 | 79 | 182 | 1228 | 400 | 53 | 612 | 1232 |
| | 9 | 61 | 8 | 15 | 33 | 26 | 43 | 122 | 179 | 0 | 174 | 837 | 519 | 136 | 759 | 250 |
| | 10 | 32 | 28 | 22 | 66 | 87 | 13 | 234 | 149 | 31 | 0 | 299 | 101 | 136 | 620 | 315 |
| | 11 | 30 | 37 | 80 | 35 | 60 | 57 | 127 | 83 | 81 | 29 | 0 | 162 | 219 | 257 | 156 |
| | 12 | 57 | 39 | 102 | 64 | 93 | 37 | 159 | 64 | 23 | 143 | 599 | 0 | 96 | 111 | 247 |
| | 13 | 38 | 37 | 110 | 63 | 24 | 42 | 48 | 198 | 43 | 113 | 815 | 468 | 0 | 144 | 570 |
| | 14 | 45 | 33 | 110 | 32 | 89 | 22 | 225 | 70 | 40 | 127 | 556 | 230 | 175 | 0 | 867 |
| | 15 | 28 | 36 | 61 | 70 | 65 | 21 | 75 | 61 | 76 | 45 | 721 | 772 | 30 | 369 | 0 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
|-----------|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|------|------|-----|-----|-----|
| Periodo 2 | 1 | 0 | 25 | 74 | 187 | 415 | 143 | 15 | 69 | 110 | 49 | 510 | 315 | 498 | 299 | 344 |
| | 2 | 60 | 0 | 70 | 88 | 97 | 68 | 104 | 179 | 158 | 48 | 470 | 376 | 284 | 405 | 465 |
| | 3 | 27 | 88 | 0 | 141 | 65 | 214 | 121 | 76 | 25 | 18 | 1219 | 298 | 152 | 145 | 583 |
| | 4 | 7 | 69 | 105 | 0 | 52 | 84 | 101 | 202 | 49 | 46 | 305 | 487 | 266 | 97 | 581 |
| | 5 | 31 | 64 | 50 | 62 | 0 | 196 | 107 | 63 | 130 | 23 | 1164 | 460 | 670 | 397 | 180 |
| | 6 | 19 | 164 | 260 | 176 | 149 | 0 | 98 | 202 | 52 | 19 | 732 | 173 | 508 | 204 | 557 |
| | 7 | 57 | 43 | 105 | 144 | 82 | 52 | 0 | 40 | 128 | 28 | 234 | 253 | 413 | 131 | 194 |
| | 8 | 33 | 25 | 149 | 126 | 176 | 62 | 76 | 0 | 129 | 49 | 243 | 414 | 551 | 355 | 451 |
| | 9 | 11 | 48 | 254 | 49 | 229 | 48 | 122 | 136 | 0 | 12 | 185 | 144 | 304 | 253 | 158 |
| | 10 | 66 | 43 | 240 | 31 | 205 | 205 | 120 | 201 | 34 | 0 | 604 | 1008 | 591 | 118 | 128 |
| | 11 | 9 | 128 | 258 | 146 | 282 | 151 | 46 | 139 | 131 | 44 | 0 | 714 | 551 | 150 | 441 |
| | 12 | 45 | 91 | 129 | 132 | 72 | 51 | 46 | 115 | 74 | 61 | 127 | 0 | 624 | 223 | 237 |
| | 13 | 42 | 79 | 127 | 49 | 101 | 66 | 28 | 130 | 28 | 55 | 825 | 190 | 0 | 418 | 478 |
| | 14 | 45 | 65 | 29 | 89 | 225 | 53 | 90 | 217 | 66 | 32 | 660 | 180 | 168 | 0 | 503 |
| | 15 | 48 | 94 | 125 | 230 | 46 | 173 | 53 | 201 | 42 | 48 | 692 | 842 | 84 | 205 | 0 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
|-----------|----|-----|------|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|
| Periodo 3 | 1 | 0 | 804 | 599 | 65 | 130 | 72 | 215 | 108 | 212 | 98 | 52 | 63 | 79 | 278 | 54 |
| | 2 | 170 | 0 | 595 | 167 | 317 | 70 | 78 | 36 | 158 | 24 | 31 | 178 | 20 | 256 | 17 |
| | 3 | 393 | 236 | 0 | 502 | 597 | 32 | 243 | 82 | 171 | 169 | 26 | 176 | 48 | 49 | 74 |
| | 4 | 249 | 342 | 350 | 0 | 467 | 53 | 271 | 95 | 201 | 96 | 48 | 261 | 53 | 69 | 123 |
| | 5 | 108 | 544 | 496 | 62 | 0 | 8 | 44 | 30 | 206 | 133 | 100 | 227 | 60 | 106 | 28 |
| | 6 | 430 | 1196 | 323 | 323 | 230 | 0 | 31 | 54 | 33 | 94 | 65 | 262 | 37 | 309 | 22 |
| | 7 | 222 | 499 | 293 | 406 | 624 | 49 | 0 | 76 | 114 | 162 | 101 | 99 | 41 | 151 | 61 |
| | 8 | 360 | 314 | 342 | 272 | 508 | 41 | 235 | 0 | 161 | 121 | 54 | 111 | 33 | 39 | 22 |
| | 9 | 381 | 407 | 298 | 540 | 387 | 15 | 257 | 57 | 0 | 91 | 79 | 32 | 64 | 302 | 33 |
| | 10 | 376 | 759 | 299 | 424 | 620 | 35 | 173 | 44 | 165 | 0 | 39 | 250 | 95 | 67 | 85 |
| | 11 | 369 | 791 | 383 | 376 | 247 | 18 | 148 | 95 | 187 | 154 | 0 | 169 | 72 | 288 | 60 |
| | 12 | 359 | 780 | 249 | 206 | 421 | 43 | 116 | 47 | 111 | 122 | 12 | 0 | 43 | 248 | 78 |
| | 13 | 75 | 398 | 444 | 88 | 136 | 55 | 175 | 90 | 197 | 125 | 68 | 115 | 0 | 67 | 80 |
| | 14 | 434 | 1074 | 494 | 296 | 273 | 13 | 212 | 59 | 88 | 108 | 12 | 239 | 22 | 0 | 106 |
| | 15 | 407 | 293 | 459 | 236 | 109 | 67 | 156 | 38 | 168 | 27 | 73 | 76 | 19 | 156 | 0 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
|-----------|----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|
| Periodo 4 | 1 | 0 | 380 | 240 | 714 | 550 | 156 | 145 | 26 | 49 | 46 | 63 | 49 | 72 | 23 | 89 |
| | 2 | 253 | 0 | 192 | 671 | 483 | 75 | 37 | 185 | 47 | 43 | 38 | 132 | 116 | 47 | 41 |
| | 3 | 646 | 213 | 0 | 684 | 273 | 178 | 59 | 72 | 81 | 70 | 133 | 87 | 90 | 33 | 126 |
| | 4 | 616 | 476 | 602 | 0 | 433 | 163 | 61 | 158 | 68 | 36 | 21 | 156 | 154 | 7 | 40 |
| | 5 | 495 | 159 | 697 | 779 | 0 | 125 | 35 | 185 | 35 | 18 | 64 | 126 | 59 | 12 | 95 |
| | 6 | 329 | 86 | 788 | 796 | 384 | 0 | 86 | 66 | 59 | 53 | 54 | 57 | 245 | 50 | 56 |
| | 7 | 442 | 102 | 165 | 203 | 415 | 45 | 0 | 85 | 99 | 31 | 51 | 160 | 61 | 13 | 50 |
| | 8 | 857 | 359 | 369 | 441 | 533 | 40 | 27 | 0 | 43 | 67 | 117 | 124 | 138 | 19 | 102 |
| | 9 | 1086 | 106 | 404 | 387 | 128 | 130 | 38 | 33 | 0 | 41 | 50 | 57 | 224 | 50 | 61 |
| | 10 | 412 | 417 | 516 | 114 | 180 | 64 | 137 | 132 | 112 | 0 | 85 | 231 | 52 | 6 | 139 |
| | 11 | 828 | 426 | 217 | 328 | 495 | 123 | 136 | 31 | 106 | 60 | 0 | 101 | 44 | 47 | 77 |
| | 12 | 858 | 291 | 507 | 313 | 525 | 115 | 18 | 78 | 14 | 17 | 39 | 0 | 225 | 43 | 125 |
| | 13 | 212 | 202 | 224 | 220 | 147 | 41 | 130 | 156 | 60 | 43 | 104 | 80 | 0 | 31 | 127 |
| | 14 | 1047 | 468 | 445 | 699 | 562 | 52 | 81 | 24 | 104 | 38 | 109 | 226 | 109 | 0 | 38 |
| | 15 | 531 | 254 | 447 | 177 | 432 | 90 | 126 | 86 | 56 | 57 | 42 | 261 | 83 | 35 | 0 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | |
|-----------|----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| Periodo 5 | 1 | 0 | 669 | 367 | 378 | 189 | 252 | 60 | 11 | 9 | 166 | 159 | 43 | 102 | 104 | 211 |
| | 2 | 455 | 0 | 85 | 51 | 178 | 287 | 56 | 39 | 52 | 120 | 150 | 32 | 134 | 113 | 180 |
| | 3 | 180 | 209 | 0 | 368 | 302 | 292 | 210 | 92 | 71 | 232 | 110 | 189 | 171 | 158 | 204 |
| | 4 | 576 | 953 | 357 | 0 | 315 | 75 | 71 | 21 | 13 | 107 | 121 | 188 | 152 | 176 | 25 |
| | 5 | 193 | 879 | 528 | 163 | 0 | 109 | 256 | 84 | 65 | 199 | 77 | 170 | 117 | 74 | 120 |
| | 6 | 244 | 314 | 421 | 110 | 270 | 0 | 62 | 15 | 42 | 88 | 182 | 26 | 139 | 149 | 119 |
| | 7 | 689 | 1008 | 77 | 163 | 171 | 61 | 0 | 111 | 25 | 30 | 59 | 38 | 96 | 40 | 92 |
| | 8 | 551 | 1005 | 204 | 233 | 131 | 38 | 167 | 0 | 52 | 27 | 165 | 145 | 33 | 135 | 113 |
| | 9 | 423 | 1116 | 155 | 108 | 229 | 157 | 193 | 103 | 0 | 233 | 99 | 59 | 156 | 133 | 132 |
| | 10 | 635 | 701 | 261 | 226 | 128 | 272 | 95 | 53 | 63 | 0 | 74 | 75 | 160 | 26 | 191 |
| | 11 | 850 | 331 | 545 | 238 | 176 | 223 | 123 | 104 | 32 | 197 | 0 | 181 | 145 | 19 | 192 |
| | 12 | 457 | 893 | 586 | 141 | 104 | 115 | 185 | 70 | 17 | 234 | 70 | 0 | 112 | 138 | 121 |
| | 13 | 208 | 982 | 281 | 82 | 170 | 114 | 34 | 93 | 14 | 177 | 38 | 142 | 0 | 174 | 88 |
| | 14 | 266 | 768 | 408 | 147 | 306 | 252 | 33 | 19 | 65 | 168 | 175 | 83 | 176 | 0 | 218 |
| | 15 | 205 | 269 | 108 | 271 | 232 | 64 | 161 | 59 | 29 | 149 | 36 | 95 | 161 | 45 | 0 |

Costo de reordenamiento por departamento

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 943 | 972 | 692 | 501 | 775 | 518 | 752 | 960 | 950 | 966 | 667 | 846 | 833 | 843 | 733 |

• 30 DEPS-PROB1

Flujo de materiales entre departamentos

| Periodo 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 0 | 20 | 2 | 38 | 20 | 15 | 3 | 4 | 11 | 23 | 28 | 162 | 209 | 51 | 132 | 57 | 66 | 35 | 58 | 86 | 7 | 7 | 27 | 18 | 20 | 10 | 16 | 40 | 14 | 12 |
| 2 | 32 | 0 | 18 | 9 | 3 | 9 | 8 | 19 | 9 | 33 | 9 | 177 | 44 | 114 | 223 | 84 | 175 | 88 | 73 | 33 | 23 | 26 | 6 | 11 | 5 | 16 | 29 | 31 | 16 | 18 |
| 3 | 30 | 15 | 0 | 21 | 8 | 21 | 5 | 27 | 14 | 20 | 20 | 42 | 148 | 104 | 31 | 83 | 84 | 47 | 81 | 15 | 7 | 27 | 26 | 2 | 6 | 17 | 12 | 10 | 31 | 15 |
| 4 | 3 | 9 | 17 | 0 | 18 | 12 | 5 | 25 | 7 | 25 | 42 | 124 | 68 | 109 | 240 | 31 | 33 | 33 | 21 | 81 | 22 | 28 | 50 | 14 | 33 | 16 | 25 | 24 | 4 | 7 |
| 5 | 13 | 28 | 11 | 5 | 0 | 15 | 8 | 26 | 11 | 23 | 18 | 54 | 63 | 98 | 217 | 53 | 92 | 42 | 187 | 81 | 19 | 25 | 12 | 10 | 44 | 15 | 20 | 40 | 4 | 17 |
| 6 | 5 | 19 | 7 | 26 | 16 | 0 | 5 | 34 | 25 | 30 | 35 | 50 | 145 | 127 | 228 | 18 | 176 | 42 | 36 | 58 | 26 | 20 | 47 | 4 | 31 | 15 | 28 | 6 | 14 | 27 |
| 7 | 5 | 3 | 13 | 16 | 17 | 19 | 0 | 36 | 7 | 31 | 22 | 43 | 221 | 133 | 167 | 120 | 151 | 55 | 116 | 14 | 22 | 4 | 10 | 14 | 28 | 6 | 19 | 40 | 20 | 21 |
| 8 | 31 | 26 | 18 | 8 | 11 | 28 | 7 | 0 | 21 | 18 | 42 | 59 | 98 | 90 | 163 | 87 | 119 | 26 | 73 | 26 | 12 | 16 | 27 | 9 | 10 | 15 | 32 | 17 | 11 | 8 |
| 9 | 21 | 16 | 17 | 15 | 10 | 36 | 5 | 19 | 0 | 4 | 11 | 130 | 132 | 89 | 61 | 19 | 162 | 49 | 92 | 80 | 24 | 24 | 44 | 10 | 32 | 17 | 27 | 33 | 31 | 11 |
| 10 | 27 | 18 | 17 | 9 | 6 | 13 | 10 | 13 | 17 | 0 | 44 | 94 | 107 | 49 | 66 | 89 | 27 | 19 | 50 | 88 | 18 | 14 | 37 | 5 | 27 | 21 | 18 | 40 | 27 | 10 |
| 11 | 11 | 12 | 4 | 22 | 14 | 28 | 12 | 7 | 19 | 13 | 0 | 37 | 121 | 134 | 102 | 93 | 59 | 36 | 97 | 91 | 16 | 4 | 16 | 17 | 29 | 4 | 10 | 6 | 16 | 8 |
| 12 | 22 | 25 | 4 | 9 | 13 | 36 | 12 | 5 | 25 | 27 | 44 | 0 | 49 | 118 | 193 | 64 | 111 | 19 | 109 | 81 | 23 | 4 | 27 | 3 | 51 | 21 | 11 | 4 | 8 | 5 |
| 13 | 10 | 13 | 6 | 26 | 3 | 12 | 11 | 39 | 20 | 11 | 22 | 32 | 0 | 122 | 75 | 13 | 163 | 16 | 27 | 81 | 7 | 30 | 36 | 20 | 48 | 3 | 18 | 9 | 25 | 12 |
| 14 | 20 | 19 | 15 | 17 | 16 | 5 | 3 | 24 | 25 | 32 | 28 | 51 | 116 | 0 | 175 | 22 | 92 | 81 | 88 | 39 | 6 | 4 | 7 | 19 | 41 | 2 | 27 | 31 | 27 | 25 |
| 15 | 16 | 4 | 9 | 41 | 20 | 25 | 13 | 22 | 17 | 33 | 26 | 137 | 166 | 14 | 0 | 106 | 179 | 74 | 89 | 17 | 7 | 25 | 15 | 12 | 17 | 19 | 33 | 39 | 34 | 27 |
| 16 | 9 | 21 | 12 | 25 | 11 | 31 | 5 | 7 | 8 | 29 | 17 | 153 | 24 | 11 | 73 | 0 | 39 | 28 | 123 | 55 | 17 | 11 | 38 | 11 | 41 | 16 | 9 | 11 | 23 | 9 |
| 17 | 17 | 26 | 5 | 15 | 22 | 24 | 10 | 35 | 19 | 6 | 33 | 49 | 143 | 51 | 195 | 119 | 0 | 24 | 60 | 71 | 22 | 21 | 49 | 6 | 28 | 8 | 22 | 23 | 13 | 26 |
| 18 | 27 | 25 | 5 | 15 | 4 | 27 | 7 | 19 | 10 | 15 | 33 | 156 | 174 | 122 | 171 | 113 | 37 | 0 | 84 | 25 | 22 | 18 | 15 | 3 | 33 | 5 | 25 | 25 | 11 | 10 |
| 19 | 8 | 22 | 10 | 36 | 6 | 30 | 4 | 35 | 9 | 23 | 40 | 126 | 140 | 40 | 106 | 115 | 118 | 61 | 0 | 29 | 16 | 28 | 50 | 3 | 10 | 9 | 19 | 11 | 26 | 20 |
| 20 | 35 | 18 | 2 | 38 | 12 | 25 | 4 | 15 | 17 | 29 | 40 | 171 | 204 | 118 | 259 | 36 | 82 | 68 | 115 | 0 | 3 | 15 | 30 | 6 | 36 | 4 | 23 | 27 | 13 | 12 |
| 21 | 5 | 14 | 19 | 7 | 2 | 40 | 2 | 10 | 5 | 29 | 7 | 97 | 208 | 103 | 89 | 119 | 26 | 82 | 187 | 93 | 0 | 12 | 26 | 20 | 53 | 5 | 4 | 19 | 31 | 19 |
| 22 | 5 | 16 | 16 | 9 | 7 | 11 | 3 | 4 | 25 | 8 | 42 | 110 | 102 | 99 | 102 | 38 | 128 | 51 | 68 | 64 | 19 | 0 | 15 | 14 | 8 | 18 | 17 | 42 | 14 | 3 |
| 23 | 21 | 23 | 11 | 21 | 10 | 6 | 13 | 31 | 21 | 27 | 34 | 185 | 90 | 36 | 213 | 96 | 109 | 55 | 55 | 63 | 6 | 26 | 0 | 12 | 11 | 21 | 26 | 7 | 26 | 10 |
| 24 | 17 | 4 | 7 | 20 | 3 | 32 | 4 | 11 | 5 | 27 | 31 | 159 | 141 | 104 | 80 | 92 | 48 | 15 | 93 | 76 | 19 | 26 | 7 | 0 | 8 | 6 | 33 | 11 | 30 | 11 |
| 25 | 19 | 9 | 18 | 28 | 15 | 6 | 11 | 39 | 17 | 20 | 28 | 29 | 121 | 113 | 261 | 117 | 124 | 38 | 43 | 48 | 14 | 22 | 49 | 5 | 0 | 15 | 16 | 37 | 21 | 14 |
| 26 | 28 | 8 | 20 | 40 | 20 | 6 | 2 | 39 | 11 | 15 | 17 | 172 | 99 | 43 | 35 | 93 | 58 | 18 | 36 | 75 | 10 | 8 | 46 | 3 | 14 | 0 | 29 | 7 | 17 | 5 |
| 27 | 33 | 8 | 3 | 35 | 17 | 9 | 8 | 18 | 5 | 12 | 20 | 157 | 25 | 97 | 71 | 48 | 68 | 14 | 70 | 62 | 27 | 9 | 21 | 15 | 24 | 4 | 0 | 40 | 21 | 11 |
| 28 | 26 | 24 | 9 | 12 | 13 | 31 | 12 | 38 | 24 | 26 | 25 | 66 | 168 | 46 | 73 | 52 | 175 | 39 | 63 | 11 | 6 | 24 | 6 | 8 | 44 | 7 | 26 | 0 | 22 | 22 |
| 29 | 4 | 5 | 18 | 15 | 3 | 10 | 6 | 9 | 22 | 18 | 36 | 39 | 167 | 121 | 180 | 85 | 124 | 40 | 49 | 45 | 9 | 23 | 46 | 20 | 45 | 21 | 14 | 22 | 0 | 13 |
| 30 | 24 | 19 | 9 | 22 | 5 | 24 | 8 | 29 | 21 | 33 | 21 | 71 | 202 | 48 | 130 | 71 | 66 | 17 | 117 | 12 | 13 | 18 | 8 | 12 | 6 | 13 | 6 | 27 | 16 | 0 |

| Periodo 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|
| 1 | 0 | 8 | 9 | 17 | 23 | 26 | 39 | 11 | 34 | 20 | 21 | 5 | 5 | 36 | 12 | 8 | 29 | 4 | 17 | 23 | 174 | 125 | 174 | 22 | 86 | 68 | 86 | 39 | 170 | 28 |
| 2 | 6 | 0 | 8 | 30 | 5 | 14 | 17 | 28 | 5 | 31 | 29 | 10 | 26 | 16 | 27 | 4 | 14 | 3 | 32 | 24 | 119 | 84 | 91 | 17 | 67 | 45 | 49 | 78 | 57 | 42 |
| 3 | 9 | 14 | 0 | 29 | 33 | 17 | 44 | 5 | 18 | 8 | 5 | 14 | 34 | 41 | 22 | 2 | 36 | 27 | 25 | 5 | 64 | 160 | 44 | 27 | 110 | 36 | 17 | 39 | 65 | 53 |
| 4 | 19 | 15 | 13 | 0 | 18 | 24 | 12 | 4 | 33 | 28 | 12 | 7 | 30 | 27 | 26 | 7 | 40 | 31 | 20 | 14 | 193 | 199 | 44 | 43 | 90 | 17 | 68 | 22 | 96 | 9 |
| 5 | 7 | 24 | 4 | 30 | 0 | 5 | 20 | 5 | 10 | 5 | 17 | 5 | 35 | 46 | 20 | 7 | 35 | 6 | 28 | 10 | 113 | 128 | 20 | 132 | 14 | 56 | 127 | 30 | 6 | |
| 6 | 23 | 3 | 16 | 18 | 8 | 0 | 9 | 17 | 28 | 44 | 8 | 11 | 25 | 13 | 14 | 5 | 35 | 5 | 35 | 24 | 73 | 141 | 153 | 52 | 169 | 81 | 43 | 61 | 90 | 16 |
| 7 | 13 | 7 | 16 | 24 | 5 | 37 | 0 | 20 | 7 | 16 | 8 | 15 | 19 | 25 | 27 | 3 | 28 | 24 | 19 | 26 | 213 | 114 | 168 | 35 | 164 | 95 | 54 | 123 | 81 | 36 |
| 8 | 22 | 11 | 19 | 30 | 4 | 39 | 35 | 0 | 21 | 32 | 18 | 7 | 15 | 12 | 16 | 2 | 24 | 17 | 35 | 7 | 32 | 131 | 64 | 13 | 107 | 26 | 73 | 28 | 90 | 36 |
| 9 | 10 | 14 | 6 | 28 | 20 | 42 | 16 | 22 | 0 | 39 | 25 | 19 | 29 | 22 | 11 | 8 | 10 | 24 | 4 | 22 | 135 | 191 | 142 | 46 | 40 | 79 | 14 | 96 | 171 | 30 |
| 10 | 26 | 21 | 19 | 22 | 33 | 31 | 26 | 19 | 5 | 0 | 22 | 17 | 13 | 20 | 19 | 7 | 41 | 7 | 28 | 14 | 169 | 65 | 127 | 6 | 102 | 100 | 38 | 144 | 45 | 28 |
| 11 | 13 | 20 | 4 | 4 | 11 | 23 | 8 | 12 | 15 | 16 | 0 | 17 | 10 | 37 | 3 | 9 | 12 | 8 | 14 | 15 | 89 | 83 | 26 | 47 | 167 | 67 | 60 | 59 | 124 | 33 |
| 12 | 30 | 18 | 13 | 17 | 32 | 25 | 15 | 19 | 26 | 21 | 16 | 0 | 16 | 5 | 11 | 9 | 25 | 7 | 12 | 15 | 231 | 88 | 88 | 40 | 176 | 81 | 42 | 32 | 149 | 56 |
| 13 | 22 | 21 | 17 | 11 | 23 | 30 | 23 | 11 | 18 | 6 | 22 | 14 | 0 | 10 | 26 | 4 | 19 | 10 | 27 | 4 | 114 | 136 | 26 | 37 | 62 | 73 | 40 | 132 | 81 | 55 |
| 14 | 10 | 7 | 20 | 27 | 3 | 26 | 27 | 24 | 24 | 46 | 18 | 18 | 16 | 0 | 9 | 7 | 32 | 25 | 17 | 3 | 123 | 92 | 52 | 53 | 33 | 91 | 71 | 153 | 100 | 21 |
| 15 | 27 | 16 | 11 | 19 | 4 | 10 | 17 | 19 | 13 | 37 | 3 | 23 | 36 | 42 | 0 | 7 | 20 | 17 | 32 | 28 | 133 | 99 | 103 | 38 | 52 | 72 | 21 | 101 | 175 | 52 |
| 16 | 13 | 6 | 10 | 8 | 23 | 19 | 41 | 17 | 27 | 6 | 14 | 12 | 19 | 37 | 20 | 0 | 20 | 19 | 6 | 20 | 109 | 91 | 114 | 29 | 35 | 63 | 44 | 135 | 127 | 24 |
| 17 | 10 | 4 | 15 | 23 | 27 | 33 | 32 | 18 | 14 | 39 | 20 | 21 | 33 | 19 | 26 | 9 | 0 | 18 | 8 | 24 | 136 | 159 | 83 | 27 | 66 | 100 | 52 | 96 | 158 | 18 |
| 18 | 33 | 18 | 19 | 18 | 26 | 45 | 27 | 6 | 19 | 46 | 30 | 15 | 10 | 29 | 18 | 2 | 20 | 0 | 26 | 14 | 72 | 189 | 119 | 48 | 159 | 96 | 102 | 71 | 83 | 52 |
| 19 | 27 | 20 | 5 | 15 | 24 | 19 | 36 | 26 | 29 | 13 | 21 | 9 | 33 | 39 | 29 | 3 | 35 | 33 | 0 | 5 | 204 | 144 | 195 | 33 | 157 | 70 | 49 | 54 | 55 | 37 |
| 20 | 21 | 13 | 15 | 4 | 29 | 18 | 11 | 20 | 27 | 34 | 14 | 7 | 24 | 15 | 34 | 9 | 38 | 32 | 21 | 0 | 147 | 161 | 96 | 22 | 25 | 24 | 61 | 74 | 85 | 11 |
| 21 | 26 | 12 | 3 | 24 | 30 | 42 | 22 | 13 | 18 | 17 | 22 | 24 | 38 | 34 | 14 | 10 | 33 | 24 | 36 | 18 | 0 | 44 | 136 | 48 | 36 | 21 | 42 | 87 | 170 | 22 |
| 22 | 23 | 6 | 8 | 23 | 9 | 19 | 14 | 24 | 17 | 9 | 16 | 15 | 33 | 46 | 12 | 8 | 33 | 3 | 31 | 8 | 38 | 0 | 33 | 36 | 63 | 45 | 93 | 24 | 67 | 45 |
| 23 | 11 | 21 | 13 | 8 | 20 | 24 | 39 | 6 | 10 | 46 | 12 | 12 | 24 | 40 | 11 | 7 | 10 | 32 | 24 | 11 | 74 | 121 | 0 | 13 | 71 | 33 | 57 | 117 | 86 | 52 |
| 24 | 12 | 9 | 12 | 11 | 33 | 24 | 41 | 14 | 5 | 25 | 5 | 6 | 13 | 12 | 23 | 5 | 13 | 7 | 27 | 21 | 255 | 197 | | | | | | | | |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | |
|-----------|----|-----|-----|----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|----|----|
| Periodo 3 | 1 | 0 | 74 | 28 | 30 | 33 | 45 | 19 | 35 | 58 | 28 | 8 | 16 | 6 | 23 | 14 | 25 | 9 | 21 | 24 | 6 | 12 | 82 | 13 | 123 | 30 | 28 | 55 | 78 | 25 | 12 |
| | 2 | 101 | 0 | 40 | 14 | 61 | 156 | 18 | 30 | 73 | 25 | 17 | 19 | 4 | 22 | 19 | 7 | 1 | 27 | 27 | 3 | 57 | 59 | 67 | 92 | 75 | 112 | 44 | 85 | 94 | 26 |
| | 3 | 119 | 63 | 0 | 14 | 19 | 127 | 42 | 9 | 29 | 45 | 15 | 7 | 2 | 24 | 12 | 13 | 6 | 16 | 28 | 16 | 78 | 132 | 60 | 94 | 59 | 74 | 23 | 106 | 34 | 30 |
| | 4 | 22 | 124 | 56 | 0 | 62 | 104 | 40 | 7 | 20 | 46 | 17 | 13 | 5 | 6 | 23 | 21 | 10 | 6 | 6 | 23 | 75 | 19 | 9 | 138 | 129 | 103 | 8 | 36 | 49 | 24 |
| | 5 | 142 | 22 | 50 | 19 | 0 | 139 | 30 | 7 | 47 | 30 | 5 | 11 | 1 | 21 | 3 | 10 | 6 | 14 | 23 | 9 | 83 | 109 | 69 | 140 | 79 | 46 | 39 | 105 | 93 | 13 |
| | 6 | 119 | 45 | 63 | 27 | 59 | 0 | 29 | 6 | 34 | 31 | 8 | 4 | 5 | 8 | 20 | 5 | 11 | 28 | 4 | 11 | 51 | 44 | 24 | 64 | 103 | 19 | 57 | 85 | 47 | 23 |
| | 7 | 134 | 69 | 20 | 40 | 22 | 22 | 0 | 45 | 48 | 45 | 17 | 12 | 5 | 10 | 23 | 20 | 3 | 12 | 20 | 9 | 8 | 86 | 18 | 66 | 33 | 59 | 17 | 107 | 17 | 12 |
| | 8 | 41 | 39 | 14 | 20 | 97 | 81 | 41 | 0 | 40 | 21 | 16 | 13 | 6 | 22 | 21 | 17 | 11 | 20 | 29 | 14 | 53 | 71 | 48 | 68 | 84 | 24 | 11 | 73 | 23 | 18 |
| | 9 | 44 | 117 | 21 | 38 | 81 | 58 | 34 | 35 | 0 | 26 | 10 | 15 | 3 | 5 | 19 | 23 | 4 | 3 | 26 | 9 | 55 | 137 | 42 | 93 | 30 | 78 | 33 | 105 | 20 | 30 |
| | 10 | 33 | 147 | 24 | 6 | 23 | 32 | 18 | 11 | 36 | 0 | 2 | 14 | 7 | 18 | 24 | 17 | 13 | 22 | 10 | 9 | 85 | 38 | 29 | 114 | 25 | 62 | 41 | 47 | 76 | 8 |
| | 11 | 75 | 135 | 43 | 11 | 78 | 57 | 9 | 8 | 29 | 36 | 0 | 3 | 2 | 4 | 22 | 10 | 4 | 7 | 4 | 14 | 57 | 172 | 21 | 71 | 60 | 18 | 31 | 40 | 85 | 33 |
| | 12 | 22 | 43 | 70 | 20 | 27 | 64 | 34 | 37 | 61 | 30 | 7 | 0 | 4 | 7 | 4 | 5 | 4 | 13 | 13 | 7 | 23 | 109 | 20 | 71 | 166 | 44 | 45 | 20 | 25 | 24 |
| | 13 | 59 | 27 | 27 | 15 | 64 | 77 | 23 | 23 | 21 | 38 | 2 | 14 | 0 | 6 | 4 | 26 | 8 | 4 | 18 | 4 | 38 | 18 | 29 | 18 | 79 | 46 | 18 | 43 | 61 | 12 |
| | 14 | 81 | 101 | 66 | 28 | 14 | 49 | 36 | 20 | 32 | 34 | 3 | 18 | 2 | 0 | 16 | 23 | 5 | 24 | 5 | 8 | 77 | 112 | 55 | 80 | 166 | 42 | 49 | 86 | 59 | 18 |
| | 15 | 106 | 41 | 16 | 34 | 53 | 151 | 8 | 40 | 40 | 43 | 8 | 15 | 7 | 26 | 0 | 5 | 7 | 14 | 27 | 16 | 59 | 56 | 61 | 46 | 142 | 106 | 46 | 62 | 82 | 10 |
| | 16 | 30 | 116 | 34 | 4 | 101 | 16 | 21 | 58 | 49 | 10 | 15 | 12 | 5 | 21 | 4 | 0 | 12 | 5 | 28 | 19 | 81 | 87 | 34 | 68 | 58 | 99 | 5 | 25 | 83 | 5 |
| | 17 | 71 | 125 | 72 | 37 | 115 | 82 | 33 | 41 | 45 | 10 | 6 | 3 | 4 | 21 | 18 | 18 | 0 | 7 | 3 | 24 | 71 | 35 | 40 | 142 | 64 | 75 | 15 | 31 | 79 | 13 |
| | 18 | 78 | 88 | 18 | 18 | 106 | 42 | 39 | 49 | 16 | 14 | 14 | 7 | 4 | 24 | 25 | 6 | 7 | 0 | 9 | 20 | 45 | 67 | 59 | 91 | 81 | 50 | 24 | 114 | 24 | 5 |
| | 19 | 85 | 114 | 13 | 39 | 24 | 130 | 15 | 29 | 57 | 12 | 9 | 19 | 5 | 4 | 18 | 12 | 3 | 9 | 0 | 11 | 79 | 45 | 16 | 141 | 133 | 94 | 16 | 72 | 61 | 11 |
| | 20 | 69 | 34 | 8 | 43 | 49 | 121 | 32 | 9 | 40 | 44 | 9 | 6 | 3 | 4 | 3 | 4 | 1 | 5 | 5 | 0 | 65 | 18 | 90 | 85 | 24 | 43 | 44 | 30 | 12 | 20 |
| | 21 | 133 | 16 | 67 | 16 | 21 | 156 | 36 | 47 | 33 | 10 | 12 | 11 | 6 | 19 | 20 | 24 | 13 | 15 | 15 | 11 | 0 | 100 | 17 | 118 | 30 | 37 | 33 | 55 | 96 | 28 |
| | 22 | 26 | 47 | 19 | 7 | 24 | 78 | 27 | 49 | 39 | 5 | 3 | 11 | 4 | 7 | 15 | 24 | 2 | 8 | 24 | 5 | 22 | 0 | 51 | 103 | 143 | 104 | 29 | 91 | 97 | 7 |
| | 23 | 31 | 18 | 35 | 28 | 28 | 128 | 16 | 36 | 31 | 14 | 6 | 9 | 5 | 16 | 4 | 22 | 13 | 19 | 25 | 7 | 51 | 121 | 0 | 61 | 45 | 76 | 10 | 75 | 51 | 9 |
| | 24 | 140 | 49 | 68 | 26 | 83 | 27 | 25 | 10 | 53 | 45 | 15 | 9 | 1 | 12 | 17 | 2 | 5 | 26 | 18 | 20 | 36 | 48 | 50 | 0 | 127 | 62 | 37 | 94 | 37 | 31 |
| | 25 | 112 | 98 | 35 | 11 | 25 | 127 | 27 | 21 | 47 | 26 | 14 | 4 | 4 | 21 | 4 | 10 | 9 | 12 | 19 | 4 | 76 | 119 | 72 | 85 | 0 | 116 | 9 | 82 | 84 | 27 |
| | 26 | 49 | 123 | 11 | 6 | 22 | 129 | 36 | 40 | 64 | 17 | 2 | 3 | 3 | 13 | 20 | 11 | 12 | 15 | 14 | 21 | 14 | 39 | 83 | 59 | 117 | 0 | 7 | 67 | 98 | 10 |
| | 27 | 33 | 119 | 7 | 13 | 93 | 69 | 36 | 27 | 37 | 19 | 11 | 13 | 6 | 11 | 10 | 8 | 2 | 13 | 4 | 12 | 9 | 136 | 27 | 143 | 138 | 117 | 0 | 57 | 44 | 27 |
| | 28 | 61 | 130 | 58 | 28 | 43 | 77 | 19 | 27 | 33 | 9 | 2 | 16 | 4 | 25 | 25 | 10 | 10 | 5 | 3 | 23 | 76 | 97 | 38 | 33 | 169 | 114 | 54 | 0 | 94 | 28 |
| | 29 | 15 | 20 | 29 | 33 | 36 | 115 | 10 | 53 | 38 | 5 | 13 | 3 | 5 | 7 | 16 | 10 | 5 | 27 | 28 | 2 | 63 | 172 | 47 | 140 | 84 | 63 | 36 | 98 | 0 | 7 |
| | 30 | 140 | 82 | 30 | 42 | 41 | 45 | 13 | 52 | 64 | 46 | 12 | 10 | 6 | 23 | 17 | 15 | 2 | 27 | 8 | 24 | 41 | 80 | 13 | 46 | 105 | 73 | 27 | 74 | 19 | 0 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Periodo 4 | 1 | 0 | 17 | 35 | 36 | 4 | 5 | 31 | 29 | 3 | 17 | 116 | 15 | 254 | 95 | 73 | 41 | 65 | 31 | 17 | 21 | 35 | 22 | 3 | 12 | 37 | 6 | 14 | 40 | 22 | 26 |
| | 2 | 14 | 0 | 28 | 38 | 22 | 17 | 18 | 5 | 17 | 4 | 82 | 41 | 208 | 101 | 112 | 15 | 104 | 88 | 134 | 22 | 21 | 21 | 11 | 18 | 13 | 22 | 13 | 43 | 13 | 35 |
| | 3 | 9 | 4 | 0 | 5 | 15 | 12 | 5 | 41 | 4 | 27 | 126 | 37 | 229 | 118 | 267 | 58 | 121 | 94 | 58 | 17 | 45 | 11 | 11 | 17 | 24 | 13 | 14 | 19 | 14 | 4 |
| | 4 | 8 | 21 | 19 | 0 | 4 | 21 | 18 | 4 | 26 | 66 | 41 | 162 | 62 | 257 | 21 | 82 | 36 | 136 | 17 | 16 | 25 | 10 | 8 | 31 | 9 | 37 | 5 | 34 | 12 | |
| | 5 | 4 | 7 | 8 | 48 | 0 | 24 | 28 | 35 | 12 | 33 | 36 | 12 | 54 | 26 | 241 | 87 | 83 | 106 | 102 | 15 | 17 | 13 | 2 | 2 | 35 | 20 | 32 | 28 | 12 | 17 |
| | 6 | 7 | 23 | 24 | 14 | 31 | 0 | 21 | 23 | 2 | 9 | 79 | 33 | 113 | 57 | 106 | 94 | 108 | 89 | 72 | 13 | 38 | 28 | 3 | 5 | 38 | 5 | 17 | 46 | 33 | 4 |
| | 7 | 15 | 5 | 14 | 43 | 26 | 9 | 0 | 18 | 14 | 15 | 21 | 41 | 79 | 22 | 234 | 56 | 106 | 102 | 32 | 14 | 23 | 25 | 5 | 15 | 27 | 17 | 8 | 13 | 23 | 30 |
| | 8 | 19 | 6 | 15 | 38 | 20 | 25 | 20 | 0 | 2 | 27 | 83 | 7 | 114 | 138 | 231 | 22 | 99 | 69 | 141 | 28 | 27 | 20 | 13 | 3 | 38 | 19 | 27 | 28 | 5 | 24 |
| | 9 | 5 | 4 | 34 | 32 | 12 | 13 | 29 | 17 | 0 | 29 | 55 | 11 | 159 | 58 | 212 | 84 | 101 | 64 | 19 | 5 | 13 | 14 | 12 | 15 | 12 | 34 | 18 | 50 | 5 | 31 |
| | 10 | 11 | 17 | 20 | 20 | 33 | 17 | 24 | 40 | 3 | 0 | 102 | 35 | 123 | 26 | 87 | 56 | 141 | 38 | 114 | 17 | 7 | 25 | 7 | 16 | 27 | 34 | 34 | 44 | 7 | 11 |
| | 11 | 2 | 23 | 35 | 40 | 28 | 16 | 8 | 43 | 11 | 18 | 0 | 10 | 38 | 169 | 137 | 40 | 47 | 38 | 59 | 5 | 26 | 7 | 13 | 19 | 37 | 12 | 43 | 41 | 4 | 7 |
| | 12 | 11 | 17 | 13 | 33 | 4 | 18 | 9 | 13 | 9 | 20 | 62 | 0 | 190 | 155 | 114 | 100 | 36 | 21 | 66 | 15 | 9 | 27 | 11 | 2 | 5 | 30 | 37 | 37 | 29 | 34 |
| | 13 | 11 | 9 | 5 | 28 | 4 | 10 | 25 | 38 | 3 | 10 | 82 | 33 | 0 | 168 | 47 | 25 | 45 | 37 | 75 | 22 | 25 | 23 | 8 | 8 | 15 | 14 | 26 | 24 | 22 | 23 |
| | 14 | 14 | 4 | 12 | 39 | 12 | 32 | 16 | 7 | 14 | 10 | 66 | 42 | 134 | 0 | 47 | 20 | 120 | 17 | 47 | 10 | 35 | 26 | 2 | 8 | 41 | 17 | 15 | 18 | 18 | 33 |
| | 15 | 3 | 10 | 27 | 23 | 20 | 9 | 8 | 25 | 4 | 31 | 112 | 52 | 133 | 37 | 0 | 92 | 150 | 99 | 17 | 9 | 37 | 12 | 7 | 5 | 10 | 29 | 36 | 7 | 5 | 28 |
| | 16 | 9 | 12 | 30 | 46 | 19 | 22 | 28 | 10 | 4 | 26 | 106 | 51 | 101 | 28 | 50 | 0 | 18 | 92 | 100 | 5 | 30 | 24 | 10 | 6 | 14 | 14 | 43 | 31 | 6 | 25 |
| | 17 | 11 | 6 | 24 | 30 | 20 | 32 | 5 | 36 | 17 | 17 | 112 | 41 | 37 | 63 | 132 | 72 | 0 | 69 | 68 | 19 | 43 | 24 | 5 | 4 | 24 | 4 | 30 | 35 | 10 | 8 |
| | 18 | 16 | 3 | 33 | 44 | 5 | 23 | 24 | 11 | 15 | 9 | 27 | 46 | 269 | 98 | 87 | 15 | 104 | 0 | 33 | 21 | 13 | 27 | 7 | 8 | 19 | 23 | 8 | 14 | 18 | 21 |
| | 19 | 8 | 7 | 34 | 21 | 26 | 26 | 21 | 44 | 9 | 30 | 124 | 53 | 37 | 51 | 66 | 105 | 125 | 120 | 0 | 11 | 34 | 7 | 7 | 6 | 37 | 11 | 40 | 29 | 24 | 29 |
| | 20 | 7 | 7 | 25 | 9 | 31 | 31 | 20 | 8 | 5 | 28 | 96 | 36 | 40 | 86 | 212 | 63 | 148 | 122 | 107 | 0 | 9 | 17 | 7 | 18 | 5 | 9 | 10 | 17 | 9 | 16 |
| | 21 | 3 | 4 | 29 | 38 | 8 | 31 | 16 | 17 | 7 | 23 | 128 | 10 | 248 | 50 | 176 | 95 | 85 | 31 | 140 | 20 | 0 | 8 | 6 | 14 | 23 | 12 | 37 | 25 | 16 | 25 |
| | 22 | 14 | 17 | 29 | 36 | 20 | 14 | 22 | 30 | 6 | 28 | 37 | 17 | 188 | 113 | 172 | 11 | 149 | 127 | 79 | 12 | 35 | 0 | 14 | 19 | 21 | 26 | 22 | 37 | 35 | 28 |
| | 23 | 16 | 20 | 37 | 5 | 29 | 9 | 31 | 34 | 12 | 11 | 79 | 22 | 169 | 179 | 238 | 51 | 42 | 103 | 90 | 26 | 45 | 5 | 0 | 10 | 35 | 24 | 17 | 6 | 29 | 37 |
| | 24 | 16 | 16 | 4 | 11 | 5 | 27 | 23 | 22 | 4 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|
| Periodo 5 | 1 | 0 | 2 | 23 | 19 | 7 | 45 | 17 | 28 | 35 | 23 | 9 | 32 | 18 | 11 | 3 | 7 | 12 | 16 | 18 | 26 | 29 | 40 | 244 | 187 | 141 | 66 | 47 | 58 | 86 | 123 |
| | 2 | 20 | 0 | 12 | 11 | 15 | 23 | 18 | 18 | 17 | 16 | 3 | 6 | 26 | 11 | 5 | 21 | 4 | 17 | 4 | 28 | 12 | 171 | 108 | 88 | 60 | 42 | 78 | 55 | 35 | 207 |
| | 3 | 24 | 10 | 0 | 6 | 7 | 5 | 10 | 6 | 33 | 25 | 4 | 29 | 11 | 22 | 14 | 5 | 4 | 21 | 11 | 18 | 41 | 149 | 166 | 95 | 73 | 134 | 53 | 41 | 194 | 163 |
| | 4 | 7 | 11 | 16 | 0 | 17 | 13 | 17 | 17 | 21 | 21 | 5 | 22 | 9 | 16 | 16 | 21 | 8 | 12 | 18 | 8 | 31 | 74 | 27 | 156 | 27 | 87 | 13 | 32 | 145 | 169 |
| | 5 | 35 | 5 | 17 | 8 | 0 | 32 | 17 | 27 | 33 | 12 | 7 | 45 | 17 | 4 | 9 | 18 | 10 | 30 | 15 | 16 | 28 | 180 | 87 | 78 | 78 | 158 | 43 | 69 | 187 | 157 |
| | 6 | 16 | 15 | 19 | 15 | 4 | 0 | 5 | 28 | 10 | 10 | 14 | 32 | 12 | 19 | 4 | 10 | 4 | 33 | 8 | 28 | 7 | 190 | 70 | 70 | 36 | 62 | 80 | 10 | 58 | 207 |
| | 7 | 4 | 14 | 11 | 7 | 8 | 27 | 0 | 7 | 5 | 13 | 19 | 14 | 27 | 12 | 12 | 18 | 11 | 23 | 13 | 6 | 45 | 168 | 30 | 144 | 61 | 55 | 79 | 45 | 131 | 148 |
| | 8 | 9 | 9 | 8 | 9 | 10 | 41 | 18 | 0 | 10 | 20 | 3 | 21 | 29 | 11 | 10 | 7 | 5 | 13 | 8 | 14 | 7 | 20 | 212 | 132 | 132 | 122 | 40 | 31 | 141 | 205 |
| | 9 | 35 | 7 | 3 | 16 | 8 | 30 | 11 | 11 | 0 | 8 | 18 | 15 | 6 | 4 | 17 | 15 | 8 | 7 | 4 | 16 | 27 | 183 | 197 | 22 | 102 | 128 | 9 | 37 | 55 | 74 |
| | 10 | 5 | 12 | 7 | 4 | 13 | 25 | 9 | 5 | 20 | 0 | 20 | 30 | 16 | 6 | 4 | 5 | 8 | 28 | 2 | 22 | 13 | 107 | 204 | 201 | 79 | 97 | 26 | 69 | 49 | 26 |
| | 11 | 24 | 16 | 6 | 25 | 6 | 27 | 5 | 6 | 9 | 18 | 0 | 40 | 17 | 14 | 8 | 22 | 12 | 12 | 19 | 5 | 39 | 159 | 189 | 71 | 128 | 191 | 22 | 75 | 108 | 62 |
| | 12 | 9 | 11 | 21 | 12 | 11 | 17 | 9 | 13 | 29 | 21 | 16 | 0 | 28 | 25 | 16 | 24 | 2 | 16 | 18 | 20 | 6 | 169 | 222 | 97 | 62 | 108 | 18 | 23 | 45 | 140 |
| | 13 | 8 | 11 | 17 | 18 | 17 | 16 | 10 | 11 | 14 | 20 | 18 | 50 | 0 | 20 | 12 | 18 | 12 | 13 | 11 | 32 | 5 | 135 | 49 | 39 | 29 | 125 | 52 | 72 | 193 | 208 |
| | 14 | 35 | 8 | 12 | 4 | 10 | 26 | 18 | 8 | 37 | 21 | 20 | 27 | 10 | 0 | 10 | 4 | 12 | 19 | 15 | 18 | 7 | 126 | 25 | 66 | 56 | 112 | 18 | 19 | 124 | 53 |
| | 15 | 33 | 3 | 14 | 4 | 14 | 24 | 18 | 14 | 42 | 20 | 2 | 40 | 26 | 9 | 0 | 6 | 5 | 14 | 14 | 39 | 110 | 114 | 92 | 99 | 163 | 74 | 50 | 41 | 225 | |
| | 16 | 12 | 7 | 15 | 3 | 3 | 34 | 12 | 29 | 42 | 5 | 2 | 46 | 4 | 14 | 12 | 0 | 3 | 7 | 16 | 17 | 8 | 93 | 71 | 88 | 32 | 155 | 41 | 37 | 194 | 129 |
| | 17 | 15 | 2 | 5 | 10 | 14 | 15 | 13 | 5 | 33 | 18 | 16 | 12 | 9 | 22 | 11 | 22 | 0 | 5 | 19 | 11 | 24 | 68 | 137 | 176 | 22 | 57 | 25 | 66 | 114 | 140 |
| | 18 | 27 | 2 | 21 | 10 | 4 | 31 | 8 | 6 | 35 | 22 | 19 | 7 | 20 | 27 | 13 | 9 | 10 | 0 | 16 | 18 | 10 | 136 | 111 | 29 | 104 | 136 | 38 | 30 | 26 | 113 |
| | 19 | 15 | 13 | 17 | 17 | 9 | 28 | 5 | 8 | 13 | 22 | 10 | 26 | 6 | 4 | 12 | 2 | 11 | 21 | 0 | 11 | 28 | 31 | 67 | 95 | 100 | 40 | 40 | 45 | 72 | 191 |
| | 20 | 14 | 6 | 11 | 14 | 17 | 34 | 22 | 24 | 23 | 8 | 18 | 10 | 27 | 10 | 3 | 14 | 9 | 19 | 4 | 0 | 7 | 173 | 65 | 95 | 113 | 96 | 29 | 17 | 137 | 80 |
| | 21 | 12 | 5 | 15 | 8 | 15 | 28 | 14 | 24 | 34 | 14 | 16 | 34 | 8 | 20 | 4 | 10 | 6 | 8 | 3 | 5 | 0 | 103 | 200 | 25 | 34 | 83 | 19 | 73 | 192 | 42 |
| | 22 | 19 | 13 | 16 | 21 | 10 | 39 | 12 | 5 | 18 | 15 | 2 | 16 | 8 | 8 | 7 | 4 | 10 | 30 | 10 | 24 | 46 | 0 | 174 | 204 | 130 | 111 | 20 | 58 | 168 | 163 |
| | 23 | 6 | 3 | 18 | 24 | 16 | 19 | 9 | 15 | 23 | 17 | 15 | 24 | 17 | 18 | 2 | 14 | 1 | 7 | 8 | 24 | 25 | 189 | 0 | 93 | 135 | 126 | 52 | 71 | 40 | 214 |
| | 24 | 34 | 6 | 13 | 6 | 11 | 42 | 19 | 4 | 30 | 3 | 15 | 16 | 29 | 11 | 5 | 9 | 11 | 17 | 2 | 11 | 46 | 24 | 233 | 0 | 91 | 91 | 65 | 75 | 106 | 51 |
| | 25 | 23 | 6 | 13 | 16 | 7 | 33 | 2 | 22 | 33 | 10 | 9 | 20 | 13 | 20 | 3 | 21 | 12 | 13 | 20 | 31 | 29 | 146 | 26 | 187 | 0 | 194 | 76 | 52 | 71 | 62 |
| | 26 | 22 | 3 | 22 | 16 | 15 | 30 | 14 | 5 | 41 | 5 | 14 | 26 | 24 | 8 | 9 | 12 | 7 | 27 | 11 | 29 | 31 | 86 | 42 | 62 | 44 | 0 | 63 | 13 | 188 | 25 |
| | 27 | 25 | 2 | 17 | 26 | 9 | 35 | 19 | 25 | 29 | 4 | 17 | 20 | 20 | 18 | 5 | 18 | 7 | 19 | 14 | 18 | 15 | 178 | 32 | 112 | 43 | 158 | 0 | 39 | 163 | 61 |
| | 28 | 35 | 9 | 6 | 18 | 7 | 42 | 17 | 24 | 22 | 12 | 5 | 44 | 18 | 10 | 16 | 3 | 11 | 13 | 4 | 3 | 31 | 78 | 147 | 61 | 78 | 138 | 21 | 0 | 131 | 190 |
| | 29 | 10 | 4 | 21 | 11 | 14 | 11 | 22 | 19 | 23 | 14 | 7 | 8 | 22 | 27 | 3 | 23 | 8 | 5 | 15 | 20 | 46 | 59 | 46 | 72 | 92 | 88 | 78 | 58 | 0 | 186 |
| | 30 | 25 | 15 | 19 | 18 | 7 | 30 | 3 | 6 | 10 | 9 | 12 | 13 | 15 | 16 | 8 | 21 | 3 | 12 | 7 | 22 | 43 | 186 | 161 | 86 | 39 | 102 | 77 | 28 | 50 | 0 |

Costo de reordenamiento por departamento

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 659 | 510 | 916 | 778 | 920 | 730 | 578 | 572 | 677 | 807 | 851 | 650 | 824 | 932 | 711 | 510 | 926 | 655 | 556 | 773 | 502 | 987 | 529 | 980 | 955 | 873 | 740 | 878 | 507 | 981 |

• 30 DEPS – PROB2

Flujo de materiales entre departamentos

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Periodo 1 | 1 | 0 | 35 | 6 | 10 | 9 | 17 | 9 | 24 | 17 | 26 | 7 | 88 | 82 | 86 | 83 | 102 | 153 | 14 | 37 | 158 | 12 | 27 | 12 | 20 | 16 | 25 | 13 | 17 | 53 | 43 |
| | 2 | 47 | 0 | 3 | 16 | 2 | 42 | 8 | 20 | 6 | 13 | 7 | 70 | 76 | 53 | 96 | 233 | 162 | 59 | 80 | 18 | 16 | 51 | 26 | 24 | 3 | 9 | 15 | 7 | 40 | 45 |
| | 3 | 8 | 22 | 0 | 2 | 11 | 21 | 12 | 26 | 9 | 12 | 5 | 89 | 57 | 11 | 136 | 58 | 186 | 102 | 43 | 29 | 14 | 10 | 19 | 7 | 17 | 6 | 3 | 13 | 16 | 31 |
| | 4 | 14 | 9 | 9 | 0 | 2 | 34 | 6 | 46 | 14 | 8 | 12 | 57 | 114 | 95 | 137 | 136 | 212 | 100 | 67 | 78 | 8 | 24 | 5 | 23 | 3 | 12 | 18 | 6 | 24 | 42 |
| | 5 | 28 | 31 | 14 | 23 | 0 | 24 | 14 | 19 | 19 | 35 | 1 | 24 | 85 | 97 | 168 | 147 | 204 | 28 | 60 | 124 | 15 | 29 | 6 | 4 | 17 | 3 | 27 | 22 | 7 | 22 |
| | 6 | 43 | 7 | 4 | 21 | 2 | 0 | 10 | 12 | 4 | 18 | 13 | 115 | 131 | 81 | 138 | 62 | 132 | 103 | 64 | 124 | 5 | 8 | 10 | 11 | 9 | 17 | 21 | 19 | 22 | 23 |
| | 7 | 27 | 41 | 10 | 11 | 8 | 40 | 0 | 47 | 5 | 8 | 7 | 82 | 17 | 20 | 45 | 249 | 209 | 18 | 21 | 169 | 8 | 10 | 23 | 26 | 6 | 9 | 26 | 10 | 9 | 25 |
| | 8 | 36 | 23 | 15 | 22 | 7 | 6 | 23 | 0 | 11 | 28 | 9 | 95 | 71 | 102 | 96 | 158 | 122 | 16 | 73 | 158 | 17 | 41 | 15 | 11 | 20 | 5 | 6 | 12 | 24 | 6 |
| | 9 | 30 | 24 | 15 | 21 | 2 | 14 | 12 | 47 | 0 | 29 | 7 | 59 | 80 | 35 | 160 | 46 | 56 | 75 | 31 | 131 | 14 | 56 | 7 | 16 | 21 | 28 | 28 | 4 | 10 | 26 |
| | 10 | 21 | 40 | 4 | 6 | 8 | 9 | 21 | 39 | 10 | 0 | 6 | 40 | 35 | 35 | 30 | 97 | 35 | 107 | 89 | 185 | 6 | 28 | 26 | 13 | 6 | 14 | 4 | 14 | 46 | 35 |
| | 11 | 25 | 28 | 5 | 6 | 10 | 34 | 11 | 43 | 6 | 25 | 0 | 72 | 132 | 17 | 161 | 83 | 134 | 27 | 44 | 71 | 9 | 22 | 9 | 4 | 21 | 21 | 6 | 12 | 26 | 21 |
| | 12 | 37 | 19 | 12 | 13 | 4 | 47 | 15 | 11 | 8 | 15 | 12 | 0 | 43 | 17 | 108 | 93 | 158 | 100 | 31 | 121 | 4 | 38 | 14 | 26 | 9 | 21 | 19 | 18 | 18 | 33 |
| | 13 | 36 | 12 | 10 | 17 | 14 | 11 | 24 | 25 | 9 | 33 | 2 | 24 | 0 | 87 | 102 | 229 | 148 | 71 | 49 | 126 | 18 | 53 | 20 | 27 | 10 | 28 | 20 | 17 | 34 | 25 |
| | 14 | 47 | 30 | 3 | 16 | 12 | 42 | 13 | 5 | 8 | 9 | 12 | 50 | 60 | 0 | 31 | 123 | 205 | 60 | 47 | 161 | 3 | 6 | 8 | 27 | 2 | 20 | 21 | 17 | 44 | 36 |
| | 15 | 5 | 15 | 13 | 22 | 4 | 34 | 18 | 44 | 10 | 7 | 7 | 85 | 113 | 88 | 0 | 102 | 201 | 49 | 73 | 169 | 2 | 48 | 24 | 17 | 5 | 21 | 21 | 7 | 41 | 22 |
| | 16 | 15 | 15 | 12 | 6 | 12 | 23 | 6 | 23 | 5 | 11 | 8 | 72 | 29 | 55 | 45 | 0 | 172 | 52 | 50 | 141 | 13 | 24 | 6 | 23 | 6 | 16 | 31 | 23 | 44 | 20 |
| | 17 | 44 | 31 | 8 | 23 | 8 | 42 | 2 | 32 | 15 | 15 | 7 | 99 | 111 | 79 | 160 | 172 | 0 | 31 | 87 | 32 | 7 | 31 | 25 | 7 | 18 | 4 | 7 | 5 | 17 | 45 |
| | 18 | 26 | 32 | 14 | 15 | 2 | 22 | 8 | 37 | 23 | 13 | 3 | 43 | 83 | 17 | 104 | 142 | 54 | 0 | 80 | 44 | 17 | 9 | 7 | 10 | 10 | 7 | 8 | 11 | 34 | 10 |
| | 19 | 40 | 8 | 5 | 4 | 10 | 27 | 21 | 31 | 20 | 30 | 1 | 106 | 33 | 103 | 114 | 128 | 123 | 37 | 0 | 140 | 11 | 17 | 4 | 21 | 5 | 3 | 15 | 5 | 52 | 12 |
| | 20 | 44 | 19 | 6 | 12 | 13 | 27 | 7 | 5 | 18 | 12 | 9 | 82 | 78 | 89 | 23 | 102 | 42 | 56 | 84 | 0 | 16 | 36 | 16 | 16 | 4 | 6 | 18 | 8 | 30 | 42 |
| | 21 | 26 | 37 | 13 | 3 | 6 | 42 | 14 | 11 | 8 | 16 | 1 | 51 | 77 | 102 | 65 | 193 | 207 | 79 | 36 | 123 | 0 | 34 | 26 | 7 | 3 | 16 | 27 | 20 | 5 | 38 |
| | 22 | 23 | 9 | 11 | 6 | 12 | 41 | 10 | 36 | 9 | 25 | 8 | 118 | 95 | 61 | 134 | 142 | 92 | 20 | 16 | 44 | 13 | 0 | 9 | 17 | 7 | 5 | 18 | 9 | 46 | 40 |
| | 23 | 12 | 42 | 2 | 20 | 10 | 34 | 20 | 45 | 16 | 27 | 9 | 84 | 135 | 101 | 97 | 209 | 74 | 43 | 43 | 156 | 12 | 41 | 0 | 8 | 5 | 3 | 24 | 11 | 35 | 8 |
| | 24 | 27 | 31 | 11 | 12 | 2 | 42 | 9 | 19 | 12 | 20 | 11 | 37 | 117 | 41 | 67 | 229 | 144 | 47 | 85 | 172 | 9 | 46 | 14 | 0 | 12 | 14 | 25 | 15 | 49 | 12 |
| | 25 | 8 | 8 | 2 | 8 | 15 | 10 | 10 | 23 | 15 | 9 | 8 | 119 | 48 | 95 | 127 | 55 | 72 | 92 | 26 | 113 | 8 | 10 | 15 | 4 | 0 | 28 | 11 | 9 | 22 | 27 |
| | 26 | 36 | 29 | 8 | 7 | 12 | 21 | 17 | 7 | 15 | 31 | 3 | 105 | 40 | 98 | 77 | 107 | 76 | 63 | 23 | 93 | 13 | 55 | 18 | 16 | 10 | 0 | 30 | 6 | 45 | 36 |
| | 27 | 33 | 5 | 5 | 12 | 15 | 31 | 5 | 15 | 16 | 24 | 3 | 99 | 125 | 93 | 24 | 221 | 130 | 76 | 68 | 32 | 8 | 6 | 27 | 25 | 4 | 13 | 0 | 11 | 21 | 4 |
| | 28 | 35 | 16 | 12 | 11 | 12 | 36 | 9 | 32 | 8 | 12 | 4 | 66 | 98 | 30 | 108 | 236 | 153 | 59 | 59 | 139 | 18 | 28 | 12 | 29 | 13 | 22 | 31 | 0 | 8 | 16 |
| | 29 | 22 | 17 | 8 | 3 | 9 | 27 | 4 | 33 | 11 | 28 | 11 | 129 | 39 | 93 | 30 | 102 | 197 | 98 | 41 | 31 | 11 | 29 | 26 | 12 | 13 | 28 | 21 | 18 | 0 | 38 |
| | 30 | 30 | 10 | 12 | 8 | 9 | 44 | 24 | 47 | 4 | 34 | 6 | 59 | 73 | 78 | 138 | 259 | 55 | 42 | 49 | 45 | 11 | 48 | 10 | 26 | 12 | 3 | 22 | 18 | 30 | 0 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|
| Periodo 2 | 1 | 0 | 18 | 37 | 4 | 22 | 11 | 7 | 18 | 3 | 22 | 35 | 11 | 35 | 5 | 13 | 11 | 24 | 4 | 9 | 20 | 170 | 37 | 74 | 21 | 192 | 135 | 133 | 69 | 120 | 171 |
| | 2 | 7 | 0 | 22 | 27 | 18 | 15 | 6 | 29 | 16 | 29 | 26 | 23 | 22 | 16 | 8 | 8 | 26 | 10 | 3 | 7 | 87 | 30 | 99 | 87 | 105 | 43 | 14 | 71 | 129 | 85 |
| | 3 | 4 | 7 | 0 | 38 | 4 | 12 | 33 | 19 | 20 | 6 | 13 | 25 | 16 | 19 | 16 | 4 | 25 | 6 | 14 | 20 | 151 | 30 | 121 | 171 | 42 | 126 | 39 | 76 | 30 | 22 |
| | 4 | 10 | 7 | 27 | 0 | 26 | 4 | 20 | 24 | 10 | 34 | 39 | 5 | 9 | 13 | 5 | 11 | 20 | 12 | 12 | 5 | 109 | 30 | 32 | 84 | 115 | 43 | 112 | 33 | 100 | 106 |
| | 5 | 12 | 39 | 15 | 42 | 0 | 3 | 21 | 24 | 18 | 5 | 37 | 13 | 25 | 11 | 16 | 9 | 18 | 7 | 9 | 24 | 151 | 26 | 100 | 130 | 176 | 91 | 107 | 66 | 75 | 164 |
| | 6 | 10 | 14 | 19 | 23 | 13 | 0 | 25 | 33 | 12 | 31 | 36 | 22 | 46 | 15 | 7 | 8 | 23 | 6 | 15 | 13 | 97 | 48 | 57 | 160 | 144 | 48 | 88 | 20 | 70 | 127 |
| | 7 | 7 | 18 | 9 | 34 | 8 | 3 | 0 | 25 | 13 | 28 | 16 | 24 | 15 | 8 | 12 | 9 | 11 | 4 | 21 | 23 | 96 | 43 | 150 | 70 | 165 | 105 | 15 | 37 | 66 | 128 |
| | 8 | 9 | 6 | 12 | 11 | 3 | 11 | 25 | 0 | 12 | 27 | 11 | 15 | 42 | 26 | 22 | 8 | 18 | 7 | 13 | 6 | 191 | 12 | 31 | 61 | 153 | 27 | 82 | 24 | 110 | 91 |
| | 9 | 17 | 28 | 5 | 21 | 16 | 12 | 17 | 11 | 0 | 25 | 6 | 6 | 5 | 13 | 5 | 3 | 22 | 9 | 10 | 32 | 106 | 46 | 192 | 110 | 58 | 67 | 112 | 12 | 71 | 143 |
| | 10 | 12 | 22 | 24 | 24 | 17 | 11 | 18 | 6 | 3 | 0 | 11 | 7 | 47 | 20 | 12 | 3 | 20 | 12 | 4 | 24 | 55 | 32 | 184 | 105 | 57 | 68 | 21 | 10 | 16 | 96 |
| | 11 | 9 | 23 | 9 | 37 | 6 | 12 | 29 | 13 | 5 | 26 | 0 | 16 | 30 | 26 | 4 | 9 | 8 | 9 | 4 | 29 | 53 | 54 | 62 | 55 | 179 | 84 | 118 | 74 | 20 | 100 |
| | 12 | 7 | 11 | 9 | 23 | 10 | 6 | 29 | 13 | 14 | 24 | 20 | 0 | 14 | 17 | 5 | 5 | 27 | 13 | 3 | 21 | 103 | 7 | 200 | 88 | 109 | 56 | 92 | 47 | 78 | 166 |
| | 13 | 2 | 9 | 22 | 21 | 4 | 6 | 3 | 27 | 8 | 6 | 6 | 13 | 0 | 27 | 12 | 5 | 7 | 7 | 19 | 31 | 52 | 55 | 81 | 100 | 22 | 95 | 127 | 29 | 80 | 136 |
| | 14 | 11 | 31 | 28 | 16 | 12 | 11 | 13 | 19 | 12 | 21 | 19 | 30 | 5 | 0 | 24 | 7 | 19 | 9 | 12 | 19 | 158 | 29 | 128 | 154 | 137 | 48 | 89 | 31 | 25 | 169 |
| | 15 | 7 | 13 | 34 | 33 | 19 | 13 | 20 | 15 | 13 | 10 | 30 | 6 | 29 | 11 | 0 | 5 | 19 | 15 | 2 | 9 | 169 | 15 | 195 | 32 | 173 | 112 | 18 | 27 | 113 | 153 |
| | 16 | 14 | 30 | 35 | 7 | 18 | 3 | 18 | 18 | 19 | 31 | 17 | 10 | 34 | 14 | 5 | 0 | 20 | 12 | 5 | 3 | 57 | 38 | 50 | 49 | 182 | 144 | 28 | 36 | 71 | 99 |
| | 17 | 11 | 41 | 28 | 5 | 9 | 17 | 31 | 38 | 16 | 21 | 7 | 10 | 47 | 14 | 23 | 10 | 0 | 13 | 12 | 15 | 162 | 13 | 153 | 136 | 216 | 16 | 21 | 72 | 81 | 29 |
| | 18 | 6 | 6 | 21 | 7 | 18 | 19 | 29 | 14 | 20 | 33 | 28 | 8 | 23 | 5 | 13 | 5 | 26 | 0 | 13 | 13 | 154 | 38 | 164 | 75 | 32 | 100 | 36 | 47 | 103 | 119 |
| | 19 | 13 | 11 | 36 | 6 | 15 | 7 | 23 | 4 | 13 | 5 | 30 | 14 | 25 | 10 | 15 | 11 | 26 | 7 | 0 | 26 | 61 | 35 | 166 | 72 | 183 | 52 | 75 | 29 | 122 | 55 |
| | 20 | 6 | 35 | 31 | 24 | 21 | 3 | 28 | 42 | 4 | 31 | 11 | 8 | 34 | 10 | 6 | 8 | 11 | 11 | 8 | 0 | 76 | 54 | 48 | 19 | 58 | 142 | 66 | 51 | 114 | 140 |
| | 21 | 2 | 21 | 21 | 9 | 5 | 18 | 14 | 6 | 10 | 30 | 20 | 21 | 45 | 3 | 17 | 3 | 23 | 10 | 17 | 16 | 0 | 56 | 159 | 132 | 222 | 144 | 72 | 22 | 125 | 93 |
| | 22 | 6 | 40 | 33 | 15 | 22 | 8 | 29 | 27 | 10 | 20 | 26 | 11 | 14 | 13 | 22 | 12 | 14 | 8 | 5 | 19 | 47 | 0 | 73 | 108 | 213 | 31 | 137 | 55 | 81 | 61 |
| | 23 | 6 | 27 | 12 | 13 | 21 | 19 | 4 | 28 | 6 | 32 | 39 | 14 | 41 | 8 | 15 | 8 | 9 | 7 | 15 | 21 | 48 | 40 | 0 | 146 | 148 | 116 | 31 | 22 | | |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | |
|-----------|----|----|----|----|----|-----|-----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|-----|-----|----|-----|
| Periodo 3 | 1 | 0 | 5 | 23 | 82 | 24 | 108 | 29 | 55 | 17 | 23 | 5 | 1 | 2 | 10 | 12 | 15 | 3 | 22 | 7 | 8 | 36 | 135 | 45 | 15 | 103 | 24 | 81 | 146 | 33 | 123 |
| | 2 | 38 | 0 | 23 | 38 | 105 | 78 | 27 | 40 | 52 | 39 | 3 | 2 | 13 | 7 | 2 | 7 | 5 | 14 | 11 | 9 | 102 | 28 | 131 | 21 | 137 | 39 | 71 | 97 | 9 | 41 |
| | 3 | 25 | 11 | 0 | 65 | 35 | 100 | 62 | 47 | 40 | 55 | 5 | 2 | 12 | 26 | 4 | 17 | 1 | 24 | 21 | 22 | 113 | 27 | 81 | 7 | 118 | 6 | 81 | 142 | 26 | 89 |
| | 4 | 14 | 18 | 18 | 0 | 50 | 39 | 12 | 117 | 34 | 32 | 1 | 5 | 4 | 3 | 1 | 9 | 2 | 4 | 29 | 5 | 135 | 36 | 43 | 29 | 34 | 33 | 62 | 116 | 25 | 117 |
| | 5 | 38 | 52 | 5 | 58 | 0 | 150 | 70 | 49 | 67 | 41 | 7 | 3 | 16 | 13 | 7 | 4 | 10 | 20 | 25 | 8 | 84 | 67 | 39 | 44 | 92 | 16 | 101 | 54 | 16 | 88 |
| | 6 | 37 | 45 | 34 | 75 | 23 | 0 | 58 | 126 | 45 | 31 | 5 | 5 | 16 | 27 | 6 | 11 | 4 | 26 | 12 | 23 | 82 | 30 | 106 | 45 | 28 | 13 | 23 | 23 | 8 | 84 |
| | 7 | 62 | 16 | 10 | 25 | 98 | 126 | 0 | 166 | 29 | 20 | 6 | 5 | 3 | 6 | 8 | 13 | 7 | 13 | 7 | 16 | 113 | 93 | 116 | 42 | 140 | 26 | 110 | 80 | 6 | 22 |
| | 8 | 62 | 45 | 12 | 51 | 45 | 128 | 28 | 0 | 49 | 24 | 7 | 3 | 5 | 26 | 8 | 13 | 6 | 5 | 9 | 21 | 123 | 86 | 121 | 29 | 20 | 25 | 103 | 126 | 24 | 116 |
| | 9 | 40 | 47 | 10 | 38 | 46 | 32 | 32 | 39 | 0 | 51 | 2 | 4 | 14 | 21 | 4 | 9 | 7 | 5 | 5 | 28 | 75 | 60 | 23 | 34 | 56 | 39 | 45 | 66 | 22 | 44 |
| | 10 | 18 | 34 | 23 | 16 | 34 | 17 | 60 | 52 | 50 | 0 | 4 | 5 | 2 | 9 | 6 | 5 | 7 | 23 | 9 | 25 | 20 | 88 | 62 | 34 | 92 | 35 | 19 | 24 | 26 | 84 |
| | 11 | 36 | 31 | 31 | 83 | 26 | 114 | 22 | 53 | 31 | 21 | 0 | 1 | 9 | 27 | 8 | 2 | 10 | 8 | 5 | 16 | 60 | 26 | 41 | 7 | 47 | 7 | 30 | 152 | 7 | 53 |
| | 12 | 9 | 6 | 22 | 46 | 50 | 49 | 70 | 19 | 86 | 44 | 2 | 0 | 15 | 5 | 12 | 12 | 8 | 27 | 17 | 24 | 43 | 125 | 58 | 25 | 89 | 17 | 13 | 137 | 15 | 30 |
| | 13 | 7 | 48 | 36 | 20 | 98 | 71 | 77 | 26 | 68 | 44 | 6 | 3 | 0 | 9 | 4 | 8 | 9 | 25 | 16 | 119 | 63 | 124 | 29 | 23 | 15 | 69 | 17 | 23 | 96 | |
| | 14 | 19 | 8 | 38 | 61 | 41 | 127 | 20 | 103 | 41 | 40 | 4 | 0 | 2 | 0 | 11 | 13 | 4 | 5 | 22 | 3 | 45 | 104 | 141 | 48 | 17 | 31 | 42 | 158 | 42 | 34 |
| | 15 | 39 | 22 | 19 | 61 | 49 | 157 | 48 | 145 | 79 | 32 | 5 | 0 | 3 | 18 | 0 | 18 | 7 | 21 | 35 | 25 | 119 | 114 | 87 | 43 | 64 | 31 | 28 | 90 | 26 | 88 |
| | 16 | 43 | 32 | 8 | 60 | 62 | 93 | 13 | 47 | 62 | 48 | 7 | 0 | 6 | 14 | 7 | 0 | 10 | 17 | 28 | 10 | 84 | 75 | 146 | 42 | 116 | 18 | 109 | 39 | 27 | 87 |
| | 17 | 17 | 48 | 26 | 16 | 44 | 88 | 12 | 98 | 55 | 7 | 4 | 5 | 15 | 3 | 1 | 12 | 0 | 9 | 6 | 27 | 64 | 32 | 26 | 45 | 116 | 29 | 32 | 60 | 7 | 88 |
| | 18 | 24 | 29 | 18 | 71 | 16 | 154 | 32 | 75 | 36 | 33 | 4 | 2 | 7 | 27 | 3 | 2 | 2 | 0 | 6 | 14 | 44 | 132 | 150 | 43 | 92 | 32 | 91 | 76 | 17 | 70 |
| | 19 | 24 | 11 | 13 | 32 | 20 | 64 | 11 | 38 | 40 | 21 | 6 | 4 | 10 | 5 | 1 | 8 | 1 | 16 | 0 | 3 | 58 | 99 | 46 | 40 | 47 | 14 | 62 | 150 | 12 | 30 |
| | 20 | 22 | 29 | 24 | 27 | 99 | 152 | 67 | 145 | 38 | 18 | 4 | 5 | 4 | 14 | 2 | 6 | 3 | 16 | 26 | 0 | 131 | 99 | 130 | 49 | 52 | 19 | 79 | 18 | 19 | 53 |
| | 21 | 56 | 26 | 27 | 36 | 85 | 53 | 54 | 105 | 68 | 32 | 2 | 5 | 3 | 9 | 3 | 13 | 5 | 17 | 33 | 24 | 0 | 49 | 93 | 41 | 77 | 14 | 31 | 19 | 44 | 88 |
| | 22 | 27 | 24 | 16 | 50 | 11 | 80 | 25 | 63 | 68 | 36 | 1 | 5 | 12 | 13 | 11 | 5 | 4 | 20 | 3 | 12 | 49 | 0 | 41 | 31 | 108 | 31 | 67 | 128 | 29 | 38 |
| | 23 | 11 | 35 | 32 | 42 | 36 | 30 | 65 | 51 | 85 | 24 | 5 | 5 | 7 | 19 | 11 | 17 | 8 | 18 | 16 | 14 | 50 | 126 | 0 | 16 | 103 | 6 | 15 | 91 | 33 | 128 |
| | 24 | 64 | 42 | 33 | 11 | 82 | 17 | 67 | 118 | 35 | 34 | 7 | 5 | 6 | 3 | 5 | 12 | 2 | 15 | 28 | 28 | 136 | 19 | 107 | 0 | 49 | 29 | 85 | 119 | 41 | 34 |
| | 25 | 58 | 49 | 36 | 44 | 58 | 17 | 37 | 145 | 53 | 11 | 7 | 3 | 7 | 16 | 10 | 12 | 10 | 4 | 8 | 12 | 126 | 80 | 132 | 9 | 0 | 33 | 59 | 103 | 41 | 126 |
| | 26 | 42 | 35 | 4 | 10 | 20 | 57 | 59 | 21 | 62 | 15 | 5 | 2 | 14 | 3 | 3 | 16 | 9 | 11 | 15 | 30 | 127 | 113 | 17 | 51 | 85 | 0 | 86 | 27 | 7 | 123 |
| | 27 | 21 | 22 | 6 | 24 | 73 | 82 | 13 | 40 | 83 | 47 | 2 | 1 | 5 | 23 | 5 | 2 | 6 | 9 | 25 | 8 | 16 | 67 | 129 | 10 | 114 | 39 | 0 | 53 | 18 | 90 |
| | 28 | 49 | 12 | 38 | 35 | 93 | 102 | 59 | 162 | 56 | 6 | 5 | 4 | 3 | 16 | 13 | 15 | 3 | 25 | 10 | 11 | 20 | 75 | 47 | 14 | 89 | 24 | 90 | 0 | 10 | 124 |
| | 29 | 26 | 41 | 29 | 85 | 103 | 43 | 19 | 134 | 37 | 14 | 5 | 5 | 17 | 9 | 12 | 15 | 10 | 5 | 10 | 21 | 34 | 26 | 111 | 47 | 111 | 27 | 64 | 105 | 0 | 43 |
| | 30 | 46 | 27 | 7 | 23 | 74 | 26 | 30 | 104 | 37 | 15 | 2 | 3 | 5 | 6 | 3 | 18 | 2 | 26 | 10 | 26 | 59 | 116 | 26 | 23 | 138 | 11 | 56 | 66 | 34 | 0 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | |
|-----------|----|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|
| Periodo 4 | 1 | 0 | 9 | 24 | 3 | 22 | 3 | 14 | 2 | 7 | 19 | 17 | 18 | 6 | 4 | 14 | 13 | 7 | 37 | 22 | 8 | 50 | 220 | 151 | 127 | 36 | 123 | 51 | 181 | 140 | 49 |
| | 2 | 2 | 0 | 30 | 12 | 27 | 2 | 10 | 8 | 15 | 4 | 30 | 8 | 18 | 20 | 17 | 17 | 14 | 30 | 21 | 7 | 31 | 184 | 93 | 64 | 64 | 30 | 101 | 28 | 125 | 77 |
| | 3 | 4 | 3 | 0 | 6 | 7 | 13 | 13 | 10 | 7 | 15 | 32 | 4 | 22 | 13 | 2 | 9 | 15 | 34 | 8 | 9 | 143 | 88 | 87 | 22 | 70 | 185 | 43 | 112 | 73 | 10 |
| | 4 | 14 | 1 | 9 | 0 | 13 | 14 | 12 | 6 | 13 | 12 | 10 | 18 | 5 | 15 | 8 | 17 | 12 | 17 | 11 | 4 | 77 | 43 | 98 | 53 | 71 | 106 | 38 | 168 | 39 | 74 |
| | 5 | 5 | 6 | 17 | 11 | 0 | 17 | 16 | 2 | 9 | 23 | 11 | 13 | 5 | 9 | 14 | 24 | 2 | 18 | 6 | 9 | 127 | 144 | 33 | 69 | 26 | 195 | 65 | 178 | 42 | 41 |
| | 6 | 5 | 8 | 18 | 2 | 32 | 0 | 14 | 3 | 9 | 22 | 11 | 2 | 20 | 14 | 15 | 12 | 12 | 22 | 35 | 6 | 79 | 177 | 62 | 122 | 20 | 216 | 73 | 159 | 91 | 57 |
| | 7 | 9 | 6 | 22 | 8 | 16 | 7 | 0 | 10 | 5 | 34 | 11 | 3 | 7 | 19 | 18 | 3 | 5 | 15 | 22 | 6 | 127 | 208 | 204 | 116 | 21 | 98 | 14 | 22 | 128 | 26 |
| | 8 | 13 | 5 | 20 | 2 | 20 | 3 | 15 | 0 | 11 | 30 | 22 | 20 | 23 | 6 | 8 | 22 | 4 | 47 | 38 | 6 | 37 | 147 | 113 | 42 | 56 | 136 | 12 | 194 | 101 | 68 |
| | 9 | 9 | 6 | 25 | 11 | 20 | 10 | 21 | 2 | 0 | 14 | 25 | 8 | 15 | 19 | 17 | 4 | 11 | 14 | 32 | 7 | 98 | 194 | 82 | 126 | 40 | 146 | 46 | 27 | 105 | 27 |
| | 10 | 12 | 9 | 22 | 11 | 31 | 11 | 10 | 6 | 11 | 0 | 17 | 12 | 17 | 8 | 11 | 4 | 12 | 31 | 30 | 8 | 77 | 79 | 185 | 44 | 43 | 71 | 116 | 74 | 117 | 33 |
| | 11 | 11 | 2 | 21 | 12 | 5 | 9 | 17 | 9 | 16 | 5 | 0 | 17 | 24 | 12 | 17 | 18 | 4 | 19 | 30 | 9 | 154 | 124 | 185 | 91 | 53 | 29 | 105 | 146 | 40 | 68 |
| | 12 | 5 | 4 | 17 | 3 | 4 | 10 | 12 | 10 | 6 | 9 | 31 | 0 | 7 | 21 | 12 | 17 | 4 | 12 | 21 | 4 | 149 | 172 | 175 | 13 | 50 | 188 | 101 | 169 | 120 | 48 |
| | 13 | 2 | 6 | 26 | 8 | 21 | 4 | 18 | 10 | 5 | 33 | 6 | 19 | 0 | 15 | 18 | 21 | 2 | 22 | 11 | 9 | 19 | 199 | 100 | 104 | 70 | 240 | 86 | 150 | 117 | 32 |
| | 14 | 11 | 5 | 27 | 11 | 28 | 7 | 9 | 7 | 17 | 25 | 11 | 6 | 7 | 0 | 7 | 23 | 14 | 14 | 38 | 6 | 98 | 214 | 84 | 80 | 38 | 204 | 12 | 64 | 133 | 62 |
| | 15 | 10 | 3 | 11 | 13 | 16 | 5 | 19 | 2 | 14 | 12 | 13 | 8 | 22 | 2 | 0 | 13 | 12 | 26 | 11 | 9 | 166 | 112 | 161 | 116 | 25 | 34 | 89 | 137 | 93 | 34 |
| | 16 | 1 | 9 | 29 | 10 | 16 | 15 | 19 | 8 | 9 | 11 | 10 | 10 | 21 | 12 | 12 | 0 | 7 | 42 | 25 | 9 | 79 | 171 | 212 | 15 | 63 | 27 | 14 | 141 | 48 | 63 |
| | 17 | 7 | 6 | 8 | 14 | 16 | 8 | 22 | 5 | 14 | 14 | 8 | 21 | 25 | 14 | 14 | 21 | 0 | 40 | 30 | 6 | 114 | 52 | 108 | 34 | 26 | 237 | 106 | 23 | 31 | 13 |
| | 18 | 10 | 7 | 16 | 10 | 28 | 9 | 20 | 7 | 14 | 9 | 25 | 15 | 16 | 15 | 8 | 10 | 11 | 0 | 35 | 2 | 56 | 34 | 132 | 52 | 16 | 179 | 112 | 35 | 148 | 55 |
| | 19 | 14 | 3 | 9 | 2 | 18 | 8 | 11 | 7 | 8 | 12 | 7 | 24 | 7 | 19 | 16 | 23 | 13 | 21 | 0 | 8 | 99 | 32 | 163 | 126 | 17 | 98 | 14 | 164 | 99 | 58 |
| | 20 | 5 | 6 | 13 | 2 | 28 | 15 | 16 | 3 | 14 | 30 | 14 | 13 | 11 | 5 | 17 | 6 | 10 | 19 | 32 | 0 | 98 | 168 | 108 | 91 | 21 | 202 | 76 | 140 | 64 | 12 |
| | 21 | 11 | 2 | 11 | 12 | 33 | 9 | 16 | 2 | 9 | 7 | 23 | 15 | 8 | 4 | 4 | 2 | 7 | 9 | 39 | 5 | 0 | 68 | 76 | 30 | 37 | 64 | 80 | 172 | 31 | 66 |
| | 22 | 14 | 4 | 21 | 2 | 7 | 2 | 13 | 7 | 3 | 8 | 32 | 13 | 5 | 18 | 2 | 23 | 13 | 30 | 21 | 5 | 74 | 0 | 166 | 105 | 65 | 95 | 66 | 131 | 136 | 49 |
| | 23 | 8 | 1 | 4 | 4 | 27 | 10 | 17 | 8 | 16 | 30 | 6 | 12 | 20 | 2 | 16 | 5 | 13 | 16 | 17 | 3 | 169 | 162 | 0 | 72 | 40 | 136 | 16 | 47 | 146 | 56 |
| | 24 | 10 | 6 | 5 | 4 | 25 | 8 | 3 | 1 | 2 | 28 | 6 | 16 | 7 | 7 | 17 | 12 | 3 | 38 | 31 | | | | | | | | | | | |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | |
|-----------|----|-----|----|----|-----|----|-----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|-----|----|-----|----|----|-----|
| Periodo 5 | 1 | 0 | 28 | 19 | 173 | 10 | 100 | 27 | 156 | 63 | 68 | 7 | 3 | 13 | 4 | 10 | 2 | 9 | 10 | 23 | 5 | 17 | 37 | 127 | 34 | 104 | 37 | 20 | 27 | 86 | 18 |
| | 2 | 64 | 0 | 15 | 19 | 15 | 103 | 29 | 65 | 105 | 67 | 5 | 5 | 11 | 11 | 16 | 5 | 15 | 22 | 3 | 1 | 16 | 25 | 74 | 38 | 89 | 58 | 40 | 27 | 35 | 63 |
| | 3 | 40 | 13 | 0 | 101 | 32 | 22 | 13 | 163 | 60 | 45 | 2 | 3 | 5 | 9 | 16 | 6 | 15 | 13 | 22 | 5 | 30 | 14 | 105 | 45 | 77 | 59 | 101 | 24 | 41 | 104 |
| | 4 | 158 | 71 | 65 | 0 | 57 | 45 | 51 | 109 | 51 | 14 | 1 | 2 | 14 | 2 | 9 | 14 | 9 | 19 | 16 | 8 | 15 | 20 | 116 | 15 | 139 | 39 | 29 | 16 | 51 | 39 |
| | 5 | 136 | 56 | 9 | 19 | 0 | 30 | 47 | 128 | 45 | 40 | 1 | 4 | 2 | 15 | 7 | 8 | 17 | 26 | 16 | 3 | 18 | 5 | 106 | 11 | 31 | 13 | 73 | 5 | 82 | 119 |
| | 6 | 42 | 13 | 69 | 67 | 21 | 0 | 63 | 70 | 120 | 36 | 3 | 3 | 4 | 2 | 16 | 11 | 13 | 14 | 17 | 2 | 31 | 12 | 79 | 39 | 123 | 27 | 10 | 30 | 63 | 31 |
| | 7 | 39 | 22 | 58 | 134 | 9 | 44 | 0 | 126 | 45 | 29 | 5 | 3 | 11 | 12 | 11 | 6 | 30 | 27 | 20 | 3 | 17 | 5 | 64 | 35 | 174 | 57 | 96 | 10 | 45 | 78 |
| | 8 | 33 | 51 | 14 | 25 | 25 | 12 | 9 | 0 | 27 | 23 | 5 | 5 | 11 | 15 | 12 | 9 | 18 | 9 | 5 | 8 | 40 | 16 | 77 | 34 | 26 | 31 | 10 | 39 | 54 | 74 |
| | 9 | 97 | 77 | 33 | 81 | 38 | 25 | 31 | 95 | 0 | 43 | 5 | 3 | 13 | 13 | 15 | 11 | 4 | 8 | 7 | 7 | 27 | 27 | 46 | 35 | 74 | 14 | 79 | 40 | 35 | 62 |
| | 10 | 26 | 29 | 66 | 69 | 52 | 105 | 39 | 108 | 128 | 0 | 5 | 8 | 11 | 12 | 10 | 14 | 23 | 25 | 13 | 4 | 13 | 21 | 90 | 26 | 172 | 26 | 93 | 41 | 40 | 115 |
| | 11 | 100 | 58 | 39 | 129 | 49 | 95 | 62 | 65 | 88 | 29 | 0 | 7 | 7 | 10 | 12 | 10 | 3 | 9 | 10 | 2 | 25 | 20 | 29 | 47 | 134 | 17 | 66 | 6 | 12 | 118 |
| | 12 | 29 | 65 | 14 | 20 | 37 | 98 | 20 | 87 | 117 | 23 | 6 | 0 | 8 | 10 | 14 | 2 | 19 | 9 | 23 | 6 | 36 | 23 | 103 | 21 | 69 | 24 | 46 | 46 | 54 | 109 |
| | 13 | 93 | 25 | 61 | 34 | 47 | 14 | 37 | 46 | 21 | 65 | 4 | 8 | 0 | 2 | 4 | 9 | 22 | 13 | 3 | 3 | 14 | 30 | 41 | 8 | 120 | 8 | 34 | 45 | 72 | 42 |
| | 14 | 73 | 14 | 55 | 53 | 43 | 85 | 53 | 109 | 116 | 53 | 1 | 3 | 12 | 0 | 7 | 9 | 22 | 29 | 20 | 9 | 10 | 25 | 100 | 10 | 105 | 59 | 76 | 36 | 9 | 50 |
| | 15 | 96 | 57 | 39 | 46 | 33 | 59 | 12 | 71 | 91 | 13 | 4 | 6 | 7 | 5 | 0 | 3 | 19 | 6 | 13 | 9 | 40 | 5 | 87 | 42 | 127 | 35 | 82 | 26 | 77 | 62 |
| | 16 | 94 | 69 | 29 | 42 | 49 | 95 | 53 | 97 | 44 | 29 | 2 | 6 | 12 | 9 | 8 | 0 | 18 | 18 | 2 | 8 | 10 | 26 | 47 | 23 | 154 | 24 | 84 | 27 | 9 | 43 |
| | 17 | 144 | 54 | 69 | 81 | 28 | 23 | 49 | 151 | 104 | 36 | 4 | 4 | 3 | 4 | 10 | 12 | 0 | 23 | 21 | 5 | 12 | 21 | 89 | 18 | 97 | 43 | 11 | 16 | 79 | 97 |
| | 18 | 99 | 76 | 27 | 128 | 57 | 40 | 24 | 114 | 115 | 57 | 5 | 6 | 4 | 3 | 3 | 2 | 14 | 0 | 6 | 4 | 11 | 37 | 55 | 35 | 54 | 6 | 62 | 29 | 66 | 75 |
| | 19 | 105 | 64 | 48 | 82 | 28 | 107 | 16 | 80 | 68 | 26 | 2 | 3 | 13 | 16 | 8 | 14 | 23 | 7 | 0 | 10 | 27 | 38 | 80 | 55 | 144 | 36 | 68 | 24 | 53 | 109 |
| | 20 | 112 | 25 | 53 | 153 | 17 | 72 | 22 | 151 | 13 | 29 | 3 | 4 | 10 | 9 | 8 | 12 | 28 | 15 | 2 | 0 | 6 | 16 | 62 | 65 | 59 | 14 | 74 | 21 | 83 | 23 |
| | 21 | 64 | 12 | 16 | 145 | 12 | 14 | 49 | 65 | 18 | 38 | 2 | 8 | 2 | 9 | 15 | 6 | 6 | 25 | 10 | 2 | 0 | 25 | 134 | 61 | 30 | 27 | 90 | 10 | 41 | 32 |
| | 22 | 101 | 59 | 39 | 143 | 7 | 18 | 41 | 137 | 55 | 60 | 4 | 1 | 10 | 7 | 11 | 3 | 6 | 8 | 2 | 4 | 27 | 0 | 99 | 62 | 22 | 37 | 11 | 26 | 43 | 113 |
| | 23 | 112 | 77 | 7 | 148 | 61 | 50 | 8 | 44 | 49 | 65 | 5 | 4 | 9 | 17 | 7 | 3 | 5 | 25 | 7 | 5 | 19 | 15 | 0 | 60 | 56 | 32 | 49 | 15 | 9 | 92 |
| | 24 | 50 | 25 | 51 | 116 | 10 | 62 | 40 | 124 | 52 | 46 | 2 | 2 | 2 | 12 | 12 | 11 | 16 | 19 | 4 | 6 | 14 | 23 | 71 | 0 | 65 | 17 | 66 | 33 | 76 | 48 |
| | 25 | 180 | 67 | 8 | 25 | 36 | 79 | 54 | 19 | 114 | 11 | 1 | 7 | 13 | 7 | 11 | 12 | 28 | 5 | 12 | 1 | 8 | 21 | 73 | 33 | 0 | 53 | 83 | 28 | 78 | 91 |
| | 26 | 97 | 42 | 36 | 100 | 37 | 50 | 37 | 140 | 68 | 52 | 7 | 4 | 13 | 4 | 2 | 4 | 30 | 15 | 15 | 3 | 41 | 17 | 39 | 40 | 151 | 0 | 18 | 22 | 17 | 66 |
| | 27 | 121 | 59 | 48 | 162 | 19 | 47 | 37 | 72 | 18 | 10 | 7 | 6 | 13 | 6 | 9 | 9 | 10 | 6 | 6 | 6 | 35 | 35 | 31 | 13 | 169 | 43 | 0 | 46 | 70 | 113 |
| | 28 | 154 | 70 | 18 | 157 | 49 | 72 | 39 | 64 | 79 | 54 | 5 | 8 | 1 | 13 | 2 | 8 | 10 | 14 | 19 | 9 | 26 | 14 | 113 | 23 | 143 | 51 | 14 | 0 | 18 | 49 |
| | 29 | 58 | 62 | 50 | 100 | 18 | 103 | 55 | 52 | 54 | 58 | 4 | 1 | 8 | 8 | 12 | 13 | 30 | 6 | 13 | 9 | 34 | 29 | 86 | 7 | 152 | 40 | 37 | 44 | 0 | 83 |
| | 30 | 56 | 55 | 17 | 75 | 45 | 53 | 65 | 36 | 98 | 40 | 6 | 3 | 11 | 2 | 14 | 2 | 4 | 30 | 9 | 2 | 20 | 17 | 130 | 48 | 116 | 46 | 94 | 34 | 85 | 0 |

Costo de reordenamiento por departamento

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|--|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| | 910 | 973 | 876 | 637 | 584 | 605 | 775 | 524 | 756 | 905 | 701 | 945 | 984 | 546 | 759 | 734 | 812 | 937 | 685 | 761 | 844 | 545 | 742 | 618 | 797 | 763 | 975 | 980 | 670 | 799 |

• 30 DEPS-PROB 3

Flujo de materiales entre departamentos

| Periodo 1 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 0 | 6 | 20 | 2 | 19 | 7 | 34 | 43 | 3 | 48 | 34 | 48 | 45 | 62 | 165 | 40 | 110 | 45 | 143 | 217 | 20 | 23 | 22 | 23 | 10 | 34 | 4 | 17 | 3 | 11 |
| 2 | 12 | 0 | 25 | 10 | 12 | 4 | 38 | 25 | 11 | 22 | 16 | 126 | 45 | 74 | 223 | 22 | 110 | 109 | 52 | 162 | 12 | 6 | 6 | 3 | 9 | 16 | 28 | 16 | 9 | 23 |
| 3 | 8 | 1 | 0 | 11 | 15 | 8 | 42 | 19 | 12 | 36 | 50 | 54 | 16 | 58 | 80 | 51 | 53 | 206 | 162 | 175 | 10 | 14 | 30 | 12 | 9 | 39 | 11 | 26 | 6 | 16 |
| 4 | 9 | 10 | 11 | 0 | 10 | 5 | 47 | 34 | 9 | 20 | 20 | 142 | 43 | 95 | 53 | 32 | 64 | 161 | 181 | 206 | 19 | 15 | 50 | 28 | 3 | 36 | 24 | 13 | 11 | 3 |
| 5 | 10 | 3 | 6 | 11 | 0 | 5 | 40 | 24 | 9 | 15 | 46 | 44 | 21 | 90 | 219 | 14 | 91 | 71 | 29 | 211 | 39 | 17 | 11 | 9 | 11 | 27 | 28 | 6 | 9 | 6 |
| 6 | 11 | 6 | 16 | 17 | 2 | 0 | 21 | 34 | 23 | 45 | 16 | 142 | 18 | 34 | 112 | 56 | 59 | 79 | 20 | 34 | 25 | 11 | 9 | 5 | 11 | 42 | 10 | 19 | 4 | 24 |
| 7 | 8 | 7 | 19 | 14 | 15 | 6 | 0 | 48 | 6 | 37 | 12 | 28 | 26 | 49 | 72 | 29 | 54 | 215 | 162 | 117 | 39 | 12 | 24 | 6 | 2 | 9 | 13 | 11 | 4 | 6 |
| 8 | 7 | 6 | 3 | 9 | 18 | 14 | 11 | 0 | 3 | 32 | 14 | 15 | 45 | 81 | 195 | 47 | 63 | 175 | 157 | 165 | 21 | 9 | 8 | 21 | 6 | 8 | 8 | 24 | 9 | 9 |
| 9 | 13 | 1 | 7 | 11 | 19 | 10 | 28 | 10 | 0 | 12 | 11 | 96 | 11 | 28 | 139 | 49 | 55 | 133 | 171 | 79 | 31 | 18 | 13 | 6 | 5 | 28 | 5 | 15 | 4 | 25 |
| 10 | 7 | 1 | 24 | 22 | 7 | 3 | 28 | 13 | 6 | 0 | 48 | 141 | 11 | 198 | 65 | 49 | 55 | 214 | 115 | 169 | 15 | 27 | 34 | 25 | 1 | 14 | 20 | 17 | 16 | 3 |
| 11 | 6 | 6 | 16 | 12 | 18 | 2 | 45 | 6 | 18 | 37 | 0 | 98 | 41 | 140 | 82 | 48 | 71 | 85 | 99 | 191 | 25 | 21 | 24 | 25 | 4 | 27 | 4 | 22 | 7 | 23 |
| 12 | 12 | 8 | 26 | 15 | 5 | 7 | 20 | 10 | 13 | 33 | 12 | 0 | 57 | 194 | 123 | 46 | 46 | 145 | 77 | 114 | 4 | 12 | 31 | 17 | 4 | 25 | 11 | 6 | 5 | 21 |
| 13 | 8 | 9 | 6 | 4 | 9 | 9 | 22 | 24 | 11 | 12 | 15 | 92 | 0 | 15 | 92 | 0 | 82 | 47 | 117 | 202 | 26 | 27 | 32 | 12 | 3 | 9 | 23 | 16 | 5 | 15 |
| 14 | 9 | 8 | 25 | 21 | 9 | 6 | 36 | 37 | 9 | 22 | 12 | 153 | 30 | 0 | 208 | 56 | 91 | 94 | 142 | 90 | 4 | 6 | 43 | 28 | 10 | 11 | 3 | 14 | 16 | 9 |
| 15 | 6 | 4 | 18 | 7 | 17 | 8 | 6 | 21 | 13 | 59 | 41 | 141 | 45 | 165 | 0 | 53 | 84 | 37 | 104 | 172 | 28 | 5 | 41 | 15 | 2 | 19 | 13 | 21 | 19 | 17 |
| 16 | 6 | 2 | 19 | 8 | 19 | 11 | 30 | 5 | 6 | 59 | 5 | 110 | 28 | 127 | 135 | 0 | 13 | 261 | 185 | 131 | 8 | 23 | 21 | 8 | 10 | 35 | 12 | 12 | 5 | 14 |
| 17 | 2 | 6 | 8 | 11 | 15 | 5 | 7 | 47 | 6 | 13 | 39 | 157 | 26 | 72 | 183 | 18 | 0 | 254 | 63 | 32 | 23 | 21 | 11 | 7 | 9 | 9 | 11 | 7 | 8 | 6 |
| 18 | 12 | 2 | 6 | 22 | 12 | 6 | 34 | 21 | 7 | 9 | 45 | 25 | 68 | 38 | 229 | 11 | 105 | 0 | 141 | 226 | 22 | 4 | 30 | 6 | 5 | 14 | 20 | 26 | 6 | 20 |
| 19 | 10 | 9 | 7 | 16 | 18 | 9 | 26 | 6 | 9 | 7 | 38 | 49 | 17 | 67 | 229 | 16 | 116 | 195 | 0 | 128 | 33 | 5 | 28 | 22 | 8 | 15 | 16 | 4 | 11 | 6 |
| 20 | 12 | 9 | 18 | 23 | 2 | 13 | 46 | 25 | 4 | 39 | 40 | 129 | 65 | 171 | 70 | 25 | 13 | 29 | 53 | 0 | 29 | 8 | 23 | 26 | 9 | 8 | 8 | 13 | 4 | 15 |
| 21 | 12 | 8 | 28 | 8 | 15 | 12 | 23 | 15 | 23 | 21 | 37 | 52 | 41 | 129 | 219 | 56 | 68 | 60 | 93 | 125 | 0 | 25 | 15 | 29 | 7 | 21 | 14 | 11 | 18 | 9 |
| 22 | 8 | 10 | 27 | 6 | 14 | 1 | 29 | 45 | 9 | 11 | 7 | 127 | 13 | 105 | 76 | 23 | 85 | 179 | 131 | 217 | 12 | 0 | 20 | 6 | 7 | 28 | 24 | 10 | 4 | 8 |
| 23 | 2 | 10 | 21 | 8 | 19 | 7 | 35 | 26 | 13 | 25 | 28 | 128 | 13 | 140 | 177 | 14 | 57 | 148 | 72 | 162 | 14 | 3 | 0 | 13 | 10 | 6 | 10 | 23 | 10 | 17 |
| 24 | 2 | 3 | 19 | 20 | 18 | 10 | 44 | 8 | 22 | 33 | 46 | 131 | 10 | 77 | 62 | 19 | 113 | 57 | 99 | 122 | 4 | 24 | 50 | 0 | 2 | 9 | 17 | 10 | 16 | 10 |
| 25 | 9 | 7 | 5 | 16 | 16 | 1 | 36 | 52 | 21 | 29 | 45 | 33 | 33 | 151 | 50 | 36 | 89 | 127 | 76 | 113 | 32 | 5 | 19 | 19 | 0 | 33 | 27 | 17 | 3 | 23 |
| 26 | 12 | 4 | 25 | 9 | 3 | 3 | 15 | 7 | 23 | 40 | 17 | 131 | 51 | 140 | 173 | 37 | 79 | 66 | 164 | 206 | 21 | 23 | 38 | 8 | 9 | 0 | 26 | 15 | 3 | 12 |
| 27 | 13 | 7 | 16 | 7 | 15 | 9 | 6 | 35 | 11 | 10 | 17 | 74 | 7 | 159 | 93 | 37 | 43 | 156 | 81 | 163 | 26 | 20 | 40 | 18 | 10 | 4 | 0 | 7 | 17 | 20 |
| 28 | 12 | 7 | 18 | 22 | 11 | 9 | 8 | 33 | 11 | 14 | 10 | 27 | 46 | 87 | 188 | 18 | 18 | 202 | 154 | 168 | 14 | 5 | 9 | 8 | 2 | 31 | 14 | 0 | 4 | 21 |
| 29 | 11 | 3 | 9 | 7 | 13 | 4 | 24 | 36 | 2 | 32 | 34 | 65 | 36 | 43 | 198 | 51 | 62 | 50 | 102 | 145 | 30 | 26 | 48 | 16 | 10 | 19 | 25 | 22 | 0 | 6 |
| 30 | 12 | 8 | 9 | 6 | 4 | 15 | 21 | 37 | 11 | 6 | 20 | 41 | 38 | 21 | 35 | 13 | 49 | 245 | 66 | 36 | 9 | 12 | 24 | 16 | 8 | 30 | 13 | 8 | 6 | 0 |

| Periodo 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|-----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|-----|----|-----|
| 1 | 0 | 24 | 13 | 4 | 2 | 10 | 23 | 16 | 12 | 7 | 7 | 17 | 14 | 28 | 17 | 32 | 17 | 14 | 28 | 4 | 58 | 85 | 170 | 106 | 27 | 22 | 156 | 147 | 37 | 130 |
| 2 | 9 | 0 | 12 | 3 | 13 | 9 | 31 | 14 | 15 | 9 | 6 | 35 | 13 | 31 | 6 | 21 | 4 | 4 | 31 | 24 | 90 | 118 | 19 | 115 | 32 | 76 | 223 | 80 | 10 | 134 |
| 3 | 3 | 19 | 0 | 14 | 18 | 7 | 39 | 16 | 36 | 26 | 3 | 28 | 9 | 48 | 5 | 13 | 13 | 5 | 15 | 4 | 114 | 76 | 78 | 39 | 72 | 57 | 91 | 208 | 39 | 121 |
| 4 | 11 | 23 | 22 | 0 | 3 | 7 | 35 | 2 | 35 | 17 | 6 | 8 | 4 | 48 | 7 | 11 | 21 | 28 | 17 | 26 | 102 | 61 | 169 | 41 | 20 | 72 | 200 | 175 | 30 | 24 |
| 5 | 3 | 35 | 13 | 17 | 0 | 4 | 27 | 9 | 37 | 34 | 10 | 11 | 6 | 10 | 5 | 36 | 8 | 7 | 13 | 17 | 100 | 140 | 80 | 64 | 41 | 92 | 99 | 25 | 43 | 16 |
| 6 | 4 | 28 | 18 | 4 | 11 | 0 | 32 | 9 | 21 | 28 | 2 | 30 | 9 | 22 | 9 | 39 | 14 | 7 | 4 | 16 | 190 | 127 | 177 | 23 | 44 | 114 | 150 | 163 | 21 | 130 |
| 7 | 13 | 5 | 11 | 10 | 6 | 3 | 0 | 7 | 39 | 17 | 11 | 47 | 11 | 49 | 5 | 15 | 19 | 13 | 11 | 30 | 147 | 85 | 124 | 112 | 87 | 108 | 88 | 130 | 46 | 25 |
| 8 | 11 | 13 | 9 | 11 | 13 | 10 | 7 | 0 | 10 | 33 | 4 | 21 | 12 | 14 | 15 | 47 | 6 | 10 | 33 | 24 | 190 | 130 | 89 | 68 | 53 | 29 | 100 | 38 | 38 | 54 |
| 9 | 8 | 10 | 16 | 12 | 17 | 6 | 36 | 10 | 0 | 23 | 2 | 24 | 2 | 32 | 5 | 16 | 11 | 20 | 28 | 15 | 180 | 51 | 52 | 130 | 62 | 121 | 179 | 193 | 11 | 138 |
| 10 | 12 | 17 | 8 | 6 | 16 | 4 | 37 | 15 | 13 | 0 | 13 | 8 | 2 | 24 | 12 | 47 | 12 | 22 | 19 | 21 | 75 | 83 | 142 | 25 | 67 | 104 | 250 | 31 | 24 | 124 |
| 11 | 17 | 36 | 12 | 8 | 8 | 6 | 33 | 15 | 30 | 11 | 0 | 34 | 12 | 17 | 3 | 21 | 10 | 21 | 15 | 20 | 176 | 42 | 187 | 96 | 70 | 31 | 63 | 109 | 38 | 73 |
| 12 | 9 | 39 | 7 | 12 | 4 | 4 | 26 | 9 | 7 | 27 | 3 | 0 | 6 | 18 | 10 | 17 | 5 | 16 | 9 | 11 | 161 | 85 | 102 | 84 | 38 | 15 | 211 | 205 | 38 | 118 |
| 13 | 4 | 18 | 11 | 2 | 3 | 2 | 39 | 6 | 10 | 33 | 7 | 27 | 0 | 18 | 9 | 35 | 7 | 24 | 32 | 29 | 138 | 125 | 121 | 105 | 84 | 81 | 65 | 184 | 33 | 44 |
| 14 | 5 | 27 | 21 | 2 | 16 | 11 | 40 | 17 | 30 | 26 | 8 | 10 | 13 | 0 | 14 | 29 | 11 | 14 | 7 | 11 | 143 | 88 | 77 | 49 | 19 | 67 | 93 | 47 | 43 | 113 |
| 15 | 4 | 7 | 16 | 10 | 7 | 2 | 37 | 17 | 30 | 3 | 4 | 40 | 4 | 13 | 0 | 8 | 18 | 28 | 16 | 17 | 81 | 135 | 85 | 39 | 73 | 70 | 50 | 205 | 22 | 133 |
| 16 | 10 | 36 | 19 | 1 | 14 | 2 | 23 | 17 | 26 | 14 | 9 | 41 | 12 | 46 | 8 | 0 | 21 | 30 | 24 | 5 | 94 | 75 | 114 | 83 | 10 | 25 | 208 | 183 | 45 | 118 |
| 17 | 13 | 4 | 22 | 5 | 10 | 2 | 25 | 6 | 39 | 22 | 4 | 8 | 11 | 12 | 13 | 31 | 0 | 33 | 27 | 29 | 30 | 42 | 116 | 23 | 37 | 89 | 188 | 67 | 45 | 66 |
| 18 | 3 | 35 | 22 | 13 | 19 | 11 | 35 | 16 | 26 | 29 | 12 | 45 | 10 | 5 | 14 | 38 | 18 | 0 | 15 | 20 | 50 | 130 | 124 | 130 | 55 | 130 | 249 | 161 | 15 | 92 |
| 19 | 15 | 5 | 5 | 3 | 9 | 11 | 39 | 2 | 27 | 3 | 12 | 11 | 3 | 7 | 2 | 31 | 13 | 22 | 0 | 3 | 26 | 92 | 97 | 15 | 16 | 22 | 129 | 53 | 47 | 129 |
| 20 | 13 | 15 | 8 | 12 | 17 | 10 | 16 | 2 | 11 | 3 | 10 | 45 | 3 | 33 | 4 | 19 | 3 | 19 | 13 | 0 | 55 | 132 | 88 | 55 | 59 | 122 | 66 | 84 | 22 | 94 |
| 21 | 4 | 10 | 2 | 2 | 7 | 1 | 33 | 15 | 26 | 26 | 9 | 16 | 9 | 35 | 7 | 43 | 8 | 20 | 31 | 17 | 0 | 83 | 111 | 99 | 82 | 96 | 226 | 123 | 13 | 135 |
| 22 | 15 | 15 | 4 | 16 | 2 | 2 | 8 | 4 | 21 | 20 | 3 | 41 | 3 | 46 | 3 | 33 | 21 | 19 | 9 | 26 | 164 | 0 | 106 | 113 | 13 | 70 | 172 | 131 | 47 | 22 |
| 23 | 15 | 22 | 3 | 16 | 2 | 9 | 30 | 5 | 11 | 12 | 10 | 5 | 5 | 27 | 11 | 11 | 2 | 23 | 17 | 14 | 20 | 127 | 0 | 67 | 36 | 24 | 75 | 105 | 27 | 120 |
| 24 | 17 | 10 | 12 | 15 | 19 | 3 | 29 | 5 | 39 | 13 | 16 | 31 | 3 | 15 | 12 | 26 | 7 | 21 | 13 | 15 | 115 | 28 | 36 | 0 | 68 | 73 | 183 | 125 | 45 | 39 |
| 25 | 11 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | |
|-----------|----|-----|-----|-----|----|----|-----|-----|-----|----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Periodo 3 | 1 | 0 | 190 | 24 | 32 | 53 | 223 | 48 | 33 | 34 | 157 | 34 | 16 | 30 | 15 | 7 | 15 | 7 | 18 | 20 | 39 | 25 | 13 | 39 | 30 | 3 | 29 | 18 | 15 | 3 | 45 |
| | 2 | 103 | 0 | 19 | 57 | 45 | 158 | 120 | 109 | 62 | 224 | 6 | 9 | 11 | 6 | 54 | 16 | 20 | 22 | 16 | 9 | 28 | 14 | 24 | 13 | 9 | 38 | 24 | 13 | 8 | 7 |
| | 3 | 93 | 135 | 0 | 15 | 16 | 107 | 64 | 29 | 17 | 224 | 13 | 27 | 39 | 24 | 44 | 3 | 18 | 26 | 22 | 20 | 9 | 18 | 36 | 25 | 19 | 28 | 43 | 20 | 7 | 11 |
| | 4 | 19 | 207 | 26 | 0 | 26 | 120 | 159 | 30 | 18 | 75 | 21 | 22 | 25 | 21 | 43 | 11 | 17 | 26 | 11 | 6 | 22 | 3 | 43 | 8 | 22 | 7 | 41 | 22 | 4 | 40 |
| | 5 | 65 | 133 | 53 | 27 | 0 | 43 | 123 | 24 | 57 | 144 | 22 | 29 | 11 | 19 | 25 | 6 | 11 | 7 | 7 | 11 | 12 | 5 | 29 | 14 | 6 | 19 | 23 | 5 | 9 | 36 |
| | 6 | 29 | 106 | 51 | 38 | 22 | 0 | 145 | 101 | 16 | 65 | 28 | 3 | 41 | 25 | 16 | 11 | 11 | 14 | 6 | 9 | 6 | 7 | 10 | 6 | 6 | 40 | 47 | 12 | 12 | 55 |
| | 7 | 86 | 107 | 72 | 48 | 62 | 73 | 0 | 68 | 54 | 146 | 7 | 29 | 23 | 16 | 29 | 17 | 14 | 27 | 25 | 11 | 27 | 16 | 27 | 13 | 26 | 34 | 6 | 21 | 13 | 30 |
| | 8 | 34 | 208 | 99 | 40 | 12 | 171 | 159 | 0 | 25 | 58 | 14 | 11 | 7 | 23 | 26 | 18 | 3 | 16 | 15 | 9 | 11 | 21 | 21 | 7 | 26 | 24 | 37 | 18 | 8 | 55 |
| | 9 | 63 | 67 | 72 | 53 | 59 | 232 | 140 | 22 | 0 | 35 | 5 | 17 | 20 | 28 | 5 | 18 | 3 | 8 | 22 | 20 | 15 | 16 | 44 | 21 | 19 | 13 | 28 | 17 | 6 | 9 |
| | 10 | 68 | 199 | 101 | 17 | 21 | 116 | 48 | 82 | 9 | 0 | 18 | 10 | 40 | 31 | 11 | 10 | 22 | 21 | 20 | 7 | 9 | 9 | 42 | 26 | 16 | 10 | 6 | 9 | 12 | 42 |
| | 11 | 36 | 72 | 75 | 22 | 60 | 216 | 203 | 54 | 57 | 133 | 0 | 22 | 4 | 8 | 31 | 7 | 19 | 19 | 11 | 19 | 8 | 6 | 17 | 24 | 3 | 37 | 15 | 4 | 15 | 13 |
| | 12 | 102 | 43 | 96 | 47 | 40 | 244 | 26 | 102 | 47 | 230 | 31 | 0 | 33 | 32 | 8 | 11 | 10 | 12 | 15 | 20 | 9 | 16 | 48 | 16 | 14 | 20 | 14 | 23 | 15 | 27 |
| | 13 | 91 | 216 | 38 | 49 | 24 | 69 | 32 | 68 | 10 | 205 | 26 | 26 | 0 | 25 | 46 | 7 | 15 | 27 | 13 | 9 | 24 | 18 | 22 | 21 | 9 | 23 | 39 | 8 | 17 | 21 |
| | 14 | 136 | 218 | 54 | 32 | 31 | 124 | 114 | 102 | 40 | 88 | 15 | 13 | 7 | 0 | 13 | 13 | 2 | 23 | 27 | 25 | 15 | 21 | 13 | 14 | 4 | 40 | 11 | 18 | 16 | 56 |
| | 15 | 37 | 136 | 23 | 27 | 45 | 173 | 62 | 29 | 12 | 161 | 10 | 24 | 23 | 31 | 0 | 7 | 7 | 22 | 15 | 12 | 28 | 7 | 37 | 17 | 10 | 11 | 33 | 14 | 4 | 19 |
| | 16 | 104 | 146 | 14 | 40 | 36 | 83 | 131 | 52 | 65 | 155 | 13 | 9 | 19 | 13 | 47 | 0 | 6 | 14 | 24 | 15 | 14 | 21 | 39 | 27 | 24 | 19 | 38 | 3 | 2 | 14 |
| | 17 | 46 | 115 | 66 | 58 | 43 | 176 | 160 | 22 | 49 | 147 | 4 | 6 | 12 | 9 | 8 | 5 | 0 | 33 | 19 | 31 | 14 | 3 | 37 | 3 | 12 | 13 | 29 | 20 | 8 | 31 |
| | 18 | 67 | 73 | 102 | 46 | 52 | 140 | 97 | 95 | 18 | 138 | 11 | 11 | 5 | 4 | 53 | 18 | 18 | 0 | 23 | 43 | 12 | 2 | 45 | 10 | 16 | 37 | 26 | 23 | 10 | 11 |
| | 19 | 55 | 167 | 24 | 6 | 47 | 276 | 108 | 17 | 65 | 207 | 33 | 27 | 23 | 17 | 47 | 8 | 2 | 12 | 0 | 24 | 24 | 14 | 22 | 4 | 17 | 22 | 42 | 2 | 12 | 39 |
| | 20 | 106 | 69 | 26 | 48 | 21 | 160 | 138 | 78 | 18 | 43 | 9 | 28 | 31 | 23 | 18 | 7 | 8 | 21 | 3 | 0 | 24 | 10 | 27 | 25 | 15 | 41 | 35 | 9 | 14 | 10 |
| | 21 | 127 | 114 | 61 | 40 | 48 | 89 | 180 | 45 | 21 | 157 | 23 | 25 | 31 | 20 | 10 | 17 | 14 | 6 | 19 | 17 | 0 | 9 | 33 | 25 | 13 | 25 | 24 | 5 | 2 | 15 |
| | 22 | 108 | 149 | 70 | 25 | 48 | 68 | 164 | 39 | 15 | 165 | 6 | 23 | 37 | 9 | 7 | 1 | 14 | 6 | 7 | 27 | 27 | 0 | 42 | 23 | 4 | 9 | 17 | 21 | 6 | 41 |
| | 23 | 33 | 64 | 37 | 35 | 56 | 214 | 67 | 49 | 21 | 82 | 34 | 10 | 25 | 6 | 28 | 4 | 16 | 8 | 23 | 41 | 3 | 10 | 0 | 28 | 9 | 31 | 19 | 17 | 10 | 34 |
| | 24 | 101 | 195 | 26 | 28 | 40 | 125 | 100 | 23 | 59 | 75 | 19 | 4 | 27 | 25 | 24 | 3 | 10 | 5 | 15 | 29 | 11 | 7 | 22 | 0 | 16 | 18 | 20 | 5 | 7 | 38 |
| | 25 | 97 | 125 | 68 | 43 | 32 | 200 | 188 | 19 | 53 | 164 | 37 | 7 | 40 | 20 | 20 | 5 | 10 | 31 | 25 | 22 | 20 | 8 | 14 | 20 | 0 | 19 | 47 | 13 | 16 | 54 |
| | 26 | 93 | 34 | 88 | 18 | 36 | 119 | 75 | 97 | 18 | 123 | 16 | 28 | 8 | 28 | 30 | 9 | 10 | 34 | 22 | 13 | 5 | 21 | 17 | 30 | 20 | 0 | 33 | 23 | 6 | 21 |
| | 27 | 125 | 37 | 55 | 31 | 25 | 30 | 110 | 18 | 10 | 81 | 17 | 28 | 9 | 19 | 29 | 8 | 18 | 20 | 26 | 14 | 27 | 6 | 28 | 29 | 21 | 26 | 0 | 3 | 11 | 8 |
| | 28 | 21 | 61 | 51 | 9 | 30 | 206 | 47 | 117 | 40 | 100 | 17 | 15 | 40 | 11 | 17 | 9 | 15 | 10 | 7 | 8 | 16 | 10 | 13 | 29 | 24 | 42 | 11 | 0 | 17 | 53 |
| | 29 | 95 | 121 | 66 | 20 | 20 | 250 | 112 | 59 | 43 | 129 | 34 | 30 | 29 | 8 | 8 | 18 | 15 | 12 | 8 | 19 | 22 | 16 | 47 | 15 | 8 | 11 | 7 | 13 | 0 | 51 |
| | 30 | 50 | 229 | 57 | 32 | 15 | 85 | 47 | 39 | 62 | 237 | 26 | 22 | 28 | 22 | 27 | 9 | 18 | 24 | 16 | 46 | 5 | 16 | 17 | 29 | 13 | 24 | 33 | 16 | 2 | 0 |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | |
|-----------|----|-----|-----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| Periodo 4 | 1 | 0 | 83 | 15 | 77 | 25 | 165 | 163 | 82 | 66 | 62 | 26 | 15 | 36 | 30 | 25 | 20 | 8 | 27 | 12 | 38 | 13 | 17 | 26 | 27 | 20 | 12 | 18 | 34 | 35 | 25 |
| | 2 | 146 | 0 | 18 | 89 | 134 | 114 | 31 | 55 | 39 | 15 | 10 | 9 | 41 | 23 | 23 | 4 | 4 | 17 | 2 | 28 | 7 | 35 | 21 | 25 | 19 | 21 | 11 | 4 | 9 | 31 |
| | 3 | 137 | 166 | 0 | 19 | 59 | 46 | 67 | 38 | 16 | 51 | 27 | 22 | 9 | 18 | 21 | 19 | 17 | 35 | 10 | 33 | 6 | 13 | 3 | 37 | 16 | 32 | 11 | 24 | 8 | 11 |
| | 4 | 55 | 174 | 39 | 0 | 73 | 134 | 147 | 137 | 30 | 46 | 17 | 10 | 30 | 7 | 26 | 12 | 11 | 26 | 4 | 28 | 36 | 24 | 3 | 26 | 19 | 29 | 3 | 33 | 5 | 18 |
| | 5 | 67 | 86 | 52 | 98 | 0 | 34 | 223 | 44 | 49 | 28 | 6 | 16 | 28 | 31 | 20 | 16 | 4 | 15 | 15 | 12 | 17 | 37 | 5 | 26 | 25 | 10 | 30 | 23 | 7 | 29 |
| | 6 | 125 | 162 | 32 | 19 | 59 | 0 | 148 | 118 | 87 | 43 | 11 | 16 | 6 | 22 | 3 | 22 | 8 | 8 | 17 | 38 | 18 | 31 | 5 | 33 | 14 | 19 | 11 | 27 | 20 | 13 |
| | 7 | 163 | 53 | 55 | 86 | 96 | 24 | 0 | 56 | 48 | 31 | 18 | 8 | 26 | 21 | 19 | 17 | 6 | 4 | 2 | 23 | 11 | 18 | 28 | 8 | 24 | 38 | 11 | 5 | 28 | 39 |
| | 8 | 91 | 129 | 7 | 95 | 41 | 74 | 106 | 0 | 55 | 31 | 28 | 2 | 9 | 24 | 19 | 23 | 11 | 21 | 19 | 16 | 9 | 28 | 22 | 13 | 10 | 16 | 13 | 12 | 5 | 14 |
| | 9 | 124 | 191 | 7 | 51 | 169 | 75 | 40 | 56 | 0 | 55 | 12 | 9 | 17 | 31 | 6 | 21 | 17 | 17 | 11 | 39 | 34 | 22 | 7 | 4 | 3 | 11 | 24 | 12 | 24 | 6 |
| | 10 | 87 | 32 | 51 | 142 | 164 | 112 | 43 | 114 | 37 | 0 | 25 | 14 | 38 | 34 | 26 | 8 | 16 | 8 | 10 | 4 | 9 | 13 | 14 | 10 | 13 | 5 | 30 | 26 | 3 | 40 |
| | 11 | 46 | 113 | 23 | 92 | 123 | 34 | 235 | 139 | 46 | 21 | 0 | 7 | 25 | 21 | 21 | 18 | 7 | 31 | 4 | 32 | 8 | 5 | 21 | 25 | 25 | 12 | 8 | 27 | 10 | 35 |
| | 12 | 158 | 109 | 47 | 65 | 41 | 187 | 67 | 90 | 84 | 18 | 12 | 0 | 10 | 35 | 21 | 19 | 8 | 33 | 6 | 23 | 20 | 40 | 5 | 35 | 6 | 32 | 23 | 30 | 11 | 17 |
| | 13 | 123 | 46 | 19 | 52 | 36 | 157 | 194 | 61 | 78 | 13 | 31 | 14 | 0 | 8 | 10 | 17 | 13 | 25 | 13 | 18 | 21 | 21 | 12 | 21 | 9 | 9 | 8 | 7 | 21 | 33 |
| | 14 | 28 | 99 | 30 | 81 | 174 | 137 | 62 | 70 | 21 | 38 | 12 | 13 | 19 | 0 | 23 | 3 | 18 | 7 | 6 | 27 | 11 | 6 | 11 | 35 | 24 | 34 | 6 | 4 | 17 | 31 |
| | 15 | 54 | 20 | 41 | 170 | 84 | 72 | 99 | 109 | 52 | 8 | 9 | 13 | 24 | 24 | 0 | 15 | 10 | 31 | 15 | 7 | 16 | 38 | 10 | 32 | 25 | 22 | 12 | 18 | 6 | 41 |
| | 16 | 154 | 68 | 20 | 135 | 183 | 55 | 93 | 115 | 31 | 9 | 10 | 20 | 6 | 20 | 5 | 0 | 10 | 25 | 13 | 19 | 15 | 6 | 13 | 16 | 6 | 20 | 30 | 10 | 22 | 38 |
| | 17 | 42 | 109 | 8 | 90 | 62 | 19 | 208 | 32 | 30 | 15 | 12 | 2 | 22 | 16 | 7 | 24 | 0 | 35 | 9 | 22 | 4 | 32 | 3 | 11 | 18 | 14 | 8 | 20 | 20 | 13 |
| | 18 | 36 | 88 | 39 | 134 | 154 | 141 | 83 | 66 | 89 | 48 | 11 | 2 | 45 | 22 | 16 | 11 | 4 | 0 | 12 | 35 | 21 | 31 | 16 | 28 | 9 | 25 | 4 | 10 | 21 | 19 |
| | 19 | 57 | 134 | 57 | 159 | 142 | 105 | 168 | 108 | 87 | 45 | 11 | 3 | 39 | 13 | 23 | 22 | 9 | 14 | 0 | 11 | 23 | 4 | 9 | 21 | 13 | 18 | 26 | 11 | 27 | 22 |
| | 20 | 127 | 126 | 11 | 139 | 95 | 170 | 38 | 43 | 79 | 48 | 27 | 14 | 16 | 27 | 15 | 26 | 14 | 35 | 2 | 0 | 27 | 11 | 24 | 33 | 21 | 11 | 23 | 7 | 19 | 20 |
| | 21 | 57 | 169 | 22 | 169 | 99 | 117 | 211 | 104 | 75 | 43 | 8 | 13 | 20 | 27 | 6 | 26 | 15 | 8 | 8 | 25 | 0 | 30 | 22 | 12 | 9 | 13 | 13 | 25 | 20 | 40 |
| | 22 | 101 | 94 | 52 | 123 | 180 | 31 | 164 | 87 | 33 | 12 | 6 | 8 | 32 | 25 | 24 | 5 | 8 | 22 | 15 | 40 | 5 | 0 | 23 | 40 | 10 | 5 | 13 | 4 | 35 | 18 |
| | 23 | 85 | 135 | 20 | 141 | 114 | 127 | 143 | 27 | 43 | 63 | 7 | 13 | 15 | 35 | 22 | 8 | 5 | 13 | 13 | 30 | 24 | 36 | 0 | 36 | 12 | 14 | 24 | 17 | 32 | 25 |
| | 24 | 61 | 109 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 | |
|-----------|----|-----|----|-----|----|----|----|----|----|-----|-----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|----|----|----|
| Periodo 5 | 1 | 0 | 24 | 70 | 6 | 73 | 40 | 31 | 43 | 48 | 107 | 4 | 5 | 11 | 10 | 11 | 2 | 5 | 34 | 1 | 19 | 96 | 90 | 100 | 61 | 44 | 46 | 118 | 94 | 48 | 59 |
| | 2 | 36 | 0 | 21 | 5 | 37 | 26 | 16 | 42 | 76 | 117 | 30 | 6 | 11 | 19 | 12 | 3 | 20 | 5 | 2 | 27 | 72 | 20 | 103 | 36 | 12 | 40 | 28 | 85 | 27 | 27 |
| | 3 | 23 | 36 | 0 | 18 | 13 | 19 | 77 | 17 | 29 | 93 | 21 | 5 | 9 | 6 | 23 | 8 | 21 | 15 | 6 | 29 | 27 | 61 | 70 | 14 | 85 | 51 | 62 | 78 | 45 | 34 |
| | 4 | 78 | 55 | 16 | 0 | 56 | 47 | 72 | 13 | 100 | 54 | 32 | 2 | 12 | 24 | 4 | 4 | 9 | 33 | 11 | 13 | 19 | 99 | 61 | 52 | 84 | 20 | 58 | 49 | 52 | 71 |
| | 5 | 31 | 32 | 59 | 19 | 0 | 24 | 65 | 15 | 42 | 56 | 12 | 4 | 3 | 9 | 19 | 6 | 20 | 15 | 7 | 17 | 109 | 127 | 182 | 26 | 38 | 49 | 25 | 57 | 52 | 32 |
| | 6 | 77 | 7 | 21 | 10 | 10 | 0 | 10 | 43 | 12 | 47 | 31 | 3 | 13 | 12 | 13 | 5 | 18 | 21 | 8 | 26 | 47 | 111 | 27 | 90 | 100 | 64 | 59 | 54 | 15 | 77 |
| | 7 | 28 | 36 | 121 | 22 | 18 | 28 | 0 | 32 | 98 | 96 | 27 | 6 | 8 | 16 | 3 | 4 | 21 | 33 | 8 | 12 | 68 | 70 | 168 | 73 | 32 | 49 | 116 | 95 | 19 | 92 |
| | 8 | 74 | 24 | 88 | 30 | 66 | 35 | 71 | 0 | 21 | 107 | 26 | 1 | 15 | 19 | 8 | 2 | 9 | 13 | 9 | 19 | 24 | 133 | 197 | 70 | 87 | 38 | 61 | 42 | 30 | 60 |
| | 9 | 38 | 44 | 121 | 16 | 13 | 28 | 59 | 4 | 0 | 63 | 19 | 6 | 13 | 13 | 8 | 1 | 16 | 12 | 4 | 29 | 15 | 19 | 123 | 38 | 56 | 47 | 81 | 93 | 30 | 61 |
| | 10 | 91 | 53 | 121 | 30 | 27 | 15 | 31 | 41 | 88 | 0 | 10 | 6 | 3 | 20 | 12 | 3 | 2 | 8 | 4 | 12 | 29 | 129 | 93 | 51 | 74 | 13 | 116 | 54 | 41 | 65 |
| | 11 | 31 | 49 | 113 | 17 | 89 | 31 | 33 | 29 | 15 | 56 | 0 | 2 | 13 | 9 | 6 | 4 | 15 | 31 | 7 | 11 | 47 | 122 | 22 | 42 | 110 | 40 | 128 | 95 | 24 | 51 |
| | 12 | 40 | 39 | 78 | 22 | 39 | 32 | 76 | 17 | 97 | 91 | 25 | 0 | 8 | 15 | 16 | 5 | 12 | 26 | 9 | 19 | 21 | 140 | 98 | 99 | 12 | 25 | 39 | 64 | 14 | 67 |
| | 13 | 16 | 56 | 86 | 14 | 86 | 24 | 16 | 23 | 20 | 80 | 21 | 6 | 0 | 25 | 5 | 7 | 14 | 6 | 10 | 16 | 120 | 133 | 22 | 104 | 25 | 57 | 73 | 24 | 25 | 66 |
| | 14 | 10 | 33 | 123 | 22 | 91 | 36 | 44 | 12 | 17 | 19 | 18 | 1 | 8 | 0 | 3 | 1 | 20 | 9 | 6 | 23 | 59 | 46 | 99 | 104 | 32 | 47 | 29 | 23 | 8 | 67 |
| | 15 | 100 | 45 | 81 | 20 | 63 | 5 | 47 | 41 | 61 | 68 | 5 | 4 | 7 | 12 | 0 | 8 | 4 | 7 | 1 | 21 | 28 | 93 | 64 | 78 | 103 | 25 | 31 | 50 | 17 | 11 |
| | 16 | 48 | 26 | 36 | 34 | 43 | 40 | 54 | 32 | 83 | 31 | 19 | 5 | 7 | 22 | 19 | 0 | 13 | 30 | 11 | 23 | 59 | 133 | 38 | 61 | 18 | 63 | 51 | 24 | 13 | 89 |
| | 17 | 10 | 64 | 109 | 27 | 82 | 34 | 76 | 37 | 56 | 29 | 20 | 5 | 2 | 16 | 15 | 6 | 0 | 27 | 11 | 25 | 66 | 48 | 83 | 39 | 34 | 42 | 106 | 46 | 34 | 52 |
| | 18 | 19 | 11 | 50 | 27 | 13 | 7 | 46 | 16 | 76 | 47 | 14 | 6 | 16 | 23 | 5 | 6 | 20 | 0 | 1 | 29 | 61 | 39 | 104 | 69 | 76 | 21 | 84 | 44 | 25 | 23 |
| | 19 | 30 | 16 | 53 | 39 | 18 | 37 | 59 | 13 | 24 | 35 | 23 | 6 | 4 | 4 | 2 | 8 | 18 | 29 | 0 | 26 | 114 | 46 | 93 | 69 | 99 | 18 | 116 | 27 | 34 | 49 |
| | 20 | 73 | 54 | 79 | 30 | 39 | 40 | 70 | 21 | 91 | 31 | 9 | 7 | 11 | 25 | 9 | 1 | 19 | 21 | 10 | 0 | 19 | 69 | 201 | 73 | 101 | 16 | 13 | 63 | 51 | 34 |
| | 21 | 56 | 17 | 78 | 21 | 28 | 37 | 12 | 35 | 93 | 61 | 28 | 1 | 17 | 29 | 13 | 3 | 4 | 16 | 2 | 24 | 0 | 26 | 133 | 17 | 101 | 12 | 111 | 31 | 5 | 88 |
| | 22 | 31 | 61 | 94 | 6 | 95 | 13 | 37 | 33 | 16 | 39 | 4 | 7 | 12 | 29 | 13 | 3 | 5 | 15 | 10 | 19 | 84 | 0 | 138 | 60 | 66 | 46 | 117 | 20 | 24 | 88 |
| | 23 | 18 | 28 | 80 | 29 | 62 | 23 | 28 | 26 | 87 | 75 | 17 | 4 | 12 | 12 | 12 | 3 | 17 | 30 | 5 | 3 | 91 | 145 | 0 | 56 | 50 | 52 | 29 | 50 | 48 | 91 |
| | 24 | 23 | 14 | 61 | 15 | 21 | 25 | 78 | 45 | 47 | 90 | 5 | 4 | 11 | 15 | 19 | 1 | 6 | 22 | 6 | 16 | 87 | 90 | 146 | 0 | 65 | 39 | 85 | 69 | 14 | 79 |
| | 25 | 30 | 40 | 109 | 13 | 14 | 25 | 32 | 42 | 16 | 48 | 18 | 6 | 13 | 3 | 15 | 2 | 6 | 10 | 1 | 9 | 39 | 88 | 80 | 82 | 0 | 17 | 97 | 31 | 36 | 22 |
| | 26 | 67 | 18 | 42 | 32 | 78 | 27 | 13 | 44 | 53 | 26 | 26 | 2 | 13 | 9 | 20 | 5 | 13 | 17 | 10 | 3 | 110 | 53 | 116 | 75 | 15 | 0 | 53 | 62 | 36 | 61 |
| | 27 | 16 | 50 | 33 | 15 | 55 | 6 | 70 | 41 | 11 | 102 | 11 | 2 | 7 | 17 | 22 | 9 | 5 | 6 | 7 | 26 | 57 | 47 | 30 | 93 | 67 | 22 | 0 | 40 | 47 | 52 |
| | 28 | 51 | 48 | 91 | 33 | 58 | 40 | 54 | 40 | 75 | 98 | 21 | 3 | 16 | 12 | 18 | 7 | 5 | 10 | 3 | 29 | 18 | 79 | 49 | 111 | 97 | 65 | 52 | 0 | 35 | 84 |
| | 29 | 99 | 28 | 50 | 38 | 54 | 47 | 8 | 36 | 92 | 65 | 22 | 7 | 16 | 12 | 8 | 7 | 11 | 5 | 2 | 22 | 69 | 118 | 130 | 58 | 103 | 39 | 41 | 50 | 0 | 10 |
| | 30 | 13 | 8 | 58 | 21 | 93 | 24 | 24 | 32 | 64 | 94 | 19 | 2 | 2 | 27 | 12 | 1 | 7 | 21 | 8 | 15 | 116 | 40 | 60 | 79 | 33 | 68 | 49 | 75 | 51 | 0 |

Costo de reordenamiento por departamento

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 557 | 833 | 560 | 618 | 551 | 741 | 792 | 895 | 983 | 813 | 671 | 780 | 623 | 634 | 695 | 580 | 832 | 693 | 935 | 758 | 585 | 816 | 645 | 854 | 715 | 978 | 634 | 736 | 702 | 679 |

2. Distancias entre locaciones.

- 6 DEPARTAMENTOS

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 1 | 2 |
| 3 | 2 | 1 | 0 | 3 | 2 | 1 |
| 4 | 1 | 2 | 3 | 0 | 1 | 2 |
| 5 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 | 1 |
| 6 | 3 | 2 | 1 | 2 | 1 | 0 |

- 15 DEPARTAMENTOS

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

• 30 DEPARTAMENTOS

| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 | 21 | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
|----|---|---|---|---|---|---|---|---|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
| 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
| 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 4 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 5 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 3 | 2 | 4 | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 3 | 4 | 5 | 6 | 6 | 5 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 6 | 5 | 4 | 3 | 4 | 5 | 7 | 6 | 5 | 4 | 5 | 6 |
| 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 4 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 5 |
| 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 |
| 7 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 8 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 4 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 9 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 10 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 6 | 5 | 4 | 3 | 4 | 5 |
| 11 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 4 |
| 12 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 |
| 13 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 14 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 15 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 16 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 |
| 17 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 |
| 18 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 |
| 19 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| 20 | 4 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 21 | 5 | 4 | 3 | 4 | 5 | 6 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 22 | 6 | 5 | 4 | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 |
| 23 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 4 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 |
| 24 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 |
| 25 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 26 | 5 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 4 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 27 | 6 | 5 | 4 | 5 | 6 | 7 | 5 | 4 | 3 | 4 | 5 | 6 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 5 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 4 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 | 3 |
| 28 | 7 | 6 | 5 | 4 | 5 | 6 | 6 | 5 | 4 | 3 | 4 | 5 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 | 4 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 | 2 |
| 29 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 5 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 4 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 3 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 2 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 | 1 |
| 30 | 9 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 8 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 7 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 6 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 5 | 4 | 3 | 2 | 1 | 0 |

1.2 Creación de variables

```
##### CREACION DE VARIABLES #####
#####
[m,n,nPer] = size(MatFluj);

MatSol=zeros (nPer,n,Cri6);
MatPisc=zeros (nPer,n,Cri6);
VecFSol=zeros (Cri6,1);
VecFSolPisc=zeros (Cri6,1);
nMejSol=0;
E=zeros (Cri6,1);
VecTorneo=zeros (Cri6,1);
MatPar=zeros (nPer,n,2);
MatHij=zeros (nPer,n,2);
PadMad=zeros (2,1);
Par=zeros (2,1);
nH=0;
VecHij=zeros (1,n);

cont=0;
cont2=0;

MatList=[0,0];
IntPar=zeros (Cri3,4);
A=zeros (Cri3,1);
B=zeros (Cri3,1);
C=zeros (Cri3,1);
D=zeros (Cri3,1);
K=zeros (Cri3,1);

busqueda=true;
MejF=0;

SolAct=zeros (nPer,n);
SolMod=zeros (nPer,n);

VecRand=zeros (1,n);

MatAl=nchoosek (1:n,2);
nComb=size (MatAl);
MatAleatorio=zeros (nComb(1),4);
MatAleatorio (:,1)=MatAl (:,1);
MatAleatorio (:,2)=MatAl (:,2);
VectAleatorio=zeros (1,nComb(1));

pAct=1;
FCons=0;
nP=0;
p=0;
nVec=0;
nInt=0;
proceso=false;
```

1.3 Búsqueda tabú

```
for p=1:5
    VecRand=randperm(n);
    SolAct(p,1)=VecRand(1);
    SolAct(p,2)=VecRand(2);
    SolAct(p,3)=VecRand(3);
    SolAct(p,4)=VecRand(4);
    SolAct(p,5)=VecRand(5);
    SolAct(p,6)=VecRand(6);
end

SolMod=SolAct;

tic

for nP=1:Cri1 %% Ciclos de periodo

    pAct=randi([1 nPer],1);

    %% Hacer ciclos fijos para no repetir en los ciclos y
    %% cuando F=0 para evaluar por primera vez la funci?n

    F=0;

    for p=1:nPer
        if(p~=pAct)
            for j=1:m
                for i=1:n
                    if(i~=j)
                        F=F+MatDist(j,i)*MatFluj(SolAct(p,j),SolAct(p,i),p);
                    end
                end
            end
        end
    end

    for p=2:nPer
        if((p~=pAct)&&(p~=pAct+1))
            for j=1:n
                if(SolAct(p,j)~=SolAct(p-1,j))
                    F=F+VecReac(SolAct(p,j));
                end
            end
        end
    end

    FCons=F;

    for nVec=1:Cri2 %% Ciclos de vecindarios evaluados
```

1.3.1 Evaluar vecindarios

```
for nVec=1:Cri2 %% Ciclos de vecindarios evaluados

    VectAleatorio=randperm(nComb(1)); %% Para los intercambios por vecindario

    for nInt=1:Cri3 %% Ciclos de intercambio dentro del vecindario

        IntPar(nInt,1)=MatAleatorio(VectAleatorio(nInt),1);
        IntPar(nInt,2)=MatAleatorio(VectAleatorio(nInt),2);
        SolMod=SolAct;
        SolMod(pAct,IntPar(nInt,1))=SolAct(pAct,IntPar(nInt,2));
        SolMod(pAct,IntPar(nInt,2))=SolAct(pAct,IntPar(nInt,1));

        p=pAct;
        F=0;
        for j=1:m
            for i=1:n
                if(i~=j)
                    F=F+MatDist(j,i)*MatFluj(SolMod(p,j),SolMod(p,i),p);
                end
            end
        end

        for p=pAct:pAct+1
            if((p<=nPer) && (p>1))
                for j=1:n
                    if(SolMod(p,j)~=SolMod(p-1,j))
                        F=F+VecReac(SolMod(p,j));
                    end
                end
            end
        end

        F=F+FCons;
        IntPar(nInt,3)=F; %% Almacenar valor de la funci?n para cada intercambio
        IntPar(nInt,4)=VectAleatorio(nInt); %% Para buscar en matriz aleatoria que sirve de lista tab?

    if(nMejSol<=Cri5)
        if(nMejSol<Cri5)
            nMejSol=nMejSol+1;
        end
        if (nMejSol==1)
            MatSol(:,nMejSol)=SolMod;
            VecFSol(nMejSol)=F;
        else
            cont=1;
            while ((VecFSol(cont)<F) && (VecFSol(cont)~=0) && (cont<Cri6))
                cont=cont+1;
            end
        end
    end
end
```

```

|
if(cont<=Cri5)
  if(VecFSol(cont)~=0)
    for cont2=(Cri5-1):-1:cont
      MatSol(:, :, (cont2+1))=MatSol(:, :, cont2);
      VecFSol(cont2+1)= VecFSol(cont2);
    end
  end
  MatSol(:, :, cont)=SolMod;
  VecFSol(cont)=F;
end
end
%
end

if (MejF==0)
  MejF=F;
  SolAct=SolMod;
else
  if(F<MejF)
    MejF=F;
    %%% Para acomodar en lista de mejores soluciones
    cont=1;
    while ((VecFSol(cont)<F) && (VecFSol(cont)~=0))
      cont=cont+1;
    end
    if(cont<Cri5)
      if(VecFSol(cont)~=0)
        for cont2=(Cri5-1):-1:cont
          MatSol(:, :, (cont2+1))=MatSol(:, :, cont2);
          VecFSol(cont2+1)= VecFSol(cont2);
        end
      end
      MatSol(:, :, cont)=SolMod;
      VecFSol(cont)=F;
    end
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
  end
end
end

for nInt=1:nComb(1)
  if(MatAleatorio(nInt,3)==true)
    if(nVec>(MatAleatorio(nInt,4)+Cri4))
      MatAleatorio(nInt,3)=false;
    end
  end
end
end
end

```

```

A=IntPar(:,1);
B=IntPar(:,2);
D=IntPar(:,4);
[C,k] = sort(IntPar(:,3));
IntPar=[A(k) B(k) C D(k)];

proceso=true;
nInt=0;
while(proceso)
    nInt=nInt+1;
    if(MatAleatorio(IntPar(nInt,4),3)==true)
        if(IntPar(nInt,3)<MejF)
            MatAleatorio(IntPar(nInt,4),4)=nVec;
            SolMod=SolAct;
            SolMod(pAct,IntPar(nInt,1))=SolAct(pAct,IntPar(nInt,2));
            SolMod(pAct,IntPar(nInt,2))=SolAct(pAct,IntPar(nInt,1));
            SolAct=SolMod;
            proceso=false;
        end
    else
        MatAleatorio(IntPar(nInt,4),3)=true;
        MatAleatorio(IntPar(nInt,4),4)=nVec;
        SolMod=SolAct;
        SolMod(pAct,IntPar(nInt,1))=SolAct(pAct,IntPar(nInt,2));
        SolMod(pAct,IntPar(nInt,2))=SolAct(pAct,IntPar(nInt,1));
        SolAct=SolMod;
        proceso=false;
    end
end
end

MatAleatorio(:,3)=zeros(nComb(1),1);
MatAleatorio(:,4)=zeros(nComb(1),1);

end

X = ['Busqueda Tabú: ',num2str(MejF)];
disp(X);

X = 'Distribucion: ';
disp(X);

for p=1:nPer
    X= mat2str(MatSol(p, :, 1));
    disp(X);
end
    toc
    tic

```

1.4 Algoritmo Genético

```
##### Algoritmo genético #####
#####

if(Cri5<Cri6)
    for cont=Cri5+1:Cri6
        for p=1:nPer
            VecRand=randperm(n);
            MatSol(p,:,cont)=VecRand;
        end

        SolAct=MatSol(:, :, cont);
        F=0;

        for p=1:nPer
            for j=1:m
                for i=1:n
                    if(i~=j)
                        F=F+MatDist(j,i)*MatFluj(SolAct(p,j),SolAct(p,i),p);
                    end
                end
            end
        end

        for p=2:nPer
            for j=1:n
                if(SolAct(p,j)~=SolAct(p-1,j))
                    F=F+VecReac(SolAct(p,j));
                end
            end
        end
        VecFSol(cont)=F;
    end
end

E=randperm(Cri6); %% Para desordenar la piscina de algoritmo genético

for cont=1:Cri6
    MatPisc(:, :, cont)=MatSol(:, :, E(cont));
    VecFSolPisc(cont)=VecFSol(E(cont));
end

for cont=1:Cri7
    VecTorneo=randperm(Cri6); %% Para seleccionar los 4 participantes d
```

1.4.1 Selección de padres por medio de torneo

```
%%% Torneo %%%  
%  
if (VecFSolPisc (VecTorneo (1)) >= VecFSolPisc (VecTorneo (2)))  
    MatPar (:, : , 1) = MatPisc (:, : , VecTorneo (2));  
else  
    MatPar (:, : , 1) = MatPisc (:, : , VecTorneo (1));  
end  
  
if (VecFSolPisc (VecTorneo (3)) >= VecFSolPisc (VecTorneo (4)))  
    MatPar (:, : , 2) = MatPisc (:, : , VecTorneo (4));  
else  
    MatPar (:, : , 2) = MatPisc (:, : , VecTorneo (3));  
end
```

1.4.2 Apareamiento

```
%%%%%%%%% Apareamiento %%%%%%%%%  
  
MatHij=zeros (nPer, n, 2);  
  
%%%%%%%%% Hijos 1 y 2 %%%%%%%%%  
  
for nH=1:2  
    for nP=1:nPer  
        if (nH==1)  
            PadMad=[2 1];  
        else  
            PadMad=[1 2];  
        end  
        for cont2=1:n  
            Par=PadMad;  
            PadMad (Par==1)=2; PadMad (Par==2)=1;  
            if (MatPar (nP, cont2, PadMad (1)) == MatPar (nP, cont2, PadMad (2)))  
                MatHij (nP, cont2, nH) = MatPar (nP, cont2, PadMad (1));  
            else  
                if (find (MatHij (nP, :, nH) == MatPar (nP, cont2, PadMad (1))))  
                    else  
                        MatHij (nP, cont2, nH) = MatPar (nP, cont2, PadMad (1));  
                    end  
                end  
            end  
        end  
    end  
end  
  
for nP=1:nPer  
    VecRand=randperm (n);  
    VecHij=MatHij (nP, :, nH);  
  
    [Res, Pos]=setdiff (VecRand, MatHij (nP, :, nH));  
    Pos=sort (Pos);  
    VecHij (VecHij==0) = VecRand (Pos);  
    MatHij (nP, :, nH) = VecHij;  
  
end  
  
SolAct=MatHij (:, :, nH);  
F=0;  
  
for p=1:nPer  
    for j=1:m  
        for i=1:n  
            if (i~=j)  
                F=F+MatDist (j, i) * MatFluj (SolAct (p, j), SolAct (p, i), p);  
            end  
        end  
    end  
end
```

```

        F=F+MatDist(j,i)*MatFluj(SolAct(p,j),SolAct(p,i),p);
    end
end
end
end
for p=2:nPer
    for j=1:n
        if(SolAct(p,j)~=SolAct(p-1,j))
            F=F+VecReac(SolAct(p,j));
        end
    end
end
end

```

1.4.3 Mutación

```

%%Mutaci?n
for nP=1:nPer
    VecHij=MatHij(nP,:,nH);
    VecRand=randperm(n);
    MatHij(nP,VecRand(1),nH)=VecHij(VecRand(2));
    MatHij(nP,VecRand(2),nH)=VecHij(VecRand(1));
end

SolAct=MatHij(:, :, nH);
F=0;

for p=1:nPer
    for j=1:m
        for i=1:n
            if(i~=j)
                F=F+MatDist(j,i)*MatFluj(SolAct(p,j),SolAct(p,i),p);
            end
        end
    end
end

for p=2:nPer
    for j=1:n
        if(SolAct(p,j)~=SolAct(p-1,j))
            F=F+VecReac(SolAct(p,j));
        end
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if(F~=MejF)
    [Res,Pos]=max(VecFSolPisc);
    if (F<Res)
        MatPisc(:, :, Pos)=SolAct;
        VecFSolPisc(Pos)=F;
    end
end

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

1.5 Resultados

```
##### Resultados #####
[VecFSol,k]=sort(VecFSolPisc); %% Para ordenar los resultados de la piscina de algoritmo gen?tico
for cont=1:Cri6
    MatSol(:,:,cont)=MatPisc(:,:,k(cont));
end
MejF=min(VecFSol);
X = ['Algoritmo Gen?tico: ',num2str(MejF)];
disp(X);
X = 'Distribucion: ';
disp(X);
for p=1:nPer
    X= mat2str(MatSol(p,:,1));
    disp(X);
end
toc
#####
beep
```

ANEXO C: Artículo

SOLUCIÓN AL PROBLEMA DE DISTRIBUCIÓN DE PLANTA DINÁMICO (DFLP) PARA INSTALACIONES DE ÁREAS IGUALES MEDIANTE EL HÍBRIDO BÚSQUEDA TABÚ - ALGORITMO GENÉTICO.

MSc. CARLOS EDUARDO DÍAZ BOHÓRQUEZ

Ingeniería Industrial

Universidad Industrial de Santander

DANIEL ENRIQUE ANDRADE PEÑA

Ingeniería Industrial

Universidad Industrial de Santander

LUIS FERNANDO RODRÍGUEZ JIMÉNEZ

Ingeniería Industrial

Universidad Industrial de Santander

Resumen:

La importancia de las metaheurísticas se ve reflejada cuando la complejidad del problema de distribución de planta dinámico aumenta (mayor número de periodos y/o departamentos), ya que los métodos exactos no logran encontrar buenas soluciones. El principal objetivo de este artículo es modelar el problema de distribución de planta dinámico (DFLP), mediante un híbrido entre Búsqueda tabú - Algoritmo genético, con el fin de comparar los resultados obtenidos con los hallados por otros autores que aplicaron diferentes métodos al propuesto en este artículo. Para lograr este objetivo, en primer lugar se realiza una documentación y revisión bibliográfica del DFLP a través del tiempo y se define la estructura básica para resolver el problema, posteriormente se procede a formular, desarrollar y ejecutar el algoritmo propuesto. Finalmente, se realiza un análisis de los resultados donde se puede apreciar la eficacia del híbrido en comparación con otros métodos de solución al problema.

Palabras clave: Problema de distribución de plantas (FLP), Problema de distribución de plantas dinámico (DFLP), meta-heurísticas, búsqueda tabú, algoritmo genético, MATLAB

Resumen:

La importancia de las metaheurísticas se ve reflejada cuando la complejidad del problema de distribución de planta dinámico aumenta (mayor número de periodos y/o departamentos), ya que los métodos exactos no logran encontrar buenas soluciones. El principal objetivo de este artículo es abordar el DFLP, mediante un híbrido entre Búsqueda tabú - Algoritmo genético, con el fin de comparar los resultados obtenidos con los hallados por otros autores que aplicaron diferentes métodos al propuesto en este artículo. Para lograr este objetivo, en primero lugar se realiza una documentación y revisión bibliográfica del DFLP a través del tiempo y se define la estructura básica para resolver el problema, posteriormente se procede a formular, desarrollar y ejecutar el algoritmo propuesto. Finalmente se realiza un análisis de los resultados donde se puede apreciar la eficacia del híbrido al encontrar buenas soluciones al problema.

Keywords: Facility layout problem (FLP), Dynamic facility layout problem (DFLP), Meta-heuristics, Tabu search, Genetic algorithm, MATLAB.

1. Introducción

Uno de los problemas de mayor impacto sobre los costos de muchas industrias es la inadecuada distribución de Planta (FLP, por sus siglas en inglés). Por esto, es uno de los problemas más abordados en la mayoría de sistemas de manufactura (Singh, S. P. & Sharma, 2005) [1].

Sin embargo, en los actuales entornos corporativos rápidamente cambiantes, las fábricas están pasando por períodos de expansión, transformación o declive. Por ejemplo, cambios rápidos de una línea de productos a otro y/o suspensión de las líneas de producción existentes suele ser común, especialmente en las industrias de alta tecnología. Para mantenerse al día con el ritmo del entorno, la distribución de las instalaciones tiene que ser adaptable a los cambios (Gary Yu-Hsin Chen. 2013) [2] en el diseño de productos, diseño de procesos, y diseño de programación de actividades (Tompkins et al., 2003) [3]. Por ello, es de gran importancia evolucionar el sistema de distribución de planta clásico (FLP) a una

distribución de planta dinámica que considere y optimice los constantes cambios de la industria.

En este artículo se propone una solución al problema de distribución de planta dinámico por medio de un algoritmo híbrido que combina la búsqueda tabú con un algoritmo genético. Lo anterior con el fin de comparar la solución con las existentes en la literatura obtenidas por diferentes métodos y de esta forma identificar alternativas de solución al problema y al entorno empresarial.

2. Revisión de la literatura

2.1 Evolución histórica:

El problema de Distribución de Planta ha sido abordado desde diferentes puntos de vista: hay diversidad de artículos que proponen bien sea un análisis dinámico, estático, de un solo nivel o múltiples. A continuación se hará un breve recuento a

partir de las investigaciones más sobresalientes al respecto:

En 1957, Koopman y Beckman [5] consideraron el FLP a partir de un diseño estático, buscando minimizar los costos de transporte de material entre instalaciones.

En 1999, Meller, Narayanan y Vance [8] consideran que en el FLP se debe hallar un arreglo plano ortogonal de n departamentos, iguales o desiguales donde éstos no se superpongan entre ellos dentro de una superficie rectangular, con el fin de minimizar la distancia recorrida entre estos, de acuerdo con el flujo del producto.

Lee and Lee en el 2002 [9] consideraron el FLP como una distribución de departamentos con áreas desiguales y de diferentes tamaños en un espacio dado, el cual estaría limitado por el largo o ancho de la planta, de manera tal que se minimice el costo de manejo de material y el espacio ocioso.

Dos años después, Shayan y Chitilappilly [10] proponen estudiar el FLP como un problema de optimización que realiza las distribuciones más eficientemente, basándose en la interacción entre los departamentos y los sistemas de manejos de material.

Sin embargo, ciertos casos de la vida real demostraron las variaciones de flujo de materiales que se dan en ciertos períodos de tiempo. Por ello, Kouvelis (1992) [7] aborda el problema de una distribución dinámica, conociendo a fondo esas variaciones o “estaciones” y lo recomienda siempre y cuando sea rentable.

Tompkins en 2003 [3] empieza a plantear que el diseño de una planta tiene que ser 'suficientemente flexible para adaptarse a los cambios en el diseño de productos,

diseño de procesos y diseño de programación de actividades.

Gary Yu-Hsin Chen en 2013 [2] plantean que la distribución de las instalaciones tiene que ser adaptable a los cambios del entorno.

2.2 Problema de distribución de planta dinámica:

El problema de distribución dinámica de las instalaciones (DFLP) se ocupa de la disposición de los departamentos para minimizar la suma de los costos de manejo de materiales y re-diseño, considerando períodos múltiples.

Los problemas de diseño de plantas son cruciales ya que el manejo de los costos de los materiales está directamente relacionado con la ubicación de los departamentos en las instalaciones. Los modelos dinámicos pueden proporcionar resultados más eficaces para satisfacer las necesidades de los entornos cambiantes, considerando períodos múltiples en lugar de diseños estáticos.

Las fluctuaciones de la demanda entre dos períodos consecutivos, cambios menores pueden resultar con beneficios notables. Las decisiones de reubicar los departamentos están influenciados por el equilibrio entre los costos de re-diseño y de manejo. Por lo general dos casos extremos pueden surgir. Uno de ellos es el caso en que los costos de re-diseño, como resultado de la reubicación, son muy altos y los administradores pueden no estar dispuestos a mover sus departamentos. Por el contrario, los costos de re-diseño pueden ser relativamente bajos en comparación con los costos de manipulación y es preferible una relocalización para reaccionar a las nuevas condiciones. DFLP se encuentra entre estos dos casos. (Ulutas, Berna, 2015) [4].

2.3 Formulación de un modelo de distribución de planta dinámico:

Después de definir las características de los departamentos y la distribución a utilizar, es necesario formular el problema por medio de un modelo matemático para poder solucionarlo, teniendo presente todas las relaciones entre los diferentes elementos.

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 DFLP son las siguientes:

- Minimización de los costos de adaptación de los departamentos.
- Minimización del costo del espacio entre departamentos.
- Minimización del flujo de material.
- Minimización del costo de manejo y manipulación del material.
- Minimización del número de retrocesos y bypassing.
- Minimización de costos de reorganizar las instalaciones de un periodo a otro.

La función objetivo, debe estar 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
- Ubicación de cada instalación en una única localización en cada periodo
- Puntos de entrada y salida de material establecidos
- Distancia mínimas entre instalaciones

Este problema de optimización es considerado de asignación cuadrática (QAP). La planta se divide en bloques rectangulares

de la misma área y forma, a cada bloque se le asigna una instalación.

A continuación se muestra la formulación matemática planteada por Balakrishnan, Cheng, & Wong, (2003):

$$\begin{aligned} \text{Min } Z = & \sum_{t=1}^P \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n f_{tik} d_{tjl} X_{tij} X_{tkl} \\ & + \sum_{t=2}^P \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \sum_{l=1}^n A_{tiji} Y_{tiji} \end{aligned} \quad (1)$$

s.t.

$$\sum_{i=1}^n X_{tij} = 1, \quad j = 1, \dots, n, \quad t = 1, \dots, P, \quad (2)$$

$$\sum_{j=1}^n X_{tij} = 1, \quad j = 1, \dots, n, \quad t = 1, \dots, P, \quad (3)$$

$$\begin{aligned} Y_{tiji} = & X_{(t-1)ij} X_{till}, \\ & i, j, l = 1, \dots, n, \quad t = 2, \dots, P, \end{aligned} \quad (4)$$

Donde P es el número de departamentos del diseño, f_{tik} el flujo del departamento i hasta k en el periodo t, d_{tjl} la distancia entre la instalación j hasta l en el periodo t, X_{tij} es una variable binaria [0,1] que determina la variación de la localización del departamento i en la instalación j en el periodo t, A_{tiji} es el costo de cambiar el departamento i de la localización j a la localización l en el periodo de tiempo t y Y_{tiji} es una variable binaria [0,1] que determina el cambio del departamento i de la localización j a la localización l en el periodo de tiempo t. La función objetivo (1) representa la sumatoria de los costos de flujo por cada par de instalaciones y el costo de reordenar en el periodo de tiempo t. La Ecuación (2) asegura que cada instalación contiene un solo departamento en el periodo de tiempo t, la Ecuación (3) garantiza que cada departamento está

ubicado únicamente en una instalación, y la ecuación (4) establece que la variable toma un valor de 1 solo si el departamento cambia de ubicación en el periodo t . Usualmente el problema de FLP y DFLP se aborda desde representaciones discretas, porque se enfoca en la cercanía entre los departamentos teniendo en cuenta la relación y dependencia entre ellos; pero estas 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.

3. Metodología

El algoritmo planteado en este artículo consiste en combinar 2 técnicas metaheurísticas (Búsqueda tabú y algoritmo genético) para encontrar la solución al problema de distribución de plantas dinámico (DFLP). A continuación se mostrara un ejemplo de la representación de una solución de un problema de 6 departamentos y 5 periodos con el fin de hacer más fácil la comprensión del método (Ver ilustración 10).

Los parámetros a utilizar en este híbrido son los siguientes:

- Parámetro 1: Ciclos de periodo. Se refiere a la cantidad de periodos seleccionados aleatoriamente para ser tratados con búsqueda tabú.
- Parámetro 2: Tamaño del vecindario. Se refiere al número de vecindarios a evaluar por cada ciclo de periodo.
- Parámetro 3: Número de intercambios a realizar en cada vecindario.

- Parámetro 4: Tamaño de la lista tabú. Numero de iteraciones en las que un intercambio está vetado.
- Parámetro 5: Porcentaje de soluciones tomadas de búsqueda tabú para la piscina del algoritmo genético.
- Parámetro 6: Tamaño de la piscina del algoritmo genético.(vale la pena aclarar que el tamaño de la piscina es constante).
- Parámetro 7: Número de apareamientos o cruces a realizar.

La metodología de búsqueda tabú se usa inicialmente con el fin de encontrar buenas soluciones por medio de los siguientes pasos:

Paso 1: Generar una solución inicial aleatoria para cada uno de los periodos (Ver ilustración 10).

Paso 2: Seleccionar aleatoriamente un periodo.

Paso 3: Evaluar vecindario con la función objetivo.

Paso 4: Seleccionar mejor solución del vecindario y guardar el movimiento en la lista tabú.

Paso 5: Almacenar la cantidad de mejores soluciones (Según parámetro 5).

Ya obtenidas las mejores soluciones se inicia la búsqueda de la solución final en el algoritmo genético de la siguiente forma:

Paso 6: Llenar espacios vacíos en la piscina inicial con soluciones aleatorias.

Paso 7: Realizar la selección de padres mediante el método de torneo, el cual consiste en la selección aleatoria de soluciones dentro de la piscina para posteriormente ponerlos a competir obteniendo así los mejores padres y dando oportunidad a cada solución que se encuentre en la piscina .

Paso 8: Hacer el cruce de padres, esto se realiza de la siguiente forma:

Para generar el primer hijo se empieza ubicando las instalaciones iguales en la misma ubicación. 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, queda la tercera casilla queda vacía debido a que la instalación número 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

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

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

Paso 9: Se procede a mutar los dos hijos, esto se hace seleccionando dos instalaciones aleatoriamente e intercambiando los departamentos allí ubicados, Aumentando así la cantidad de soluciones a evaluar.

Paso 10: Evaluar los hijos e hijos mutados en la función objetivo.

Paso 11: Comparar hijos e hijos mutados con las soluciones que se encuentran en la piscina, agregando así los hijos que representen una mejor solución que alguna en la piscina, y eliminando las peores soluciones de esta.

Paso 12: Selección de la mejor solución dentro de la piscina.

Paso 13: Mostrar la distribución de la mejor solución para cada uno de los periodos.

3.2 Estudio computacional:

En este artículo se trabajaron 3 problemas para 6, 15 y 30 departamentos con 5 periodos, para un total de 9 problemas, en los cuales se utilizó el conjunto de datos propuestos por Balakrishnan¹⁵; en estos datos se encuentra el flujo de materiales entre departamentos para cada uno de los periodos y el costo de reacomodación, el cual depende solo del departamento, es decir que no cambia en los diferentes periodos. Los datos fueron generados computacionalmente a partir de una distribución uniforme. El flujo de materiales generado fue ajustado proporcionalmente de forma que la suma de los flujos totales de los periodos de un problema fuera equivalentes, esto se hizo para prevenir que algún periodo dominara sobre los otros. Los costos de reacomodación generados también fueron ajustados proporcionalmente de forma que el costo promedio de reacomodación fuera el 15% del costo promedio del flujo de materiales del departamento. El costo del flujo de materiales es de \$1 por unidad de material, es decir que los datos de flujo de materiales son al mismo tiempo los costos de flujo de materiales. Las distancias entre locaciones son rectangulares, entre los centroides de dos locaciones vecinas equivale a 1 unidad de distancia. Se debe tener en cuenta que la instalación de 6 departamentos es 2x3 locaciones, la de 15 es de 3x5 y la de 30 de 5x6, tal y como se muestran en la en la ilustración 1.

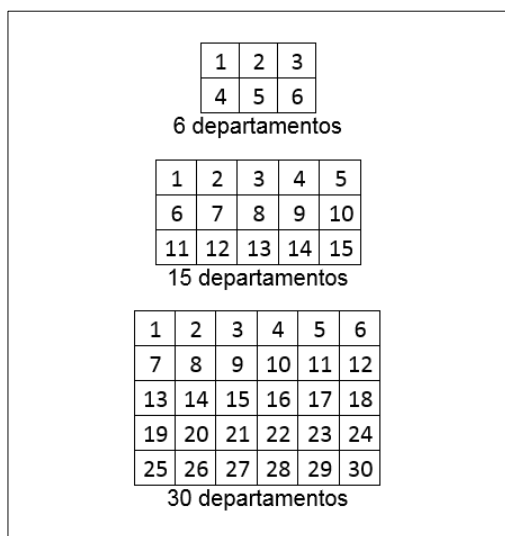
La diferencia entre los 3 problemas se encuentra en los rangos de la distribución uniforme y en el flujo total de materiales.

Balakrishnan y Cheng [6] utilizan este conjunto de datos para probar su algoritmo genético (NLGA). También compararon sus resultados con el algoritmo genético de Conway y Venkataramanan (CONGA) [11]. Los resultados de la comparación entre NLGA y CONGA mostraron que NLGA tiene un mejor rendimiento. También utiliza el mismo conjunto de datos para probar sus ocho implementaciones de programación dinámica (DP) y dos implementaciones de recocido simulado (SA).

4. Resultados:

A continuación se presenta para cada uno de los tamaños de planta los problemas desarrollados con los hallazgos obtenidos mediante el algoritmo híbrido (búsqueda tabú – algoritmo genético).

Ilustración 1 Dimensión matricial de los 3 tamaños de planta



4.1. Escenario de 6 departamentos

Para el escenario de 6 departamentos se realizó la comparación con otras metaheurísticas implementadas por diferentes autores (Ver tabla 1) como Balakrishnan y Cheng (2000)[6] Conway y Venkataramanan (1994)[11], en los 3 problemas se logró la solución óptima (Ver tabla 3). En las combinaciones que se hicieron se logró obtener un alto porcentaje de aciertos, y un error promedio muy bajo en algunas de las combinaciones.

4.2. Escenario de 15 departamentos

Para el escenario de 15 departamentos se realizó la comparación con otras metaheurísticas implementadas por diferentes autores (Ver tabla 2) como Balakrishnan y Cheng (2000)[6], Conway y Venkataramanan (1994)[11], en los problemas se logró encontrar soluciones muy cercanas a las existentes en la literatura (Ver tabla 5), superando en el Problema 2 al 90% de los resultados comparados y en el problema 3 el 76%, para el problema 1 logro encontrarse una mejor solución a la encontrada por los autores.

4.3. Escenario de 30 departamentos

Para el escenario de 30 departamentos se realizó la comparación con otras metaheurísticas implementadas por diferentes autores (Ver tabla 3) como Balakrishnan y Cheng (2000)[6], Conway y Venkataramanan (1994)[11], en los problemas se logró encontrar soluciones muy cercanas a las existentes en la literatura (Ver tabla 7), superando en el problema 2 al 69% de los resultados comparados, y en los problemas 1 y 3 logro encontrarse una mejor solución a la encontrada por los autores.

Tabla 1 Comparación de soluciones 6 departamento

| SOL OPTIMA | HBG | ACO | NLGA | CONGA | DP_10 | DP_10I | DP_5 | DP_5I | SA_EG_1 | SA_EG2 |
|------------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 106.419 | 106.419 | 106.419 | 106.419 | 108.976 | 106.419 | 106.419 | 106.419 | 106.419 | 106.419 | 106.419 |
| 104.834 | 104.834 | 104.834 | 104.834 | 105.17 | 104.834 | 104.834 | 104.834 | 104.834 | 104.834 | 104.834 |
| 104.32 | 104.32 | 104.32 | 104.32 | 104.52 | 104.32 | 104.32 | 104.32 | 104.32 | 104.52 | 104.32 |

Tabla 2 Comparación de soluciones 15 departamentos

| MEJOR SOL | HBG | ACO | NLGA | CONGA | DP_10L | DP_10LI | DP_5L | DP_5LI | DP_10S | DP_10SI | DP_5S | DP_5SI | SA_EG_1 | SA_EG2 |
|-----------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 481.378 | 480.727 | 501.447 | 511.854 | 504.759 | 484.054 | 483.568 | 484.972 | 482.123 | 484.369 | 483.708 | 484.369 | 483.708 | 481.378 | 481.792 |
| 478.816 | 485.813 | 506.236 | 507.694 | 514.718 | 489.322 | 489.322 | 491.102 | 488.84 | 487.274 | 485.702 | 489.819 | 488.382 | 478.816 | 488.592 |
| 487.886 | 491.592 | 512.886 | 518.461 | 516.063 | 491.31 | 491.31 | 493.632 | 493.632 | 491.79 | 491.79 | 493.224 | 492.597 | 487.886 | 492.536 |

Tabla 3 Comparación de soluciones 30 departamentos

| MEJOR SOL | HBG | ACO | NLGA | CONGA | DP_10L | DP_10LI | DP_5L | DP_5LI | DP_10S | DP_10SI | DP_5S | DP_5SI | SA_EG_1 | SA_EG2 |
|-----------|----------------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|
| 579.741 | 576.681 | 604.408 | 611.794 | 632.737 | 581.805 | 579.741 | 583.082 | 581.942 | 581.805 | 579.741 | 582.858 | 581.369 | 583.081 | 583.227 |
| 570.906 | 572.701 | 604.37 | 611.873 | 647.585 | 574.657 | 570.915 | 576.592 | 571.563 | 575.004 | 570.906 | 576.106 | 572.511 | 573.965 | 574.116 |
| 577.402 | 576.725 | 603.867 | 611.664 | 642.295 | 581.03 | 581.03 | 581.691 | 580.549 | 581.17 | 577.402 | 581.262 | 580.186 | 580.102 | 577.787 |

5. Conclusiones:

La formulación del algoritmo debe estar enfocada en recorrer el mayor número de soluciones posibles debido a la gran cantidad (billones) de soluciones que cada problema tiene y las cuales aumentan dependiendo de las instancias como del número de departamentos y periodos.

EL DFLP es un problema de distribución de planta, por esto hace parte de las decisiones estratégicas de una empresa, las cuales requieren de tiempo y cuidado para ser estudiadas ya que son definitivas en un lapso largo de tiempo. En este orden de ideas, los tiempos computacionales presentados en este trabajo y en los demás artículos estudiados podrían ser despreciables en la realidad.

Para cuestiones académicas, se comparan los tiempos computacionales obtenidos con el algoritmo propuesto con los de otros autores, sin embargo, esta comparación cuenta con un alto grado de incertidumbre ya que los tiempos además de depender de la robustez del algoritmo también dependen de las características de los computadores en los cuales se ejecutaron. Adicionalmente vale la pena decir que una gran cantidad de autores no brinda información acerca de sus tiempos o de las especificaciones de sus computadores.

Los resultados obtenidos con el algoritmo son bastantes satisfactorios debido a que no solo se obtuvieron soluciones cercanas (en algunos casos) a las encontradas en la literatura sino también se logra mejorar algunas soluciones presentadas por autores reconocidos, lo que refleja la eficiencia del modelo planteado.

Realizar buenas distribuciones de planta para un periodo determinado, no requiere invertir grandes cantidades de dinero como lo perciben muchas empresas. Gracias a herramientas tan sencillas como las metaheurísticas se pueden obtener excelentes soluciones sin elevar en grandes proporciones los costos por periodo de tiempo.

6. Bibliografía

- [1]. Singh SP, Sharma RRK (2006) A review of different approaches to the facility layout problems. Int J Adv Manuf Technol 30:425–433
- [2]. Chen GYH (2013) A new data structure of solution representation in hybrid ant colony optimization for large dynamic facility layout problems. Int J Prod Econ 142(2):362–371
- [3]. Tompkins, J.A., White, J.A., Bozer, Y.A., Tanchoco, J.M.A., 2003. Facilities Planning, 3rd. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ.
- [4]. Dynamic facility layout problem in footwear industry: Ulutas, Berna
- [5]. Koopmans, T.C y Beckmann, M. “Assignment problems and the location of economic activities”. Econometrica. Vol. 1, No. 25 (1957).
- [6]. Balakrishnan, J., Cheng, C. H., y Wong, K. F. (2003). “FACOPT: A user friendly FACility layout OPTimization system”. Computers & Operations Research, 30(11), 1625–1641.
- [7]. Kouvelis, AA Kurawarwala, GJ Gutierrez . “Algorithms for robust single and multiple period layout planning for manufacturing systemsP” - European journal of operational research, 1992
- [8]. Russell D Meller. “An iterative facility layout algorithm”. International Journal of Production Research, 1999
- [9]. Lee, Y. H., y Lee, M. H. (2002). “A shape-based block layout approach to facility layout problems using hybrid genetic algorithm”. Computers&Industrial Engineering, 42, 237–248.
- [10]. E. Shayan & A. Chittilappilly Genetic algorithm for facilities layout problems based on slicing tree structure”. International Journal of Production Research Volume 42, Issue 19, 2004
- [11]. Conway, Daniel G. and M.A. Venkataramanan. 1994. Genetic search and the dynamic facility layout problem, Computers in Operations Research 21: 955-960.