



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla

Centro Interdisciplinario de Posgrados,

Investigación y Consultoría

Departamento de Ingeniería

Doctorado en Sistemas Integrados de Manufactura y Estrategias de
Calidad

Título de la tesis

Variaciones al CFCLP-TC para Diseño de Cadenas de Suministro Multiobjetivo

Tesis que para obtener el Grado de Doctor
en Sistemas Integrados de Manufactura y Estrategias de Calidad

Presenta

Hertwin Minor Popocatl

Puebla, México.

Julio 2012



UPAEP – Secretaría General

Dirección General de Apoyos Académicos

Dirección del Centro de Recursos para el Aprendizaje y la Investigación.

Biblioteca Central - **Karol Wojtyla**

Tesis Digitales Restricciones de uso:

DERECHOS RESERVADOS ©

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de textos, imágenes, gráficas, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente de donde la obtuvo mencionando el autor o autores involucrados en el documento.

Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.



Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla
Centro Interdisciplinario de Posgrados,

Investigación y Consultoría

Departamento de Ingeniería

Doctorado en Sistemas Integrados de Manufactura y Estrategias
de Calidad

Se aprueba la Tesis:

Variaciones al CFCLP-TC para Diseño de Cadenas de Suministro Multi-
objetivo

Comité de Revisión.

Dr. Elías Olivares Benítez

Director

Dr. José Alfredo Leonardo López de Cosío

Asesor

Dr. José Antonio Aguilar Solís

Asesor

Puebla, México.

Julio 2012

Dedicatoria

A mis padres Abraham e Irene, por su gran apoyo, por saber que siempre y en todo momento puedo contar con ustedes, gracias por estar siempre a mi lado.

A mis hermanos Miriam y Oldair por compartir nuestro tiempo, nuestros exitos y fracasos, gracias por estar conmigo.

A mis amigos y compañeros que siempre me han apoyado y siempre han estado conmigo cuando he necesitado su apoyo, gracias.

Agradecimientos

Deseo expresar mi agradecimiento a la Universidad Politécnica de Tulancingo por haberme brindado el apoyo económico para realizar mis estudios de Doctorado en Sistemas Integrados de Manufactura y Estrategias de Calidad en la UPAEP.

Agradezco especialmente al Dr. Luis Téllez Reyes y al Dr. Cesar Santiago Tepantlán por haber impulsado este proyecto.

Gracias a todos los profesores, compañeros y amigos que me acompañaron en este proceso, sus aportaciones han sido muy valiosas para enriquecer este trabajo.

Resumen

La manufactura moderna incluye todos los procesos inherentes desde el diseño del producto hasta que el mismo es dispuesto después de su utilización, por tanto la distribución del producto desde las plantas de manufactura hasta que llega al cliente forma parte del ciclo de la manufactura.

En este trabajo se estudia un problema de configuración de cadenas de suministro con un enfoque bi-objetivo, que busca acercar los modelos matemáticos a situaciones más flexibles que pueden ocurrir en la realidad.

En el presente trabajo, se revisa el problema de diseño de cadenas de suministro llamado “Problema Capacitado de Localización de Instalaciones con Selección de Transporte”. El problema es basado en una red de distribución de dos-niveles, con múltiples plantas, un conjunto de centros de distribución potenciales y un conjunto de clientes. El problema es formulado como un modelo de optimización con dos funciones objetivo basadas en costo y tiempo. Este trabajo propone tres cambios en el enfoque del modelo original para obtener conjuntos de frentes de Pareto y evaluar su eficiencia.

Con este trabajo se pretende extender la literatura existente por la incorporación los siguientes enfoques: 1).- se propone un enfoque en el cuál el producto pueda ser suministrado a los clientes desde varios centros de distribución, 2.- se propone que los clientes puedan en algunas ocasiones ser suministrados por medio de plantas, sin que el producto pase por los centros de distribución, sin que esto necesariamente implique la eliminación de los centros de distribución, y 3).- se considera el flujo de producto entre centros de distribución para incrementar el nivel de servicio de los clientes. Estos enfoque se tratan de manera separada.

Con los enfoques descritos anteriormente se genera los modelos de programación matemática con un enfoque bi-objetivo, que busca minimizar el costo total y el tiempo en que el producto llega al cliente, se propone resolverlos a través del enfoque del método ϵ -constraint para generar los frentes de Pareto y así comparar cada uno de estos enfoques con el modelo original. Los modelos son implementados en GAMS y resueltos con CPLEX.

Contenido

Resumen

Capítulo 1: Introducción

1.1.- Motivación	1
1.2.- Objetivo General	3
1.3.- Objetivos específicos	3
1.4.- Relevancia	4
1.5.- Organización	4

Capítulo 2: Descripción del problema y modelos matemáticos

2.1.- Descripción del problema	6
2.2.- Modelo matemático (propuesta original)	7
2.3.- Variación que permite el abastecimiento de los clientes (k) por fuentes múltiples (Centros de Distribución (j))	10
2.4.- Variación en el flujo directo de las plantas (i) a los clientes (k)	10
2.4.1.- Modelo matemático (variaciones en el flujo directo entre plantas (i) – clientes (k))	11
2.5.- Variación que permite el flujo entre centros de distribución (j) – (p)	13
2.5.1.- Modelo matemático (variación en el flujo entre centros de distribución de (j) – (p))	14

Capítulo 3: Revisión de la literatura

3.1.- Antecedentes	18
3.2.- Diseño de cadenas de suministro	19
3.2.1.- Aspectos característicos de los modelos de localización de instalaciones	20
3.2.2.- Factores adicionales en el diseño de cadenas de suministro	21
3.2.3.- Planeación de cadenas de suministro multi-periodo	22
3.3.- Problema de localización en cadenas de suministro de dos niveles	23
3.4.- Programación multi-objetivo	24
3.4.1.- Problemas multi-criterio	25
3.4.2.- Método ε -constraint	26
3.4.3.- Métricas de comparación	27
3.5.- Métodos heurísticos y metaheurísticos	30
3.6.- Programación Matemática	31

Capítulo 4: Experimentos y Resultados

4.1.- Instancias en el modelo original	32
4.2.- Instancias para la variación que permite el abastecimiento de los clientes (k) por fuentes múltiples (Centros de Distribución (j))	32
4.3.- Construcción de instancias en la variación que permite el flujo directo de las plantas (i) a los clientes (k)	33
4.4.- Construcción de instancias en la variación que permite el flujo entre centros de distribución (j) – (p)	34
4.5.- Equipo y Software	35
4.6.- Resultados	36
4.6.1.- Resultados de la variación que permite el abastecimiento de los clientes (k) por fuentes múltiples (Centros de Distribución (j))	36
4.6.2.- Resultados de la variación del que permite el flujo directo de las plantas (i) a los clientes (k)	40
4.6.3.- Resultados de la variación que permite el flujo entre centros de	44

distribución (j) – (p)

Capítulo 5: Conclusiones y trabajos futuros

5.1.- Conclusiones	47
5.2.- Trabajos Futuros	49

Referencias	50
--------------------	----

Apéndices

Anexo 1: Resultados del modelo original	56
Anexo 2: Resultados de la variación 1	61
Anexo 3: Resultados de la variación 2	66
Anexo 4: Resultados del modelo original (adaptación para la variación 3)	71
Anexo 5: Resultados de la variación 3	75
Anexo 6: Código en GAMS del modelo original	77
Anexo 7: Código en GAMS de la variación 1	79
Anexo 8: Código en GAMS de la variación 2	81
Anexo 9: Código en GAMS de la variación 3	84

Lista de Tablas

Tabla 4.1: Tamaño de Instancia	32
Tabla 4.2: Resultados de la primera variación	38
Tabla 4.3: Resultados de la segunda variación	42
Tabla 4.4: Resultados de la tercera variación	45

Lista de Figuras y Graficas

Figura 2.1 Esquema del Problema Capacitado de Localización con Costo Fijo con Selección de Transporte(CFCLP-TC).	7
Figura 2.2 Esquema del Problema Capacitado de Localización con Costo Fijo con Selección de Transporte (CFCLP-TC) con variaciones en el flujo directo entre plantas (i) – clientes (k).	11
Figura 2.3 Esquema del Problema Capacitado de Localización con Costo Fijo con Selección de Transporte (CFCLP-TC) con en el variaciones en el flujo entre los centros de distribución	14
Figura 3.1: Red general de una cadena de distribución	
Figura 3.2: Método ε -constraint	
Figura 4.1: Pseudocódigo de implementación de método de ε -constraint (Variación 1)	37
Figura 4.2: Pseudocódigo de implementación de método de ε -constraint (Variación 2)	40
Figura 4.3: Pseudocódigo de implementación de método de ε -constraint (Variación 3)	43
Grafica 4.1: Distribución de arcos con Factor 6	33
Grafica 4.2: Distribución de arcos con Factor 7	34
Grafica 4.3: Distribución de arcos con Factor 8	34
Grafica 4.4: Distribución de arcos para E3 de la Variación 3 (5-5-5-2-001)	35
Grafica 4.5: Distribución de arcos para E3 de la Variación 3 (5-5-5-5-001)	36
Grafica 4.6: Comparación de frentes de Pareto (5-5-5-5-004), variación 1	39
Grafica 4.7: Comparación de frentes de Pareto (5-10-10-2-001), variación 1	39
Grafica 4.8: Comparación de frentes de Pareto (5-10-20-2-004), variación 1	39
Grafica 4.9: Comparación de frentes de Pareto (5-5-5-2-002), variación 2	43
Grafica 4.10: Comparación de frentes de Pareto (5-10-10-2-001), variación 2	43
Grafica 4.11: Comparación de frentes de Pareto (5-10-20-2-005), variación 2	43
Grafica 4.12: Comparación de frentes de Pareto (5-5-5-2-002), variación 3	46
Grafica 4.13: Comparación de frentes de Pareto (5-5-5-5-004), variación 3	46
Grafica 4.14: Comparación de frentes de Pareto (5-5-5-5-005), variación 3	46

Capítulo 1: Introducción

1.1.- Motivación

La manufactura moderna incluye todos los procesos iniciales e intermedios requeridos para la producción y la integración de los componentes de un producto. El ciclo de manufactura se produce normalmente en una interfaz que inicia con el fabricante o distribuidor e incluye todos los procesos involucrados en la reposición de los inventarios. Los procesos implicados en el ciclo de fabricación son las siguientes:

- Ordenes de llegada desde el almacén de producto terminado, distribuidor, minorista o el cliente.
- Programación de la producción.
- Fabricación y cadena de suministro
- Recepción del distribuidor, el vendedor o la atención al cliente.

Desde la década de 1970, la manufactura mundial ha sido testigo de un entorno muy competitivo. Este entorno ha obligado a las empresas a identificar nuevas fuentes de ventajas competitivas. Para muchas empresas, el diseño de cadenas de suministro eficientes ha proporcionado un impulso competitivo, y les ha permitido satisfacer las exigencias de la competencia global.

Mackelprang y Anand (2010) establecen la importancia que existe entre el diseño de las cadenas de suministro y el ciclo de la manufactura por medio de un diseño tipo Justo a Tiempo (JIT). Bozarth et al. (2009) definen el impacto de la complejidad de la cadena de suministro en las plantas de manufactura, donde establece la importancia para mejorar la eficiencia del ciclo de manufactura.

En este contexto, el diseño del sistema de distribución es una cuestión estratégica para casi todas las compañías. Un buen diseño en un cadena de suministros implica generalmente minimizar los costos y los tiempos de suministro. El costo es una medida de efectividad con un único criterio, pero no ocurre lo mismo con el nivel de servicio que suele tener varias medidas como la disponibilidad de productos en inventario, tiempo necesario para liberar el producto al cliente, entre otras. Se busca entonces un equilibrio entre el costo y el nivel de servicio para lograr una ventaja competitiva.

Ballou (1999) divide la planeación de cadenas de suministro en decisiones concernientes a inventarios, transportación y localización de instalaciones. La cadena de suministro, también es conocida como una red de distribución que está compuesta de instalaciones y flujos de transportación entre instalaciones. Estas instalaciones cumplen funciones diferentes, como proveedores, fábricas, depósitos, centros de distribución o minoristas. Las decisiones implicadas en el diseño de cadenas de suministro son (Simchi-Levi et al., 2000):

- Determinar el número de instalaciones
- Determinar la localización de las instalaciones
- Determinar las capacidades de las instalaciones
- Localizar productos en las instalaciones
- Determinar el flujo de productos entre instalaciones

Las decisiones de diseño de red determinan la configuración de la cadena de suministro y tienen un impacto significativo en los costos de la logística y la capacidad de respuesta (Chopra y Meindl, 2007). Para los casos de ubicación de instalaciones se tiene un impacto a largo plazo en la cadena de suministro, por el alto costo de la apertura o movimiento de una instalación. La apertura y los costos de inventarios inducen a reducir el número de instalaciones mientras que la capacidad de respuesta causa el efecto contrario. Un gran número de instalaciones pueden reducir el tiempo para liberar un producto al cliente final. En determinados productos este tiempo puede ser visto como un valor añadido que la empresa proporciona a partir de la posibilidad de obtener ventajas a corto y largo plazo en el mercado.

Muchos modelos desarrollados para el diseño de sistemas de distribución son basados en localización discreta de instalaciones donde un conjunto de sitios potenciales son conocidos previamente. Los primeros modelos fueron formulados por Balinski y Mills (1960), Baumol y Wolfe (1958) y Kuehn y Hamburger (1963). Estos y los subsecuentes modelos han sido formulados como problemas de programación entera - mixta. La evolución de modelos similares ha considerado hasta hace poco (Klose y Drexel, 2005) los siguientes elementos:

- Numero de fases
- Capacidad de la instalación
- Número de productos
- Periodos de tiempo
- Demanda estocástica
- Restricciones que incluyen:
 - Fuentes únicas o múltiples
 - Enrutamiento

Un área que actualmente ha recibido mucha atención por parte de especialistas e investigadores es la del estudio de los canales de transporte. La decisión de utilizar un canal de transportación tiene un cierto efecto sobre el tiempo de espera para entregar un producto que a menudo es un indicador de nivel de servicio al cliente. La disponibilidad de diferentes canales para transportar el producto entre un par de instalaciones es una característica de servicios modernos de logística. Estos canales de transporte pueden ser vistos como modos de transporte (tren, camión, barco, avión, etc.), los servicios de embarque (express, normal, overnight, etc.) o tan simple como la oferta de servicios de diferentes compañías. Las opciones de transportación son diferenciadas por parámetros de tiempo y costo. Comúnmente estos parámetros se correlacionan negativamente con tiempos cortos para las alternativas más caras. Generalmente la distancia era tratada como sustituta de los costos y tiempos de transporte, pero hoy en día esta suposición no es válida.

La separación de los parámetros de costo y tiempo crea un problema bi-objetivo con posibilidad de varias soluciones no dominadas. El diseño del problema de cadenas de suministro debe abordarse teniendo en cuenta la compensación costo-tiempo. A diferencia de los modelos existentes los métodos de solución que aquí se proponen, tratan de generar el conjunto de soluciones no dominadas como alternativas para el tomador de decisiones. El problema ha sido llamado “CapacitatedFixedCostFacilityLocationProblemwithTransportationChoices” (CFCLP-TC) (Problema Capacitado de Localización de Instalaciones con costo fijo con Selección de Transporte), presentado por Olivares-Benitez (2007).

1.2.- Objetivo General

Como objetivo general de esta investigación se plantea evaluar variaciones en el modelo de CFCLP-TC para Diseño de Cadenas de Suministro Multi-objetivo con selección de transporte por medio de software comercial de optimización probando diversas instancias de modo que se determine cuál es el mejor enfoque considerando diferentes canales de distribución

1.3.- Objetivos Específicos

Como objetivos específicos se plantea llevar a cabo las siguientes actividades:

- *Evaluar variaciones en el modelo permitiendo que cada cliente pueda no ser suministrado por una sola fuente (j).*
- *Evaluar variaciones en el modelo permitiendo el flujo directo entre plantas (i)- clientes (k).*
- *Evaluar variaciones en el modelo permitiendo el flujo entre los centros de distribución.*
- *Implementar el método ε -constraint para obtener los conjuntos de soluciones eficientes reflejándolos en el frente de Pareto.*

Los cambios propuestos en el modelo CFCLP-TC permitirán evaluar diferentes configuraciones de la cadena de suministros, considerando los dos objetivos principales, los costos totales y el tiempo de suministro de la cadena. Esto permitirá determinar bajo condiciones específicas de cada caso si los cambios propuestos son convenientes o no lo son, en función de los objetivos planteados.

En el primer caso se propone permitir que los clientes (k) puedan ser suministrados por más de un centro de distribución (j), posibilitando un mayor número de opciones para dicho suministro y de esta forma evaluar el comportamiento de los costos totales de la red de distribución y de los tiempos en cada caso.

En el segundo caso se propone la posibilidad de permitir el flujo de productos desde las plantas (i) a los clientes (k), sin tener que pasar por los centros de distribución (j), lo cual podría afectar los parámetros de costos y tiempos. Los resultados de las instancias con las modificaciones a este modelo, permitirán establecer una mejor configuración de la cadena de suministros.

En el tercer caso se propone permitir el flujo de productos de un centro de distribución (j) a otro centro de distribución (j), dependiendo de la ubicación de estos centros de distribución, el flujo entre estos centros podría afectar de manera positiva los costos totales de la cadena de suministro, de la misma forma y dependiendo de estas condiciones los tiempos podrían ser menores que si se trasladaran los productos desde las plantas (i).

Una de las principales contribuciones de este trabajo es la evaluación de variaciones en el modelo de CFCLP-TC para Diseño de Cadenas de Suministro Multi-objetivo para comparar las diferentes configuraciones de la cadena de suministro que permitan obtener costos más bajos y tiempos más cortos.

1.4.- Relevancia

El problema del diseño de las cadenas de suministro que se ha considerado es el propuesto por Olivares-Benitez (2007) llamado ("CapacitatedFixedCostFacilityLocationProblemwithTransportationChoices" (CFCLP-TC), el cual incluye una decisión acerca de la selección de canales de transportación entre instalaciones. En este problema se utiliza un enfoque bi-objetivo que minimiza simultáneamente el tiempo de transporte del producto de las plantas a los clientes y combina costos de localización de instalaciones y transporte. Este enfoque de solución construye un conjunto de soluciones no dominadas alternativas para el tomador de decisiones.

El CFCLP-TC es una extensión natural del problema no capacitado para la localización de instalaciones (UFLP) y del problema capacitado de localización de instalaciones (CFLP). Daskin (1995) muestra que estos problemas son NP-Hard, por tanto la complejidad inherente del CFCLP-TC es considerada también como NP-Hard.

Con las modificaciones propuestas al modelo se pretende acercar el mismo a escenarios más flexibles y evaluar las respuestas por medio de software comercial de optimización. El modelo CFCLP-TC está basado en un sistema de dos - niveles (two-echelon) para la distribución de un producto en un periodo de tiempo. En el primer paso, las plantas manufactureras envían producto a los centros de distribución. El segundo paso corresponde al flujo de producto de los centros de distribución a los clientes. En el problema el número y localización de plantas y clientes son conocidas. En un conjunto de localizaciones potenciales son abiertos los centros de distribución. El número de centros de distribución potenciales no está definido a priori. Cada sitio candidato tiene un costo fijo para la apertura de una instalación. Cada sitio potencial tiene también una capacidad limitada. Esta capacidad está relacionada a la tasa de envío, la cual depende de factores como limitaciones físicas, equipamiento y productividad de las instalaciones. Las plantas tienen capacidad limitada de manufactura. Esta capacidad representa la producción enviada de cada planta.

Mula et al. (2010) establecen como una de las principales aportaciones que faltan por hacerse en el campo de los modelos matemáticos para el diseño de cadenas de suministro, la consideración de los diferentes canales de distribución en dichos modelos.

El estudio de las variaciones del problema (CFCLP-TC) permitirá establecer la importancia de la selección de los canales de distribución bajo los supuestos descritos anteriormente, de tal forma que este problema se acerque más a escenarios más flexibles que se demandan en los procesos de cadenas de suministros y localización de instalaciones modernos. El desarrollo de esta investigación contribuye pues al desarrollo del estado del arte en un área que no ha sido lo suficientemente explorada.

1.5.- Organización

Las variaciones al CFCLP-TC para Diseño de Cadenas de Suministro Multi-objetivo se describen completamente en el capítulo 2. Aquí se incluye una descripción del modelo matemático original y de las variaciones propuestas. En el capítulo 3 se presenta una revisión completa de la literatura en donde se estudian y discuten problemas similares, así como los métodos de evaluación propuestos en el presente trabajo de modo que se pueda establecer el estado del arte del problema. En el capítulo 4 se describen y

presentan los experimentos computacionales con los modelos propuestos. Aquí se describe la comparación de los frentes de Pareto y su evaluación a través de métricas adecuadas. En el capítulo 5 se muestran las conclusiones del estudio y se plantean extensiones del problema para futuros trabajos.

Capítulo 2: Descripción del problema y modelos matemáticos

2.1- Descripción del problema

El “Problema capacitado de localización de instalaciones con costo fijo y selección de transportación” (CFCLP-TC) propuesto por Olivares-Benitez (2007), está basado en una distribución de dos escalones (two-echelon) de un producto en un periodo de tiempo. En el primer escalón, las plantas de manufactura envían producto a los centros de distribución. El segundo escalón corresponde al flujo de producto de los centros de distribución (j) a los clientes (k). En este problema, el número y localización de las plantas (i) y clientes (k) son conocidos a priori. En este se incluye una decisión adicional acerca de la selección de canales de transportación entre instalaciones. En este problema se utiliza un enfoque bi-objetivo que minimiza simultáneamente el tiempo de transporte del producto de las plantas a los clientes y combina costos de localización de instalaciones y transporte. Este enfoque de solución construye un conjunto de soluciones no dominadas alternativas para el tomador de decisiones.

En este problema se tiene un conjunto de posibles ubicaciones para la apertura de los centros de distribución (j) y su número no está definido previamente. Cada sitio candidato tiene un costo fijo para la apertura de una instalación, y una capacidad limitada. Las plantas de manufactura tienen una capacidad limitada y ésta representa la producción enviada de cada planta.

Una característica importante del problema, es la de considerar varias alternativas de transporte del producto desde una instalación a la otra en cada paso de la red. Cada opción representa un tipo de servicio con costos asociados y parámetros de tiempo. La existencia de empresas de logística de terceros (3PL) hace que se encuentren disponibles distintos servicios de transporte en el mercado. Las alternativas son generadas por la oferta de diferentes compañías, la disponibilidad de diferentes tipos de servicios de cada compañía (urgente o regular), y el uso de diferentes modos de transportación (camión, tren, avión, barco o inter-modal). Comúnmente, estas diferencias involucran una correspondencia inversa entre el tiempo y el costo, donde por ejemplo un servicio rápido es más caro. Se muestra el esquema de la red de distribución en la Figura 2.1.

A partir de las condiciones descritas anteriormente se establece que el flujo de los productos debería ser: Un punto de partida inicial en las plantas (i), para enviar los productos a centros de distribución potenciales (j), y posteriormente enviarlos a los clientes (k), todo esto a partir de varias opciones de traslado entre plantas, los centros de distribución potenciales y los clientes.

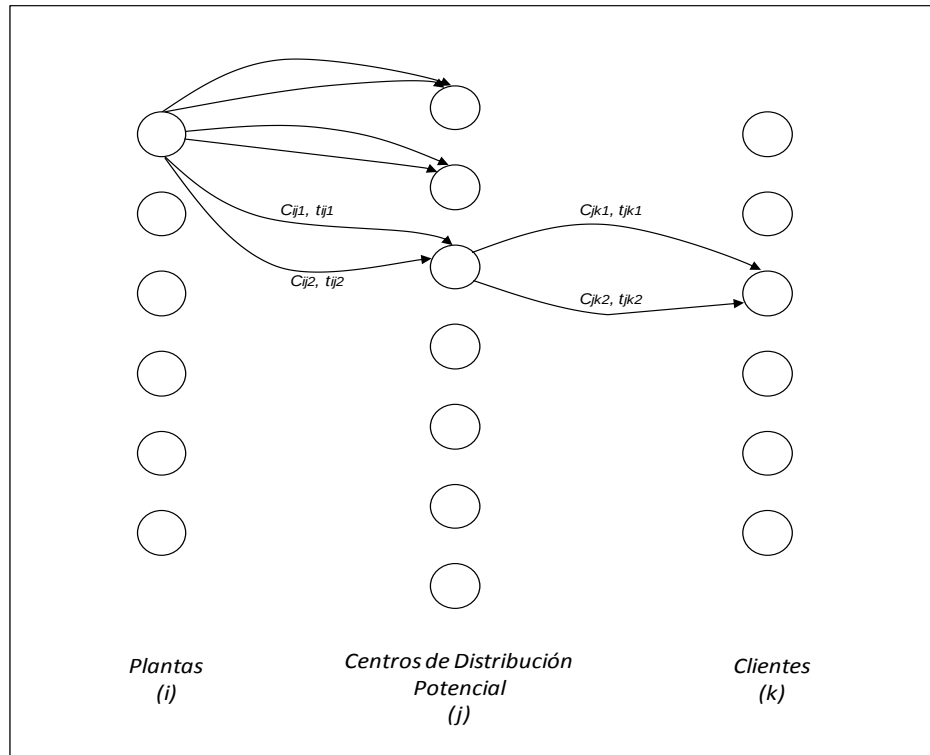


Figura 2.1 Esquema del Problema Capacitado de Localización con Costo Fijo con Selección de Transporte (CFCLP-TC)

2.2.- Modelo matemático (propuesta original)

El problema original descrito anteriormente es representado por un modelo de programación bi-objetivo entero-mixto por Olivares-Benítez (2007) y Olivares-Benítez et al. (2010). La formulación del modelo es precedida por la siguiente notación:

Conjuntos:

- I : conjunto de plantas i
- J : conjuntos de centros de distribución potenciales j
- K : conjunto de clientes k
- LP_{ij} : conjunto de arcos l entre los nodos i y j ; $i \in I, j \in J$
- LW_{jk} : conjunto de arcos l entre los nodos j y k ; $j \in J, k \in K$

Parámetros:

CP_{ijl} : costo de transportar una unidad de producto de la planta i al centro de distribución j usando el arco ijl ; $i \in I, j \in J, l \in LP_{ij}$

CW_{jkl} : costo de transportar una unidad de producto desde el centro de distribución j al cliente k usando el arco jkl ; $j \in J, k \in K, l \in LW_{jk}$

TP_{ijl} : tiempo para transportar cualquier cantidad de producto desde la planta i al centro de distribución j usando el arco ijl ; $i \in I, j \in J, l \in LP_{ij}$

TW_{jkl} : tiempo para transportar cualquier cantidad de producto desde el centro de distribución j al cliente k usando el arco jkl ; $j \in J$, $k \in K$, $l \in LW_{jk}$

MP_i : capacidad de la planta i ; $i \in I$

MW_j : capacidad del centro de distribución j ; $j \in J$

D_k : demanda del cliente k ; $k \in K$

F_j : costo fijo por la apertura del centro de distribución j ; $j \in J$

Variables de decisión:

X_{ijl} : cantidad transportada de la planta i al centro de distribución j usando el arco ijl ; $i \in I$, $j \in J$, $l \in LP_{ij}$

Y_{jkl} : cantidad transportada desde el centro de distribución j al cliente k usando el arco jkl ; $j \in J$, $k \in K$, $l \in LW_{jk}$

Z_j : variable binaria igual a 1 si el centro de distribución j es abierto e igual a 0 en cualquier otro caso; $j \in J$

A_{ijl} : variable binaria igual a 1 si el arco ijl es usado para transportar producto de la planta i al centro de distribución j e igual a 0 en cualquier otro caso; $i \in I$, $j \in J$, $l \in LP_{ij}$

B_{jkl} : variable binaria igual a 1 si el arco jkl es usado para transportar producto desde el centro de distribución j al cliente k e igual a 0 en cualquier otro caso; $j \in J$, $k \in K$, $l \in LW_{jk}$

Variables auxiliares:

T : tiempo máximo que toma enviar producto de cualquier planta a cualquier cliente

E_j^1 : tiempo máximo en el primer escalón de la cadena de suministro a través del centro de distribución j , $E_j^1 = \max(TP_{ijl}A_{ijl})$; $i \in I$, $j \in J$, $l \in LP_{ij}$.

E_j^2 : tiempo máximo en el Segundo escalón de la cadena de suministro a través del centro de distribución j , $E_j^2 = \max(TW_{jkl}B_{jkl})$; $j \in J$, $k \in K$, $l \in LW_{jk}$.

Modelo 1:

$\min(f_1, f_2)$

$$f_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in LP_{ij}} CP_{ijl}X_{ijl} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{l \in LW_{jk}} CW_{jkl}Y_{jkl} + \sum_{j \in J} F_j Z_j \quad (1)$$

Sujeto a

$$f_2 = T \quad (2)$$

$$T - E_j^1 - E_j^2 \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (3)$$

$$\begin{aligned} E_j^1 - TP_{ijl}A_{ijl} &\geq 0 & \forall i \in I, j \in J, l \in LP_{ij} \quad (4) \\ E_j^2 - TW_{jkl}B_{jkl} &\geq 0 & \forall j \in J, k \in K, l \in LW_{jk} \quad (5) \end{aligned}$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in LW_{jk}} Y_{jkl} = D_k \quad \forall k \in K \quad (6)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in LP_{ij}} X_{ijl} = MP_i \quad \forall i \in I \quad (7)$$

$$MW_j Z_j - \sum_{j \in J} \sum_{l \in LW_{jk}} Y_{jkl} \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (8)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in LP_{ij}} X_{ijl} - \sum_{j \in J} \sum_{l \in LW_{jk}} Y_{jkl} = 0 \quad \forall j \in J \quad (9)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in LW_{jk}} B_{jkl} = 1 \quad \forall k \in K \quad (10)$$

$$\sum_{l \in LP_{ij}} A_{ijl} \leq 1 \quad \forall i \in I, j \in J \quad (11)$$

$$\sum_{l \in LW_{jk}} B_{jkl} \leq 1 \quad \forall j \in J, k \in K \quad (12)$$

$$X_{ijl} - A_{ijl} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, l \in LP_{ij} \quad (13)$$

$$Y_{jkl} - B_{jkl} \geq 0 \quad \forall j \in J, k \in K, l \in LW_{jk} \quad (14)$$

$$MP_i A_{ijl} - X_{ijl} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, l \in LP_{ij} \quad (15)$$

$$MW_j B_{jkl} - Y_{jkl} \geq 0 \quad \forall j \in J, k \in K, l \in LW_{jk} \quad (16)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in LP_{ij}} A_{ijl} - Z_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (17)$$

$$T, E_j^1, E_j^2, X_{ijl}, Y_{jkl} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, \quad k \in K, \quad l \in LP_{ij}, l \in LW_{jk} \quad (18)$$

$$Z_j, A_{ijl}, B_{jkl} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J, \quad k \in K, \quad l \in LP_{ij}, l \in LW_{jk} \quad (19)$$

Las ecuaciones (1) y (2) son las funciones objetivo que buscan el mejor costo posible en el menor tiempo posible. La ecuación (3) calcula el tiempo más largo total de cualquier (i) a cualquier (k). Las ecuaciones (4) y (5) calculan el tiempo total en cada escalón respectivamente. La ecuación (6) busca satisfacer la demanda total de los clientes (k). La

ecuación (7) permite que la cantidad transportada de (i) a (j) no exceda la capacidad de la planta (i). La ecuación (8) permite que la cantidad transportada de (j) a (k) no exceda la capacidad del centro de distribución (j). La ecuación (9) permite un balance entre lo que es enviado de (i) a (j) y lo enviado de (j) a (k). La ecuación (10) establece que los clientes (k) solo pueden ser suministrados a través de un solo centro de distribución (j). Las ecuaciones (11) y (12) establecen que la transportación del producto solo podrá realizarse a través de un solo arco. Las ecuaciones (13) y (14) establecen que un arco estará inactivo si no se tiene flujo a través de él. Las ecuaciones (15) y (16) establecen que el envío del producto solo se realizará a través de arcos activos. La ecuación (17) establece que los centros de distribución (j) que no tengan flujo de producto a través de ellos, deberán estar cerrados. Las ecuaciones (18) y (19) establecen la definición de las variables en el modelo.

2.3.- Variación que permite el abastecimiento de los clientes (k) por fuentes múltiples (Centros de Distribución (j))

En el modelo original se establece como restricción que cada cliente será abastecido por una fuente única (centro de distribución (j)). En este punto nos preguntamos ¿Qué ocurriría si se permitiera un suministro a los clientes de múltiples fuentes?. La idea principal de esta variación es permitir que los clientes puedan ser suministrados en algunos casos por más de una fuente (centro de distribución (j)). El cambio propuesto en esta variación al modelo implicara la eliminación de la restricción (10). Con la implementación de esta variación al modelo original estableceremos el comportamiento de las funciones objetivo (1) y (2) para determinar la amplitud y densidad del frente de Pareto y compararlo con el Frente de Pareto del Modelo original. Así mismo estableceremos el comportamiento del tiempo requerido para la obtención de resultados comparados con los obtenidos en el modelo original.

2.4.- Variación en el flujo directo de las plantas (i) a los clientes (k)

En esta variación se propone que para algunos casos las plantas (i) provean a los clientes en una forma directa, es decir sin pasar necesariamente por los centros de distribución (j). La idea principal es debido a que en algunos casos los clientes (k) pueden estar más cerca de las plantas (i) que de los centros de distribución (j), esto podría hacer el flujo más eficiente en términos de costo y tiempos sin considerar los centros de distribución (j). Como en la variación anterior aquí se intenta evaluar la eficiencia de este enfoque a través de la construcción del nuevo frente de Pareto y la evaluación del comportamiento del tiempo computacional requerido. La figura 2.2 muestra el esquema de esta propuesta.

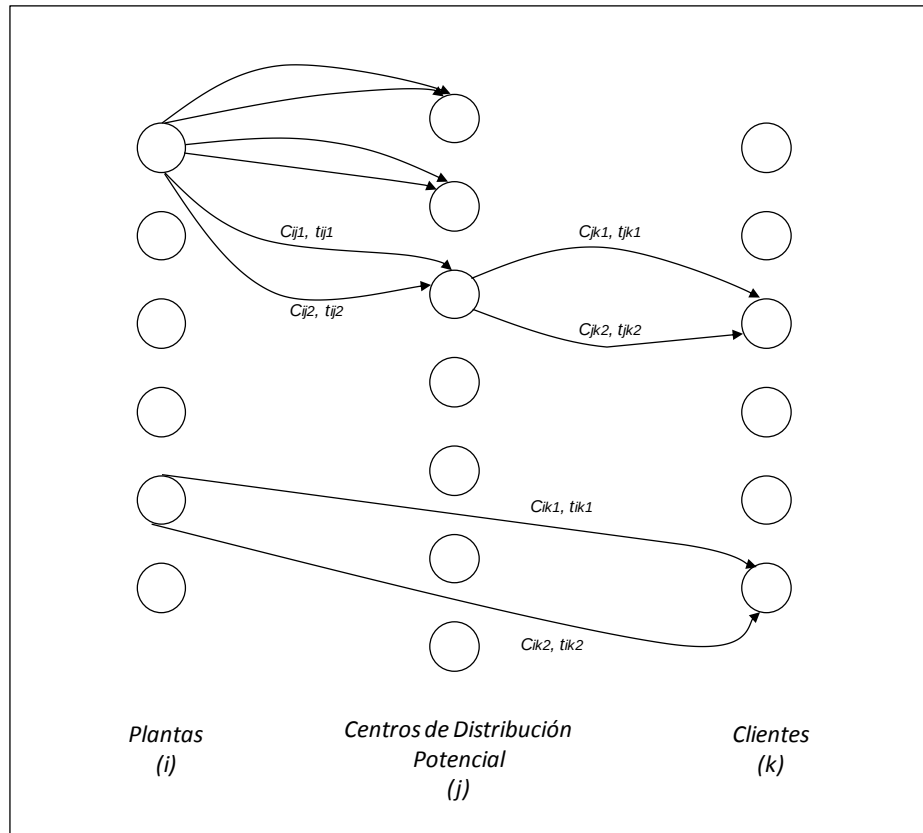


Figura 2.2 Esquema del Problema Capacitado de Localización con Costo Fijo con Selección de Transporte (CFCLP-TC) con variación en el flujo directo entre plantas (i) – clientes (k)

2.4.1.- Modelo matemático (variaciones en el flujo directo entre plantas (i) – clientes (k))

El modelo matemático propuesto para la variación que permite el flujo directo entre plantas (i) y clientes (k) en algunos casos, es como sigue:

Conjuntos:

LV_{ik} : Conjunto de arcos l entre los nodos i y k : $i \in I, k \in K$

Parámetros:

CV_{ikl} : Costo de enviar una unidad de producto de la planta i al cliente k usando el arco ikl : $i \in I, k \in K, l \in LV_{ik}$

TV_{ijl} : Tiempo para transportar cualquier cantidad de producto de la planta i al cliente k usando el arco ikl ; $i \in I, k \in K, l \in LV_{ik}$

Variables de Decisión:

V_{ikl} : Cantidad transportada de la planta i al cliente k usando el arco ikl ; $i \in I$, $k \in K$, $l \in LV_{ik}$

G_{ikl} : Variable binaria igual a 1 si el arco ikl es usado para transportar producto de la planta i al cliente k , e igual a 0 en cualquier otro caso; $i \in I$, $k \in K$, $l \in LV_{ik}$

Variables Auxiliares:

$E3$: Tiempo máximo que toma enviar el producto de i a k , $E3 = \max(TV_{ikl}G_{ikl})$; $i \in I$, $k \in K$, $l \in LV_{ik}$

Modelo 2:

$\min(f_1, f_2)$

$$f_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in LP_{ij}} CP_{ijl} X_{ijl} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{l \in LW_{jk}} CW_{jkl} Y_{jkl} + \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{l \in LV_{ik}} CV_{ikl} V_{ikl} + \sum_{j \in J} F_j Z_j \quad (20)$$

Sujeto a

(2), (3), (4), (5), (8), (9), (11), (12), (13), (14), (15), (16), (17)

$$E3 - TV_{ikl}G_{ikl} \geq 0 \quad \forall i \in I, k \in K, l \in LV_{ik} \quad (21)$$

$$T - E3 \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (22)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in LW_{jk}} Y_{jkl} + \sum_{i \in I} \sum_{l \in LV_{ik}} V_{ikl} = D_k \quad \forall i \in I, \quad \forall k \in K \quad (23)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in LP_{ij}} X_{ijl} + \sum_{i \in I} \sum_{l \in LV_{ik}} V_{ikl} = MP_i \quad \forall i \in I, \quad \forall k \in K \quad (24)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in LV_{ik}} G_{ikl} + \sum_{j \in J} \sum_{l \in LW_{jk}} B_{jkl} = 1 \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (25)$$

$$\sum_{l \in LV_{ik}} G_{ikl} \leq 1 \quad \forall i \in I, k \in K \quad (26)$$

$$V_{ikl} - G_{ikl} \geq 0 \quad \forall i \in I, k \in K, l \in LV_{ik} \quad (27)$$

$$MP_i G_{ikl} - V_{ikl} \geq 0 \quad \forall i \in I, k \in K, l \in LV_{ik} \quad (28)$$

$$T, E_j^1, E_j^2, T3, X_{ijl}, Y_{jkl}, G_{ikl} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, \quad k \in K, \quad l \in LP_{ij}, l \in LW_{jk}, l \in LV_{ik} \quad (29)$$

$$Z_j, A_{ijl}, B_{jkl}, \quad V_{ikl} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J, \quad k \in K, \quad l \in LP_{ij}, l \in LW_{jk}, \quad l \in LV_{ik} \quad (30)$$

En esta nueva formulación la ecuación (20) reemplaza a (1) en la formulación original como la función objetivo que busca el mejor costo. La ecuación (21) se añade al modelo original y esta proporciona el tiempo entre las plantas (i) y los clientes (k). La ecuación (22) calcula el tiempo mayor entre las plantas (i) y los clientes (k). La ecuación (23) reemplaza a la ecuación (6) en el modelo original y ésta busca satisfacer la demanda de los clientes (k). La ecuación (24) reemplaza a la ecuación (7) en el modelo original y esta busca que la cantidad transportada de (i) a (k) no exceda la capacidad de la planta (i). La ecuación (25) reemplaza a la ecuación (10) en el modelo original y ésta establece que los clientes (k) solo puedan ser suministrados a través de una sola fuente. La ecuación (26) se adiciona al modelo original y establece que la transportación del producto solo podrá realizarse a través de un solo arco. La ecuación (27) se adiciona al modelo original y establece que un arco que no tenga flujo a través de él estará inactivo. La ecuación (28) se adiciona al modelo original y establece que el flujo del producto solo se realizará a través de arcos activos. Las ecuaciones (29) y (30) sustituyen a (18) y (19) en el modelo original y establecen el dominio de las variables.

2.5.- Variación que permite el flujo entre centros de distribución (j) – (p)

En esta variación se propone la posibilidad de intercambio de productos entre los centros de distribución (j). Para algunas alternativas esta variación competiría directamente con el flujo de plantas (i) – centros de distribución (j) – plantas (k) con la alternativa flujo de plantas (i) – centros de distribución (j) – centros de distribución (p) - plantas (k). La idea principal es que para algunos casos resulta más económico y más rápido enviar producto de un centro de distribución (j) a un centro de distribución (p) para posteriormente enviarlo a los clientes (k). Como en la variación anterior se intenta evaluar la eficiencia de este enfoque a través de la construcción del nuevo frente de Pareto y la evaluación del comportamiento del tiempo computacional requerido. La figura 1.3 muestra el esquema de esta propuesta. La figura 2.3 muestra el esquema de esta propuesta.

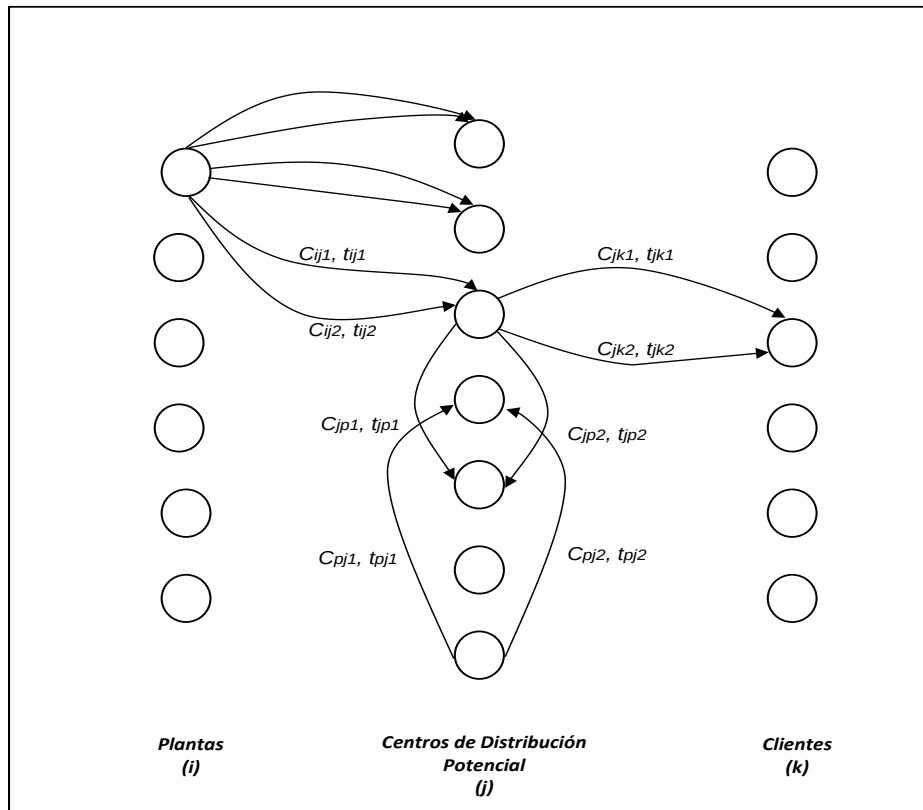


Figura 2.3 Esquema del Problema Capacitado de Localización con Costo Fijo con Selección de Transporte (CFCLP-TC) con en la variación en el flujo entre los centros de distribución

2.5.1.- Modelo matemático (variación en el flujo entre centros de distribución de (j) – (p))

El modelo matemático propuesto para la variación que permite el flujo entre centros de distribución (j) – (p) en algunos casos, es como sigue:

Conjuntos:

LS_{jp} : Conjunto de arcos l entre los nodos $j-p$: $j \in J$

LS_{pj} : Conjunto de arcos l entre los nodos $p-j$: $j \in J$

Parámetros:

CS_{jpl} : Costo de enviar una unidad de producto en los centros de distribución j usando el arco jpl : $j \in J, l \in LS_{jp}$

CS_{pjl} : Costo de enviar una unidad de producto en los centros de distribución p usando el arco pjl : $j \in J, l \in LS_{pj}$

TS_{jpl} : Tiempo para transportar cualquier cantidad de producto en los centros de distribución j usando el arco jpl : $j \in J, l \in LS_{jp}$

TS_{pjl} : Tiempo para transportar cualquier cantidad de producto en los centros de distribución p usando el arco pjl ; $j \in J, l \in LS_{pj}$

Variables de Decisión:

R_{jpl} : Cantidad transportada de j a p usando el arco jpl ; $j \in J, l \in LS_{jp}$

R_{pjl} : Cantidad transportada de p a j usando el arco pjl ; $j \in J, l \in LS_{pj}$

C_{jpl} : Variable binaria igual a 1 si el arco jpl es usado para transportar producto de la dentro de los nodos j , e igual a 0 en cualquier otro caso; $j \in J, p \in P, l \in LS_{jp}$

C_{pjl} : Variable binaria igual a 1 si el arco pjl es usado para transportar producto de la dentro de los nodos p , e igual a 0 en cualquier otro caso; $j \in J, p \in P, l \in LS_{pj}$

Variables Auxiliares:

E_3 : Tiempo máximo que toma enviar el producto usando la alternativa i, j, p, k
 $E_3 = \max(TP_{ijl}A_{ijl}) + \max(TS_{jpl}C_{jpl}) + \max(TW_{pkl}B_{pkl})$; $i \in I, j \in J, l \in LP_{ij}, l \in LS_{jp}, k \in K, l \in LW_{jk}$

E_3 : Tiempo de alternativa i, j, p, k $E_3 = \max_{ijpk}[TP_{ijl} + TS_{jpl} + TW_{pkl}]$,
 $E_3 = \max_{ijpk}[TP_{ijl} + TS_{pjl} + TW_{pkl}]$

M : Valor positivo muy grande.

δ_{jp} : Variable binaria igual a 1 si el arco jpl es utilizado para transportar producto de j a p , e igual a 0 en cualquier otro caso. $j \in J, l \in LS_{jp}$.

δ_{pj} : Variable binaria igual a 1 si el arco pjl es utilizado para transportar producto de p a j , e igual a 0 en cualquier otro caso. $j \in J, l \in LS_{pj}$

Modelo 3:

$\min(f_1, f_2)$

$$f_1 = \sum_{i \in I} \sum_{j \in J} \sum_{l \in LP_{ij}} CP_{ijl} X_{ijl} + \sum_{j \in J} \sum_{k \in K} \sum_{l \in LW_{jk}} CW_{jkl} Y_{jkl} + \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{l \in LS_{jp}} C_{jpl} R_{jpl} + \sum_{j \in J} \sum_{p \in P} \sum_{l \in LS_{pj}} C_{pjl} R_{pjl} + \sum_{j \in J} F_j Z_j$$

Sujeto a

(2), (3), (4), (5), (6), (7), (8), (10), (11), (12), (13), (14), (15), (16)

$$T - E_3 \geq 0 \quad \forall j \in J, \quad (32)$$

$$\sum_{l \in LS_{jp}} C_{jpl} \leq M(1 - \delta_{jp}) \quad \forall j \in J, p \in P \quad (33)$$

$$\sum_{l \in LS_{pj}} C_{pjl} \leq M(1 - \delta_{pj}) \quad \forall j \in J, p \in P \quad (34)$$

$$\sum_{j \in J} \sum_{l \in LS_{jp}} C_{jpl} + \sum_{p \in P} \sum_{l \in LS_{jp}} C_{pjl} \leq 1 \quad \forall j \in J, p \in P \quad (35)$$

$$E3 - \sum_{l \in LP_{ij}} A_{ijl} TP_{ijl} + \sum_{l \in LS_{jp}} C_{jpl} TS_{jpl} + \sum_{l \in LW_{pk}} B_{pkl} TW_{pkl} \geq -M\delta_{jp} \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P, k \in K \quad (36)$$

$$E3 - \sum_{l \in LP_{ij}} A_{ipj} TP_{ipj} + \sum_{l \in LS_{pj}} C_{pjl} TS_{pjl} + \sum_{l \in LW_{pk}} B_{jkl} TW_{jkl} \geq -M\delta_{pj} \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P, k \in K \quad (37)$$

$$MW_j Z_j - \left(\sum_{j \in J} \sum_{l \in LW_{jk}} Y_{jkl} + \sum_{j \in LS_{jp}} R_{jpl} - \sum_{j \in LS_{pj}} R_{pjl} \right) \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (38)$$

$$\sum_{i \in I} \sum_{l \in LP_{ij}} X_{ijl} + \sum_{p \in P} \sum_{l \in LS_{jp}} R_{pjl} - \sum_{k \in K} \sum_{l \in LW_{jk}} Y_{jkl} - \sum_{p \in P} \sum_{l \in LS_{jp}} R_{jpl} = 0 \quad \forall j \in J \quad (39)$$

$$\sum_{l \in LS_{jp}} C_{jpl} \leq 1 \quad \forall j \in J, \quad (40)$$

$$\sum_{l \in LS_{pj}} C_{pjl} \leq 1 \quad \forall j \in J, \quad (41)$$

$$\sum_{p \in P} \sum_{l \in LS_{jp}} C_{jpl} + \sum_{p \in P} \sum_{l \in LS_{jp}} C_{pjl} \leq 1 \quad \forall p \in P, \quad (42)$$

$$R_{jpl} - C_{jpl} \geq 0 \quad \forall j \in J, l \in LS_{jp} \quad (43)$$

$$R_{pjl} - C_{pjl} \geq 0 \quad \forall j \in J, l \in LS_{pj} \quad (44)$$

$$MW_j C_{jpl} - R_{jpl} \geq 0 \quad \forall j \in J, l \in LS_{jp} \quad (45)$$

$$MW_j C_{pjl} - R_{pjl} \geq 0 \quad \forall j \in J, l \in LS_{pj} \quad (46)$$

$$T, E_j^1, E_j^2, E3, X_{ijl}, Y_{jkl}, R_{jpl} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, l \in LP_{ij}, l \in LW_{jk}, l \in LS_{jp} \quad (47)$$

$$Z_j, A_{ijl}, B_{jkl}, C_{jpl}, \delta_{jp} \in \{0, 1\} \quad \forall i \in I, j \in J, k \in K, l \in LP_{ij}, l \in LW_{jk}, l \in LS_{jp} \quad (48)$$

En esta nueva formulación la ecuación (31) sustituye a (1) en el modelo original como función objetivo que busca el mejor costo posible. La ecuación (32) se adiciona al modelo original y calcula el tiempo más grande considerando el flujo de $(j) - (p)$. Las ecuaciones (33) y (34) que se adicionan al modelo original establecen una condición si - entonces para determinar el tiempo máximo en el flujo del producto desde (i) a (k) considerando el flujo entre $(j) - (p)$. Las ecuación (35) se adiciona al modelo original y esta limita múltiples flujos de producto a través de los centros de distribución (j) de modo que solo pueda ser ocupado una vez. Las ecuaciones (36) y (37) se adicionan al modelo original y completan

la condición si – entonces para el cálculo del tiempo máximo en el flujo del producto desde (i) a (k) considerando el flujo entre $(j) - (p)$. La ecuación (38) sustituye a (8) en el modelo original y establece que la cantidad transportada de (j) a (k) no exceda la capacidad del centro de distribución (j) considerando el flujo entre centros de distribución $(j) - (p)$. La ecuación (39) sustituye a (9) en el modelo original y establece un balance entre lo transportado de (i) a (j) considerando la alternativa $(j) - (p)$ y lo transportado de (j) a (k) . Las ecuaciones (40) y (41) se adicionan al modelo original y estas establecen que la transportación del producto solo podrá realizarse a través de un solo arco. La ecuación (42) se adiciona al modelo original y establece que el intercambio de producto entre $(j) - (p)$ no se cicle. Las ecuaciones (43) y (44) establecen que un arco estará inactivo si no se tiene flujo a través de él. Las ecuaciones (45) y (46) se adicionan al modelo original y establecen que establecen que los centros de distribución (j) que no tengan flujo de producto a través de ellos, deberán estar cerrados. Las ecuaciones (47) y (48) sustituyen a (18) y (19) en el modelo original y establecen el dominio de las variables en el modelo.

Capítulo 3: Revisión de la Literatura

3.1.- Antecedentes

La localización de instalaciones es un tema que ha atraído la atención de los investigadores. Numerosos artículos y libros han sido escritos acerca de este tema (Drezner y Hamacher, 2004). Sin embargo la cuestión de aplicabilidad de los modelos de localización siempre ha estado a discusión. En contraste, la utilidad práctica de la logística nunca lo ha estado. Una de las áreas en logística, la cual ha atraído mucha atención es la administración de la cadena de suministro (SCM) (Simichi-Levi et al., 2004 y Chopra y Meindl, 2007). Como una consecuencia, los modelos de localización de instalaciones han sido propuestos gradualmente dentro del contexto de las cadenas de suministro. Así el tema inicial es bastante atractivo y se proyecta con grandes posibilidades de aplicación y desarrollo. Aquí hay naturalmente varias preguntas que surgen inmediatamente durante su desarrollo, como son: (a) ¿Qué características debe tener un modelo de localización para desempeñarse adecuadamente dentro del contexto de las cadenas de suministro?, (b) ¿Existen modelos de localización de instalaciones que ya se apliquen en el contexto de las cadenas de suministro?, (c) ¿Todos los SCM necesitan modelos para localizar instalaciones?

Generalmente el problema de localización de instalaciones implica un conjunto de clientes distribuidos espacialmente y un conjunto de instalaciones para atender las demandas de los clientes, (Drezner y Hamacher, 2004). Por otra parte, los tiempos y costos entre los clientes y las instalaciones son medidas dadas por métricas (Revelle y Eisselt, 2005). Otras posibles preguntas a ser respondidas son: (a) ¿Qué instalaciones deben ser usadas (abiertas)?, (b) ¿Qué clientes deben ser atendidos de que instalación o instalaciones para minimizar el costo total?, (c) ¿Cómo debe ser diseñada la cadena de suministro? Adicionalmente a esta configuración genérica, un número de restricciones surgen del dominio de la aplicación específica. Para referencias recientes nos referimos a (Klose y Drexl, 2005 y ReVelle et al., 2008).

La SCM es un proceso de planeación, implementación y control de las operaciones de la cadena de suministro de una forma eficiente. La SCM se extiende al almacenamiento de Materias Primas (MP), trabajos en procesos, inventarios y productos terminados del punto de origen a los puntos de consumo (Simichi-Levi et al., 2004). Parte de los procesos de planeación en SCM tiene como objetivo encontrar la mejor configuración posible de la cadena de suministro. Adicionalmente a la configuración de instalaciones de ubicación genérica, existen otras áreas como la producción, inventarios, distribución y enrutamiento que tienen ser consideradas (Cordeau et al., 2006). Históricamente, se han focalizado relativamente en el diseño de los sistemas de distribución (Klose and Drexl, 2005) pero sin considerar toda la cadena de suministros.

Dependiendo del tiempo de planeación, se consideran tres niveles de planeación (Melo et al., 2008): estratégico, táctico y operacional. El nivel estratégico tiene que ver con las decisiones que tienen un efecto de largo plazo en la organización. Estas incluyen decisiones considerando el número, localización y capacidades de los almacenes y plantas manufactureras o el flujo del material a través de una red logística. Este estado establece una clara liga entre los modelos de localización y la estrategia de la administración de la cadena de suministro.

3.2.- Diseño de Cadenas de Suministro

Históricamente los investigadores se han enfocado en el diseño de los sistemas de distribución (Geoffrion y Powers, 1995), sin considerar como un todo la cadena de suministro. Típicamente los modelos de localización discretos fueron propuestos para que incluyeran características adicionales. Aikens (1985) revisa algunas importantes formulaciones lineales enteras – mixtas para sistemas de producción – distribución. Sin embargo estos modelos tenían un alcance limitado y no podían hacer frente a estructuras de cadenas de suministro realistas. Geoffrion y Powers (1995), plantean la inclusión de características relevantes para la Administración de la Cadena de Suministro (SCM) en los modelos de localización de instalaciones que empezaron a considerarse gradualmente. Estos incluyen:

- a) Subconjunto del producto (especificaciones del cliente)
- b) Límites superiores e inferiores en los envíos de un determinado producto a una determinada planta
- c) Especificaciones del producto en factores de ponderación para medidas de rendimiento en los centros de distribución
- d) Aproximación lineal por segmentos para costos no lineales
- e) La capacidad de localizar plantas y centros de distribución
- f) Inclusión de restricciones de capacidad de los productos en las plantas.
- g) Conversión de materia prima en actividades de uno o dos niveles
- h) Distribución adicional y niveles de producción

ReVelle y Laporte (1996) sugirieron la inclusión de características adicionales en modelos de localización de instalaciones, como la inclusión de nuevos objetivos (máximo retorno de inversión) y decisiones relacionadas a la selección de equipamiento para las nuevas instalaciones.

En un problema de localización discreta de instalaciones, la selección de lugares en donde se establecerán las nuevas instalaciones está restringida a un conjunto finito de lugares para la localización disponibles. El ejemplo más sencillo de este enfoque es en donde p instalaciones deben ser seleccionadas para minimizar la distancia total (ponderada) o los costos para suministrar la demanda del cliente. Este es un problema clásico llamado: problema de la p – mediana el cuál ha sido ampliamente estudiado (Díaz et al., 2006; Mladenovic et al., 2007; Baiou y Barahona, 2008; Goldengorin y Krushinsky, 2011). Este problema asume que todos los sitios candidatos son equivalentes en términos de la configuración del costo para establecer una nueva instalación. Cuando este no es el caso, la función objetivo es extendida con un término para el costo fijo de localización, y como resultado, el número de instalaciones a ser abiertas empieza como una decisión endógena. Este nuevo enfoque es conocido en la literatura como el problema no capacitado para la localización de instalaciones (UFLP). Existen muchas referencias de este problema (Sun, 2006; Averbakh et al., 2007; Huang y Li 2008). En ambos casos, el problema de la p - mediana y el UFLP, cada cliente es asignado para abrir una instalación que minimiza su costo de asignación. Una de las más importantes extensiones del problema UFLP es el problema capacitado de localización de instalaciones (CFLP) en el cuál se consideran valores exógenos para maximizar la demanda que puede ser suministrada de cada sitio potencial. En este caso, la propiedad de asignación más cercana ya no es válida (Klose y Gortz, 2007; Chen y Ting, 2008; Lin 2009).

Los modelos anteriormente mencionados tienen varias características en común:

- a) Horizonte de planeación de periodo único
- b) Parámetros determinísticos (demandas, costos)
- c) Producto único
- d) Un solo tipo de instalación
- e) Decisiones de localización – asignación

Claramente, estos modelos son insuficientes para manejar de manera realista los modelos de localización para la localización de instalaciones. Por lo tanto, muchas extensiones de estos problemas básicos han sido propuestos y ampliamente estudiados (Yao et al., 2010).

Un aspecto crucial en muchos problemas prácticos de localización es la de considerar la existencia de diferentes tipos de instalaciones (Altinel et al., 2009), cada una de las cuales juega un rol específico (producción o almacenamiento) y un flujo natural del material (que es, una jerarquización) entre ellos (Caggiano et al., 2009). Cada conjunto de instalaciones del mismo tipo es usualmente denotado por un nivel o escalón, así definimos un nivel en la jerarquización de instalaciones.

Otro aspecto manejado en aplicaciones de la vida real, y que ha atraído mucha atención en la literatura, se refiere a múltiples mercancías (Canel et al., 2001). En síntesis las características capturadas por los modelos clásicos son resumidas como siguen:

- a) Las redes son demasiado específicas y, se incluye una categorización de las instalaciones en los niveles, por lo general se consideran un máximo de tres niveles.
- b) Los materiales solo pueden fluir de un nivel al siguiente (de las plantas a los centros de distribución o de los centros de distribución a los clientes).
- c) Las decisiones estratégicas solo son enfocadas en la localización de instalaciones y la asignación de clientes a las instalaciones operativas.
- d) La localización de instalaciones esta usualmente restringida a uno o dos niveles (plantas y/o centros de distribución)
- e) Se supone que la demanda solo ocurre en el nivel más bajo de la red.

Sin embargo el punto focal de modelos de localización de instalaciones, tales como UFLP y el CFLP, está muy lejos de acercarse a problemas realistas en la planeación estratégica de cadenas de suministro, pero han sido de gran ayuda como base para la construcción de modelos que incluyen decisiones de SCM adicionalmente a la localización.

3.2.1.- Aspectos característicos de los modelos de localización de instalaciones

Consideramos una red de cadena de suministro como una estructura general como la que se muestra en la figura 3.1. Las decisiones de localización conciernen a la existencia de instalaciones y a la inclusión de nuevas instalaciones. Después son seleccionadas de un conjunto predefinido de sitios candidatos. Además, la planeación de la localización puede ser llevada a cabo para diferentes tipos de instalaciones simultáneamente (plantas y centros de distribución). Las decisiones estratégicas se enfocan también en los procedimientos, producción, distribución, expansión de la capacidad, y la satisfacción de la demanda de los clientes. El objetivo es determinar la configuración óptima de la red para minimizar el costo total. Esto incluye cargos fijos por la apertura y cierre de nuevas

instalaciones, producción, transportación, expansión de recurso y penalización de los costos de demanda.

3.2.2.- Factores adicionales en el diseño de cadenas de suministro

El análisis de las características adicionales en los modelos originales, nos permite comprender muchos otros aspectos que deben ser tomados en cuenta cuando se desarrolla un modelo de localización de instalaciones que debe ser compatible con la planeación de las necesidades del contexto de la cadena de suministro.

El primer grupo (y más obvio) de características que se requieren como una extensión de los modelos generales de localización son concernientes a las decisiones relativas a la transportación (Cordeau et al., 2006). Junto con la planificación del envío del producto entre instalaciones en el mismo nivel y las entregas directas desde instalaciones del mismo nivel a la localización de los clientes, también se debe analizar los siguientes aspectos:

- a) Selección de modos de transporte y capacidades
- b) Configuración de los enlaces de transportación
- c) Relación entre fuentes únicas o múltiples y las relaciones entre instalaciones y clientes

Otro grupo de extensiones se refieren a los clásicos modelos de localización de múltiples niveles de instalaciones y “localización de niveles”, también como múltiples mercancías (Caggiano et al., 2009). Los problemas de localización de instalaciones han sido ampliamente estudiados para sistemas de un nivel. Sin embargo, en la figura 3.1 es claro que una de las principales características de una red de cadena de suministros es una estructura multi-nivel (multi-echelon). Además, las decisiones de localización deben ser modeladas en diferentes niveles. En los niveles superiores de la red, esto corresponde a la localización de las plantas de manufactura, en los niveles intermedios se localizan sitios de montaje adicional, y en los niveles bajos de localizan los almacenes, centros de distribución o depósitos.

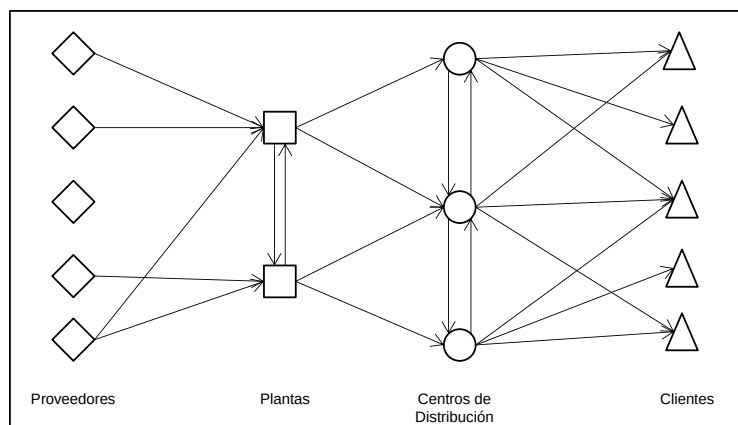


Figura 3.1: Red general de una cadena de distribución

El tercer grupo de problemas a ser considerados para los modelos de localización de instalaciones se refieren a la integración de actividades de la cadena de suministro dentro de estos modelos, como la obtención de producción multi-etapa (Lin et al., 2009) y

expansión de la capacidad. Con este enfoque se deben tomar en cuenta las siguientes características:

- Problemas de capacidad
 - Tamaño de la capacidad (reducción o expansión de instalaciones existentes o través de sistemas continuos o modulares)
 - Selección de tecnología y equipamiento
 - Niveles de rendimiento mínimo para la operación significativa de la instalación.
- Inventario
- Ruteo

Las características del inventario y ruteo han incrementado la atención recibida (Shen y Qi, 2007; Tancrez et al., 2012). La administración del inventario involucra dos tareas cruciales: la primera es determinar el número de los puntos de abastecimiento (centros de distribución y/o almacenes), mientras que el segundo es definir el nivel de inventario que se debe mantener en cada uno de esos puntos. Para evitar la sub-optimización, estas decisiones deben ser consideradas en una perspectiva integral, es decir con las decisiones de localización.

En la parte final de la cadena de suministro, los volúmenes de transportación en el siguiente nivel pudieran no ser lo suficientemente grandes para justificar un transporte completo. En este caso, las rutas de entrega a los clientes deben ser consideradas. Sin embargo, al cambiar el tipo de entrega, también cambia el costo de la demanda de un cliente. Cordeau et al. (2006) consideran el concepto de localización – ruteo.

Como resultado de la globalización económica, los modelos para el diseño estratégico de cadenas de suministro internacional han incrementado su importancia (Meixell y Gargeya, 2005; Hammami et al., 2008; Xu y Nozick, 2009; Nagurney, 2010; Speier et al., 2011). Los factores financieros están entre los aspectos que tienen un fuerte impacto en la configuración de una cadena de suministro global. Se incluyen impuestos, leyes aplicables, tarifas, tasas de cambio, precios de transferencia y reglas de operación locales. Otra importante extensión se refiere a la consideración de componentes estocásticos en la localización de instalaciones (Lin, 2009). Típicamente las fuentes de incertidumbre incluyen la demanda de los clientes, costos, tasas de cambio, capacidades y tiempos de transportación.

Finalmente, una extensión significativa de los problemas clásicos de localización de instalaciones es la de considerar un horizonte de planeación compuesto de varios periodos de tiempo (Melo et al., 2009). Las decisiones de localización de instalaciones y cadenas de suministro son entonces planeadas para cada periodo del horizonte de tiempo.

3.2.3.- Planeación de cadenas de suministro multi-periodo

En el diseño de una red, se invierten grandes cantidades de capital a nuevas instalaciones, lo que hace este tipo de inversión un proyecto de largo plazo. Por lo tanto, las instalaciones que son localizadas ahora se espera que operen por un largo periodo de tiempo. Por otra parte, muchos parámetros tales como la demanda de los clientes y el cambio de costos durante el tiempo de vida de la instalación que hacen una buena alternativa localización hoy, puede ser una mala en el futuro. Si las previsiones de los

parámetros futuros desconocidos están disponibles, pueden ser usados para obtener el diseño de la red que se manejara con los cambios futuros. Como resultado, un horizonte de planeación dividido en varios periodos de tiempo debe ser considerado en la configuración de una cadena de suministro (Hamdouch, 2011).

Las decisiones en el diseño de la red son en su mayoría provocadas por las condiciones cambiantes del mercado, en lugar de hacerlo por la necesidad de crear una nueva cadena de suministro desde cero (Liang y Cheng, 2009). Debido a la globalización económica y los avances en las tecnologías de la información, la reconfiguración de una cadena de suministro existente se ha vuelto más frecuente y su eficiencia más importante. Las oportunidades de expansión de los mercados emergentes, adquisiciones y alianzas estratégicas están entre los factores que provocan el rediseño de las cadenas. En el curso de este proceso existen instalaciones que pueden ser relocalizadas a áreas con condiciones económicas más favorables (bajos costos laborales) (Hung, 2011). El proyecto de re-ubicación de instalaciones es costoso y consume tiempo, así que tiene que ser cuidadosamente planeado para evitar interrupciones repentinas de la red.

El objetivo del rediseño de la cadena de suministro durante el horizonte de planeación es el de minimizar la suma de los costos fijos y variables. Los primeros incluyen los costos fijos por la operación de las instalaciones, mientras que los segundos están asociados con la operación del sistema de producción en el nivel alto de las instalaciones (plantas), la transportación de mercancías a través de la red, y el mantener el inventario en los lugares adecuados (almacenes).

Las principales restricciones son:

- a) Balance en el flujo de productos relacionados con cada instalación mercancía y periodo de tiempo (incluyendo la satisfacción de la demanda).
- b) Restricciones referentes a la re-localización de instalaciones en nuevos lugares durante el horizonte de planeación.
- c) Límites de planeación con respecto a la cantidad máxima de productos que pueden fluir a través de cada instalación y periodo
- d) Condiciones mínimas de rendimiento que indica que solo tiene sentido para operar una instalación si es a través de los niveles mínimos previamente especificados.
- e) Restricciones que permiten la configuración de cada instalación para cambiar a lo sumo una vez durante el horizonte de tiempo: una vez cerrada, una instalación existente no puede ser abierta nuevamente, y una vez abierta una nueva instalación no puede ser cerrada.
- f) Las restricciones de presupuesto limitan la inversión realizada en cada periodo para la transferencia de capacidad, en la creación de nuevas instalaciones y en cierre de instalaciones existentes o reubicación completa.

3.3.- Problema de localización en cadenas de suministro de dos niveles

El diseño de las cadenas de suministro busca hacer frente al problema de en donde localizar los centros de distribución (DC), y que DC suministrará producto a que cliente. El modelo de una red de distribución moderna debe ser establecido en un punto medio entre factores que tienen ventajas y desventajas, estos incluyen usualmente:

- a) Costos fijos de operación y localización
- b) Costo total de transportación
- c) Costos de almacenamiento y costos de reposición en los DC

Además, el diseño de modelos de redes deben tener en cuenta factores tales como:

- a) Falta de abastecimiento mediante el establecimiento de niveles adecuados de stocks de seguridad
- b) Concernientes a la capacidad, la cual puede afectar los costos operativos

La dificultad de realizar un adecuado balance entre las ventajas y desventajas es en sí mismo un problema difícil. Las cadenas de suministro multi-nivel son usadas comúnmente para soportar la manufactura y venta al mercado. Una cadena de suministro tiene que satisfacer la demanda de los clientes y niveles específicos de servicio, así como los costos más bajo posibles. El diseño de tal cadena de suministro implica por lo tanto un problema de localización de DC así como de establecer el flujo de los productos para los DC y clientes.

En un sistema con múltiples plantas produciendo un mismo producto, un determinado centro de distribución puede técnicamente ser atendido por múltiples plantas, lleva al problema de múltiples fuentes de aprovisionamiento y adquisiciones basadas en riesgo. Similarmente, un cliente puede ser atendido por múltiples DC, para minimizar el riesgo de no cubrir una demanda por falta de stock. Sin embargo, este tipo de problemas de distribución múltiple aunque son pertinentes y cruciales para las cadenas de suministro, normalmente no consideran múltiples fuentes de aprovisionamiento y adquisiciones basadas en riesgo, ya que estos son tratados de forma separada. Sadjady y Davoudpour (2012) presentan un modelo de cadena de suministro de dos-niveles, con múltiples mercancías, tiempo de entrega y costo de inventario a través de un enfoque de programación entera mixta, y propone una solución basada en una heurística lagrangiana. Schmitt y Singh (2012) estudian un enfoque cuantitativo de análisis del riesgo de interrupción de una cadena de suministro multi-nivel.

3.4.- Programación Multi-objetivo

En muchos problemas en áreas de la administración e ingeniería es muy común que se pretenda optimizar más de un objetivo de manera simultánea, y estos objetivos se encuentran normalmente en conflicto entre ellos. El principal objetivo de estos problemas es el de buscar soluciones eficientes y frentes de Pareto para estos problemas. Un problema de programación multi - objetivo se formula como sigue:

$$\begin{aligned} \text{Min } f(x) &= (f_1(x), \dots, f_p(x))^T \\ \text{s.t. } x &\in X \end{aligned}$$

En donde $X \subseteq \mathbb{R}^n$ es el conjunto factible, $f: X \rightarrow \mathbb{R}^p$ esta compuesto de p funciones con valores reales objetivo, y $\mathbb{R}^n$ y $\mathbb{R}^p$ son vectores en el espacio Euclidiano con dimensión finita. Para el caso especial $p = 2$, nos referimos a éste como problema bi-objetivo (BOP). Se define el conjunto de resultados alcanzables (Y) de la siguiente manera:

$$Y := \{y \in \mathbb{R}^p : y = f(x), x \in X\} = f(X)$$

Para $y^1, y^2 \in \mathbb{R}^p$, usamos la siguiente notación:

$$\begin{aligned} y^1 \preceq y^2 &: \Leftrightarrow y^1 \leq y^2 \text{ y } y^1 \neq y^2 \\ y^1 < y^2 &: \Leftrightarrow y_k^1 < y_k^2, \quad \forall k = 1, \dots, p \end{aligned}$$

El concepto de Frente de Pareto implica las mejores soluciones que pueden encontrarse en un problema y puede definirse como:

Para un punto $x \in X$ es llamado:

- Una solución débilmente eficiente si no hay $x' \in X$ de tal manera que $f(x') < f(x)$,
- Una solución eficiente si no hay $x' \in X$ de tal manera que $f(x') \leq f(x)$,
- Una solución estrictamente eficiente si no hay $x' \in X, x' \neq x$ de tal manera que $f(x') \leq f(x)$.

Chinchuluun y Pardalos (2007) presentan un análisis de las diferentes condiciones de optimalidad y teoría de la dualidad en diferentes problemas multi-objetivo. Brintrup (2010) modela y simula el modelo de una cadena de suministro que busca minimizar el tiempo de ejecución y al mismo tiempo maximizar sus ingresos a través de optimización multi-objetivo evolucionaria.

3.4.1.- Problemas multi – criterio

La toma de decisiones y el análisis es una parte importante de las ciencias administrativas. En muchos problemas reales, el tomador de decisiones persigue más de un objetivo o considera más de un parámetro de comparación. Este enfoque transforma el problema de toma de decisiones en un problema de toma de decisiones multi - objetivo (MODM) o en un problema de toma de decisiones multi – atributos (MADM) (Pomerol y Barba-Romero, 2000). Este grupo de problemas se encuentra en una categoría, llamada problemas de toma de decisiones multi –criterio.

Existen muchos problemas de toma de decisiones cuya información es espacial, de manera (geográfica). Esta clase de decisiones son llamadas decisiones de localización. Las decisiones de localización son estudiadas en la investigación de operaciones y las ciencias administrativas.

En la MADM existen usualmente un número limitado de alternativas predeterminadas. Estas alternativas satisfacen cada objetivo en un nivel específico y el tomador de decisiones selecciona la mejor solución (o soluciones) entre todas las alternativas, de acuerdo a la prioridad de cada objetivo y a la interacción entre ellos. Existen muchas técnicas que son utilizadas para hacer frente a los problemas de MADM. Algunas de las más populares son: dominante, maximin, maximax, método conjuntivo, método disjuntivo, método lexicográfico, eliminación por aspectos, elección que expresa la realidad (ELECTRE) (Pomerol y Barba-Romero, 2000), técnica para ordenar la preferencia por soluciones similarmente ideales, entre otras más.

Las técnicas MODM tratan de designar la mejor alternativa considerando varias interacciones que buscan satisfacer de la mejor manera posible las restricciones (Collette y Siarry, 2004). Los problemas MODM tiene varios componentes, pero las características más comunes son:

- a) Conjunto de objetivos cuantificables
- b) Conjunto bien definido de restricciones
- c) Proceso para la obtención de la información de las ventajas y desventajas.

Existen muchas técnicas que son utilizadas para hacer frente a los problemas MODM. Algunas de las más populares son: método del criterio global, función de utilidad, método de la métrica L-P, método del límite de la función objetivo, método lexicográfico, programación por metas, método de restricciones eficientes, método de ponderaciones, programación multi – objetivo, entre otras más.

Sin embargo, para resolver los problemas MODM, usualmente se debe considerar:

- a) Objetivos en conflicto: Esta en la naturaleza de los problemas MODM tener objetivos en conflicto.
- b) Soluciones eficientes: Una solución ideal en un problema MODM es el que resulta en el valor óptimo de cada función objetivo simultáneamente. Una solución eficiente (también conocida como solución no – inferior o solución no dominada), en la cual una función objetivo puede ser mejorada son detrimento simultaneo de los otros objetivos.
- c) Soluciones preferidas. Una solución preferida (también conocida como la mejor solución) es una solución eficiente, la cual es seleccionada por el tomador de decisiones como la decisión final. También se utiliza el método simple MODM algún análisis de sensibilidad para seleccionar la solución preferida.
- d) Existen diferentes enfoques para resolver problemas de optimización multi – objetivos. Estos enfoques se dividen en tres categorías.
- e) Enfoques clásicos: Estos tratan de convertir un problema multi – objetivo en uno mono – objetivo y optimizar este nuevo objetivo único.
- f) Enfoque del Pareto óptimo: Un conjunto de soluciones es obtenido cuando se resuelve el problema.

Si los problemas de la primera y segunda categoría son complejos, pueden ser resueltos utilizando algoritmos evolutivos (Yu y Gen, 2010): Algunos de estos enfoques son: Algoritmo genético multi – objetivo (MOGA), algoritmo genético de ordenamiento no dominado (NSGA1) y (NSGA2).

3.4.2.- Método ε -constraint

El método ε -constraint consiste en la creación de un modelo con un solo objetivo que es optimizado y las demás funciones se convierten en restricciones en el modelo (Ehrgott y Ruzika, 2008). Tal como se muestra a continuación, un modelo de optimización multi-objetivo puede ser reformulado a través de un modelo ε -constraint como sigue:

$$(\text{Minimizar} / \text{Maximizar}) f_i(X)$$

Subjeto a

$$\begin{aligned} f_k(X) &\leq \varepsilon_k, \quad k = 1, \dots, n \text{ and } k \neq i \\ H(X) &= 0 \\ G(X) &\leq 0 \end{aligned}$$

En este caso, la función $f_i(X)$ es la única en ser optimizada; las otras $(n - 1)$ funciones se convierten en restricciones y son limitadas por su valores correspondientes. El objetivo en este método consiste en cambiar los valores ε en cada una de las funciones y, de esta forma obtener diferentes valores optimizados en la función $f_i(X)$.

La figura 3.2 muestra un ejemplo en el cual dos funciones (f_1 y f_2) son optimizadas utilizando el método de ε -constraint. Aquí f_2 es optimizada y f_1 se convierte en restricción. Para las dos soluciones P_1^a y P_1^b se puede observar en la figura que la función f_1 es una

restricción con un límite superior ε_1^a ; el punto de optimización encontrado para f_2 es P_1^a . Cuando en el modelo para el valor de la restricción f_1 cambia a ε_1^b , el valor optimizado encontrado para f_2 es P_1^b .

Si cambiamos el valor de la restricción para f_1 , obtenemos diferentes valores para f_2 , y de esta forma obtenemos los valores para ε_1^b , el frente de Pareto óptimo. Se puede también optimizar por otras funciones cambiando la función objetivo a ser optimizada. En este caso el modelo podría ser:

$$(\text{Minimizar} / \text{Maximizar}) f_j(X)$$

Sujeto a

$$f_k(X) \leq \varepsilon_k, \quad k = 1, \dots, n \text{ and } k \neq j$$

$$H(X) = 0$$

$$G(X) \leq 0$$

En donde, la función $f_i(X)$ es ahora una restricción y la función $f_j(X)$ es la función objetivo. En este caso los valores, de las funciones que actúan como restricción son modificadas, para encontrar nuevos valores del frente de Pareto óptimo. El método fue introducido por Haimes et al. (1971) y se ha utilizado para la optimización de problemas multi – objetivos. Laumanns et al. (2006) proponen un nuevo esquema adaptativo para generar valores apropiados para la restricción ε . Shin y Cho (2006) utiliza el enfoque ε -constraint para modelos de diseño robusto. Faulkenberg y Wiecek (2012) proponen la generación de representaciones discretas con puntos equidistantes para problemas bi – objetivo con conjuntos de solución determinados por conos convexos y poliédricos a través de la solución por ε -constraint. Salazar-Aguilar et al. (2011) utilizan el enfoque ε -constraint para un modelo de programación bi – objetivo para territorios compactos y balanceados en un distrito comercial.

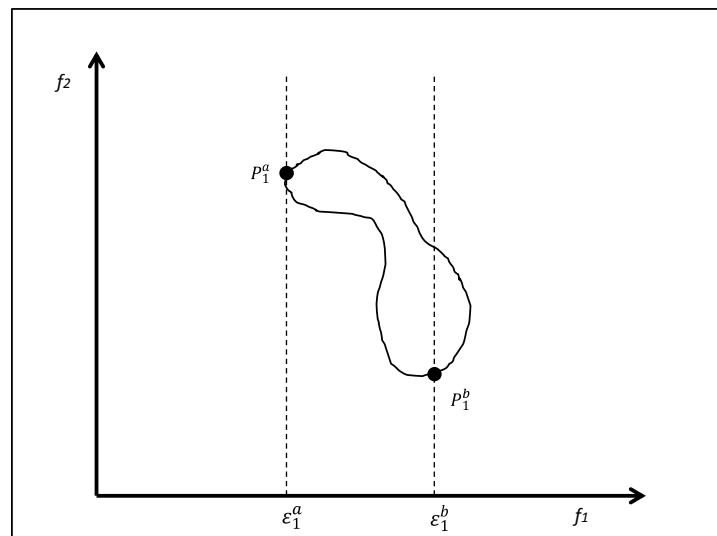


Figura 3.2: Método ε -constraint

3.4.3.- Métricas de comparación

Una métrica es un parámetro que nos permite establecer el nivel del frente de Pareto comparado con otro, se deben considerar tres valores fundamentales de medición (Coello y Lamont 2004):

- 1.- Minimizar la distancia del frente de Pareto producido por el algoritmo con respecto al frente verdadero.
- 2.- Maximizar la distribución de soluciones obtenidas, de manera que podamos tener una distribución de vectores tan uniforme como sea posible.
- 3.- Maximizar la cantidad de elementos del conjunto de óptimos de Pareto generados.

En la optimización multi – objetivo, los siguientes factores son importantes:

- 1.- Dominancia de Pareto: Una solución x_1 se dice que domina (Pareto) a otra solución x_2 (denotada por $x_1 \succ x_2$) si y solo si:

$$(\forall_i \in \{1, 2, \dots, w\}: f_i(x_1) \leq f_i(x_2)) \wedge (\exists_j \in \{1, 2, 3, \dots, w\}: f_j(x_1) < f_j(x_2))$$

- 2.- Solución Pareto: Una solución x_1 se dice que es una solución Pareto si y solo si no hay una solución que satisfaga $x_2 \succ x_1$.

- 3.- Conjunto Pareto: El conjunto contiene todas las soluciones Pareto es como se dijo Pareto.

- 4.- Frente de Pareto: El conjunto de todos los valores de las funciones objetivo corresponden a las soluciones en el conjunto Pareto.

Los problema multi – objetivo requieren múltiples soluciones no dominadas con cierta diversidad para formar un frente de Pareto. La comparación adecuada de dos algoritmos es una tarea compleja. Algunas de las métricas más comúnmente utilizadas para problemas multi – objetivos son:

Número total de soluciones no dominadas (ONSN)

Presentada por Qian et al. (2009), esta se define como: Permitir que S denote la unión de los K conjuntos de soluciones no dominadas i.e. $S = (S_1 \cup \dots \cup S_K)$. Una medida de rendimiento directo de las soluciones no-dominadas del conjunto S_j con respecto al conjunto de soluciones K no dominadas es el numero de soluciones en S_j no dominadas por cualquier otra soluciones en S . Esta medida se escribe como:

$$ONSN(S_j) = |S_j - \{x \in S_j | \exists y \in S : y \succ x\}|, \quad (49)$$

Donde $y \succ x$ significa que la solución (x) es dominada por la solución (y). En (49) las soluciones (x) son dominadas y eliminadas de S_j . El valor más grande de $ONSN(S_j)$ corresponde a la mejor solución del conjunto S_j .

Generación total de vectores no dominados (ONVG)

Para un conjunto de soluciones no dominadas S_j la métrica ONVG es definida como $|S_j|$, la cual es el número de distintas soluciones no dominadas Van (1999).

Métrica de distancias (DI_R)

Esta es usada para medir el rendimiento del conjunto de soluciones no dominadas S_j con respecto al conjunto de referencia S^* del frente de Pareto Knowles y Corne (2002).

$$DI_R(S_j) = \frac{1}{|S^*|} \sum_{y \in S^*} \min\{d_{xy} | x \in S_j\} \quad (50)$$

En donde d_{xy} es la distancia entre una solución (x) y una solución de referencia (y) en las w -dimensiones del espacio objetivo normalizado.

$$d_{xy} = \sqrt{(f_1^*(y) - f_1^*(x))^2 + \dots + (f_w^*(y) - f_w^*(x))^2} \quad (51)$$

En donde f_i^* es el i -ésimo objetivo que es normalizado usando la referencia del conjunto solución S^* . Cuando se comparan las métricas de dos conjuntos de soluciones no dominados S_1 y S_2 si el frente de Pareto no es conocido, se combinan los dos conjuntos y se seleccionan todas las soluciones no dominadas para formar el conjunto S^* . Obviamente, los valores más pequeños de $DI_R(S_j)$ corresponden a la mejor aproximación del frente de Pareto.

Calidad Promedio (AQ)

Esta métrica fue propuesta por Jaszkievicz (2003) para medir la calidad de un conjunto de soluciones, el cual fue originalmente expresado en la forma de una expresión ponderada de Tchebycheff. Sin embargo, esta función puede ocultar ciertos aspectos de la calidad del conjunto de soluciones, porque los malos resultados con respecto a la proximidad podrían ser compensados por el buen desempeño en la distribución de soluciones. Así, diversos indicadores de difusión y de espacio se añaden a la formulación para superar la limitación, y se obtiene una métrica dada por el valor promedio de una función de escalarización sobre una muestra representativa del vector ponderado de la siguiente forma:

$$AQ = \sum_{\lambda \in \Lambda} s_a(\mathbf{f}, \mathbf{z}^0, \lambda, \rho) / |\Lambda| \quad (52)$$

En donde $s_a(\mathbf{f}, \mathbf{z}^0, \lambda, \rho) = \min_i \{ \max_j \{ \lambda_j (f_j(\mathbf{x}_i) - z_j^0) + \rho \sum_{j=1}^w \lambda_j (f_j(\mathbf{x}_i) - z_j^0) \} \}$, y $f_j(\cdot)$ es el j -ésimo objetivo, y $\Lambda = \{ \{ \lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_w) \mid \lambda_j \in \{0, 1/r, 2/r, 1\}, \sum_{j=1}^w \lambda_j = 1 \} \}$, y $\mathbf{z}^0$ es un punto de referencia en el espacio objetivo que se establece en $(0, 0)$ por problemas bi-objetivos, y ρ es un número suficientemente pequeño. Además r es un parámetro que cambia el número del conjunto objetivo. AQ Puede evaluar la proximidad y la diversidad del conjunto de soluciones. Una métrica pequeña corresponde a un mejor conjunto de solución.

R_{pos}

La métrica $R_{pos}(P_i)$ fue propuesta por Altiparmark et al. (2006). Para calcular el $R_{pos}(P_i)$ se considera a P_1 y P_2 como el conjunto de soluciones obtenidas de cada modelo, y P como la unión de las soluciones del Pareto óptimo (i.e $P = P_1 \cup P_2$) de tal forma que solo se incluyen las soluciones no dominadas (Y 's). Las soluciones óptimas en (P_i) que no están dominadas por cualquier otra solución en (P) se calculan de la siguiente forma:

$$R_{pos}(P_i) = \frac{|P_i - \{X \in P_i \mid \exists T \in P: Y < X\}|}{P_i} \quad (53)$$

En donde $Y < X$ significa que la solución (X) es dominada por la solución (Y). Cuanto mayor sea la proporción de $R_{pos}(P_i)$, mejor es el conjunto de soluciones (P_i).

D_{average} y D_{min}

Propuesta por Olivares et al. (2010) llamada D_{avg} y D_{min}. Esta fue desarrollada para dar un significado práctico a la comparación de punto a punto. La discretización del objetivo f_2 y el numero de objetivos permite establecer el procedimiento como sigue para los pares de conjunto S_1 y S_2 .

$$D_{avg} = \frac{\sum_{t \in T} \frac{f_1(s):f_2(s)=t}{f_1(s'):f_2(s')=t}}{|T|} \quad \forall s \in S_1, s' \in S_2 \quad (54)$$

$$D_{min} = \min_{t \in T} \frac{\frac{f_1(s):f_2(s)=t}{f_1(s'):f_2(s')=t}}{|T|} \quad \forall s \in S_1, s' \in S_2 \quad (55)$$

La métrica D_{avg} indica la calidad de un conjunto comparado con otro. Entonces se establece la siguiente relación

$$Si \quad D_{avg} \begin{cases} < 1 \quad S_1 \text{ es mejor que } S_2 \\ > 1 \quad S_1 \text{ es peor que } S_2 \\ = 1 \quad S_1 \text{ es similar a } S_2 \end{cases}$$

3.5.- Métodos heurísticos y Metaheurísticos

La palabra heurística proviene del Griego heuriskein, que significa “el arte de descubrir nuevas estrategias (reglas) para resolver problemas”. El prefijo meta, también proviene del Griego, significa “más allá de”. El termino metaheurística fue propuesto por Glover (1986).

Muchos problemas de optimización de importancia científica e industrial resultan muy difíciles de resolver a través de métodos exactos como la programación matemática por medio de software comercial, debido principalmente al tiempo que toma converger a una solución. En la práctica una “buena” solución suele ser suficiente y esta puede ser obtenida a través de algoritmos heurísticos y metaheurísticos. Los algoritmos heurísticos pueden ser clasificados básicamente en dos tipos:

Constructivos: Estas heurísticas tratan de construir una solución factible sin precisar de ninguna previa.

De mejora: Son heurísticas que tratan de generar una solución factible de costo inferior respecto a la de una previa.

Un concepto clave es el conjunto de soluciones vecinas a una solución dada, y que define el subconjunto de todas las soluciones que se obtienen a partir de la dada mediante una “relación de vecindad”. Existen muchas y muy diversas heurísticas para la solución de problemas multi-objetivo para la localización de instalaciones. Yeh y Chuang (2011) utilizan un enfoque de algoritmos genéticos para la selección de socios en problemas de cadenas de suministro verdes. Wang y Makond (2011) proponen una solución basada en algoritmos genéticos para el problema de decisión de localización y asignación en una cadena de suministro dos-niveles con demanda estocástica. Arostegui et al. (2006) realizan una comparación de Búsqueda Tabu, Templado Simulado y Algoritmos Genéticos para problemas de localización de instalaciones. Wang (2009) establece el diseño de una cadena de suministro multi-echelon por medio de un algoritmo de dos fases por colonia de hormigas. Moncayo-Martínez y Zhang (2011) utilizan un enfoque de colonia de hormigas para optimizar una cadena de suministro. Lidestam y Rönqvist(2011) usan la descomposición Lagrangiana en la planeación de cadenas de suministro.

3.6.- Programación Matemática

La Programación Matemática trata de resolver problemas de decisión en los que se deben determinar acciones que optimicen un determinado objetivo, pero satisfaciendo ciertas limitaciones en los recursos disponibles. La programación Matemática se divide en varias ramas según las características de las variables y de las ecuaciones y/o inecuaciones. Cuando las ecuaciones/inecuaciones son lineales en sus variables, entonces se habla de programación lineal, mientras que en otro caso se habla de Programación no lineal. Dentro de la programación lineal existen algunos casos interesantes como la programación cuadrática. Si las variables usan valores enteros entonces se habla de Programación entera, opuesta a la programación continua donde las variables asumen valores reales (quizás no negativos). Cuando la función objetivo es una función vectorial se trata de programación multi-objetivo. Si los parámetros que describen el problema tiene valores fijos, se trata entonces de programación determinística, distinguiéndose así de la Programación Estocástica donde los parámetros son variables aleatorias. Cuando los parámetros varían de forma sistémica se habla de Programación Paramétrica.

Mula et al. (2010) realizan una revisión del enfoque de programación matemática para la planeación de la cadena de suministro y el transporte. Este análisis es realizado en base a una clasificación de 8 aspectos: Estructura de la cadena de suministro, nivel de decisión, enfoque de modelación de la cadena de suministro, propósito, información compartida, limitaciones del modelo, contribuciones novedosas y aplicación práctica. Sodhi y Tang (2009) proponen un modelo de planeación de la cadena de suministro bajo incertidumbre de demanda usando programación estocástica. Azaron et al. (2008) consideran el riesgo en el diseño de una cadena de suministro con un enfoque de programación multi-objetivo estocástica.

Capítulo 4: Experimentos y Resultados

4.1.- Instancias en el modelo original

Para el proceso de experimentación computacional se utilizaron cinco instancias con cinco tamaños diferentes, tal como se muestra en la tabla 4.1. En esta también se muestra el numero de variables enteras que tiene cada tamaño de instancia.

	Variables Enteras Modelo Original	Variables Enteras Variación 1	Variables Enteras Variación 2	Variables Enteras variación 3
5 – 5 – 5 – 2	105	105	205	355
5 – 5 – 5 – 5	255	255	505	805
5 – 10 – 10 – 2	320	320	510	1310
5 – 10 – 15 – 2	410	410	710	1410
5 – 10 – 20 – 2	510	510	910	1510

Tabla 4.1: Tamaño de Instancia

La codificación de las instancias es como sigue: La primera posición indica el número de plantas (i), la segunda posición indica en número de centros de distribución (j), la tercera posición indica el número de clientes (k), y finalmente la cuarta posición (l) indica el número de arcos entre nodos en cada escalón.

Las instancias usadas en el modelo original fueron propuestas y descritas por Olivares-Benítez et al. (2010); estas fueron usadas en el modelo original y en la primera variación. Estas instancias tienen las siguientes características: los parámetros que componen estas instancias son:

- Demanda del cliente, capacidad del centro de distribución,
- Capacidad de la planta,
- Costo de transporte y tiempo para cada arco, y
- Costo fijo del centro de distribución.

4.2.- Instancias para la variación que permite el abastecimiento de los clientes (k) por fuentes múltiples (Centros de Distribución (j))

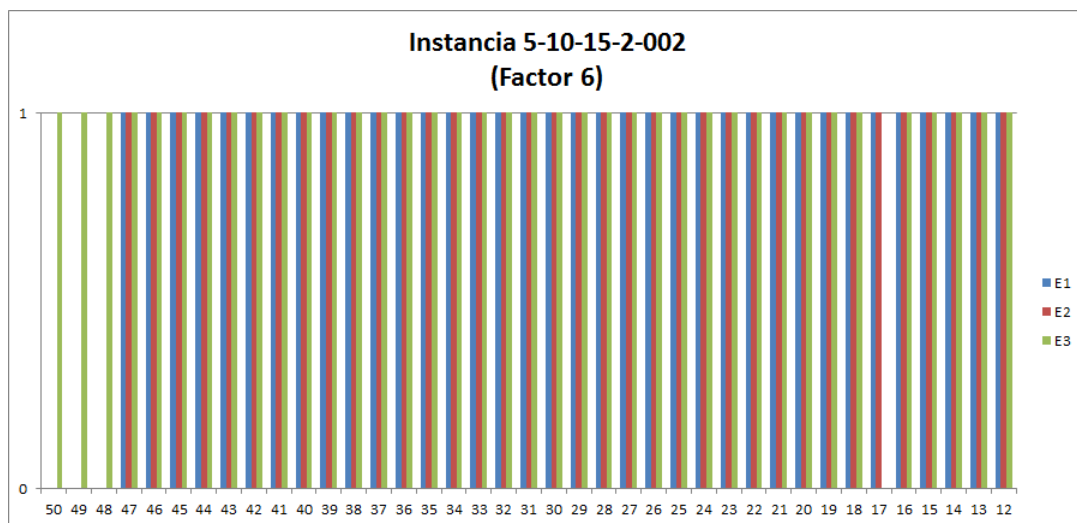
Esta variación propuesta en este trabajo implica que los clientes (k) pueden ser suministrados por más de un centro de distribución (j). La idea es evaluar el comportamiento de los costos totales y los tiempos de cada instancia, así como el nuevo frente de Pareto. Para esta variación fueron utilizadas las mismas instancias que para el problema original.

4.3- Construcción de instancias en la variación que permite el flujo directo de las plantas (i) a los clientes (k)

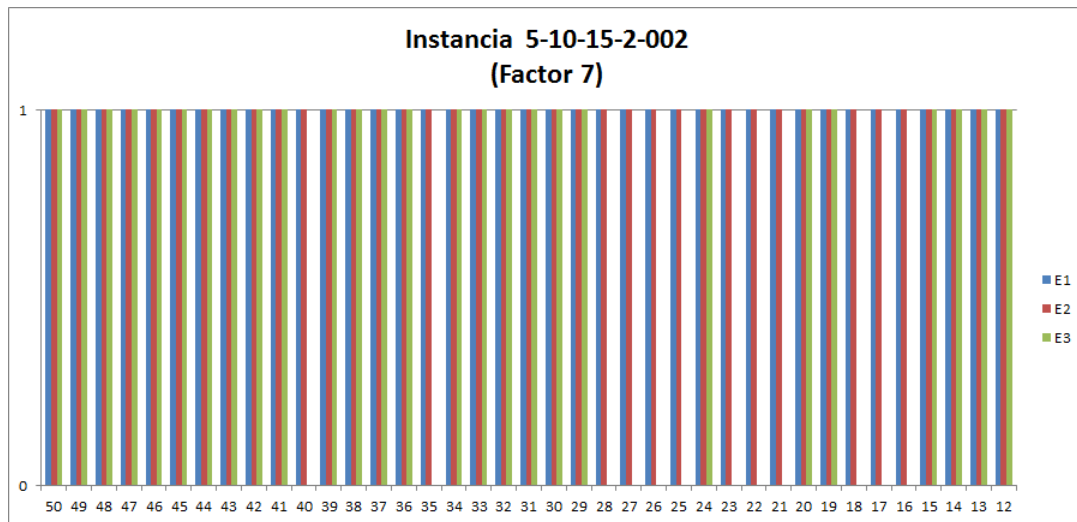
Para la variación que permite en algunos casos en flujo directo en (i) y (k) esta propuesta fue modificada de la siguiente forma para adaptarse a este nuevo enfoque. El tiempo para los arcos de la alternativa (i) – (k) fueron generados de manera aleatoria sobre la base de una distribución normal, con valores entre 5 – 50. El objetivo de estos valores es el de que sean competitivos comparados con los de la instancia original de modo que el modelo pueda optar por seleccionar en algunas ocasiones el flujo directo entre (i) – (k), y en otras seleccione el flujo (i) – (j) – (k). Asumimos que el tiempo y el costo para la alternativa (i) – (k) se encuentran correlacionados de manera negativa. El costo de transportación unitario para el flujo (i) – (k) es una variable de punto flotante calculada de la siguiente manera:

$$\text{Costo} = \frac{(7) * (50)}{\text{Tiempo}} \quad (56)$$

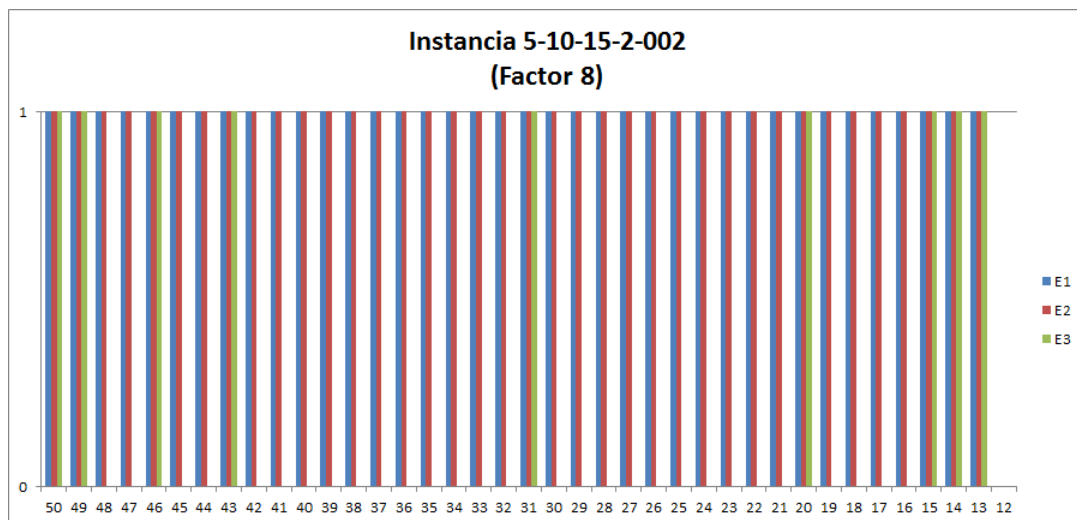
El valor de 7 es una constante que nos permite una distribución uniforme de los arcos usados en el flujo (i) – (j) – (k) o la variación propuesta (i) – (k), de esta forma la instancia propuesta es consistente y no es fácil de resolver por el modelo. Las gráficas 4.1, 4.2 y 4.3 muestran la distribución de los arcos del modelo original (i) – (j) – (k) y la variación propuesta (i) – (k). En esas graficas E1 y E2 corresponden al uso de los arcos para la alternativa original y E3 corresponde al uso de los arcos en la variación propuesta. En las gráficas 4.1 y 4.3 la distribución de los arcos se observa no homogénea. En la gráfica 4.1 los arcos solo seleccionan la alternativa (i) – (k) ignorando la alternativa (i) – (j) – (k). En la gráfica 4.3 la alternativa (i) – (k) es seleccionada en la mayoría de los casos. Como se observa en la gráfica 4.2 se tiene una distribución más homogénea de los arcos seleccionados entre las dos alternativas, lo cual significa que la instancia modificada propuesta es competitiva con respecto a la original. Debido a lo anterior se selecciona el valor de 7.



Grafica 4.1: Distribución de arcos con Factor 6



Gráfica 4.2: Distribución de arcos con Factor 7



Gráfica 4.3: Distribución de arcos con Factor 8

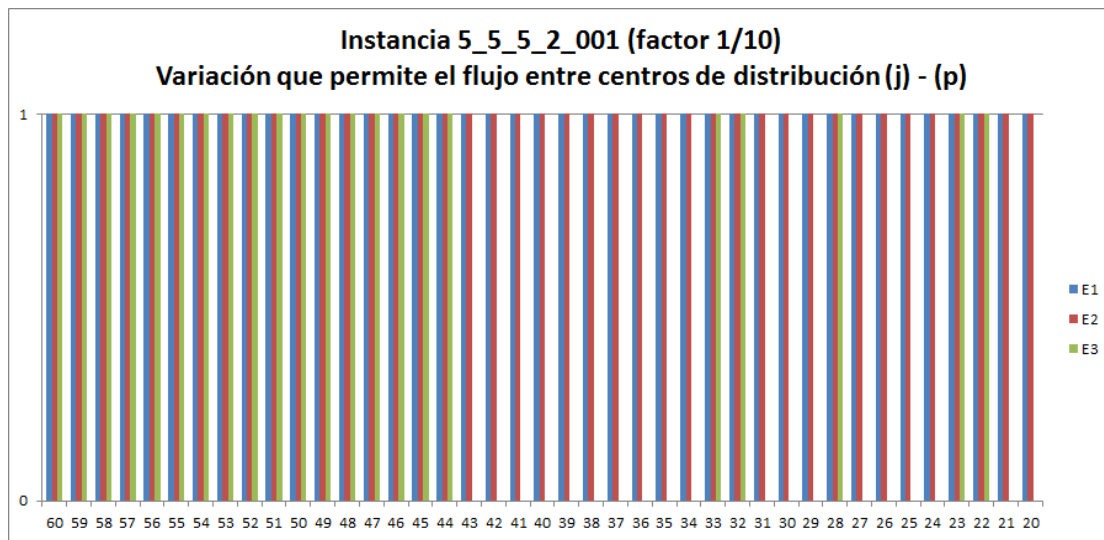
4.4.- Construcción de instancias en la variación que permite el flujo entre centros de distribución (j) – (p)

Para realizar esta variación se pretendió utilizar las instancias originales, ampliándolas (incorporando nuevos tiempos y costos para los arcos que permiten el intercambio entre centros de distribución), sin embargo no se obtuvieron resultados adecuados con el modelo. La selección de arcos para el flujo entre centros de distribución (j) – (p) en esta propuesta con la instancia original, eran ignorados. Por lo que se modificó la instancia original de la siguiente forma: el costo fijo del centro de distribución (j) se generó como una variable aleatoria entera con valores entre 10,000 – 15000. Con estos valores se fuerza al modelo a abrir una mayor cantidad de centros de distribución de modo que el flujo de producto entre ellos sea más probable. A partir de este punto la instancias se ampliaron, generando el tiempo adicional para los flujos de (j) – (p) de manera aleatoria con un rango de 1 – 5. Los costos de las nuevas alternativas se generan utilizando la siguiente relación:

$$\text{Arco } 3 = \left(\frac{50}{\text{Tiempo}} \right) * \left(\frac{1}{10} \right) (57)$$

En esta variación el valor de (1/10) es una constante que permite una distribución uniforme de los arcos usados en el flujo (i) – (j) – (k) o la variación propuesta (i) – (j) – (p) – (k), de esta forma la instancia es consistente y competitiva comparada con la instancia original, además de que no es fácil de resolver por el modelo.

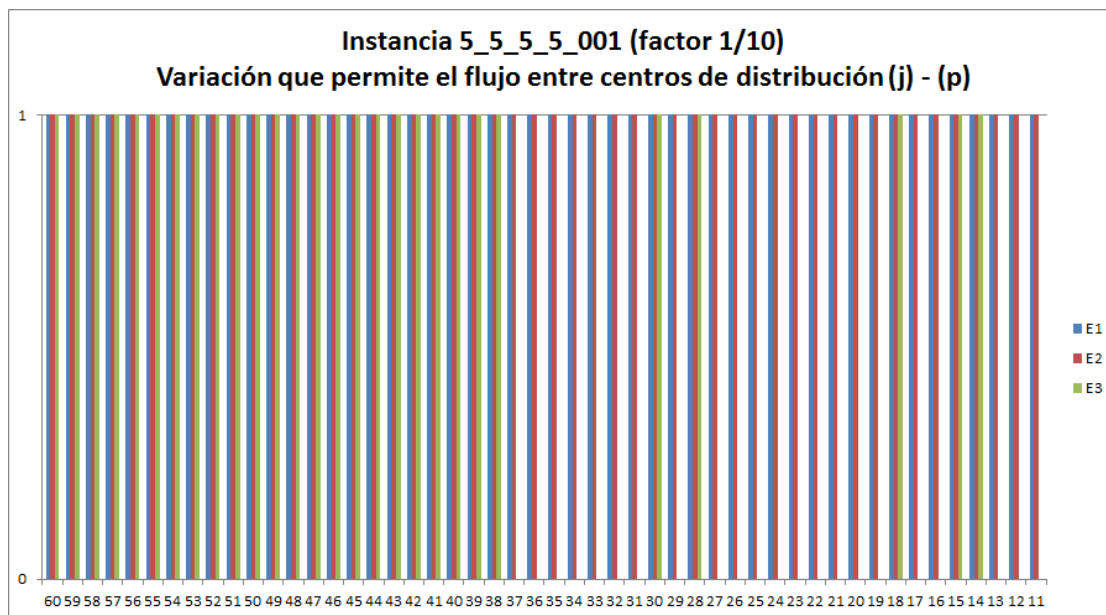
Las gráficas 4.4 y 4.5 muestran cómo se distribuyen el uso de los arcos en la variación propuesta. En las gráficas E1 y E2 corresponden al uso de los arcos para la alternativa original y E3 corresponde al uso de los arcos en la variación propuesta. Como se observa en las gráficas la distribución de los arcos es homogénea.



Grafica 4.4: Distribución de arcos para E3 de la Variación 3 (5-5-5-2-001)

4.5.- Equipo y Software

Para la realización del experimento computacional se utilizó un equipo de cómputo con las siguientes características: Maquina Workstation con procesador Intel (R) Xenon (R) CPU X5550 a 2.67 Ghz con 12 GB de memoria RAM y Windows 7 a 64 bits como sistema operativo. La implementación de los modelos de optimización fue realizada en GAMS 23.6.2 y resueltos con CPLEX 12. En los anexos 6, 7, 8 y 9 se incluye el código en GAMS de los modelos probados.



Grafica 4.5: Distribución de arcos para E3 de la Variación 3 (5-5-5-001)

4.6.- Resultados

Para la comparación de los frentes de Pareto del modelo original y las variaciones propuestas (sin fuente única, flujo directo entre (i) y (k) y flujo entre (j) y (p)) se utilizaron las métricas $R_{pos}(P_i)$ propuesta por Altiparmark (2006), así como la métrica $D_{average}$ y D_{min} propuesta por Olivares (2010). $D_{average}$ nos permite conocer que diferencia existe en promedio de un frente con respecto a otro, y esto dado las características del problema estudiado proporciona un parámetro de comparación adecuado. D_{min} proporciona un parámetro de comparación de los frentes de Pareto comparado punto a punto y se considera una comparación adecuada para el problema estudiado.

4.6.1.- Resultados de la variación que permite el abastecimiento de los clientes (k) por fuentes múltiples (Centros de Distribución (j))

Para la implementación de este experimento se utilizó el enfoque de ε -constraint para resolver el problema bi-objetivo. Las soluciones no-dominadas son evaluadas por medio de las métricas $R_{pos}(P_i)$, $D_{average}$ y D_{min} , y se siguió el procedimiento mostrado en la figura 4.1.

La tabla 4.1 muestra los resultados de la comparación entre la solución del modelo original y la primera variación (fuentes de abastecimiento múltiples) del problema CFCLP-TC. En ésta se presenta la evaluación de cinco instancias con las métricas R_{pos} , $D_{average}$, and D_{min} , así como el tiempo en segundos de procesamiento de cada una de ellas. En los anexos 1 y 2 se incluyen los resultados de las instancias probadas.

En la tabla 4.2 se observa que en todos los casos $D_{average}$ es menor que 1, lo que indica una calidad superior de los frentes de Pareto de la variación con respecto al modelo original. D_{min} en todos los casos indica la diferencia más pequeña de ambos frentes comparados y nos proporciona un indicador de la diferencia de los frentes comparados.

Algoritmo ε Constraint

Input: Modelo 1 (modelo original) y Modelo 2 (Múltiples Fuentes de Suministro)

Output: Lista de soluciones no-dominadas

Begin:

1: $t = 1$ Optimizar el Modelo 1 con la función objetivo f_2

2: Recalcular T cuando $T - (E_j^1 = \max(TP_{ijl}A_{ijl}) - E_j^2 = \max(TW_{jkl}B_{jkl})) \geq 0, i \in I, j \in J, l \in LP_{ij}, j \in J, k \in K, l \in LW_{jk}$

3: $t=1$ Optimizar el Modelo 2 con la función objetivo f_2

4: Recalcular T cuando $T - (E_j^1 = \max(TP_{ijl}A_{ijl}) - E_j^2 = \max(TW_{jkl}B_{jkl})) \geq 0, i \in I, j \in J, l \in LP_{ij}, j \in J, k \in K, l \in LW_{jk}$

5: While se obtenga una solución factible para el Modelo 1 y Modelo 2: $t = t + 1$

6: Recalcular ε^t con $\tau = 1$

$$\varepsilon^t = T - \tau$$

7: EndWhile

7: Registrar soluciones no dominadas

8: Generar comparación de Frentes de Pareto de ambas propuestas por medio del métricas definidas

END

Figura 4.1: Pseudocódigo de implementación de método de ε -constraint (Variación 1)

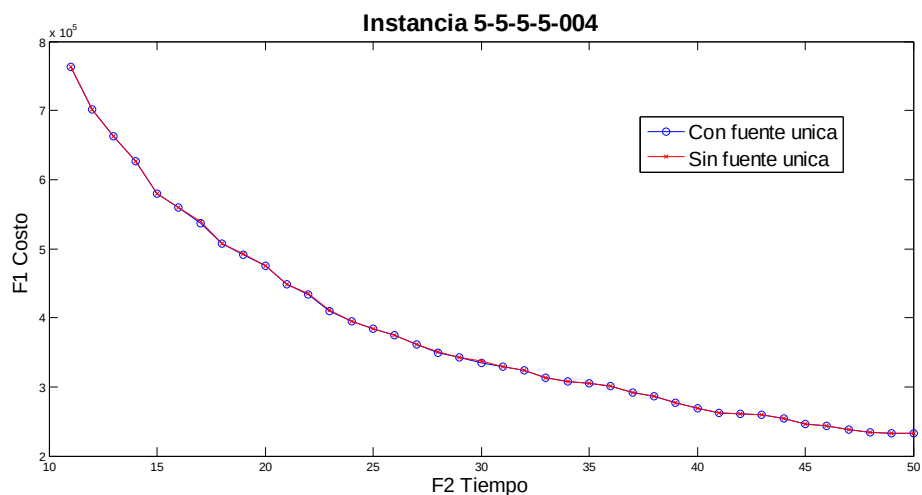
Con respecto al R_{pos} se observa que la variación al modelo presenta valores de 1 en todos los casos comparado con el modelo original. Los valores del R_{pos} en el modelo original en promedio son del 64% para la instancia 5-5-5-2, del 69% para la instancia 5-5-5-5, y de 0% para las instancias 5-10-10-2, 5-10-15-2 y 5-10-20-2. Esto indica en todos los casos que la variación que permite el abastecimiento de producto a los clientes por fuentes múltiples, presenta siempre mejores frentes de Pareto comparados con los obtenidos en el modelo original.

Con respecto al tiempo de procesamiento comparando el modelo original con la variación que permite el flujo directo entre (i) y (k) tenemos lo siguiente. Para la instancia 5-5-5-2 se incrementa en promedio un 9%. Para la instancia 5-5-5-5 se incrementa en promedio 627% con respecto al modelo original. Para el tamaño 5-10-10-2 se incrementa un 76% en promedio. Pero en las instancias 5-10-15-2 decrece un 16% y 5-10-20-2 decrece un 500%.

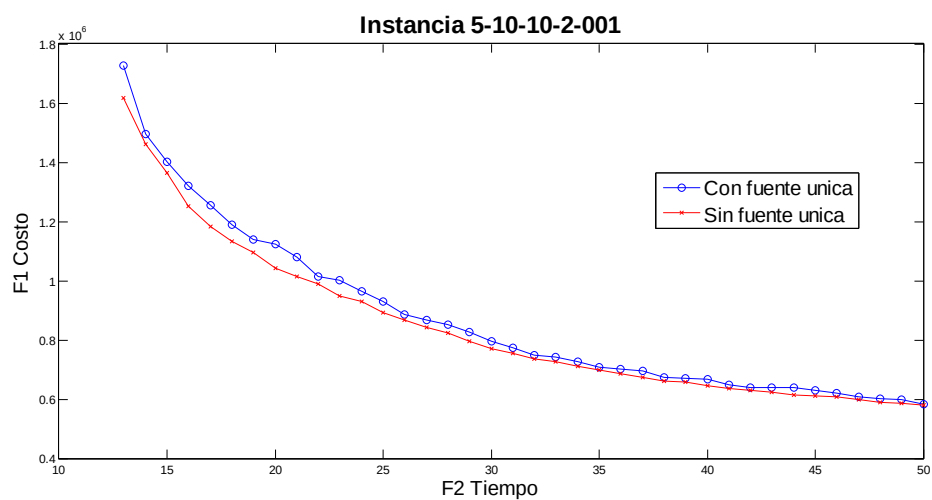
En las gráficas 4.6, 4.7 y 4.8 se observan ejemplos de cómo se comportan los frentes de Pareto de la variación que permite múltiples fuentes de suministro comparados con el modelo original.

Instancia	Con fuente única			Sin fuente única			Dmin	Tiempo con fuente única (Segundos)	Tiempo sin fuente única (Segundos)
	Tamaño	Si	Rpos (Si)	Si	Rpos (Si)	Davg			
5_5_5_2	1	23	0.71875	32	1	0.999241592	0.988047284	8.838	9.068
	2	13	0.464285714	28	1	0.997364453	0.982548241	9.197	11.052
	3	15	0.535714286	28	1	0.998039348	0.992728047	9.606	10.751
	4	18	0.5625	32	1	0.997265609	0.975479117	14.514	15.811
	5	24	0.96	25	1	0.999322488	0.988949556	9.006	9.565
5_5_5_5	1	34	0.894736842	38	1	0.999550382	0.991263149	40.998	59.376
	2	8	0.2	40	1	0.994702828	0.975947215	55.89	68.319
	3	25	0.641025641	39	1	0.999332609	0.989229847	68.772	87.766
	4	30	0.769230769	39	1	0.999382328	0.993278934	55.651	93.328
	5	37	0.948717949	39	1	0.999935512	0.997661346	41.012	52.617
5_10_10_2	1	0	0	37	1	0.969177174	0.929480711	356.355	2294.165
	2	0	0	39	1	0.981281738	0.966007434	193.005	371.465
	3	0	0	37	1	0.98124332	0.962507079	417.547	2212.05
	4	2	0.05	40	1	0.977909241	0.942805887	233.841	813.129
	5	0	0	37	1	0.969691672	0.91712171	259.442	1674.431
5_10_15_2	1	0	0	36	1	0.974936625	0.93690112	8042.069	29027.322
	2	0	0	36	1	0.98081129	0.956079748	11207.506	2668.63
	3	0	0	35	1	0.980120853	0.966818736	16262.752	8218.611
	4	0	0	37	1	0.981839825	0.963522995	23225.921	10991.189
	5	0	0	39	1	0.984170361	0.969302746	8734.642	6810.192
5_10_20_2	1	0	0	35	1	0.98737854	0.97111859	149028.323	364.128
	2	0	0	37	1	0.98613018	0.97454929	112315.372	24367.128
	3	0	0	35	1	0.99016256	0.9824318	246814.212	38991.51
	4	0	0	37	1	0.98522424	0.973581	240520	39919.572
	5	0	0	37	1	0.98692727	0.97677506	78406	32163.298

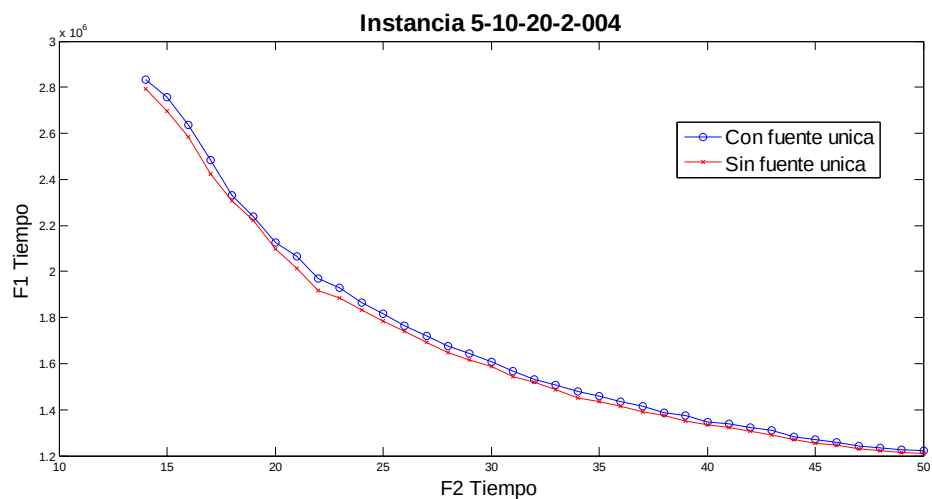
Tabla 4.2: Resultados de la primera variación



Grafica 4.6: Comparación de frentes de Pareto (5-5-5-5-004), variación1



Grafica 4.7: Comparación de frentes de Pareto (5-10-10-2-004), variación1



Grafica 4.8: Comparación de frentes de Pareto (5-10-20-2-004), variación1

4.6.2.- Resultados de la variación del que permite el flujo directo de las plantas (i) a los clientes (k)

Para la implementación de este experimento se utilizó el enfoque de ε -constraint para resolver el problema bi-objetivo, las soluciones no-dominadas son evaluadas por medio de las métricas $R_{pos}(P_i)$, $D_{average}$ y D_{min} , y se siguió el procedimiento mostrado en la figura 4.2. En el anexo 3 se incluye los resultados de todas las instancias probadas de esta variación.

Algoritmo ε Constraint

Input: Modelo 1 (modelo original) y Modelo 3 (Flujo – Directo de plantas (i) a clientes (k))

Output: Lista de soluciones no-dominadas

Begin:

1: $t = 1$ Optimizar el Modelo 1 con la función objetivo f_2

2: Recalcular T cuando $T - (E_j^1 = \max(TP_{ijl}A_{ijl}) - E_j^2 = \max(TW_{jkl}B_{jkl})) \geq 0, i \in I, j \in J, l \in LP_{ij}, j \in J, k \in K, l \in LW_{jk}$.

3: $t=1$ Optimizar el Modelo 2 con la función objetivo f_2

4: Recalcular T cuando $T - (E_j^1 = \max(TP_{ijl}A_{ijl}) - E_j^2 = \max(TW_{jkl}B_{jkl})) \geq 0, i \in I, j \in J, l \in LP_{ij}, j \in J, k \in K, l \in LW_{jk}$, y cuando $T - E_3 = \max(TV_{ikl}G_{ikl}) \geq 0, \forall j \in J$

5: While se obtenga una solución factible para el Modelo 1 y Modelo 3: $t = t + 1$

6: Recalcular ε^t con $\tau = 1$

$\varepsilon^t = T - \tau$

7: EndWhile

7: Registrar soluciones no dominadas

8: Generar comparación de los Frentes de Pareto de ambas propuestas

END

Figura 4.2: Pseudocódigo de implementación de método de ε -constraint (Variación 2)

En la tabla 4.2 se muestran los resultados de la comparación entre el modelo original y la variación que permite el flujo directo entre las plantas (i) y los clientes (k). En ésta observamos que en todos los casos $D_{average}$ es menor que 1, lo que indica que los frentes de Pareto de la variación son mejores comparados con los del modelo original. D_{min} en

todos los casos indica la diferencia más pequeña de ambos frentes comparados y nos proporciona un indicador de la diferencia de los frentes comparados.

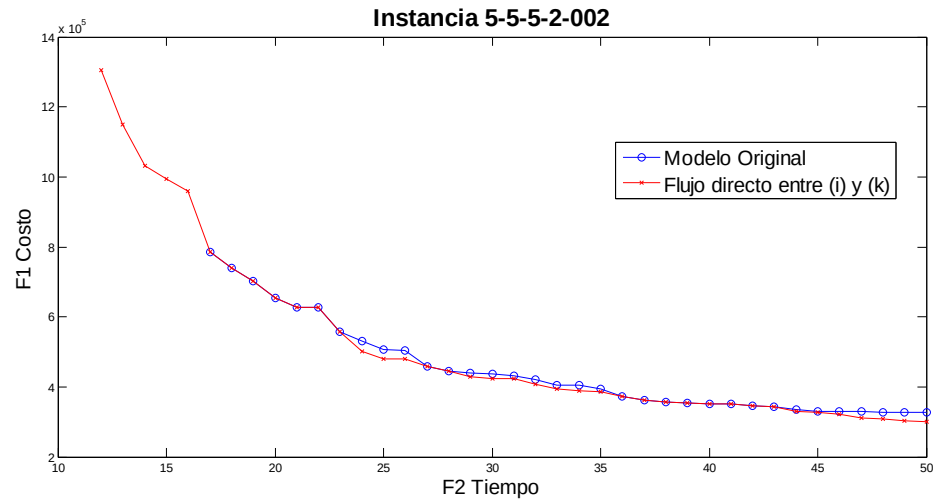
Con respecto al R_{pos} se observa que la variación al modelo presenta valores de 1 en todos los casos comparado con el modelo original. Los valores del R_{pos} en el modelo original en promedio son del 53% para la instancia 5-5-5-2, del 73% para la instancia 5-5-5-5, del 64% para la instancias 5-10-10-2 del 26% para la instancia 5-10-15-2 y del 18% para la instancia 5-10-20-2. Esto indica en todos los casos que la variación que flujo directo entre (i) y (k), presenta siempre mejores frentes de Pareto comparados con los obtenidos en el modelo original.

Con respecto al tiempo de procesamiento comparando el modelo original con la variación que permite el flujo directo entre (i) y (k) tenemos lo siguiente. Para la instancia 5-5-5-2 se incrementa en promedio un 1.6%. Para la instancia 5-5-5-5 se incrementa en promedio 6.2% con respecto al modelo original. Para el tamaño 5-10-10-2 se muestra un decrecimiento del 3.4% en promedio. Pero en las instancias 5-10-15-2 decrece un 22% y 5-10-20-2 aumenta un 16%.

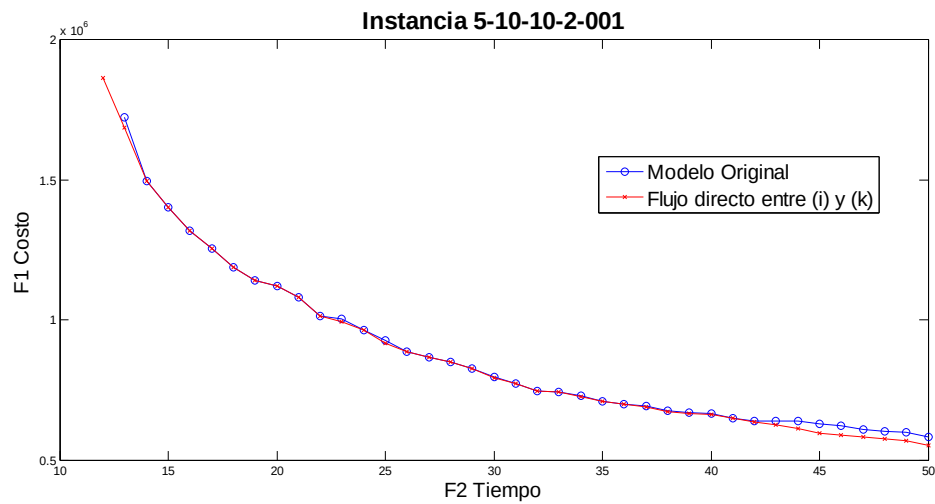
Instancia	Tamaño	Modelo original		Flujo Directo entre (i) y (k)		Davg	Dmin	Tiempo con el modelo original (Segundos)	Tiempo con flujo directo entre (i) y (k) (Segundos)
		Si	Rpos (Si)	Si	Rpos (Si)				
5_5_5_2	1	27	0.870967742	31	1	0.9975774	0.959659456	8.838	9.263
	2	15	0.428571429	35	1	0.980960942	0.917888119	9.197	10.276
	3	18	0.545454545	33	1	0.96701778	0.853863061	9.606	10.456
	4	1	0.032258065	31	1	0.958961922	0.917643737	14.514	12.989
	5	23	0.793103448	29	1	0.993623653	0.963885626	9.006	9.018
5_5_5_5	1	38	0.926829268	41	1	1	1	40.998	46.599
	2	33	0.76744186	43	1	0.99936964	0.991534923	55.89	55.641
	3	16	0.380952381	42	1	0.98025659	0.932383724	68.772	67.826
	4	35	0.813953488	43	1	0.99788515	0.97854988	55.651	65.761
	5	34	0.790697674	43	1	0.998394785	0.968841971	41.012	44.064
5_10_10_2	1	18	0.461538462	39	1	0.988469758	0.946692854	356.355	320.192
	2	32	0.780487805	41	1	0.997667593	0.977328129	193.005	190.587
	3	27	0.675	40	1	0.996586139	0.963569547	417.547	407.858
	4	31	0.775	40	1	0.998552693	0.98577745	233.841	245.735
	5	19	0.527777778	36	1	0.988811791	0.894387321	259.442	247.134
5_10_15_2	1	2	0.055555556	36	1	0.91012003	0.759719496	8042.069	316.244
	2	12	0.307692308	38	0.974358974	0.989174535	0.945877847	11207.506	10616.087
	3	10	0.25	40	1	0.978722374	0.86283473	16262.752	14671.503
	4	12	0.3	39	0.975	0.975841615	0.878749165	23225.921	14748.102
	5	17	0.425	40	1	0.98058196	0.919278825	8734.642	14748.102
5_10_20_2	1	3	0.076923077	38	0.974358974	0.944736561	0.802553629	149028.323	6973.83
	2	8	0.216216216	35	0.945945946	0.953849115	0.833593009	112315.372	137238.826
	3	9	0.236842105	37	0.973684211	0.959743314	0.837665021	246814.212	129141.434
	4	8	0.205128205	39	1	0.959377389	0.802553629	240520	246519.6
	5	8	0.205128205	38	0.974358974	0.968049106	0.865481661	78406	467645.918

Tabla 4.3: Resultados de la segunda variación

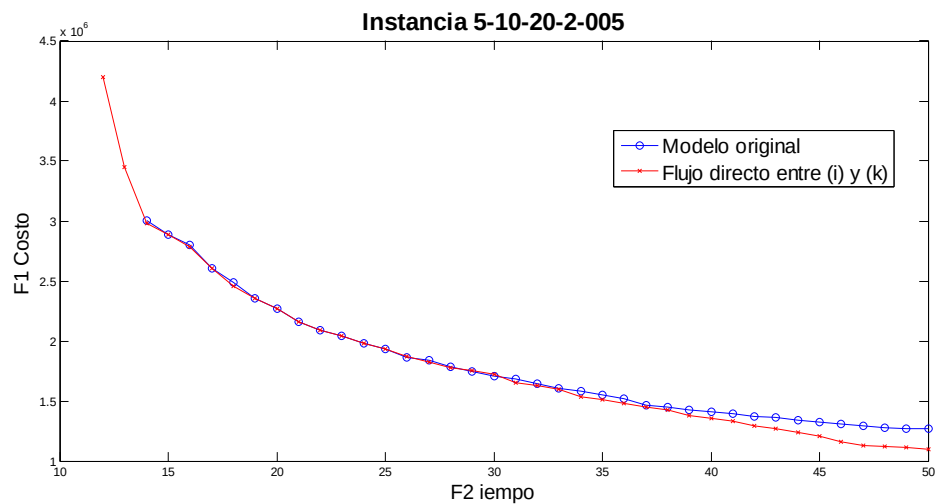
En las gráficas 4.9, 4.10 y 4.11 se observa cómo se comportan los frentes de Pareto de la variación que permite flujo directo entre (i) y (k) comparados con el modelo original.



Grafica 4.9: Comparación de frentes de Pareto (5-5-5-2-002), variación 2



Grafica 4.10: Comparación de frentes de Pareto (5-10-10-2-001), variación 2



Grafica 4.11: Comparación de frentes de Pareto (5-10-20-2-005), variación 2

4.6.3.- Resultados de la variación que permite el flujo entre centros de distribución (j) – (p)

Para la implementación de este experimento se utilizó el enfoque de ε -constraint para resolver el problema bi-objetivo, las soluciones no-dominadas son evaluadas por medio de las métricas $R_{pos}(P_i)$, $D_{average}$ y D_{min} , y se siguió el procedimiento mostrado en la figura 4.3. En los anexos 4 y 5 se incluyen todos los resultados de las instancias probadas.

Algoritmo ε Constraint

Input: Modelo 1 (modelo original) y Modelo 4 (Flujo entre Centros de Distribución (j) – (p))

Output: Lista de soluciones no-dominadas

Begin:

1: $t = 1$ Optimizar el Modelo 1 con la función objetivo f_2

2: Recalcular T cuando $T - (E_j^1 = \max(TP_{ijl}A_{ijl}) - E_j^2 = \max(TW_{jkl}B_{jkl})) \geq 0, i \in I, j \in J, l \in LPij, j \in J, k \in K, l \in LWjk$

3: $t=1$ Optimizar el Modelo 4 con la función objetivo f_2

4: Recalcular T cuando $T - (E_3 = \max(TP_{ijl}A_{ijl}) + \max(TS_{jpl}C_{jpl}) + \max(TW_{jkl}B_{jkl})); i \in I, j \in J, l \in LPij, l \in LSjp, k \in K, l \in LWjk$

5: While se obtenga una solución factible para el Modelo 1 y Modelo 4: $t = t + 1$

6: Recalcular ε^t con $\tau = 1$

$$\varepsilon^t = T - \tau$$

7: EndWhile

7: Registrar soluciones no dominadas

8: Generar comparación de los Frentes de Pareto de ambas propuestas

END

Figura 4.3: Pseudocódigo de implementación de método de ε -constraint (Variación 3)

Para el análisis de esta variación se realizó únicamente el análisis de dos instancias (5-5-5-2, y 5-5-5-5), debido a que el tiempo de procesamiento que se requiere para evaluar la variación es muy grande. Para la instancia 5-5-5-5 se requirió en promedio 34 horas de procesamiento para obtener un resultado, sin embargo para la instancia del siguiente tamaño 5-10-10-2 después de 143 horas de procesamiento aún no se obtenía un

resultado, por lo que se determinó no realizar las pruebas con el resto de las instancias de mayor tamaño.

En la tabla (4.3) se muestran los resultados de esta variación. $D_{average}$ es superior a 1 en todos los casos, lo que indica una calidad inferior de los frentes de Pareto de la variación con respecto al modelo original. D_{min} en todos los casos indica la diferencia más pequeña de ambos frentes comparados y nos proporciona un indicador de la diferencia de los frentes comparados.

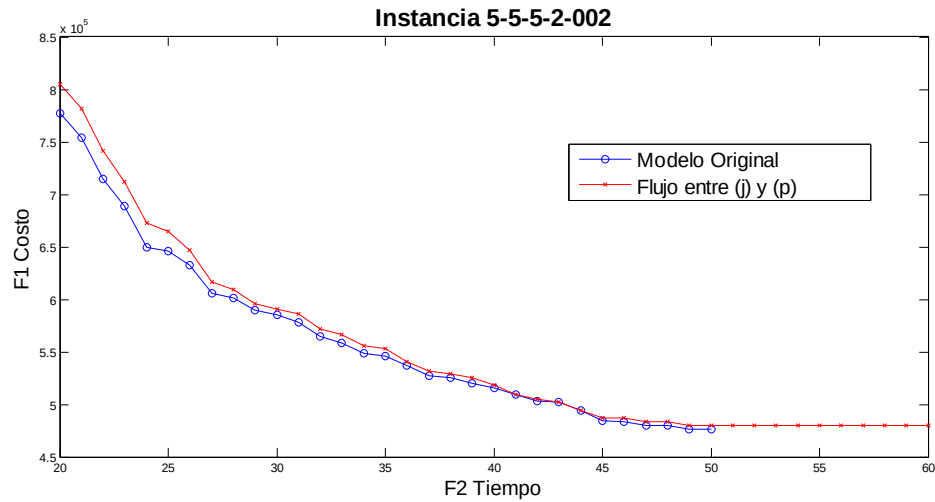
Con respecto al R_{pos} se observa que la variación al modelo presenta valores inferiores a 1 en todos los casos comparado con el modelo original. Los valores del R_{pos} en el modelo original en promedio son de 1 con respecto a la variación, lo que nos indica que el modelo original presenta siempre mejores frentes de Pareto

Con respecto al tiempo de procesamiento comparando el modelo original con la variación que permite el flujo entre (j) - (p) tenemos lo siguiente. Para la instancia 5-5-5-2 se incrementa en promedio un 460%. Para la instancia 5-5-5-5 se incrementa en promedio 560% con respecto al modelo original.

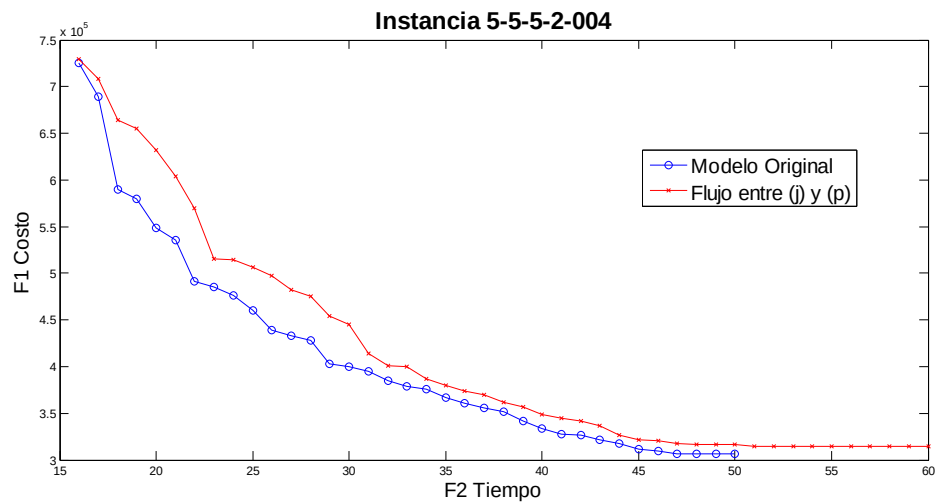
Instancia	Tamaño	Modelo Original		Flujo entre (j) y (p)		D_{avg}	D_{min}	Tiempo con el modelo original (Segundos)	Tiempo de flujo entre (j) y (p) (Segundos)
		Si	R_{pos} (Si)	Si	R_{pos} (Si)				
5_5_5_2	1	33	1	1	0.33333333	1.0165715	1	11.631	326.195
	2	31	1	1	0.03225806	1.01402981	1	20.896	292.527
	3	31	1	0	0	1.04683427	1.02795867	8.728	245.921
	4	32	1	0	0	1.06735052	1.006421	13.499	1215.217
	5	30	1	0	0	1.08324319	1.03670392	9.841	898.683
5_5_5_5	1	38	1	0	0	1.02172283	1.00771899	187.27	52861.828
	2	39	1	0	0	1.01398614	1.00201322	112.811	382637.904
	3	39	1	6	0.15384615	1.00778561	1	3944.193	122663.847
	4	40	1	0	0	1.01458474	1.00033388	218.698	43666.763
	5	40	1	2	0.05	1.01185138	1	2234.115	131359.178

Tabla 4.4: Resultados de la tercera variación

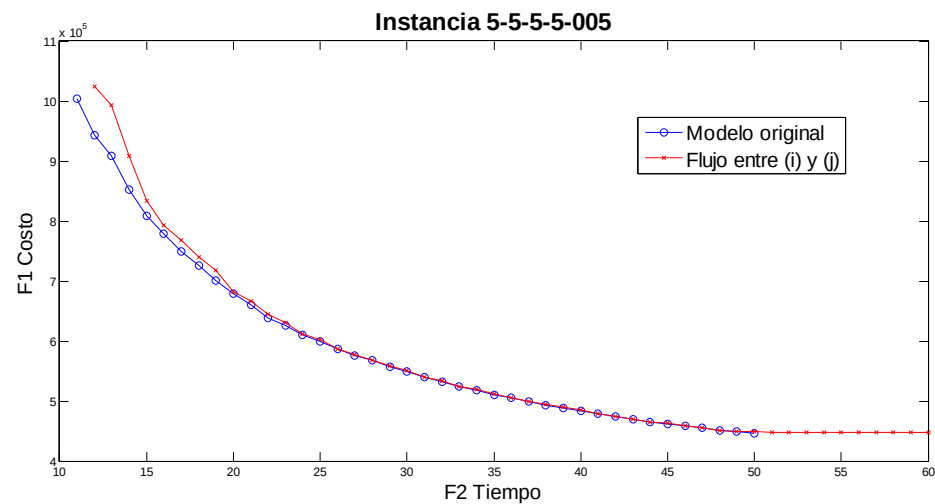
En las gráficas 4.12, 4.13 y 4.14 se observa cómo se comportan los frentes de Pareto de la variación que permite múltiples fuentes de suministro comparados con el modelo original.



Gráfica 4.12: Comparación de frentes de Pareto (5-5-5-2-002), variación 3



Gráfica 4.13: Comparación de frentes de Pareto (5-5-5-2-004), variación 3



Gráfica 4.14: Comparación de frentes de Pareto (5-5-5-5-005), variación 3

Capítulo 5: Conclusiones y Trabajos Futuros

5.1.- Conclusiones

Melo et al. (2009) define la administración de la cadena de suministro como el proceso de planeación, implementación y control de las operaciones de la cadena de suministro de una forma eficiente. Este aspecto está definido en un contexto de decisiones tácticas que permiten eficientar el ciclo completo de la manufactura. El trabajo desarrollado en esta investigación explora un área que no ha sido lo suficientemente trabajada e incorporada a los modelos matemáticos del diseño de cadenas de suministro; la selección de canales de distribución (Mula et al., 2010 y Bozart et al., 2009).

El problema CFCLP-TC propuesto por Olivares-Benítez (2007) y Olivares-Benítez et al. (2010) incorpora de manera novedosa la selección de alternativas de transporte en el contexto de un problema (dos-escalones) considerando: plantas, centros de distribución y clientes; sin embargo las variaciones propuestas en este trabajo permiten acercar los modelos teóricos a las aplicaciones reales, ya que consideran situaciones de mayor flexibilidad que podrían ocurrir en situaciones reales.

La primera variación que posibilita el flujo a los clientes de múltiples fuentes (DC) establece que el enfoque propuesto permite de forma general obtener mejores costos (Mínimos) comparado con la propuesta original en donde los clientes están limitados a obtener el producto de una sola fuente (DC) en puntos en el tiempo iguales. Esto permite obtener mejores frentes de Pareto en la alternativa propuesta (fuentes de abastecimiento múltiples), esto se debe a que el modelo matemático de la variación propuesta es una relajación del modelo original, el número de variables entonces disminuye y por lo tanto en este nuevo enfoque el espacio de soluciones se incrementa, posibilitando encontrar mejores soluciones en los mismos puntos de tiempo.

De acuerdo a los resultados obtenidos se desprende que resulta más eficiente permitir que los clientes sean suministrados por más de un centro de distribución, esto sin embargo aumenta la complejidad del cross-docking, y de acuerdo con Bozarth et al. (2009) incrementara el nivel de complejidad de la cadena de suministro afectando de manera negativa el rendimiento de la misma, esto debido a que se debe incrementar el nivel de coordinación con otros centros de distribución de modo que la demanda de los clientes sea cubierta adecuadamente. Sin embargo debemos tomar en cuenta que esta suposición tendría un menor impacto con una mayor variedad de productos manejados y enviados por los centros de distribución a los clientes.

La segunda variación que permite en algunos casos los flujos del producto de las plantas directamente a los clientes sin pasar necesariamente por los centros de distribución de forma general obtiene mejores costos (mínimos) comparados con la propuesta original en puntos del tiempo iguales.

En este caso el nivel de complejidad del modelo matemático de la segunda variación es mayor que el del enfoque original, sin embargo buscamos las instancias adecuadas a esta propuesta para que fueran competitivas con respecto a las originales, de modo que el modelo matemático tuviera la posibilidad de seleccionar ambas alternativas, es decir que compitieran. Se debe considerar que este enfoque no supone la eliminación de los centros de distribución, y la propuesta solo se justificaría cuando los clientes se encuentren geográficamente más cerca de las plantas que de los centros de distribución.

Cuando se planea la configuración de la cadena de suministro y se determina los puntos donde se ubicarán los clientes que se proyectan en ese punto en el tiempo, no es posible a futuro predecir con exactitud donde se ubicaran geográficamente en un futuro los nuevos clientes, y es claro que resultaría más costoso reubicar los centros de distribución en función de la nueva configuración geográfica de los clientes. Por tanto una alternativa que permita optimizar los costos y tiempos de la cadena de suministro en función de la posibilidad de enviar de manera directa de las plantas a los clientes es en si una alternativa atractiva. Los resultados obtenidos nos permiten determinar que se obtienen siempre mejores frentes de Pareto con este enfoque, sin embargo un problema con este enfoque es el tiempo requerido para resolver las instancias, ya que el incremento del tiempo es considerable cuando nos acercamos a las instancias más grandes que se asemejan a problemas reales. Esta propuesta permite explorar una configuración de la cadena de suministro novedosa que no ha sido considerada en la literatura revisada.

La tercera variación que permite en algunos casos el intercambio de producto entre centros de distribución comparada con la propuesta original en puntos de tiempo iguales, obtiene de manera general peores costos (mínimos). El nivel de complejidad del modelo matemático de este enfoque comparado con la propuesta original es mayor, debido a la mayor cantidad de restricciones y de variables, por tanto el espacio de solución es más limitado que con los enfoques anteriores, por lo que encontrar resultados es más complicado. Sin embargo estos resultados son conclusión del modo como las instancias fueron diseñadas, de modo que ajustando estas instancias podríamos encontrar otros frentes de Pareto diferentes. Un factor importante es el tiempo de intercambio entre centros de distribución, ya que si este disminuye podríamos obtener mejores soluciones. Esta propuesta es considera en el contexto global de la administración de la cadena de suministro, en donde un centro de distribución puede suministrar a otro si los tiempos para hacer llegar el producto al cliente y los costos asociados a esa alternativa son menores. Un ejemplo de esto es el intercambio de producto que llegan a realizar las agencias de automóviles para disminuir los tiempos de entrega que supondrían al realizar un pedido de un cliente directamente a la planta de ensamblaje. Esta es una práctica común que disminuye los tiempos de entrega a los clientes, esto en un ámbito de competencia es de vital importancia para el éxito de la organización (nivel de servicio).

Los resultados obtenidos determinan que este enfoque proporciona peores frentes de Pareto que el modelo original y por tanto mayores costos en puntos de tiempo iguales para ambos enfoques. Para este enfoque los tiempos de cómputo requerido se incrementan considerablemente conforme el tamaño de las instancias crece y por tanto de acerca a situaciones que no son raras en la práctica. Un cliente puede solicitar un producto que se encuentre fuera de stock, por lo que se deberá solicitar a la planta. La planta puede no tener este artículo en proceso por lo que deberá generar las ordenes de producción para satisfacer la demanda, posteriormente este producto será enviado al DC y finalmente al cliente. El nivel de servicio en este proceso, depende directamente del tiempo en que el cliente recibe finalmente el producto. Sin embargo un aspecto que no considera el modelo es el nivel de servicio al cliente, ya que para el ejemplo propuesto es difícil predecir con total exactitud los productos que solicitaran los clientes y cuando lo harán y sin embargo cuando esto suceda se deberá proporcionar el artículo que el cliente demanda en el menor costo y tiempo posible.

En el desarrollo de este trabajo se obtuvieron los matemáticos para:

- El Problema Capacitado de Localización de Instalaciones con costo fijo y Selección de Transporte con posibilidad de envío de producto de manera directa entre las plantas y los clientes para algunos casos.
- El Problema Capacitado de Localización de Instalaciones con costo fijo y Selección de Transporte con posibilidad de intercambio de producto entre centros de distribución.

Así como nos permitió desarrollar una metodología de comparación basado en las métricas planteadas para la determinación de los frentes de Pareto, y por tanto determinar cuál enfoque es más eficiente en función del costo y el tiempo.

También nos permitió establecer los enfoques más eficientes al generar los frentes de Pareto, y por tanto cual genera mejores resultados en función de las funciones objetivo establecidas.

Los enfoques propuestos son novedosos y permiten acercar los modelos matemáticos para la configuración de las cadenas de suministro a situaciones que ocurren muy comúnmente en la práctica y permiten cerrar la brecha entre la teoría y la práctica, además de contribuir al estado del arte en este contexto.

5.2.- Trabajos futuros

El desarrollo de este tema de investigación establece las bases para futuros trabajos en esta área tal como se describe a continuación:

Es claro que los enfoques nuevos presentan un incremento en el tiempo de procesamiento requerido. Los resultados y las conclusiones presentadas se basan únicamente en las instancias que fueron probadas y éstas en un contexto de aplicación real, son pequeñas. Es claro que los resultados de los frentes de Pareto para instancias mayores podrían ser diferentes, por tanto es importante determinar esos frentes; sin embargo la imposibilidad de hacerlo con métodos exactos nos obliga a tratar de obtenerlos por medio de heurísticas o metaheurísticas.

En la literatura revisada el método de descomposición Lagrangiana es ampliamente utilizado para resolver problemas similares (Lidestam et al., 2011). Los resultados obtenidos muestran la viabilidad de una futura implementación para evaluar el comportamiento de instancias de gran tamaño para el problema planteado en este trabajo. Otro enfoque utilizado es el de algoritmos genéticos, (Gen et al., 2006) para un problema similar encontrado en la bibliografía. En este se reportan resultados satisfactorios para instancias probadas de gran tamaño, lo que podría extenderse al problema tratado para instancias de gran tamaño.

El enfoque de algoritmos evolutivos para optimización es ampliamente utilizado en problemas similares Lin et al. (2009), del tipo multi/objetivo, tales como Non-dominated Sorting Genetic Algorithm (NSGA-II) y Strength Pareto Evolutionary Algorithm (SPEA – II). Por lo tanto resulta una consecuencia natural en el desarrollo de la presente investigación.

Referencias

Aikens, C.H. (1985). *Facility location models for distribution planning*. *European Journal of Operational Research*. 22, 263-279.

Altinel Kuban, DurmazEngin, Aras Necati, OzkisacikKerem Can. (2009). *A location–allocation heuristic for the capacitated multi-facility Weber problem with probabilistic customer locations*. *European Journal of Operational Research*. 198, 790–799.

Altiparmark, F.; Gen, M.; Lin, L.; Paksoy, T. (2006). *A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks*. *Computer & Industrial Engineering*. 51, 196 – 215.

ArosteguiJr Marvin, Kadipasaoglu N., KhumawalaBasheer M. (2006). *An empirical comparison of Tabu Search, Simulated Annealing and Genetic Algorithms for facilities location problems*. *Int. J. Productions Economics*. 103, 742 – 754.

Averbakh Igor, Berman Oded, ZviDrezner, Wesolowsky George O. (2007). *The uncapacitated facility location problem with demand-dependent setup and service costs and customer-choice allocation*. *European Journal of Operational Research*. 179, 956–967.

Azaron A., Brown k. N., Tarim S.A., Modarres M. (2008). *A multi-objective stochastic programming approach for supply chain design considering risk*. *Int. J. Production Economics*. 116, 129–138.

BaiouMourad, Barahona Francisco. (2008). *On the p-median polytope of Y - free graphs*. *Discrete Optimization*. 5, 205–219.

Ballou R. H. (1999). *Business Logistics Management*. Prentice Hall, Upper Saddle River, USA.

Balinski M. L., Mills H. (1960). *A Warehouse Problem*. Technical Report. Mathematica, Princeton, USA, April.

Baumol W. J., Wolfe P. (1958). *A Warehouse Location Problem*. *Operations Research*, 6(2): 252-263.

Bozart Cecil C., Warsing Donald P., Flynn Barbara B., Flynn E. James. (2009). *The impact of supply chain complexity on manufacturing plant performance*, *Journal of Operations Management* 27, 78-93.

Brintrup Alexandra. (2010). *Behavior adaptation in the multi-agent, multi-objetive and multi-role supply chain*. *Computers in Industry*. 61, 636-645.

Caggiano Kathryn E. Jackson Peter L. Muckstadt John A. Rappold James A. (2009). *Efficient computation of time-based customer service levels in a multi-item, multi-echelon supply chain: A practical approach for inventory optimization*. *European Journal of Operational Research*. 199, 744-749.

CanelCem, KhumawalaBasheer M., Law Japhett, Loh Anthony. (2001). An algorithm for the capacitated, multi-commodity multi-period facility location problem. *Computers & Operations Research*. Volume 28, Issue 5, 411–427.

Chen Chia-Ho, Ting Ching-Jung.(2008). Combining Lagrangian heuristic and Ant Colony System to solve the Single Source Capacitated Facility Location Problem. *Transportation Research Part E*. 44, 1099–1122

ChinchuluunAltannar, PardalosPanos M. (2007). A survey of recent developments in multiobjective, optimization.*Annals of Operations Research*, 154, 29–50 DOI 10.1007/s10479-007-0186-0.

Chopra S., Meindl P. (2007). *Supply Chain Management: Strategy, Planning and Operations*, Prentice Hall, New Jersey.

Collette Yann, Siarry Patrick. (2004). *Multi-objective optimization: Principles and case studies*. Springer.

Cordeau, J-F., Pasin, F., Solomon, M.M. (2006).An integrated model for logistics network design.*Annals of Operations Research*. 144, 59–82.

Daskin Mark S. (1995). *Network and Discrete Location: Models, Algorithms and Applications*. Wiley Inter-Science.

Diaz Juan A., Fernandez Elena. (2006). Hybrid scatter search and path relinking for the capacitated p -median problem.*European Journal of Operational Research*. 169, 570–585.

Drezner Z., Hamacher H.W. (2004). *Facility Location Applications and Theory*, (Eds.), Springer, New York.

Ehrgott M., Ruzika S. (2008). Improved ε -constraint Method for Multi-objective Programming. *J Optim Theory Appl*. 138, 375-396.

Faulkenberg Stacey L., Wiecek Margaret M. (2012). Generating equidistant representations in bi objective programming.*ComputOptim Appl*. DOI 10.1007/s10589-011-9403-5

Gen Mitsuo, AltiparmakFulya, Lin Lin. (2006). A genetic algorithm for two-stage transportation problem using priority-based encoding, DOI 10.1007/s00291-005-0029-9, *OR Spectrum*. 28, 337–354

Geoffrion, A.M., Powers, R.F. (1995). Twenty years of strategic distribution system design: An evolutionary perspective. *Interfaces* 25, 105–127.

Goldengorin B., Krushinsky D. (2011). Complexity evaluation of benchmark instances for the p -median problem. *Mathematical and Computer Modeling*.53, 1719 –1736.

Glover F. *Future Paths for Integer Programming and Links to Artificial Intelligence*.*Computers & Operations Research*. 13 (1986) 533-549.

Haimes Y. Y., Lasdon, L. S., Wismer, D.A. (1971). *On a bi-criterion formulation of the problem of integrated system identification and system optimization.*IEEE Transaccion on system, Man, and Cybernetics. 1, 296-297

HamdouchYounes. (2011). *Multi-period supply chain network equilibrium with capacity constraints and purchasing strategies.* Transportation Research Part C. 19, 803–820.

HammamiRamzi, FreinYannick, Hadj-AlouaneAtidel B. (2008). *Supply chain design in the localization context: Relevant features and new modeling tendencies.* Int. J. Production Economics. 113, 641–656.

Huang Huei-Chuen, Li Rongheng. (2008). *A k-product uncapacitated facility location problem.*European Journal of Operational Research. 185, 552–562.

Hung Shih-Jieh. (2011). *Activity-based divergent supply chain planning for competitive advantage in the risky global environment: A DEMATEL-ANP fuzzy goal programming approach.* Expert Systems with Applications. 38, 9053–9062.

Klose, A. Drexler. (2005). *Facility location models for distribution system design,* European Journal of Operational Research. 162, 4–29.

Klose Andreas, Gortz Simon. (2007). *A branch-and-price algorithm for the capacitated facility location problem.* European Journal of Operational Research 179, 1109–1125.

Knowles JD., Corne D.W. *On metrics for comparing non-dominated sets.* (2002). In Congress on Evolutionary Computation. 711–6.

Kuehn Alfred A., Hamburger M. J. (1963). *A Heuristic Program for Locating Warehouses.*Management Science. 9 (4), 643-666.

Jaszkiewicz A. (2003). *Do multiple-objective metaheuristics deliver on their promises? A computational experiment on the set-covering problem.*IEEE Transactions on Evolutionary Computation. 7(2), 133–43.

Laumanns Marco, Thiele Lothar, ZitzlerEckart. (2006). *An efficient, adaptive parameter variation scheme for metaheuristics based on the epsilon-constraint method.* European Journal of Operational Research. 169, 932-942.

Liang Tien-Fu, Cheng Hung-Wen.(2009). *Application of fuzzy sets to manufacturing/distribution planning decisions with multi product and multi-time period in supply chains.*Expert Systems with Applications. 36, 3367–3377.

Lidestam Helene, Rönqvist Mikael. (2011). *Use of Lagrangian decomposition in supply chain planning.* Mathematical and Computer Modeling 54, 2428–2442.

Lin C.K.Y. (2009). *Stochastic single-source capacitated facility location model with service level requirements.* Int. J. Production Economics. 117, 439–451.

Lin Lin, Gen Mitsuo, Wang Xiaoguang. (2009). *Integrated multistage logistics network design by using hybrid evolutionary algorithm.*Computers & Industrial Engineering. 56, 854–873.

Mackelprang Alan W., Anand Nair. (2010). *Relationship between just-in-time manufacturing practice and performance: A meta-analytic investigation*, *Journal of Operations Management*. 28, 283-302.

MladenovicNenad, Brimberg Jack, Hansen Pierre, Moreno-Pérez José A. (2007). *The p-median problem: A survey of metaheuristic approaches*. *European Journal of Operational Research*. 179, 927–939.

Melo T., Nickel S., Saldanha-da-Gama. (2008). *Network design decisions in supply chain planning*, ISSN 1434-9973.

Melo M.T., Nickel S., Saldanha-da-Gama F. (2009). *Facility location and supply chain management – A review*. *European Journal of Operations Research*. 196, 401 – 412.

Meixell Mary J., GargeyaVidyaranya B. *Global supply chain design*. (2005). *A literature review and critique*. *Transportation Research Part E. Logistics and Transportation Review*. Volume 41, Issue 6, 531–550.

Moncayo-Martínez L.A. Zhang David Z. (2011). *Multi-objective ant colony optimization: A meta-heuristic approach to supply chain design*. *Int. J. Production Economics*. 131, 407–420.

MulaJosefa, Peidro David, Díaz-Madroñero Manuel, Vicens Eduard. (2010). *Mathematical programming models for supply chain production and transport planning*, *European Journal of Operational Research*. 2004, 377 – 390.

Nagurney Anna. (2010). *Supply chain network design under profit maximization and oligopolistic competition*. *Transportation Research Part E*. 46, 281–294.

Olivares Benitez E. (2007). *Capacitated Fixed Cost Facility Location Problem with Transportation Choices*. PhD Dissertation, ITESM.

Olivarez-Benitez E., González-Velarde J. L., Ríos-Mercado R.Z. (2010). *A Supply Chain Design problem with Facility Location and. Bi-objective Transportation Choices*. *TOP, Journal of the Spanish Society of Statistics and Operations Research*. DOI.10.1007/s11750-010-0162-8.

Pomerol Jean-Charles, Barbara-Romero Sergio. (2000). *Multicriterion Decision in Management: Principles and Practice*. Kluwers International Series.

Qian Bin, Wang Ling, Huang De-Xian, Wang Wan-Liang, Wang Xiong. *An effective hybrid DE-based algorithm for multi-objective flow shop scheduling with limited buffers*. *Computers & Operations Research*. 36 (2009) 209 – 233

ReVelle, C.S., Laporte, G. (1996). *The plant location problem: New models and research prospects*. *Operations Research*. 44, 864-874

ReVelle C. S., Eiselt H. A. (2005). *Location analysis: A synthesis and survey*. *European Journal of Operational Research*. 165, 1-19

ReVelle C. S., Eiselt H. A., Daskin M. S. (2008). A bibliography for some fundamental problem categories in discrete location science. *European Journal of Operational Research*. 184, 817-848.

SadjadyHannan, Davoudpour Hamid. (2012). Two-echelon, multi-commodity supply chain network design with mode selection, lead-times and inventory costs. *Computers&OperationsResearch*. 39, 1345–1354

Salazar-Aguilar M. Angélica, Ríos-Mercado Roger Z., González-Velarde José Luis. (2011). A bi-objective programming model for designing compact and balanced territories in commercial districting. *Transportation Research Part C*. 19, 885–895.

Schmitt Amanda J., Singh Mahender. (2012). A quantitative analysis of disruption risk in a multi-echelon supply chain. *International Journal of Production Economics* doi: 10.1016/j.ijpe.2012.01.004.

SodhiManMohan S., Tang Christopher S. (2009). Modeling supply-chain planning under demand uncertainty using stochastic programming: A survey motivated by asset–liability management, *Int. J. Production Economics*. 121, 728–738.

Shin Sangmun, Cho Byung Rae. (2006). Robust Design Models for Customer-Specified Bounds on Process Parameters. *J SystSciSyst Eng*. 15(1), 002-018. DOI: 10.1007/s11518-006-0002-4.

ShenZuo-Jun Max, Qi Lian.(2007). Incorporating inventory and routing costs in strategic location models. *European Journal of Operational Research*. 179, 372–389.

Simchi-Levi D., Kaminski P., Simchi-Levi E. (2000). *Designing and Managing the Supply Chain: Concepts, Strategies and Case Studies*. McGraw Hill, Boston, USA.

Simchi-Levi D., Kaminsky P., Simchi-Levi E. (2004). *Managing the Supply Chain: The Definitive Guide for the Business Professional*, McGraw-Hill, New York.

Speier Cheri, Whipple Judith M., Closs David J., Voss M. Douglas. (2011). Global supply chain design considerations: Mitigating product safety and security risks. *Journal of Operations Management*. 29, 721–736.

Sun Minghe. (2006). Solving the uncapacitated facility location problem using tabu search. *Computers & Operations Research* 33, 2563–2589.

Tancrez J. S., Lange j. C., Semal P. (2012). A location-inventory model for large Three-Level Supply Chains. *Transportation Research Part E*. Vol. 48(2), 485-592.

Van Veldhuizen DA. (1999). *Multi objective evolutionary algorithms: classifications, analyses, and new innovations*. PhD dissertation, Department of Electrical and Computer Engineering, Graduate School of Engineering, Air Force Institute of Technology, Wright-Patterson AFB, Ohio.

Wang Kung-Jeng, MakondBunjira, Liu S-Y. (2011). Location and allocation decisions in a two-echelon supply chain with stochastic demand – A genetic-algorithm based solution. *Expert Systems with applications*. 38, 6125-6131.

Wang, H.S. (2009). *A two-phase ant colony algorithm for multi-echelon defective supply chain network design*. *European Journal of Operational Research*. 192 243-252.

XuNingxiong, Nozick Linda. (2009). *Modeling supplier selection and the use of option contracts for global supply chain design*. *Computers & Operations Research*. 36, 2786 – 2800.

Yao Zhishuang, Lee Loo Hay, JarupphongsaWikrom, Tan Vicky, Hui Chen Fei. (2010). *Multi source facility location-allocation and inventory problem*. *European Journal of Operation Research*. 2007, 750 – 762.

Yeh Wei-Chang, Chuang Mei-Chi. (2011). *Using multi objective genetic algorithm for parner selection in Green supply chain problems*. *Expert Systems with applications*. 38, 4244–4253.

Yu Xinjie, Gen Mitsuo. (2010). *Introduction to evolutionary algorithms*. Springer –Verlang.

Anexo 1

Resultados de la Instancia Original (5-5-5-2)					
Tiempo	5-5-5-2-001	5-5-5-2-002	5-5-5-2-003	5-5-5-2-004	5-5-5-2-005
50	245978.737	325993.043	297723.556	251705.772	265573.704
49	245978.737	325993.043	297723.556	251705.772	278941.768
48	245978.737	327596.48	304865.951	251705.772	278941.768
47	245978.737	328961.795	304865.951	259467.281	278941.768
46	257021.051	328961.795	313990.891	261278.965	278941.768
45	260091.148	328961.795	313990.891	265102.542	278941.768
44	260091.148	334627.393	313990.891	265102.542	278941.768
43	267025.041	344134.59	313990.891	272921.607	299409.083
42	279424.801	346513.194	321422.214	280712.195	299409.083
41	280875.633	350541.028	329366.941	285887.901	311447.543
40	280875.633	350541.028	329366.941	288195.261	311447.543
39	287365.801	354996.528	329366.941	293565.877	314712.973
38	287365.801	357450.605	338886.009	297855.647	323885.165
37	293850.697	361462.913	342090.024	298785.031	332498.58
36	306250.457	372772.069	350406.484	313423.982	349935.464
35	315924.376	392868.712	354240.684	317886.018	356312.079
34	319445.476	404449.44	358122.83	329703.815	359656.37
33	328464.197	405466.737	370254.579	345099.666	359656.37
32	345663.948	419880.643	373049.004	354882.544	370187.068
31	353704.662	432044.801	379015.513	361122.995	391238.105
30	353704.662	438229.971	393830.018	364421.606	391238.105
29	373679.237	440636.221	410712.79	368220.962	391238.105
28	381572.793	444405.463	410712.79	419374.531	416842.602
27	394670.508	459782.488	429484.692	419374.531	441621.858
26	414407.952	504803.712	450156.452	433646.614	450795.255
25	424664.797	507314.593	451014.371	434995.533	459248.325
24	450625.115	529514.153	463304.734	453546.31	461830.77
23	484122.266	556634.525	480158.468	471890.146	487264.133
22	502305.02	626934.807	494505.517	478485.463	517980.639
21	505763.633	626934.807	506499.118	525487.439	538455.528
20	536478.26	654724.057	514724.811	530695.909	553170.917
19	542553.417	702885.711	534822.93	562112.447	592783.709
18	552793.183	739611.388	577916.377	580675.909	630969.555
17	591787.273	785034.845	603159.307	633589.123	648909.272
16	611983.664		706699.246	679090.501	705902.309
15	638812.812		767609.179		
14	677203.229				
13	753441.778				
12	763998.889				

	Resultados de la Instancia Original (5-5-5-5)				
Tiempo	5-5-5-5-001	5-5-5-5-002	5-5-5-5-003	5-5-5-5-004	5-5-5-5-005
50	235652.939	303140.186	280588.14	232869	242514.812
49	235652.939	306538.979	284687.739	232869	255025.635
48	235652.939	307561.718	285327.469	234560.834	258204.126
47	241941.599	308932.851	288150.056	237552.459	262981.761
46	241941.599	310378.082	291622.121	244040.164	262981.761
45	245556.819	316403.29	293618.516	245731.998	265139.588
44	250242.687	319715.552	295700	253746.366	271596.706
43	255467.106	324207.751	299666.34	259852.435	273962.101
42	260551.259	328971.95	304030.293	261075.75	278411.335
41	265237.127	334640.867	309531.339	262767.584	285371.687
40	270461.546	340146.656	313996.281	268816.584	294206.603
39	276206.318	347162.141	317788.402	276830.952	295330.558
38	282851.864	352805.28	321774.541	285902.176	298878.284
37	290182.616	359201.378	327424.297	291951.176	301036.111
36	296288.642	368915.703	331802.188	300533.827	307493.229
35	300974.51	374820.997	337662.625	305375.948	309858.624
34	306198.929	378082.305	344248.546	307396.007	316818.976
33	311943.701	381521.265	353911.641	313445.007	330778.892
32	318589.247	389991.233	360285.448	323482.436	333809.346
31	325919.999	399682.831	371745.783	329006.845	361343.555
30	339378.796	416375.926	384796.211	337147.882	363926
29	345713.495	423307.905	388972.541	342563.067	385881.706
28	360765.705	432637.502	406326.933	350371.055	388247.101
27	370377.515	442340.605	418689.528	361465.419	412847.906
26	384523.033	453559.818	429605.491	374604.739	428595.632
25	393352.751	471228.616	440960.124	384318.083	440325.156
24	409700.162	482191.519	456059.59	394502.02	451902.639
23	426713.394	495498.332	470543.346	411305.657	465923.793
22	443847.658	510890.87	485230.504	434805.889	486948.814
21	462493.391	535250.479	498827.274	448189.813	503813.504
20	486233.598	552059.801	516000.353	475164.848	516007.041
19	497119.928	590259.176	538012.653	492298.702	536022.461
18	516857.372	607739.696	558949.389	507156.753	579063.325
17	550125.428	653077.996	584752.281	540075.829	598732.756
16	573194.285	694834.607	623337.474	560232.879	625272.869
15	612103.845	711694.277	655276.443	580251.105	650000.816
14	657930.499	780729.153	689059.592	626969.005	695242.405
13	683267.979	824456.618	747770.696	663124.01	764083.75
12	731448.594	862409.215	892859.152	701275.157	801817.579
11	787357.136	893022.003		763716.773	1002440.435
10	846533.969				

	Resultados de la Instancia Original (5-10-10-2)				
Tiempo	5-10-10-2-001	5-10-10-2-002	5-10-10-2-003	5-10-10-2-004	5-10-10-2-005
50	582789.904	579866.486	583253.739	472788.186	613492.413
49	599586.888	587070.87	583253.739	474786.743	616729.499
48	600850.309	588358.335	588153.405	474954.233	620764.501
47	608333.47	591485.088	592479.633	482724.867	630347.565
46	620676.09	594830.28	600704.737	491345.968	630347.565
45	628331.926	608242.08	608583.805	493817.589	644325.356
44	638829.992	618478.131	625175.811	494941.338	646395.333
43	639229.858	629924.161	628386.29	514465.147	662020.558
42	639473.721	634658.886	638436.668	516278.186	669932.365
41	649527.485	651561.61	652849.885	528242.056	677642.734
40	665884.819	663621.781	664120.013	539141.983	687431.41
39	670509.247	671358.457	673524.457	549141.004	697196.04
38	674819.499	678615.711	677862.132	565699.447	714716.547
37	693838.084	690961.002	690007.696	571368.275	720360.939
36	700471.987	708788.94	694943.771	580409.144	730536.333
35	708938.761	721231.726	702859.034	589067.883	746127.731
34	727783.666	731221.028	740498.012	601408.108	762304.454
33	741648.092	746376.842	762076.18	616204.756	777422.974
32	747176.548	774833.132	782181.432	622998.1119	794180.532
31	774506.841	793542.151	792285.191	633758.466	803920.764
30	795629.433	813690.362	806099.28	652753.792	835256.246
29	825657.654	832634.818	840683.869	678033.662	848509.237
28	851478.653	851980.84	854960.76	697470.903	875688.628
27	866022.001	879849.43	878076.322	710461.81	898135.282
26	887162.125	907188.091	897997.56	737271.322	920723.395
25	928127.355	948861.708	923736.317	763467.046	981756.185
24	963538.726	983701.978	964794.134	771916.473	991007.602
23	1003030.778	1032382.255	983403.412	803026.342	1005043.625
22	1014118.718	1050009.351	1009142.788	853269.836	1041145.928
21	1080608.504	1088933.849	1060040.363	887435.163	1094758.644
20	1122516.202	1146305.76	1108565.881	909148.363	1142581.704
19	1140177.048	1184032.725	1149292.76	979331.459	1224481.65
18	1187813.78	1249693.546	1206417.565	1011544.787	1243059.278
17	1254624.102	1277782.633	1257009.532	1079858.17	1296161.012
16	1319196.823	1325711.354	1317537.821	1154709.322	1372066.312
15	1402997.907	1505314.541	1360920.537	1209504.263	1521924.743
14	1495892.815	1588618.893	1549166.178	1283387.592	1645118.124
13	1725051.317	1726593.953	1698529.694	1336439.409	
12		1809621.634		1553696.886	
11				1607826.356	

	Resultados de la Instancia Original (5-10-15-5)				
Tiempo	5-10-15-2-001	5-10-15-2-002	5-10-15-2-003	5-10-15-2-004	5-10-15-2-005
50	1172718.476	925128.893	956247.837	832523.981	935661.704
49	1172718.476	929536.661	958554.613	834871.802	944063.261
48	1172718.476	932472.864	962205.054	844232.576	949593.729
47	1172718.476	937632.066	967693.39	855333.684	963078.823
46	1172718.476	952520.146	974549.749	861557.643	972173.734
45	1172718.476	966483.497	986052.755	877105.539	978097.663
44	1174070.795	981807.263	1008068.654	884710.996	997097.574
43	1175530.418	989762.765	1024360.327	895503.925	1008341.021
42	1181283.878	1001365.661	1036664.085	899493.955	1022419.428
41	1198877.105	1012361.71	1053684.22	921446.128	1033959.172
40	1207989.202	1031609.602	1055907.026	930344.169	1050857.602
39	1214344.446	1048494.171	1075004.583	948629.338	1070887.828
38	1229622.921	1064022.55	1093904.655	959210.721	1083001.113
37	1246552.798	1093707.06	1128538.781	982820.545	1099441.16
36	1256391.979	1115717.249	1138615.53	985724.65	1122146.551
35	1270828.88	1138631.435	1156139.142	1014529.805	1136841.706
34	1285189.578	1144401.165	1189767.722	1037264.283	1159281.268
33	1297304.956	1170343.01	1218056.149	1053666.472	1185999.471
32	1314942.97	1200884.687	1230175.38	1070853.294	1203558.316
31	1335200.763	1218323.578	1253583.075	1097729.702	1227226.261
30	1364430.657	1242442.294	1286911.683	1121167.385	1245747.892
29	1377084.988	1284855.358	1311234.495	1148593.014	1284638.837
28	1405389.751	1304818.05	1341957.851	1187342.884	1328030.117
27	1428264.122	1340334.771	1398207.244	1207262.748	1358180.577
26	1482323.923	1370916.544	1423866.044	1248374.108	1393812.544
25	1566500.456	1425865.058	1446702.733	1278550.539	1442494.477
24	1520046.432	1510569.202	1491432.077	1327808.778	1490269.374
23	1542979.306	1526601.653	1533516.588	1369460.909	1535122.457
22	1570123.571	1590190.633	1601685.854	1435030.809	1582014.94
21	1608757.277	1637080.784	1679572.457	1484176.369	1648283.92
20	1641681.339	1699947.951	1720248.714	1575414.631	1698683.979
19	1691619.307	1818144.526	1778517.435	1621979.611	1765079.637
18	1749697.119	1883938.799	1854742.347	1688947.773	1836332.996
17	1811440.446	1975468.124	1941279.374	1762053.343	1898382.303
16	1841998.284	2106353.893	2038432.353	1850550.241	2025942.713
15	1923129.66	2238445.159		1939800.204	2204675.802
14	1974270.868			2158244.852	2343914.315
13	2042480.788				2481680.762
12	2218764.686				2598414.222
11	2305183.748				
10	2508180.816				

	Resultados de la Instancia Original (5-10-20-2)				
Tiempo	5-10-20-2-001	5-10-20-2-002	5-10-20-2-003	5-10-20-2-004	5-10-20-2-005
50	1409216.02	1424503.286	1388284.17	1220762.554	1268664.547
49	1412132.608	1445989.105	1396334.204	1224636.637	1273422.512
48	1428732.635	1455158.639	1399718.03	1235075.901	1275916.989
47	1433856.978	1460582.026	1409073.563	1242013.399	1294536.919
46	1451446.339	1474934.192	1423543.977	1259664.454	1309618.782
45	1469300.111	1496467.145	1437180.222	1270214.776	1326769.352
44	1480161.988	1517555.17	1464628.798	1282282.26	1342953.163
43	1492159.021	1535279.441	1479566.141	1308755.34	1359823.75
42	1513121.905	1552977.654	1495109.502	1324370.599	1372129.107
41	1528222.027	1573663.347	1507913.393	1338770.364	1391988.433
40	1555119.525	1595200.426	1533390.294	1346391.406	1411963.841
39	1571345.339	1612284.179	1548616.566	1372971.95	1423198.082
38	1596830.921	1629364.105	1567105.421	1386055.334	1447406.953
37	1616214.475	1662622.282	1594521.386	1413923.52	1462723.19
36	1639476.91	1680067.768	1621692.91	1433551.538	1499486.784
35	1657485.08	1708187.628	1637761.584	1460027.259	1527892.725
34	1681659.395	1725423.325	1663763.473	1481079.65	1559129.205
33	1712791.827	1756356.492	1710811.043	1505524.1	1592564.417
32	1739645.141	1790722.102	1745390.94	1533003.405	1627091.715
31	1777055.819	1811248.139	1772349.184	1569620.876	1660393.321
30	1826318.079	1847418.83	1824417.839	1608218.699	1693525.949
29	1858004.999	1886665.126	1871628.919	1643323.279	1738772.646
28	1909898.046	1927978.541	1897128.38	1676386.259	1778060.171
27	1953017.786	1982312.938	1944273.918	1720989.867	1811743.759
26	1988965.126	2003324.353	1985916.467	1765996.816	1860665.321
25	2059210.274	2092295.124	2048051.53	1817450.149	1925401.599
24	2107654.968	2138237.967	2113795.364	1866366.538	1979104.764
23	2163718.975	2218077.541	2169693.479	1928026.187	2046309.504
22	2243408.555	2280959.359	2238024.941	1968501.581	2092958.112
21	2306811.829	2379349.79	2284801.606	2066503.081	2159453.052
20	2379101.55	2482346.919	2387760.287	2127998.219	2269276.034
19	2496755.985	2601820.95	2530411.272	2237672.385	2355859.223
18	2589733.138	2715140.636	2637317.982	2332265.885	2488253.32
17	2778672.24	2777517.102	2747649.931	2483082.23	2602610.6
16	2947954.717	2972714.196	2919956.524	2634376.595	2803339.7
15	2947954.717	3165046.679		2757164.878	2890201.099
14		3375062.474		2833563.341	3004565.84

Anexo 2

Resultado de la Instancia Variación 1 (5-5-5-2)					
Tiempo	5-5-5-2-001	5-5-5-2-002	5-5-5-2-003	5-5-5-2-004	5-5-5-2-005
50	245978.737	325200.261	295849.354	251705.772	265573.704
49	245978.737	325200.261	295849.354	251705.772	278941.768
48	245978.737	327491.882	303639.919	251705.772	278941.768
47	245978.737	328961.795	303639.919	259467.281	278941.768
46	257021.051	328961.795	312764.859	261278.965	278941.768
45	260091.148	328961.795	312764.859	265000.636	278941.768
44	260091.148	334627.393	312764.859	265000.636	278941.768
43	267025.041	344133.846	312764.859	272799.441	299409.083
42	279424.801	346513.194	321422.214	280556.864	299409.083
41	280875.633	350541.028	329366.941	284873.999	311447.543
40	280875.633	350541.028	329366.941	288146.913	311447.543
39	287365.801	354996.528	329366.941	291475.821	314712.973
38	287365.801	357159.305	338886.009	297855.647	323885.165
37	293850.697	360857.009	342090.024	298785.031	332498.58
36	306250.457	372772.069	350406.484	313250.039	349935.464
35	315924.376	389722.672	354240.684	317760.514	356312.079
34	319445.476	401825.487	358122.83	329703.815	359656.37
33	327947.057	401825.487	370238.556	345099.666	359656.37
32	341532.325	412552.987	370336.209	354882.544	370187.068
31	353704.662	431898.475	379015.513	361122.995	391238.105
30	353704.662	432510.726	391890.878	364421.606	391238.105
29	372670.967	440489.895	408495.163	368220.962	391238.105
28	380033.613	441170.237	410712.79	409147.258	416689.568
27	393193.344	452619.131	429484.692	414827.197	441621.858
26	414407.952	504803.712	450156.452	423013.216	450795.255
25	422820.808	507314.593	451014.371	433011.99	458100.27
24	450279.99	529514.153	463304.734	453546.31	461830.77
23	484122.266	556634.525	480158.468	469430.824	487264.133
22	502271.636	626934.807	490914.055	478485.463	512256.723
21	505763.633	626934.807	506049.929	525487.439	533181.093
20	536478.26	654724.057	514724.811	530695.909	553170.917
19	542495.593	702885.711	534822.93	562112.447	592783.709
18	552793.183	736700.374	577916.377	580675.909	630969.555
17	591787.273	784652.342	603159.307	629932.522	648909.272
16	611983.664		704890.334	674434.3	705902.309
15	638812.812		763016.009		
14	677003.549				
13	753441.778				
12	763998.889				

	Resultado de la Instancia Variación 1 (5-5-5-5)				
Tiempo	5-5-5-5-001	5-5-5-5-002	5-5-5-5-003	5-5-5-5-004	5-5-5-5-005
50	235652.939	303088.809	280588.14	232869	242514.812
49	235652.939	306451.593	284407.641	232869	255025.635
48	235652.939	307410.143	285302.845	234560.834	258204.126
47	241941.599	308910.807	288064.6	237552.459	262981.761
46	241941.599	310281.953	291597.497	244040.164	262981.761
45	245556.819	315992.216	293618.516	245731.998	265139.588
44	250242.687	319105.639	295700	253746.366	271596.706
43	255467.106	324132.826	299666.34	259852.435	273962.101
42	260551.259	327452.004	303928.719	261075.75	278411.335
41	265237.127	334569.682	309531.339	262767.584	285371.687
40	270461.546	338060.908	313804.621	268816.584	294206.603
39	276206.318	347020.283	317788.402	276830.952	295330.558
38	282851.864	352805.28	321774.541	285902.176	298878.284
37	290182.616	359019.996	327424.297	291951.176	301036.111
36	296288.642	368100.581	331802.188	300533.827	307493.229
35	300974.51	374603.773	337662.625	305375.948	309858.624
34	306198.929	378082.305	344248.546	307396.007	316818.976
33	311943.701	381521.265	353911.641	313445.007	330778.892
32	318589.247	389991.233	360285.448	323482.436	333809.346
31	325919.999	398972.018	371711.095	329006.845	361343.555
30	339378.796	407042.338	384609.863	334881.889	363926
29	345713.495	416234.376	388972.541	342563.067	385881.706
28	360765.705	426750.522	406326.933	349666.837	388247.101
27	370377.515	436572.818	418686.891	360873.249	412847.906
26	383245.097	447939.688	429605.491	374604.977	428595.632
25	392689.74	467809.292	440960.1239	384318.083	439295.388
24	409700.162	476110.181	456059.59	394223.616	451902.639
23	424904.597	489787.563	470543.346	409842.782	465923.793
22	443847.658	510050.754	485230.504	433935.645	486948.814
21	462493.391	525761.07	498786.324	448189.813	503813.504
20	486233.598	550496.563	516000.353	475164.848	516007.041
19	497119.928	580094.409	535876.521	491762.934	536022.461
18	516857.372	607739.696	556813.257	507156.753	579063.325
17	550125.428	653077.996	584752.281	537202.316	598732.756
16	573194.285	694263.445	616624.034	559546.775	625122.271
15	612103.845	711694.277	655276.443	580251.105	650000.816
14	652182.258	769478.87	689059.592	626969.005	695242.405
13	683267.979	804626.14	747770.696	663124.01	764083.75
12	731448.594	860333.8	888926.699	701275.157	801817.579
11	787357.136	893022.003		763380.039	1002440.435
10	846533.969				

Resultado de la Instancia Variación 1 (5-10-10-2)					
Tiempo	5-10-10-2-001	5-10-10-2-002	5-10-10-2-003	5-10-10-2-004	5-10-10-2-005
50	578432.984	568058.333	576333.247	460744.452	599880.618
49	586103.418	578039.658	576333.247	462743.009	603784.178
48	588378.066	581718.996	579368.03	468068.115	605652.39
47	597163.211	586038.118	584148.337	476910.183	614493.49
46	607412.961	588076.139	588228.906	480434.342	620934.677
45	609475.069	597672.057	598698.641	489840.803	627165.89
44	614283.786	606713.522	610007.144	493030.597	633247.409
43	623892.365	619466.38	618290.357	502992.513	646317.401
42	629775.153	628803.956	629326.496	509159.836	651445.997
41	636824.93	641306.819	640519.371	521941.639	662545.002
40	646406.537	650164.35	646235.074	529376.512	673100.516
39	656374.266	655706.589	658008.9	538197.975	681280.224
38	661876.58	667433.735	666947.987	550664.697	697612.687
37	673524.065	682556.932	681365.318	560976.439	700517.115
36	686432.648	691150.362	689807.63	564989.761	713363.14
35	699731.095	702380.493	702789.392	575083.076	727959.349
34	712237.416	714405.118	725438.64	585737.796	739113.065
33	727921.385	731075.949	742492.499	598408.377	759961.049
32	736506.636	753597.152	761748.016	610552.283	779723.566
31	753937.779	766567.617	779217.476	624498.981	793564.416
30	769940.05	793169.172	799977.515	643473.315	807505.813
29	796861.649	810005.324	822749.314	656317.923	826270.062
28	823961.401	825490.077	841458.2	679261.3	847465.748
27	842512.921	857966.183	858275.639	687098.671	868498.541
26	867571.754	888519.931	873472.387	727378.432	901171.101
25	892726.197	922664.901	902540.491	744935.355	936428.875
24	930533.456	956518.204	928621.184	763501.654	953552.362
23	946914.859	1002943.777	964473.293	784088.998	983285.392
22	989391.415	1040370.743	1002868.18	814957.79	1013635.309
21	1013185.791	1067368.057	1042732.286	836679.096	1046925.116
20	1043357.158	1111607.897	1087966.868	880340.735	1092942.231
19	1094212.028	1164234.427	1111492.263	950211.932	1164309.928
18	1133510.977	1219967.505	1172651.269	980776.132	1188083.502
17	1183646.968	1254600.807	1236810.973	1035610.658	1238930.907
16	1252721.952	1295277.02	1292494.03	1088898.165	1320340.638
15	1365463.915	1502926.487	1360920.537	1201548.164	1456353.254
14	1460359.978	1587187.872	1500905.102	1264078.842	1508773.547
13	1615877.98	1726276.961	1643690.777	1322358.998	
12		1809497.874		1553696.886	
11				1607826.356	

	Resultado de la Instancia Variación 1 (5-10-15-2)				
Tiempo	5-10-15-2-001	5-10-15-2-002	5-10-15-2-003	5-10-15-2-004	5-10-15-2-005
50	917641.523	917641.523	936045.08	823511.379	921780.02
49	923172.532	923172.532	941032.469	825789.036	928557.099
48	925666.644	925666.644	948542.988	834070.067	934318.691
47	934408.585	934408.585	953638.784	841812.303	953042.294
46	938455.677	938455.677	968456.039	853346.967	961898.199
45	960715.379	960715.379	974956.415	864214.863	969773.651
44	967906.321	967906.321	989399.077	874618.168	980940.083
43	976078.889	976078.889	997024.634	879642.679	987935.416
42	990231.893	990231.893	1017518.694	893792.43	996367.703
41	1005743.068	1005743.068	1035739.147	906051.145	1019760.764
40	1019418.019	1019418.019	1047630.672	917944.164	1029208.125
39	1029689.112	1029689.112	1058432.721	934806.492	1045188.336
38	1050216.134	1050216.134	1074025.39	955570.618	1059867.531
37	1062891.138	1062891.138	1096389.821	969086.059	1077075.112
36	1092510.089	1092510.089	1118199.167	978358.516	1096716.77
35	1108167.624	1108167.624	1133350.49	987818.93	1113185.071
34	1124300.128	1124300.128	1153590.264	1010172.705	1138724.202
33	1140114.135	1140114.135	1180786.415	1032140.67	1163950.102
32	1162715.149	1162715.149	1195925.55	1047677.51	1185762.934
31	1182761.124	1182761.124	1230324.904	1073404.786	1215009.201
30	1207528.973	1207528.973	1255087.975	1094401.419	1234874.145
29	1248973.267	1248973.267	1287306.381	1126980.554	1265542.921
28	1272046.097	1272046.097	1310566.211	1155142.575	1287263.239
27	1299068.872	1299068.872	1355712.272	1179649.619	1330750.24
26	1346139.981	1346139.981	1393080.584	1221232.329	1358819.585
25	1399732.642	1399732.642	1423270.144	1257566.03	1427556.932
24	1455113.816	1455113.816	1471638.921	1297496.498	1461255.237
23	1477546.1	1477546.1	1517765.776	1319507.076	1504745.573
22	1562929.686	1562929.686	1548539.893	1386816.777	1578352.769
21	1610324.596	1610324.596	1637154.054	1462395.432	1614040.17
20	1679369.632	1679369.632	1678971.584	1529390.966	1665273.644
19	1738291.161	1738291.161	1749354.168	1585298.28	1749728.488
18	1848687.661	1848687.661	1824091.418	1668969.574	1797108.722
17	1930531.085	1930531.085	1907563.484	1720198.591	1877112.957
16	2038458.455	2038458.455	2008908.586	1818382.927	2002674.759
15	2193020.509	2193020.509		1909977.143	2199034.297
14				2080241.277	2321179.807
13					2422805.347
12					2593967.192

	Resultado de la Instancia Variación 1 (5-10-20-2)				
Tiempo	5-10-20-2-001	5-10-20-2-002	5-10-20-2-003	5-10-20-2-004	5-10-20-2-005
50	1388385.962	1412754.346	1376421.733	1208661.732	1254442.915
49	1391280.8	1428585.914	1381681.05	1212116.607	1264657.356
48	1405376.908	1434776.31	1388441.754	1221909.57	1269179.765
47	1416758.901	1439955.137	1396198.694	1232113.912	1282815.775
46	1429450.249	1456998.35	1407377.112	1244992.741	1290030.842
45	1446356.69	1474636.16	1423739.3	1255202.806	1302661.098
44	1459862.804	1489709.247	1447612.345	1268754.669	1327831.757
43	1475220.032	1507722.02	1460062.116	1290912.52	1346756.214
42	1493860.12	1528444.342	1483495.62	1308370.835	1360714.889
41	1511938.731	1549119.001	1495952.54	1321613.217	1379873.491
40	1532683.341	1576029.002	1519403.303	1334659.694	1388448.439
39	1553561.438	1595120.275	1538111.563	1352544.494	1405094.446
38	1576838.698	1617119.026	1554758.031	1376700.562	1431355.049
37	1594079.807	1634321.989	1578606.395	1391475.757	1452139.318
36	1618149.999	1657277.535	1599509.728	1416607.273	1473731.274
35	1642030.536	1685784.149	1619496.607	1433507.022	1502695.174
34	1664087.522	1707717.221	1639504.817	1451395.977	1542482.212
33	1697840.821	1735217.46	1694982.647	1488336.056	1566236.83
32	1722821.496	1761315.591	1723672.364	1518045.294	1601699.636
31	1758748.659	1788217.562	1758288.849	1544580.24	1635519.924
30	1808857.716	1821154.199	1797386.045	1586142.958	1666124.692
29	1838681.711	1854638.4	1846421.933	1617122.691	1708721.172
28	1880603.062	1907120.228	1882240.97	1647516.01	1742542.711
27	1932719.168	1950468.04	1935714.45	1691597.94	1796349.217
26	1979728.05	1992614.09	1974502.645	1740092.064	1838557.51
25	2033206.86	2057479.148	2036971.428	1783062.847	1895697.635
24	2101622.594	2109376.685	2098385.111	1831157.103	1933213.147
23	2148767.176	2161625.896	2142295.851	1883522.776	1998784.096
22	2214967.192	2255562.375	2206780.947	1917127.395	2048456.244
21	2284973.513	2338457.049	2258716.231	2011908.132	2147092.542
20	2342716.068	2432092.355	2345811.631	2099593.636	2255133.811
19	2465337.597	2571337.214	2508972.048	2224270.18	2329995.588
18	2559065.947	2686712.246	2624726.929	2305360.119	2463913.316
17	2698420.276	2758729.824	2716713.599	2423604.606	2584931.758
16	2866044.583	2912425.414	2905347.799	2584634.62	2755357.515
15		3119456.196		2697081.355	2850269.073
14		3328480.666		2792489.766	2963347.115

Anexo 3

Resultado de la Instancia Variación 2 (5-5-5-2)					
Tiempo	5-5-5-2-001	5-5-5-2-002	5-5-5-2-003	5-5-5-2-004	5-5-5-2-005
50	244687.519	299225.141	254215.147	239331.727	265573.704
49	245978.737	303423.018	254215.147	239331.727	276313.459
48	245978.737	309106.186	272944.141	239331.727	276313.459
47	245978.737	310377.474	278047.391	239331.727	277915.577
46	257021.051	321824.379	284839.139	242208.625	277915.577
45	260091.148	328197.871	284839.139	246046.913	278941.768
44	260091.148	331166.623	284839.139	246046.913	278941.768
43	267025.041	344133.846	284839.139	264272.481	299409.083
42	279424.801	346513.194	284839.139	268962.091	299409.083
41	280875.633	350541.028	305550.621	272111.969	311447.543
40	280875.633	350541.028	310351.269	276617.097	311447.543
39	287365.801	354996.528	326456.403	284935.213	314712.973
38	287365.801	357450.605	326640.552	284935.213	323885.165
37	293850.697	361462.913	332617.122	284935.213	332498.58
36	306250.457	372772.069	345319.567	300394.429	340450.187
35	315924.376	386763.368	354240.684	300394.429	354831.017
34	319445.476	388637.737	358122.83	315926.811	354831.017
33	328464.197	393346.969	370254.579	333272.197	359656.37
32	345663.948	407475.582	373049.004	337106.693	370187.068
31	353704.662	424246.402	379015.513	346133.671	385511.351
30	353704.662	424246.402	393830.018	358666.668	387616.476
29	373679.237	428571.97	410712.79	363445.166	391238.105
28	380450.222	444405.463	410712.79	384836.412	402239.064
27	394670.508	459782.488	429484.692	387082.132	425672.961
26	414407.952	479984.182	450156.452	409322.87	437680.645
25	424664.797	479984.182	451014.371	419208.577	446317.746
24	450625.115	500796.367	463304.734	429014.862	461830.77
23	482041.762	556634.525	480158.468	465226.396	487264.133
22	482041.762	626934.807	494505.517	478485.463	517980.639
21	505763.633	626934.807	506499.118	515464.526	538455.528
20	533972.187	654724.057	514724.811	515577.648	553170.917
19	533972.187	702885.711	534822.93	546994.186	592783.709
18	552793.183	739611.388	577916.377	565557.648	630969.555
17	591787.273	785034.845	603159.307	633589.123	648909.272
16	599031.393	960588.355	706699.246	679090.501	705902.309
15	638812.812	994853.119	767609.179	751134.432	
14	677203.229	1030481.511	884041.769	778666.932	
13	753441.778	1149017.725	1009575.934	782404.816	
12	763998.889	1303725.163	1090639.901		

	Resultado de la Instancia Variación 2 (5-5-5-5)				
Tiempo	5-5-5-5-001	5-5-5-5-002	5-5-5-5-003	5-5-5-5-004	5-5-5-5-005
50	235652.939	303121.768	261615.815	230898.094	242514.812
49	235652.939	303944.103	269374.364	232869	253027.181
48	235652.939	306633.088	271554.123	234560.834	256263.278
47	241941.599	306633.088	274323.437	237552.459	262357.555
46	241941.599	309879.604	275908.107	244040.164	262981.761
45	245556.819	315392.722	276982.127	245731.998	265139.588
44	250242.687	319257.311	280673.748	250729.69	271596.706
43	255467.106	324207.751	285922.251	254278.569	273962.101
42	260551.259	328971.95	286699.311	258404.883	278411.335
41	265237.127	334640.867	295188.05	262767.584	284824.587
40	270461.546	340146.656	297196.822	268816.584	294206.603
39	276206.318	347162.141	306706.731	276830.952	295330.558
38	282851.864	352805.28	313405.095	285902.176	298878.284
37	290182.616	359201.378	325338.21	291951.176	301036.111
36	296288.642	368915.703	328073.581	294919.134	307493.229
35	300974.51	374820.997	337662.625	301137.598	309858.624
34	306198.929	378082.305	344248.546	307396.007	316818.976
33	311943.701	381521.265	353911.641	313445.007	330778.892
32	318589.247	389991.233	360285.448	323482.436	333809.346
31	325919.999	399682.831	371727.01	329006.845	361343.555
30	339378.796	416375.926	381910.008	337147.882	363926
29	345713.495	423307.905	388972.541	342563.067	385881.706
28	360765.705	432637.502	406326.933	350371.055	388247.101
27	370377.515	442340.605	407236.93	361465.419	407312.912
26	384523.033	453559.818	418126.648	374604.739	415241.437
25	393352.751	471228.616	439104.959	384318.083	440325.156
24	409700.162	482191.519	448346.018	394502.02	451902.639
23	426713.394	495498.332	464021.111	411305.657	465923.793
22	443847.658	510890.87	478842.736	434805.889	486948.814
21	462493.391	535250.479	498827.274	448189.813	503813.504
20	486233.598	552059.801	516000.353	475164.848	516007.041
19	497119.928	590259.176	538012.653	492298.702	536022.461
18	516857.372	607744.696	558949.389	507156.753	579063.325
17	550125.428	653077.996	584752.281	540075.829	598732.756
16	573194.285	694834.607	623337.474	560232.879	625272.869
15	612103.845	711694.277	655276.443	580251.105	650000.816
14	657930.499	780729.153	689059.592	626969.005	695242.405
13	683267.979	824456.618	747770.696	663124.01	764083.75
12	731448.594	862409.215	892859.152	701275.157	801817.579
11	787357.136	893022.003	1154946.151	763716.773	1002440.435
10	846533.969	1552813.89	1260472.705	1003389.703	1686747.651
9	1776328.722	2139486.895	1673583.264	1599289.517	2035873.536
8	2071280.601	2203553.35		1730930.315	2084144.064
7	2257586.708	2721683.35			

Resultado de la Instancia Variación 2 (5-10-10-2)					
Tiempo	5-10-10-2-001	5-10-10-2-002	5-10-10-2-003	5-10-10-2-004	5-10-10-2-005
50	551996.239	566719.828	562005.541	467755.439	548699.836
49	567624.622	576950.057	568513.851	468034.065	555929.421
48	574597.554	578496.468	581530.525	471543.577	580705.952
47	581998.284	580993.377	589008.787	476992.682	609804.784
46	589061.871	586226.262	595408.835	485981.449	624275.17
45	596724.3	608242.08	606816.063	493817.589	635290.993
44	612288.642	618478.131	618840.224	494941.338	642238.156
43	626909.289	629924.161	626855.816	514465.147	658020.199
42	634437.312	634658.886	638436.668	516278.186	658020.199
41	649146.667	651561.61	652849.885	528242.056	676420.12
40	661264.314	663621.781	659458.717	539141.983	680203.157
39	665934.407	671358.457	673524.457	549141.004	694435.499
38	672336.633	678615.711	677862.132	565699.447	711350.786
37	690845.087	690961.002	690007.696	571119.374	715014.314
36	700471.987	708788.94	694943.771	580409.144	723122.201
35	708938.7602	719725.617	702859.034	589067.883	746127.731
34	724808.361	731221.028	740498.012	601408.108	762304.454
33	741648.092	746376.842	762076.18	616204.756	777422.974
32	747176.548	774833.132	776232.075	622998.1119	794180.532
31	774506.841	793542.151	792285.191	633758.466	803071.426
30	792542.222	813690.362	806099.28	652753.792	835256.246
29	825657.654	832634.818	840683.869	678033.6618	848509.237
28	851478.653	851980.84	854960.76	697470.903	875688.628
27	866022.001	879849.43	878076.322	710461.81	898135.282
26	887162.125	907188.091	897997.56	737271.322	920723.395
25	915473.516	948861.708	923736.317	763467.046	981756.185
24	963538.726	983701.9779	964794.134	771916.473	991007.602
23	994595.434	1032382.255	983403.412	803026.342	1005043.625
22	1014118.718	1050009.351	1009142.788	853269.836	1041145.928
21	1080608.504	1088933.849	1060040.363	887435.163	1093309.68
20	1122516.202	1146305.76	1108565.881	909148.363	1142581.704
19	1140177.048	1184032.725	1149292.76	979331.459	1224481.65
18	1187813.78	1249693.546	1206417.565	1011544.787	1243059.278
17	1254624.102	1277782.633	1257009.532	1079858.17	1296161.012
16	1319196.823	1325711.354	1317537.821	1154304.428	1372066.312
15	1402997.907	1505314.541	1360920.537	1209504.263	1521924.743
14	1495892.815	1588618.893	1549166.178	1283387.592	1615840.045
13	1685838.689	1726593.953	1678163.54	1336439.409	
12	1864837.226	1809621.634	1834368.583	1553696.886	
11		2427656.725	2514140.581	1604184.713	
10		2826978.218			

Resultado de la Instancia Variación 2 (5-10-15-2)					
Tiempo	5-10-15-2-001	5-10-15-2-002	5-10-15-2-003	5-10-15-2-004	5-10-15-2-005
50	890937.09	878393.368	825083.844	731579.753	867856.115
49	917088.435	879228.136	866422.405	737746.202	867857.365
48	938430.243	885346.361	871564.574	756104.905	888104.894
47	945449.139	917121.82	901811.449	786543.43	897934.3326
46	958247.464	925763.037	921063.198	812002.933	906139.28
45	959341.908	929539.07	944433.449	818376.886	912771.996
44	994224.077	950662.815	978954.831	829180.82	931027.987
43	997880.391	972535.42	988223.587	840262.494	962791.774
42	1034471.386	987522.946	1005269.205	857876.371	986002.194
41	1099078.616	1005892.994	1018837.243	874421.91	998161.338
40	1112206.009	1031609.602	1037663.92	901350.838	1020535.477
39	1113487.513	1044596.337	1059886.01	937720.081	1043086.137
38	1137306.25	1063188.156	1072627.332	955808.829	1058923.139
37	1161280.374	1085354.553	1098343.431	965489.26	1077574.68
36	1189320.514	1107220.578	1126961.607	985156.34	1110856.148
35	1222957.48	1130528.025	1151035.635	1003821.521	1125967.4
34	1272346.758	1139439.494	1176432.054	1019962.223	1142696.228
33	1331099.864	1163390.267	1211013.603	1046693.368	1178390.202
32	1338279.738	1193902.694	1229266.296	1068239.462	1203558.316
31	1366086.986	1214842.165	1247979.47	1098407.033	1230623.897
30	1404923.662	1243902.986	1286237.955	1119534.571	1245701.8
29	1440329.648	1269184.876	1311234.495	1146966.78	1284638.837
28	1488073.853	1304818.05	1338858.669	1174380.65	1323401.546
27	1537750.431	1340334.771	1398207.244	1200681.947	1358180.577
26	1573638.138	1370916.544	1423866.044	1248374.108	1393812.544
25	1614654.597	1425865.058	1446702.733	1278550.539	1442494.477
24	1662093.658	1499775.398	1491432.077	1327808.778	1490269.374
23	1740453.287	1526601.653	1533516.588	1369460.909	1535122.457
22	1798097.281	1590190.633	1600583.459	1426575.749	1582014.94
21	1839040.3	1637080.784	1677902.802	1484176.369	1648283.92
20	1908984.662	1699567.364	1710553.465	1575414.631	1698683.979
19	1974270.868	1799094.732	1778517.435	1621979.611	1765079.637
18	2036758.715	1883938.799	1854742.347	1688947.773	1836332.996
17	2218647.669	1975468.124	1941279.374	1762053.343	1898382.303
16	2305183.748	2106353.893	2038432.353	1850550.241	2025942.713
15	2433789.018	2233253.357	2243124.864	1939800.204	2204675.802
14		2359693.677	2377246.666	2158244.852	2343914.315
13		2691918.31	2628165.165	2467120.928	2438769.163
12		2930237.451	2688129.586	2632378.48	2598414.222
11			3795279.918	2942860.292	3434798.633

Resultado de la Instancia Variación 2 (5-10-20-2)					
Tiempo	5-10-20-2-001	5-10-20-2-002	5-10-20-2-003	5-10-20-2-004	5-10-20-2-005
50	1130971.431	1187455.981	1162917.088	1023011.992	1098005.899
49	1157419.562	1226957.856	1171763.585	1054199.84	1116598.791
48	1171021.942	1243908.021	1218985.096	1087133.38	1121738.76
47	1213453.048	1245685.123	1233507.815	1088169.09	1132052.29
46	1231023.792	1285922.638	1249762.196	1108783.602	1162792.562
45	1283477.209	1306456.437	1271291.247	1147503.16	1209399.539
44	1310328.282	1330888.318	1330484.295	1163981.279	1234784.942
43	1354954.631	1398312.409	1365868.915	1189016.854	1272643.942
42	1360978.966	1441683.727	1392241.96	1218768.813	1296199.2
41	1397133.802	1460204.372	1410199.742	1241256.543	1333038.814
40	1431555.076	1469131.91	1455610.286	1259575.029	1354465.975
39	1457610.673	1480719.806	1480955.679	1316424.739	1382083.836
38	1519017.459	1543361.503	1527775.03	1347212.905	1423236.822
37	1549974.07	1586372.234	1561221.777	1367370.168	1448073.227
36	1604573.002	1611981.314	1589752.201	1406163.641	1477534.257
35	1629161.199	1651487.719	1613142.37	1419901.395	1514200.047
34	1657626.119	1688997.177	1649284.375	1465228.632	1534704.393
33	1669657.736	1718757.402	1660977.424	1485318.593	1596333.241
32	1706516.864	1767383.402	1743235.92	1527034.83	1630151.872
31	1739047.437	1789484.8	1778878.928	1556008.183	1652979.542
30	1789662.321	1842378.835	1820323.729	1599599.121	1719042.054
29	1829639.092	1873818.838	1875792.847	1633016.104	1753997.739
28	1895763.76	1933047.238	1906634.938	1677225.956	1780369.466
27	1954589.682	1981917.376	1960117.539	1714903.303	1825116.119
26	1984869.873	2010647.925	1985916.467	1744538.082	1874944.755
25	2044794.804	2108502.059	2044134.923	1807878.583	1930766.312
24	2115185.329	2163913.044	2113795.364	1866366.538	1979104.764
23	2163718.975	2221008.114	2169693.479	1928026.187	2040601.599
22	2235494.119	2280991.246	2238024.941	1960162.224	2092958.112
21	2305615.214	2384837.812	2284801.606	2050606.11	2159453.052
20	2368486.186	2482346.919	2387760.287	2127998.219	2269276.034
19	2496755.985	2593766.88	2526322.63	2237672.385	2355859.223
18	2576550.489	2690733.61	2637317.982	2332265.885	2453831.02
17	2730108.549	2777517.102	2747649.931	2445617.049	2602610.6
16	2906226.713	2972714.196	2919956.524	2634376.595	2788922.056
15	3103340.494	3165046.679	3123816.912	2757164.878	2890201.099
14	3395543.988	3375062.474	3279090.363	2833563.341	2980508.074
13	3607446.378		3545418.316	3114876.916	3450828.008
12	4236482.804			3858944.533	4196867.272

Anexo 4

Resultado de la Instancia Modelo Original (Adapción para Variación 3) (5-5-5-2)					
Tiempo	5-5-5-2-001	5-5-5-2-002	5-5-5-2-003	5-5-5-2-004	5-5-5-2-005
50	331880.469	476254.113	386082.042	306067.179	382916.384
49	336781.435	476254.113	386082.042	306067.179	386938.884
48	339751.769	479816.023	386082.042	306067.179	386938.884
47	346245.845	479816.023	386082.042	306067.179	386938.884
46	348486.127	483501.626	392563.702	309453.042	389616.015
45	352157.474	484657.592	393901.606	311453.967	389616.015
44	352507.873	494162.89	399230.152	317310.635	396768.503
43	359045.084	502293.06	399230.152	322001.252	396768.503
42	359089.239	503481.81	405030.895	326298.657	396768.503
41	367958.266	509174.312	408248.996	327258.98	403582.871
40	371503.147	515420.428	413614.104	333433.043	406437.812
39	375884.084	519836.255	413614.104	341458.992	414771.943
38	378529.321	525212.637	423820.03	352006.284	420199.503
37	378529.321	527672.553	428566.619	355421.026	424809.344
36	383936.191	537146.166	434590.619	360638.657	432863.935
35	398256.703	545651.952	437538.963	366804.54	438399.923
34	400572.444	548944.208	447601.951	375476.801	445983.001
33	415861.584	558785.511	450987.971	379276.157	453248.695
32	424569.829	564717.17	457534.91	384597.429	460024.214
31	428687.617	577783.637	462029.407	395147.591	473780.701
30	430668.634	585631.591	472213.31	400085.246	488089.702
29	445892.404	589936.405	489228.046	402579.555	490463.356
28	458261.537	601485.7	498887.978	427955.528	499714.261
27	472652.989	605654.815	518034.36	433240.705	525429.518
26	488429.638	632201.3	534632.969	438757.716	537214.773
25	502471.524	646132.196	537366.889	460411.203	545481.095
24	518650.209	649715.258	547490.228	476278.38	550502.142
23	535304.712	688864.194	573542.196	485264.224	569213.886
22	552548.697	715016.061	582779.128	491045.809	606431.98
21	567291.256	753694.155	596474.708	535931.972	680895.291
20	589635.784	777396.336	650336.353	548385.397	699793.293
19	621961.643		659310.727	579801.935	722166.62
18	632261.939		677865.974	590270.722	760780.953
17	651792.298		714356.926	689088.717	773316.544
16			754705.642	725151.877	806150.052
15			779948.572		

Resultado de la Instancia Modelo Original (Adapción para Variación 3) (5-5-5-5)					
Tiempo	5-5-5-5-001	5-5-5-5-002	5-5-5-5-003	5-5-5-5-004	5-5-5-5-005
50	325490.941	398927.952	439401.657	294246.038	445620.288
49	328222.997	402535.345	440755.68	295602.889	448445.321
48	331667.767	402863.929	443170.739	298897.999	450959.91
47	334722.31	404870.051	446632.527	301157.539	456087.63
46	338160.734	410543.371	449382.59	304133.964	458888.537
45	341858.506	413597.998	452904.399	308081.138	462243.401
44	346910.435	415583.112	456872.163	310984.846	465578.769
43	350529.399	422016.028	460685.261	315064.789	469785.214
42	353886.862	424887.319	464753.937	319035.028	474241.507
41	357537.902	430727.599	469764.383	322349.934	479033.7
40	362295.415	434621.939	474092.011	326948.891	483735.75
39	366621.786	442011.87	478986.489	332299.32	487847.35
38	372111.551	446461.9	484224.065	336444.002	493014.284
37	377945.361	452793.922	489012.597	341036.988	498745.659
36	382500.091	458398.439	494785.382	346450.539	505174.99
35	387258.722	466230.221	500648.301	352371.489	510456.351
34	393184.324	473289.459	507080.061	358780.815	517845.448
33	399438.352	479866.693	517054.244	364248.625	524000.039
32	405582.226	489191.988	521682.831	370447.309	532117.482
31	412506.613	498666.971	529462.935	375357.862	539471.948
30	422123.734	509987.975	538241.288	382874.562	549938.461
29	428550.676	516713.367	545893.292	389074.866	557245.83
28	437944.393	526512.752	556788.364	397831.64	567496.87
27	447385.143	537544.479	565789.653	406427.514	575898.72
26	459256.525	550222.147	575795.641	415739.677	586233.336
25	471220.545	561598.297	588284.675	426069.67	599193.713
24	484437.727	575431.121	602901.333	437162.437	610516.07
23	501867.802	589388.192	616717.449	453215.882	625262.934
22	516081.572	604195.201	631043.782	464534.963	639008.57
21	533819.797	632063.638	647098.671	481794.101	659636.729
20	548767.841	643471.095	664547.105	505684.723	678275.914
19	569570.181	668931.474	682790.373	528917.376	700506.397
18	595164.051	690259.277	703727.109	541099.493	725709.278
17	612304.219	724462.783	735190.702	569527.076	748592.874
16	640331.299	764905.442	762088.211	596688.779	778858.405
15	674184.032	800660.963	800072.157	618619.358	808577.947
14	724067.771	850107.071	845444.843	667031.236	852041.398
13	761504.037	908410.891	869357.439	698000.091	908048.265
12		927613.921	948321.531	737901.611	943414.216
11		1008044.071		781515.805	1004244.129

Resultado de la Instancia Modelo Original (Adapción para Variación 3) (5-10-10-2)					
Tiempo	5-10-10-2-001	5-10-10-2-002	5-10-10-2-003	5-10-10-2-004	5-10-10-2-005
50	628109.24	806062.608	670881.374	531749.411	671770.463
49	628109.24	812843.685	670881.374	531749.411	680265.696
48	633459.941	812843.685	673059.852	535678.464	683841.515
47	639514.579	816253.901	677474.258	536900.179	688211.4
46	650288.133	821419.803	682600.53	547662.484	694083.523
45	655725.881	830473.842	694150.627	550927.456	702602.003
44	659651.364	840152.817	702500.305	558261.304	712338.254
43	665319.981	853453.899	712825.655	568273.829	719166.277
42	670891.286	860105.571	720697.522	578350.962	729509.371
41	679760.419	870102.427	730518.749	586286.088	734164.952
40	688835.079	883079.894	741699.237	591235.929	743455.555
39	698438.97	889338.479	750829.437	599617.563	752894.127
38	705452.782	902185.979	762837.56	605141.466	764230.551
37	716645.385	912958.15	772795.668	619531.702	775476.668
36	729032.732	922802.063	790648.5	627321.719	787460.002
35	743928.556	939521.041	800386.075	638992.63	803005.648
34	759906.775	953025.733	815974.258	651133.034	819386.853
33	771124.04	968745.827	827269.988	660214.724	833149.927
32	783626.846	983480.757	847528.357	670973.78	847913.71
31	803295.116	996793.335	859956.803	682397.907	865550.491
30	815341.412	1019217.149	881689.886	700630.745	879950.317
29	842901.337	1035456.197	898648.399	718519.215	904909.996
28	868321.151	1053178.552	920216.781	739382.555	918820.141
27	888848.394	1078856.24	938292.44	751664.124	937080.845
26	911041.976	1097248.447	976146.893	788687.9109	973756.668
25	934174.039	1129112.902	1001599.564	795723.839	1014671.031
24	961559.235	1167227.118	1021685.283	824469.769	1039862.744
23	985853.668	1212698.405	1048825.127	839912.5	1074721.579
22	1015723.998	1253704.409	1079998.128	868282.09	1105304.624
21	1045587.452	1293041.592	1127719.044	903148.015	1137609.362
20	1064318.227	1345874.234	1188535.282	929690.003	1171605.54
19	1116328.315	1377039.065	1199866.189	995780.866	1215833.265
18	1167157.823	1428527.669	1242021.87	1030832.195	1245696.955
17	1240737.321	1494536.286	1337813.85	1082831.46	1296005.27
16	1314801.986	1614076.4	1376144.849	1172138.613	1424150.938
15	1406213.57	1725783.878	1473951.291	1260270.839	1610605.271
14	1479176.807	1905983.619	1556075.205	1301858.996	1680118.558
13	1702423.3			1434707.944	

Resultado de la Instancia Modelo Original (Adapción para Variación 3) (5-10-15-2)					
Tiempo	5-10-15-001	5-10-15-002	5-10-15-003	5-10-15-004	5-10-15-005
50	1330231.255	1624628.201	1405349.222	1142265.443	1474384.503
49	1336166.576	1630256.134	1406927.368	1146140.19	1478411.588
48	1342352.284	1630921.652	1412864.921	1149169.768	1483949.679
47	1349765.223	1642775.33	1416672.379	1156500.371	1498040.36
46	1362488.749	1649946.345	1427740.691	1166289.406	1505846.774
45	1372125.398	1668548.291	1435577.484	1176201.414	1515789.902
44	1383852.487	1678450.04	1449714.325	1186539.262	1527835.562
43	1396662.313	1686945.096	1463796.433	1196798.641	1541614.047
42	1410890.976	1697469.105	1476931.348	1209471.874	1553882.898
41	1424679.86	1718759.656	1493455.793	1221649.985	1568649.164
40	1437815.846	1734675.936	1505679.213	1232914.634	1582452.038
39	1450514.221	1745135.348	1523141.459	1251184.023	1598907.068
38	1470547	1761174.532	1538205.254	1267890.552	1613629.386
37	1484791.543	1778271.101	1555039.677	1282151.11	1624263.789
36	1500840.246	1800868.353	1573084.665	1292383.684	1643991.099
35	1514807.476	1820028.605	1593136.673	1306110.027	1663730.545
34	1536279.83	1833110.369	1609272.731	1323471.051	1686250.325
33	1556618.43	1851591.859	1631760.43	1338686.7	1701159.865
32	1577829.583	1871774.228	1652178.152	1363861.597	1728149.021
31	1603327.782	1892332.724	1669848.403	1380915.437	1750878.407
30	1635220.332	1917767.288	1704074.865	1408435.286	1774498.686
29	1671659.229	1948161.799	1742049.68	1435328.525	1805688.34
28	1694219.16	1977444.162	1762256.884	1453909.728	1825778.585
27	1720922.432	2007855.907	1798544.196	1487529.148	1865793.667
26	1745456.788	2034485.526	1825682.817	1532427.167	1899318.664
25	1795168.525	2077689.158	1868273.14	1565950.894	1937978.301
24	1832382.731	2144365.196	1904336.471	1609242.471	1980225.073
23	1869173.15	2182293.034	1952661.259	1666157.936	2023295.511
22	1948199.036	2228933.445	1983795.853	1708340.113	2076295.436
21	1984757.857	2276998.604	2069573.918	1769298.513	2114800.377
20	2057978.717	2350595.876	2104385.422	1848916.713	2180334.486
19	2116012.833	2447494.091	2152713.282	1900910.218	2275010.273
18	2152598.147	2545059.077	2231241.763	1960788.538	2318013.299
17	2282833.432		2376602.888	2004857.694	2396802.657
16	2385872.223		2451009.928	2100465.445	2465819.269
15	2512351.269			2163079.84	2650791.54
14				2415417.352	2825656.315

Anexo 5

Resultado de la Instancia Variación 3 (5-5-5-2)					
Tiempo	5-5-5-2-001	5-5-5-2-002	5-5-5-2-003	5-5-5-2-004	5-5-5-2-005
60	334418.305	479796.579	397990.056	315061.466	409011.05
59	334418.305	479796.579	397990.056	315061.466	409011.05
58	334418.305	479796.579	397990.056	315061.466	409011.05
57	334418.305	479796.579	397990.056	315061.466	409011.05
56	334418.305	479796.579	397990.056	315061.466	409011.05
55	334418.305	479796.579	397990.056	315061.466	409011.05
54	334418.305	479796.579	397990.056	315061.466	409011.05
53	334546.979	479796.579	397990.056	315061.466	409011.05
52	336304.581	479796.579	397990.056	315061.466	409011.05
51	338788.979	479796.579	397990.056	315061.466	409011.05
50	338788.979	479796.579	397990.056	316161.091	409011.05
49	342061.534	479796.579	397990.056	316212.283	409011.05
48	346753.603	483838.323	397990.056	316671.924	409011.05
47	350026.158	483838.323	399323.316	317662.584	410693.228
46	356725.305	487288.924	403662.043	320665.329	415491.58
45	359089.239	487288.924	404966.467	321941.456	421131.569
44	359089.239	494585.578	411754.899	326144.154	423624.855
43	359089.239	502293.06	413254.894	336337.316	423624.855
42	359089.239	504627.064	418551.796	341741.35	423624.855
41	367958.266	509343.097	422386.421	344599.018	427110.884
40	374181.515	518236.394	425833.108	349136.146	428920.549
39	378529.321	525362.271	427119.156	356427.8	437922.535
38	378529.321	529252.644	435669.473	361813.35	443961.562
37	378529.321	531533.82	444702.107	370212.846	446053.158
36	384569.831	541067.167	454674.964	373351.26	465127.48
35	398852.968	552935.402	458212.547	379638.196	470444.718
34	403259.673	556190.548	461273.047	386977.889	484981.884
33	422339.946	566135.425	472508.337	400149.11	491501.601
32	424569.829	571948.637	479120.19	401366.337	491501.601
31	428687.617	586405.192	483118.65	414214.957	516318.129
30	430668.634	590992.11	497942.172	445156.429	538919.911
29	446172.039	595602.558	514232.494	454037.887	545910.11
28	463646.442	609095.948	521518.279	475180.922	571764.056
27	473788.49	616700.648	542431.732	482271.709	573751.971
26	488429.638	646838.845	560133.614	497543.267	605136.162
25	510474.106	664983.238	570332.098	506228.223	606734.754
24	527164.476	672556.166	571931.008	514275.111	631459.629
23	574804.387	712434.077	631330.294	515802.247	642644.278
22	574804.387	741903.513	644659.758	569286.832	692488.658
21	599790.674	781318.532	650973.001	604019.744	713483.6
20	663585.381	804699.999	677013.634	631553.718	740295.994
19			691726.768	655554.348	748672.966
18			724990.058	663906.145	821788.125
17			763525.092	708242.084	867095.577
16			792871.393	729808.078	896372.182

Resultado de la Instancia Variación 3 (5-5-5-5)					
Tiempo	5-5-5-5-001	5-5-5-5-002	5-5-5-5-003	5-5-5-5-004	5-5-5-5-005
60	331583.782		439682.446	296858.534	446991.026
59	331583.782		439682.446	296858.534	446991.026
58	331583.782		439682.446	296858.534	446991.026
57	331583.782		439682.446	296858.534	446991.026
56	331583.782		439682.446	296858.534	446991.026
55	331583.782		439682.446	296858.534	446991.026
54	332373.782		439682.446	296858.534	447090.206
53	333207.434		439682.446	297259.534	447375.206
52	334121.438		439682.446	297877.21	447850.586
51	335439.158		439682.446	298266.688	448238.862
50	337260.816		439682.446	298889.603	448657.507
49	339188.332		441826.738	299624.758	449175.96
48	342512.668		443237.787	301333.812	451064.574
47	344178.709		446632.527	303402.377	456163.266
46	346220.949		449635.477	305305.968	459198.583
45	349603.685		453026.714	308668.88	462885.854
44	352740.113		456931.747	311784.948	465578.769
43	356298.315		460972.081	315447.838	469785.214
42	360181.29		465245.164	319352.409	474421.522
41	362199.055		470122.791	322457.56	479488.384
40	366602.761		474407.59	328204.718	485395.945
39	371310.952		479064.6	332638.016	489813.54
38	376552.25		484224.065	338033.503	494575.264
37	383650.434		489012.597	342625.929	499686.474
36	388418.86		494787.864	349493.355	506029.859
35	392611.855		500648.301	353462.373	512454.277
34	397540.427		509191.388	360470.487	519477.075
33	403410.237		517444.142	364864.38	524725.066
32	412784.261		523686.218	373802.728	534181.746
31	417834.309		529630.119	377256.198	540215.796
30	426824.238		539382.974	387101.855	550287.781
29	436826.824		549731.127	392523.076	558321.197
28	449724.687		559408.206	400134.488	568454.093
27	460346.633		568693.907	409262.05	577248.328
26	467237.483		580863.809	418332.954	586269.032
25	477289.846		589016.284	428612.422	601752.713
24	491388.113		603650.406	437388.421	612479.738
23	509134.49		619033.203	456498.926	630807.492
22	520065.2		631138.318	472348.805	645138.169
21	545616.426		647992.331	493801.797	665756.793
20	559020.581		666960.283	521912.982	682701.474
19	584451.038		682790.373	547195.04	717353.625
18	607501.308		703727.109	562910.007	740165.42
17	632479.827		736792.952	574868.413	767513.011
16	655425.261		776612.075	610151.599	793311.411
15	691430.383		800201.613	661689.818	833838.351
14	740871.844		845844.123	679453.088	908694.009
13	841920.032		881914.129	733078.601	992548.271
12			1052343.282	794063.884	1024884.446
11				807303.198	

Anexo 6

Código en GAMS del modelo original

\$Title Capacitated Fixed Cost Facility Location Problem With Transportation Choices

\$Ontext

Modelo del problema "Capacitated Fixed Cost Facility Location Problem with Transportation Choices" (CFCLP-TC para Diseño de Cadenas de Suministro Multiobjetivo).

Modelo Original

\$Offtext

\$eolcom //

Set

i	Conjunto de Plantas i
j	Conjunto de CD Potenciales j
l	Conjunto de Arcos entre i y j
k	Conjunto de Clientes k
m	Conjunto de Arcos entre j y k
arc1(i,j,l)	Conjunto de arcos l entre los nodos i y j
arc2(j,k,m)	Conjunto de arcos m entre los nodos j y k

Parameter	fcost1(i,j,l)	Costo de i a j
	fcost2(j,k,m)	Costo de j a k
	ftime1(i,j,l)	Tiempo de i a j
	ftime2(j,k,m)	Tiempo de j a k
	capacidad (i)	Capacidad de plantas i
	capacidad2 (j)	Capacidad de CD j
	costo_fijo_CD(j)	Costo fijo de CD j
	demanda_clientes (k)	Demanda de clientes k
	T	Valor inicial de T
		/ 20 /

Scalar col numero de columnas /1/;

Scalar cc;

cc=TIMEELAPSED;

arc1(i,j,l)\$(fcost1(i,j,l) or ftime1(i,j,l)) = yes;
arc2(j,k,m)\$(fcost2(j,k,m) or ftime2(j,k,m)) = yes;

Variable	F1	Valor del objetivo 1
	F2	Valor del objetivo 2
	z(j)	Variable Binaria si j es abierto
	x(i,j,l)	Cantidad trasportada de i a j usando el arco ij
	y(j,k,m)	Cantidad trasportada de j a k usando el arco jk
	B(j,k,m)	Si es usado el arco jkm
	A(i,j,l)	Si es usado el arco ij
	E1(j)	Tiempo 1 Maximo en la primera fase
	E2(j)	Tiempo 2 Maximo en la primera fase;

Binary variable z;

Positive variable x;

Positive variable y;

Binary variable B;

Binary variable A;

Positive variable E1;

Positive variable E2;

Positive variable T;

Equations

obj1	Objetivo de Costos
obj2	Objetivo tiempo

Tiempo_primera_fase1 (i,j,l)	Tiempo de primera fase en el nodo i-j
Tiempo_segunda_fase1 (j,k,m)	Tiempo de segunda fase en el nodo j-k
Tiempo_total (j)	Tiempo Total

Demanda(k)	Cantidad transportada por k es igual a la demanda
CP(i)	Capacidad de la planta i
Capacidad_cd (j)	Capacidad del centro de distribución
Balance_flujo(j)	Balance de flujo en el centro de distribución
Suministro_cliente (k)	Cada cliente k debe ser suministrado por solo un CD
Arco_seleccionado_ij (i,j)	A lo sumo un arco puede ser seleccionado entre los nodos ij
Arco_seleccionado_jk (j,k)	A lo sumo un arco puede ser seleccionado entre los nodos jk
Arco_inactivo_ij (i,j,l)	Arco inactivo ij si no hay flujo a través de el
Arco_inactivo_jk (j,k,m)	Arco inactivo jk si no hay flujo a través de el
Flujo_arcos_activos_ij (i,j,l)	Flujo solo por arcos activos en ij
Flujo_arcos_activos_jk (j,k,m)	Flujo solo por arcos activos en jk
CD_cerrado_Arcos_Activos (j)	Asegura que el CD sera cerrado sino tiene arcos activos;

obj1.. F1 =e= sum(arc1, fcost1(arc1)*x(arc1))+ sum(arc2, fcost2(arc2)*y(arc2))+ sum(j, costo_fijo_CD(j)* z(j));

obj2.. F2 =e= T;

Tiempo_total (j).. T - E1(j) - E2(j) =g= 0;

Tiempo_primera_fase1 (i,j,l)\$ (ord(j)>=1 and ord (i)<=50).. E1(j) =g= sum(arc1(i,j,l), A(i,j,l))*ftime1(i,j,l);
Tiempo_segunda_fase1 (j,k,m)\$ (ord(j)>=1 and ord (k)<=50).. E2(j) =g= sum(arc2(j,k,m), B(j,k,m))*ftime2(j,k,m);

Demanda(k).. sum(arc2(j,k,m), y(j,k,m)) =e= demada_clientes (k);

CP(i).. sum(arc1(i,j,l), x(i,j,l)) != capacidad (i);

Capacidad_cd (j).. (capacidad2 (j)* z(j)) - (sum(arc2(j,k,m), y(arc2))) =g= 0;

Balance_flujo(j).. sum(arc1(i,j,l), x(i,j,l)) - sum(arc2(j,k,m), y(j,k,m)) =e= 0;

Suministro_cliente (k).. sum(arc2(j,k,m), B(j,k,m)) =e= 1;

Arco_seleccionado_ij (i,j).. Sum(arc1(i,j,l), A(i,j,l)) != 1;
Arco_seleccionado_jk (j,k).. Sum(arc2(j,k,m), B(j,k,m)) != 1;

Arco_inactivo_ij (i,j,l)\$ (ord(j)>=1 and ord (i)<=50).. (sum(arc1(i,j,l), x(i,j,l))-A(i,j,l)) =g= 0;
Arco_inactivo_jk (j,k,m)\$ (ord(j)>=1 and ord (k)<=50).. (sum(arc2(j,k,m), y(j,k,m))-B(j,k,m)) =g= 0;

Flujo_arcos_activos_ij (i,j,l)\$ (ord(j)>=1 and ord (i)<=50).. (sum(arc1(i,j,l), (capacidad (i)*A(i,j,l)) - x(i,j,l))) =g= 0;
Flujo_arcos_activos_jk (j,k,m)\$ (ord(j)>=1 and ord (k)<=50).. (sum(arc2(j,k,m), (capacidad2 (j)*B(j,k,m)) - y(j,k,m))) =g= 0;

CD_cerrado_Arcos_Activos (j).. (sum (arc1(i,j,l), A(i,j,l)) - z(j)) =g= 0;

Model CFCLPTC /ALL/ ;

CFCLPTC.optcR = 0.00001;

File resultados /resultados.dat/, CFCLP_TC /CFCLP_TC.dat/;

Put resultados;

Put 'Resultados del modelo CFCLP-TC'///

While ((T ge 5) and (T - 1 ne T),

Solve CFCLPTC USING MIP MINIMIZING F1;

Display F1.l, F2.l, E1.l, E2.l, x.l, y.l, z.l, A.l, B.l ;

Anexo 7: Código en GAMS de la variación 1

\$Title Capacitated Fixed Cost Facility Location Problem With Transportation Choices

\$Ontext

Modelo del problema "Capacitated Fixed Cost Facility Location Problem with Transportation Choices" (CFCLP-TC para Diseño de Cadenas de Suministro Multiobjetivo).
Modelo Original

\$Offtext

\$eolcom //

Set

i	Conjunto de Plantas i
j	Conjunto de CD Potenciales j
l	Conjunto de Arcos entre i y j
k	Conjunto de Clientes k
m	Conjunto de Arcos entre j y k
arc1(i,j,l)	Conjunto de arcos l entre los nodos i y j
arc2(j,k,m)	Conjunto de arcos m entre los nodos j y k

Parameter	fcost1(i,j,l)	Costo de i a j
	fcost2(j,k,m)	Costo de j a k
	ftime1(i,j,l)	Tiempo de i a j
	ftime2(j,k,m)	Tiempo de j a k
	capacidad (i)	Capacidad de plantas i
	capacidad2 (j)	Capacidad de CD j
	costo_fijo_CD(j)	Costo fijo de CD j
	demanda_clientes (k)	Demanda de clientes k
	T	Valor inicial de T
		/ 20 /

Scalar col numero de columnas /1/;

Scalar cc;

cc=TIMEELAPSED;

arc1(i,j,l)\$ (fcost1(i,j,l) or ftime1(i,j,l)) = yes;
arc2(j,k,m)\$ (fcost2(j,k,m) or ftime2(j,k,m)) = yes;

Variable	F1	Valor del objetivo 1
	F2	Valor del objetivo 2
	z(j)	Variable Binaria si j es abierto
	x(i,j,l)	Cantidad trasportada de i a j usando el arco ijl
	y(j,k,m)	Cantidad trasportada de j a k usando el arco jkm
	B(j,k,m)	Si es usado el arco jkm
	A(i,j,l)	Si es usado el arco ijl
	E1(j)	Tiempo 1 Maximo en la primera fase
	E2(j)	Tiempo 2 Maximo en la primera fase;

Binary variable z;

Positive variable x;

Positive variable y;

Binary variable B;

Binary variable A;

Positive variable E1;

Positive variable E2;

Positive variable T;

Equations

obj1	Objetivo de Costos
obj2	Objetivo tiempo

Tiempo_primera_fase1 (i,j,l)	Tiempo de primera fase en el nodo i-j
Tiempo_segunda_fase1 (j,k,m)	Tiempo de segunda fase en el nodo j-k

Tiempo_total (j)	Tiempo Total
Demanda(k)	Cantidad transportada por k es igual a la demanda
CP(i)	Capacidad de la planta i
Capacidad_cd (j)	Capacidad del centro de distribución
Balance_flujo(j)	Balance de flujo en el centro de distribución
Arco_seleccionado_ij (i,j)	A lo sumo un arco puede ser seleccionado entre los nodos ij
Arco_seleccionado_jk (j,k)	A lo sumo un arco puede ser seleccionado entre los nodos jk
Arco_inactivo_ij (i,j,l)	Arco inactivo ij si no hay flujo a través de el
Arco_inactivo_jk (j,k,m)	Arco inactivo jk si no hay flujo a través de el
Flujo_arcos_activos_ij (i,j,l)	Flujo solo por arcos activos en ij
Flujo_arcos_activos_jk (j,k,m)	Flujo solo por arcos activos en jk
CD_cerrado_Arcos_Activos (j)	Asegura que el CD sera cerrado sino tiene arcos activos;

obj1.. F1 =e= sum(arc1, fcost1(arc1)*x(arc1))+ sum(arc2, fcost2(arc2)*y(arc2))+ sum(j, costo_fijo_CD(j)* z(j));

obj2.. F2 =e= T;

Tiempo_total (j).. T - E1(j) - E2(j) =g= 0;

Tiempo_primera_fase1 (i,j,l)\$ (ord(j)>=1 and ord (i)<=50).. E1(j) =g= sum(arc1(i,j,l), A(i,j,l))*ftime1(i,j,l);
Tiempo_segunda_fase1 (j,k,m)\$ (ord(j)>=1 and ord (k)<=50).. E2(j) =g= sum(arc2(j,k,m), B(j,k,m))*ftime2(j,k,m);

Demanda(k).. sum(arc2(j,k,m), y(j,k,m)) =e= demada_clientes (k);

CP(i).. sum(arc1(i,j,l), x(i,j,l)) != capacidad (i);

Capacidad_cd (j).. (capacidad2 (j)* z(j)) - (sum(arc2(j,k,m), y(arc2))) =g= 0;

Balance_flujo(j).. sum(arc1(i,j,l), x(i,j,l)) - sum(arc2(j,k,m), y(j,k,m)) =e= 0;

Arco_seleccionado_ij (i,j).. Sum(arc1(i,j,l), A(i,j,l)) != 1;
Arco_seleccionado_jk (j,k).. Sum(arc2(j,k,m), B(j,k,m)) != 1;

Arco_inactivo_ij (i,j,l)\$ (ord(j)>=1 and ord (i)<=50).. (sum(arc1(i,j,l), x(i,j,l))-A(i,j,l)) =g= 0;
Arco_inactivo_jk (j,k,m)\$ (ord(j)>=1 and ord (k)<=50).. (sum(arc2(j,k,m), y(j,k,m))-B(j,k,m)) =g= 0;

Flujo_arcos_activos_ij (i,j,l)\$ (ord(j)>=1 and ord (i)<=50).. (sum(arc1(i,j,l), (capacidad (i)*A(i,j,l)) - x(i,j,l))) =g= 0;
Flujo_arcos_activos_jk (j,k,m)\$ (ord(j)>=1 and ord (k)<=50).. (sum(arc2(j,k,m), (capacidad2 (j)*B(j,k,m)) - y(j,k,m))) =g= 0;

CD_cerrado_Arcos_Activos (j).. (sum (arc1(i,j,l), A(i,j,l)) - z(j)) =g= 0;

Model CFCLPTC /ALL/ ;

CFCLPTC.optcR = 0.00001;

File resultados /resultados.dat/, CFCLP_TC /CFCLP_TC.dat/;

Put resultados;

Put 'Resultados del modelo CFCLP-TC'///

While ((T ge 5) and (T - 1 ne T),

Solve CFCLPTC USING MIP MINIMIZING F1;

Display F1.l, F2.l, E1.l, E2.l, x.l, y.l, z.l, A.l, B.l ;

Anexo 8: Código en GAMS de la variación 2

\$Title Capacitated Fixed Cost Facility Location Problem With Transportation Choices

\$Ontext

Modelo del problema "Capacitated Fixed Cost Facility Location Problem with Transportation Choices" (CFCLP-TC para Diseño de Cadenas de Suministro Multiobjetivo).

Modelo que permite enviar los artículos desde las plantas i a los clientes j, sin pasar por los centros de distribución.

\$Offtext

\$eolcom //

Set

i	Conjunto de Plantas i
j	Conjunto de CD Potenciales j
l	Conjunto de Arcos entre i y j
k	Conjunto de Clientes k
m	Conjunto de Arcos entre j y k
o	Conjunto de Arcos entre i y k
arc1(i,j,l)	Conjunto de arcos l entre los nodos i y j
arc2(j,k,m)	Conjunto de arcos m entre los nodos j y k
arc3(i,k,o)	Conjunto de arcos o entre los nodos i y k

Parameter

fcost1(i,j,l)	Costo de i a j
fcost2(j,k,m)	Costo de j a k
fcost3(i,k,o)	Costo de i a k
ftime1(i,j,l)	Tiempo de i a j
ftime2(j,k,m)	Tiempo de j a k
ftime3(i,k,o)	Tiempo de i a k
capacidad (i)	Capacidad de plantas i
capacidad2 (j)	Capacidad de CD j
costo_fijo_CD(j)	Costo fijo de CD j
demanda_clientes (k)	Demanda de clientes k
T	Valor inicial de T

/ 50 /

Scalar col numero de columnas /1/;

Scalar cc;

cc=TIMEELAPSED;

arc1(i,j,l)\$ (fcost1(i,j,l) or ftime1(i,j,l)) = yes;
 arc2(j,k,m)\$ (fcost2(j,k,m) or ftime2(j,k,m)) = yes;
 arc3(i,k,o)\$ (fcost3(i,k,o) or ftime3(i,k,o)) = yes;

Variable

F1	Valor del objetivo 1
F2	Valor del objetivo 2
z(j)	Variable Binaria si j es abierto
x(i,j,l)	Cantidad transportada de i a j usando el arco ijl
y(j,k,m)	Cantidad transportada de j a k usando el arco jkl
v(i,k,o)	Cantidad transportada de i a k usando el arco ikl
B(j,k,m)	Si es usado el arco jkm
A(i,j,l)	Si es usado el arco ijl
G(i,k,o)	Si es usado el arco iko
E1(j)	Tiempo 1 Máximo en la primera fase
E2(j)	Tiempo 2 Máximo en la primera fase
E3(k)	Tiempo 3 Máximo de i a k;

Binary variable z;

Positive variable x;

Positive variable y;

Positive variable v;

Binary variable B;

Binary variable A;

Binary variable G;

Positive variable E1;

Positive variable E2;
Positive variable E3;

Equations

obj1	Objetivo de Costos
obj2	Objetivo tiempo
Tiempo_total (j)	Tiempo Total
Tiempo_alternativa (k)	Tiempo de la alternativa en el nodo i-k
Tiempo_primera_fase1 (i,j,l)	Tiempo de primera fase en el nodo i-j
Tiempo_segunda_fase1 (j,k,m)	Tiempo de segunda fase en el nodo j-k
Tiempo_variacion_total (i,k,o)	Tiempo de i a k sin usar centros de distribución

Demanda(k)	Cantidad trasportada por k es igual a la demanda
CP(i)	Capacidad de la planta i
Capacidad_cd (j)	Capacidad del centro de distribución

Balance_flujo(j)	Balance de flujo en el centro de distribución
Suministro_cliente (k)	Cada cliente k debe ser suministrado por solo un CD

Arco_seleccionado_ij (i,j)	A lo sumo un arco puede ser seleccionado entre los nodos ij
Arco_seleccionado_jk (j,k)	A lo sumo un arco puede ser seleccionado entre los nodos jk
Arco_seleccionado_ik (i,k)	A lo sumo un arco puede ser seleccionado entre los nodos ik

Arco_inactivo_ij (i,j,l)	Arco inactivo ij si no hay flujo a través de el
Arco_inactivo_jk (j,k,m)	Arco inactivo jk si no hay flujo a través de el
Arco_inactivo_ik (i,k,o)	Arco inactivo ik si no hay flujo a través de el

Flujo_arcos_activos_ij (i,j,l)	Flujo solo por arcos activos en ij
Flujo_arcos_activos_jk (j,k,m)	Flujo solo por arcos activos en jk
Flujo_arcos_activos_ik (i,k,o)	Flujo solo por arcos activos en ik

CD_cerrado_Arcos_Activos (j) Asegura que el CD será cerrado sino tiene arcos activos;

obj1.. F1 = e= sum(arc1, fcost1(arc1)*x(arc1))+ sum(arc2, fcost2(arc2)*y(arc2))+ sum(arc3, fcost3(arc3)*v(arc3)) + sum(j, costo_fijo_CD(j)* z(j));

obj2.. F2 = e= T;

Tiempo_total (j).. T - E1(j) - E2(j) =g= 0;
Tiempo_alternativa (k).. T - E3(k) =g= 0;

Tiempo_primera_fase1 (i,j,l)\$ (ord(j)>=1 and ord (i)<=50).. E1(j) =g= sum(arc1(i,j,l), A(i,j,l))*ftime1(i,j,l);
Tiempo_segunda_fase1 (j,k,m)\$ (ord(j)>=1 and ord (k)<=50).. E2(j) =g= sum(arc2(j,k,m), B(j,k,m))*ftime2(j,k,m);
Tiempo_variacion_total (i,k,o)\$ (ord(i)>=1 and ord (k)<=50).. E3(k) =g= sum(arc3(i,k,o), G(i,k,o))*ftime3(i,k,o);

Demanda(k).. sum(arc2(j,k,m), y(j,k,m))+ sum(arc3(i,k,o), v(i,k,o)) =e= demada_clientes (k);

CP(i).. sum(arc1(i,j,l), x(i,j,l))+ sum(arc3(i,k,o), v(i,k,o)) !== capacidad (i);

Capacidad_cd (j).. (capacidad2 (j)* z(j)) - (sum(arc2(j,k,m), y(arc2))) =g= 0;

Balance_flujo(j).. sum(arc1(i,j,l), x(i,j,l)) - sum(arc2(j,k,m), y(j,k,m)) =e= 0;

Suministro_cliente (k).. sum(arc3(i,k,o), G(i,k,o))+ sum(arc2(j,k,m), B(j,k,m)) =e= 1;

Arco_seleccionado_ij (i,j).. Sum(arc1(i,j,l), A(i,j,l)) !== 1;
Arco_seleccionado_jk (j,k).. Sum(arc2(j,k,m), B(j,k,m)) !== 1;
Arco_seleccionado_ik (i,k).. Sum(arc3(i,k,o), G(i,k,o)) !== 1;

Arco_inactivo_ij (i,j,l)\$ (ord(j)>=1 and ord (i)<=50).. (sum(arc1(i,j,l), x(i,j,l))-A(i,j,l)) =g= 0;
Arco_inactivo_jk (j,k,m)\$ (ord(j)>=1 and ord (k)<=50).. (sum(arc2(j,k,m), y(j,k,m))-B(j,k,m)) =g= 0;
Arco_inactivo_ik (i,k,o)\$ (ord(i)>=1 and ord (k)<=50).. (sum(arc3(i,k,o), v(i,k,o))-G(i,k,o)) =g= 0;

Flujo_arcos_activos_ij (i,j,l)\$ (ord(j)>=1 and ord (i)<=50).. (sum(arc1(i,j,l), (capacidad (i)*A(i,j,l)) - x(i,j,l))) =g= 0;
Flujo_arcos_activos_jk (j,k,m)\$ (ord(j)>=1 and ord (k)<=50).. (sum(arc2(j,k,m), (capacidad2 (j)*B(j,k,m)) - y(j,k,m))) =g= 0;
Flujo_arcos_activos_ik (i,k,o)\$ (ord(i)>=1 and ord (k)<=50).. (sum(arc3(i,k,o), (capacidad (i)*G(i,k,o)) - v(i,k,o))) =g= 0;

CD_cerrado_Arcos_Activos (j).. (sum (arc1(i,j,l), A(i,j,l)) - z(j)) =g= 0;

```
Model CFCLPTC /ALL/ ;  
    CFCLPTC.optcR = 0.00001;  
File resultados /resultados.dat/, CFCLP_TC /CFCLP_TC.dat/;  
Put resultados;  
Put 'Resultados del modelo CFCLP-TC'///  
While ((T ge 5) and (T - 1 ne T),  
    Solve CFCLPTC USING MIP MINIMIZING F1 ;  
Display F1.I, F2.I, E1.I, E2.I,E3.I, x.I, y.I,v.I, z.I, A.I, B.I, G.I ;
```

Anexo 9: Código en GAMS de la variación 3

\$Title Capacitated Fixed Cost Facility Location Problem With Transportation Choices

\$Ontext

Modelo del problema "Capacitated Fixed Cost Facility Location Problem with Transportation Choices" (CFCLP-TC para Diseño de Cadenas de Suministro Multiobjetivo).

Modelo que permite intercambio de producto entre los centros de distribución de j - p y de p - j.

\$Offtext

\$eolcom //

Set

i	Conjunto de Plantas i
j	Conjunto de CD Potenciales j
k	Conjunto de Clientes k
l	Conjunto de Arcos entre i y j
m	Conjunto de Arcos entre j y k
n	Conjunto de Arcos entre j y p
arc1(i,j,l)	Conjunto de arcos l entre los nodos i y j
arc2(j,k,m)	Conjunto de arcos m entre los nodos j y k
arc3(j,p,n)	Conjunto de arcos o entre los nodos (j-p) y (p-j)

Alias (j,p)

Parameter	fcost1(i,j,l)	Costo de i a j
	fcost2(j,k,m)	Costo de j a k
	fcost3(j,p,n)	Costo de (j-p) y (p-j)
	ftime1(i,j,l)	Tiempo de i a j
	ftime2(j,k,m)	Tiempo de j a k
	ftime3(j,p,n)	Tiempo de (j-p y p-j)
	capacidad (i)	Capacidad de plantas i
	capacidad2 (j)	Capacidad de CD j
	costo_fijo_CD(j)	Costo fijo de CD j
	demanda_clientes (k)	Demanda de clientes k
	W	Valor de M
		/ 5000 /
	T	Valor inicial de T
		/ 60 /

Scalar col numero de columnas /1/;

Scalar cc;

cc=TIMEELAPSED;

arc1(i,j,l)\$ (fcost1(i,j,l) or ftime1(i,j,l)) = yes;
 arc2(j,k,m)\$ (fcost2(j,k,m) or ftime2(j,k,m)) = yes;
 arc3(j,p,n)\$ (fcost3(j,p,n) or ftime3(j,p,n)) = yes;

Variable	F1	Valor del objetivo 1
	F2	Valor del objetivo 2
	z(j)	Variable Binaria si j es abierto
	x(i,j,l)	Cantidad trasportada de i a j usando el arco ijl
	y(j,k,m)	Cantidad trasportada de j a k usando el arco jkl
	r(j,p,n)	Cantidad transportada de (j-p) y (p-j) usando el arco (jpl) y (pjl)
	B(j,k,m)	Si es usado el arco jkm
	A(i,j,l)	Si es usado el arco ijl
	C(j,p,n)	Si es usado el arco (jpl) o (pjl)
	s(j,p)	Variable Binaria para restricción Si - Entonces
	E1(j)	Tiempo 1 Máximo en la primera fase
	E2(j)	Tiempo 2 Máximo en la primera fase
	E3	Tiempo 3 Máximo de j a p;

Binary variable z;

Positive variable x;

Positive variable y ;
 Positive variable r ;
 Binary variable B ;
 Binary variable A ;
 Binary variable C ;
 Binary variable s ;
 Positive variable $E1$;
 Positive variable $E2$;
 Positive variable $E3$;

Equations

obj1 Objetivo de Costos
 obj2 Objetivo tiempo

Tiempo_total (j) Tiempo Total
 Tiempo_alternativa Tiempo entre los centros de distribución j-p

Tiempo_primera_fase1 (i,j,l) Tiempo de primera fase en el nodo i-j
 Tiempo_segunda_fase1 (j,k,m) Tiempo de segunda fase en el nodo j-k

Adicional_1(j) Evitar múltiples rutas

Condicion1 (j,p) Condición para la suma de tiempo
 Condicion1A (p,j) Condición para la suma de tiempo

Determinacion_tiempo_E3 (i,j,p,k) Determinación de tiempo
 Determinacion_tiempo_E3A (i,j,p,k) Determinación de tiempo

Demanda(k) Cantidad transportada por k es igual a la demanda
 CP(i) Capacidad de la planta i

Capacidad_cd(j) Capacidad del centro de distribución

Balance_flujo(j) Balance de flujo en el centro de distribución $x_{ijl} + R_{pjl}$

Suministro_cliente (k) Cada cliente k debe ser suministrado por solo un CD

Arco_seleccionado_ij (i,j) A lo sumo un arco puede ser seleccionado entre los nodos ij
 Arco_seleccionado_jk (j,k) A lo sumo un arco puede ser seleccionado entre los nodos jk
 Arco_seleccionado_jp (j,p) A lo sumo un arco puede ser seleccionado entre los nodos jp
 Arco_seleccionado_pj (p,j) A lo sumo un arco puede ser seleccionado entre los nodos pj

Intercambio_entre_nodos (j,p) Evita que se cicle el intercambio entre los nodos

Arco_inactivo_ij (i,j,l) Arco inactivo ij si no hay flujo a través de el
 Arco_inactivo_jk (j,k,m) Arco inactivo jk si no hay flujo a través de el
 Arco_inactivo_jp (j,p,n) Arco inactivo jp si no hay flujo a través de el
 Arco_inactivo_pj (p,j,n) Arco inactivo pj si no hay flujo a través de el

Flujo_arcos_activos_ij (i,j,l) Flujo solo por arcos activos en ij
 Flujo_arcos_activos_jk (j,k,m) Flujo solo por arcos activos en jk
 Flujo_arcos_activos_jp (j,p,n) Flujo solo por arcos activos en jp
 Flujo_arcos_activos_pj (p,j,n) Flujo solo por arcos activos en pj

CD_cerrado_Arcos_Activos (j) Asegura que el CD sera cerrado sino tiene arcos activos;

obj1.. $F1 = e = \sum(\text{arc1}, \text{fcost1}(\text{arc1}) * x(\text{arc1})) + \sum(\text{arc2}, \text{fcost2}(\text{arc2}) * y(\text{arc2})) + \sum(\text{arc3}, \text{fcost3}(\text{arc3}) * r(\text{arc3})) + \sum((p,j,n), \text{fcost3}(p,j,n) * r(p,j,n)) + \sum(j, \text{costo_fijo_CD}(j) * z(j));$

obj2.. $F2 = e = T$;

Tiempo_total (j).. $T - E1(j) - E2(j) = g = 0$;

```

Tiempo_alternativa .. T - E3 =g= 0;

Tiempo_primera_fase1 (i,j,l)$ (ord(j)>=1 and ord (i)<=60).. E1(j) =g= sum(arc1(i,j,l), A(i,j,l))*ftime1(i,j,l);
Tiempo_segunda_fase1 (j,k,m)$ (ord(j)>=1 and ord (k)<=60).. E2(j) =g= sum(arc2(j,k,m), B(j,k,m))*ftime2(j,k,m);

Adicional_1(j).. Sum(arc3(j,p,n)$ (ord(j)>=1 and ord (p)>=1), C(j,p,n)) + Sum(arc3(p,j,n), C(p,j,n)) =l= 1;

Condicion1 (j,p).. Sum(arc3(j,p,n), C(j,p,n)) =l= W*(1-s(j,p));
Condicion1A (p,j).. Sum(arc3(p,j,n), C(p,j,n)) =l= W*(1-s(p,j));

Determinacion_tiempo_E3 (i,j,p,k).. (E3 - (sum(arc1(i,j,l), A(i,j,l))*ftime1(i,j,l)) + sum(arc3(j,p,n), C(j,p,n))*ftime3(j,p,n))+
sum(arc2(p,k,m), B(p,k,m))*ftime2(j,k,m))) =g= -W*s(j,p);
Determinacion_tiempo_E3A (i,j,p,k).. (E3 - (sum(arc1(i,p,l), A(i,p,l))*ftime1(i,p,l)) + sum(arc3(p,j,n), C(p,j,n))*ftime3(p,j,n))+
sum(arc2(j,k,m), B(j,k,m))*ftime2(j,k,m))) =g= -W*s(p,j);

Demanda(k).. sum(arc2(j,k,m), y(j,k,m)) =e= demada_clientes (k);
CP(i).. sum(arc1(i,j,l), x(i,j,l)) =l= capacidad (i);

Capacidad_cd(j).. (capacidad2(j)* z(j)) - ((sum(arc2(j,k,m), y(arc2))) + sum(arc3(j,p,n), r(j,p,n)) - sum(arc3(p,j,n),
r(p,j,n))) =g= 0;

Balance_flujo(j).. sum(arc1(i,j,l), x(i,j,l)) + sum(arc3(p,j,n), r(p,j,n)) - sum(arc2(j,k,m), y(j,k,m)) - sum(arc3(j,p,n),
r(j,p,n)) =e= 0;

Suministro_cliente (k).. sum(arc2(j,k,m), B(j,k,m)) =e= 1;

Arco_seleccionado_ij (i,j).. Sum(arc1(i,j,l), A(i,j,l)) =l= 1;
Arco_seleccionado_jk (j,k).. Sum(arc2(j,k,m), B(j,k,m)) =l= 1;
Arco_seleccionado_jp (j,p).. Sum(arc3(j,p,n), C(j,p,n)) =l= 1;
Arco_seleccionado_pj (p,j).. Sum(arc3(p,j,n), C(p,j,n)) =l= 1;

Intercambio_entre_nodos(j,p)$ (ord(j)>=1 and ord (p)>=1).. Sum(arc3(j,p,n), C(j,p,n)) + Sum(arc3(p,j,n), C(p,j,n)) =l= 1;

Arco_inactivo_ij (i,j,l)$ (ord(j)>=1 and ord (i)<=50).. (sum(arc1(i,j,l), x(i,j,l))-A(i,j,l))) =g= 0;
Arco_inactivo_jk (j,k,m)$ (ord(j)>=1 and ord (k)<=50).. (sum(arc2(j,k,m), y(j,k,m))-B(j,k,m))) =g= 0;
Arco_inactivo_jp (j,p,n)$ (ord(j)>=1 and ord (p)<=50).. (sum(arc3(j,p,n), r(j,p,n))-C(j,p,n))) =g= 0;
Arco_inactivo_pj (p,j,n)$ (ord(p)>=1 and ord (j)<=50).. (sum(arc3(p,j,n), r(p,j,n))-C(p,j,n))) =g= 0;

Flujo_arcos_activos_ij (i,j,l)$ (ord(j)>=1 and ord (i)<=50).. (sum(arc1(i,j,l), (capacidad (i)*A(i,j,l)) - x(i,j,l))) =g= 0;
Flujo_arcos_activos_jk (j,k,m)$ (ord(j)>=1 and ord (k)<=50).. (sum(arc2(j,k,m), (capacidad2 (j))*B(j,k,m)) - y(j,k,m))) =g= 0;
Flujo_arcos_activos_jp (j,p,n)$ (ord(j)>=1 and ord (p)<=50).. (sum(arc3(j,p,n), (capacidad2 (p)* C(j,p,n)) - r(j,p,n))) =g= 0;
Flujo_arcos_activos_pj (p,j,n)$ (ord(p)>=1 and ord (j)<=50).. (sum(arc3(p,j,n), (capacidad2 (j)* C(p,j,n)) - r(p,j,n))) =g= 0;

CD_cerrado_Arcos_Activos (j)$ (ord(j)>=1).. (sum (arc1(i,j,l), A(i,j,l)) - z(j)) =g= 0;

Model CFCLPTC /ALL/ ;

CFCLPTC.optcR = 0.00001;
CFCLPTC.reslim = 990000;

File resultados /resultados.dat/, CFCLP_TC /CFCLP_TC.dat/;

Put resultados;
Put 'Resultados del modelo CFCLP-TC'///

While ((T ge 5) and (T - 5 ne T),

Solve CFCLPTC USING MIP MINIMIZING F1;

Display F1.l, F2.l, E1.l, E2.l, E3.l, x.l, y.l, r.l, r1.l, z.l, A.l, B.l, C.l, C1.l, VVV.l, VVV1.l;

```