



**Universidad Popular Autónoma del Estado
de Puebla**

Centro Interdisciplinario de Posgrados
Investigación y Consultoría

Departamento de Ingeniería

Doctorado en Logística y Dirección de la Cadena
de Suministro

Modelo Matemático Bi-objetivo Determinístico de Red Logística Directa e Inversa de la Industria de Re-manufactura

Tesis para obtener el grado de Doctor en
Logística y Dirección de la Cadena de Suministro

Presenta

Araceli López y López



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:

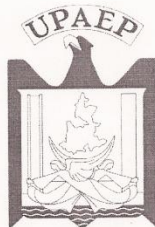
DERECHOS RESERVADOS ©

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 Logística y Dirección de la Cadena de
Suministro

Por este medio nos permitimos informar a Uds. la aprobación de la Tesis:

“Modelo matemático bi-objetivo determinístico de red logística directa e inversa de la industria de re-manufactura”, que presenta el (la) alumno (a): Araceli López y López como requisito para obtener el Grado de Doctorado en este programa académico.

Atte.

Comité Doctoral

Dr. Elías Olivares Benítez
Asesor

Dra. José Luis Martínez Flores
Director de Tesis

Dr. Vittorio Zanella Palacios
Asesor

Puebla, México.

12 de abril de 2012.

*“Todos somos genios. Pero si juzgas a un pez por su capacidad de trepar árboles,
vivirá todo su vida pensando que es un inútil.”*

Albert Einstein

Agradezco a Dios que tengo a quién y qué dedicar.

A mis hijas, Priscila y Mariana Erandi, porque son mi mejor fuente de inspiración para levantarme y seguir en el camino que Dios me ha preparado. Mil gracias por su amor y compañía.

A mi padre Fidel[†], porque en todos estos años su recuerdo ha estado presente y bendiciéndome.

A mi madre Isabel, por tenerme en sus oraciones, por el amor que me tiene y por cuidar de mis hijas.

A mis hermanos, José Fidel, Fabiola, Alejandro, Raquel, Mario y Eduardo, porque caminamos siempre sin soltarnos de las manos y por la admiración que les tengo.

A mis cuñadas, Lucy, Nidia, Sonia y Heidy por sus ánimos y compañía.

A mis sobrinos, Ana Laura, Ana Victoria, Lupita, Raquel, Heidy, Maya Violeta y José Eduardo, porque vuelen mucho más lejos que nosotros.

Agradezco al Programa de Mejoramiento del Profesorado (PROMEP). Por su apoyo económico para realizar el *“Doctorado en Logística y Dirección de la Cadena de Suministro”* en la UPAEP. Contribuyendo con esto a impulsar la superación sustancial en la formación, dedicación y desempeño de los cuerpos académicos de la Universidad Autónoma del Estado de Tlaxcala y elevar la calidad de la educación superior.

También el apoyo y confianza de la Universidad Autónoma de Tlaxcala, en especial a la Facultad de Ciencias Básicas, Ingeniería y Tecnología por darme todas las facilidades laborales para la realización de mis estudios.

Gracias a mis asesores, Dr. Elías Olivares Benítez, Dr. José Luis Martínez Flores y al Dr. Vittorio Zanella Palacios, porque su paciencia y sabiduría hicieron posible este trabajo.

Al Dr. Saúl Cano Hernández y Dr. Enrique González Gutiérrez, gracias por el apoyo incondicional y observaciones para este trabajo.

M.C. Antonio Durante Murillo, gracias por su impulso, apoyo y confianza, que permitieron cristalizar mis metas académicas.

RESUMEN

En estos tiempos de crisis, ha habido un incremento en la preocupación de las empresas por aprovechar al máximo las ventajas de la logística inversa incrementando hasta en un 5% sus utilidades y así conservan y ganan clientes lo que sin duda las hace más competitivas. De aquí la importancia de modelarla matemáticamente para encontrar soluciones que permitan su puesta en práctica, especialmente en devoluciones del producto con la finalidad de buscar no sólo los ahorros en costo de inventario, en costo del transporte, en costo de eliminación debido a los productos vueltos, sino también la mejora de la lealtad del cliente y de las ventas futuras en una firma. En esta tesis se propone un modelo matemático Bi-objetivo de logística directa e inversa en un ámbito de la industria de remanufactura de ocho escalones, analizando la apertura de centros potenciales de distribución, centros de devolución, centros de eliminación y centros de desensamble, así como la minimización de costos y tiempos de envío. Se considera además que el flujo de unidades entre cada par de instalaciones debe realizarse por dos diferentes opciones de transporte (camioneta, autobús, tren, avión, barco o servicios de envío urgente, normal, de noche, etc.). Se utiliza el método ε – *Constraint* implementado en LINGO versión 10 y la heurística NSGA II. Se diseñan diferentes instancias para validar el modelo. Por simplicidad solo se considera en las pruebas del modelo el envío de un solo producto.

ABSTRACT

In these times of crisis, there has been an increased concern of the companies to take full advantage of the benefits of reverse logistics increasing up to 5% of profits and retain and earn customers and which certainly makes them more competitive. From here the importance of model it mathematically to find solutions to their implementation, especially in product returns in order to seek not only cost savings in inventory, cost of transport, disposal costs due to returned products but also improving customer loyalty and future sales in a firm. These theses proposes a mathematical model Bi-objective forward and reverse logistics in a field of re-manufacturing industry of eight echelons, analyzing the potential opening of distribution centers, return centers, centers for disposal and disassembly centers and as minimization of costs and delivery times. It also suggests that the flow of units between each pair of facilities must be made in two different transportation options (truck, bus, train, plane, boat or express delivery services, normal, at night, etc.). We use the ϵ -Constraint method implemented in LINGO version 10 and the heuristic NSGA II. Various instances are designed to validate the model. For simplicity only is considered in the model tests of the sending of a single product.

INDICE

RESUMEN	6
ABSTRACT	7
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN	
1.1 Antecedentes	15
1.2 Problema de investigación	17
1.3 Justificación	17
1.4 Objetivos de la investigación	18
1.5 Objetivo general	18
1.6 Objetivos específicos	18
1.7 Preguntas de investigación	19
1.8 Alcances y limitaciones	19
1.9 Alcances	19
1.10 Limitaciones.	20
CAPÍTULO 2. MARCO TEÓRICO	
CAPÍTULO 3. MODELO DE OPTIMIZACIÓN BI-OBJETIVO PARA EL DISEÑO DE UNA RED LOGÍSTICA EN EL MEDIO AMBIENTE DE RE-MANUFACTURA	
3.1 Introducción	30
3.2 Descripción del problema y el modelo matemático	31
3.3 Experiencia Computacional	35
3.4 Conclusiones	39

3.5 Referencias	39
-----------------	----

CAPÍTULO 4. UN MODELO BI-OBJETIVO PARA LA CADENA DE SUMINISTRO DE UN SISTEMA DE MANUFACTURA.

4.1 Resumen	40
4.2 Introducción	40
4.3 Un Modelo de Ubicación de Instalaciones para un Sistema de Manufactura con Opción de Transporte de Regreso	41
4.4 Modelo propuesto	41
4.5 Solución de una instancia	47
4.6 Conclusiones	49
4.7 Referencias	49

CAPÍTULO 5. MODELO MATEMÁTICO BI-OBJETIVO DETERMINÍSTICO DE RED LOGÍSTICA DIRECTA E INVERSA DE LA INDUSTRIA DE RE-MANUFACTURA

5.1 Resumen	51
5.2 Introducción	51
5.3 Modelo propuesto	52
5.4 Generación de instancias	65
5.4.1 Capacidades de las instalaciones del flujo directo	65
5.4.2 Costos y tiempos de transporte para el flujo directo	66
5.4.3 Capacidades de las instalaciones del flujo inverso	67
5.4.4 Costos y tiempos de transporte para el flujo inverso	70
5.5 Experiencia computacional	70
5.5.1 Instancia 01	70

5.6 Resultados	75
5.7 Conclusiones	83
5.8 Referencias	84

CAPÍTULO 6. TRABAJO FUTURO Y CONCLUSIONES FINALES

6.1 Trabajo futuro	85
6.2 Conclusiones finales	85
REFERENCIAS	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	Número de artículos de logística inversa publicados de 1995 a 2005	22
Figura 2.2	Propuesta de Fleischmann, (1997)	24
Figura 2.3	Red de recuperación de productos propuesto	27
Figura 2.4	Problema de localización de un sistema de re-manufactura	28
Figura 2.5	Modelo de red logística inversa multi-etapa	29
Figura 3.1	An instance with three return centers, three disassembly centers and two processing centers	35
Figura 3.2	Pareto front for step size 10	36
Figura 3.3	Pareto front for step size 3.	36
Figura 3.4	Pareto front for step size 1	37
Figura 3.5	Solution $f_1 = 2375$, $f_2 = 27$. Variables, $Y_{desen1}=1$, $Y_{desn2}=1$, $Y_{proces1}=1$, $Y_{proces2}=1$.	37
Figura 3.6	Solution $f_1 = 1606$, $f_2 = 41$. Variables, $Y_{desen1}=1$, $Y_{desn2}=1$, $Y_{proces1}=1$, $Y_{proces2}=1$	38
Figura 3.7	Solution $f_1 = 1245$, $f_2 = 97$. Variables, $Y_{desen1}=1$, $Y_{desn2}=1$, $Y_{proces1}=1$, $Y_{proces2}=1$	38
Figura 4.5.1	Frente de Pareto con tamaño de paso 10.	48
Figura 4.5.2	Frente de Pareto con tamaño de paso 5.	48
Figura 4.5.3	Solución gráfica de una instancia del envío y regreso de un solo producto.	49
Figura 5.3.1	Modelo propuesto de diseño de red logística e inversa.	54
Figura 5.6.1	Una solución gráfica de la instancia 01, utilizando Lingo 10.	76

Figura 5.6.2 Óptimos de Pareto para la instancia 01, con Lingo versión 10.	78
Figura 5.6.3 Óptimos de Pareto para la instancia 01, generación 1 de 1000, con una población de 50 individuos.	79
Figura 5.6.4 Óptimos de Pareto para la instancia 01, generación 1000 de 1000, con una población de 50 individuos.	79
Figura 5.6.5 Óptimos de Pareto, para la instancia 01, generación 1 de 1000, con una población de 100 individuos.	80
Figura 5.6.6 Óptimos de Pareto para la instancia 01, generación 1000 de 1000, con una población de 100 individuos.	80
Figura 5.6.7 Óptimos de Pareto para la instancia 01, generación 1 de 10,000, con una población de 50 individuos, segunda corrida.	81
Figura 5.6.8 Óptimos de Pareto para la instancia 01, generación 10,000 de 10,000, con una población de 50 individuos, segunda corrida.	81

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1	Porcentaje de técnicas empleadas en la solución de problemas de logística inversa.	23
Tabla 5.5.1	Cotas para los costos y tiempos de transportación, y número de canales de envío para la instancia 01.	71
Tabla 5.5.2	Tiempos y costos de transportación de las fábricas a los CPD's, para la instancia 01.	71
Tabla 5.5.3	Tiempos y costos de transportación de los CPD's a los clientes, para la instancia 01.	71
Tabla 5.5.4	Tiempos y costos de transportación de los clientes a los centros de devolución, para la instancia 01.	72
Tabla 5.5.5	Tiempos y costos de transportación de los centros de devolución a los centros de desensamble, para la instancia 01.	72
Tabla 5.5.6	Tiempos y costos de transportación de los centros de devolución a los centros de eliminación, para la instancia 01.	73
Tabla 5.5.7	Tiempos y costos de transportación de los centros de devolución a las fábricas, para la instancia 01.	73
Tabla 5.5.8	Tiempos y costos de transportación de los centros de desensamble a los centros de eliminación, para la instancia 01.	73
Tabla 5.5.9	Tiempos y costos de transportación de los centros de desensamble a las fábricas, para la instancia 01.	74
Tabla 5.5.10	Costos de apertura de los CPD's, Centros de Devolución y Centros de Desensamble, para la instancia 01.	75
Tabla 5.5.11	Tipos de instancias utilizadas para validar el modelo. Fuente: elaboración propia.	75
Tabla 5.6.1	Óptimos de Pareto para la instancia 01 con Lingo 10.	77
Tabla 5.6.2	Valores de $R_{pos}(P_i)$ para la instancia 01.	82

Tabla 5.6.3 Resultados de la instancia 02 con lingo versión 10.	82
Tabla 5.6.3 Resultados de la instancia 03 con lingo versión 10.	83
Tabla 5.6.3 Resultados de la instancia 04 con lingo versión 10.	83

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes.

La sociedad consumista en que vivimos genera un elevado número de residuos que la naturaleza no puede desechar, convirtiéndose esto en una gran problemática y conduciéndonos entonces a aceptar la implementación de logística inversa.

La Logística Inversa (LI) es uno de los aspectos de la Logística que más interés está provocando en los profesionales e investigadores en estas últimas décadas (Carranza y Sabría, 2008).

La problemática de los residuos es sin duda una gran preocupación de toda ciudad conurbada. La gravedad de acumulación de residuos motiva a gestionar la búsqueda de encontrarles un correcto proceso de transformación o acondicionamiento que les permita incorporarse al proceso productivo, bien de la propia actividad económica que los genera, o bien de otra actividad en lugar de ser enterrados en un vertedero, alcanzando así un valor económico.

La reutilización de productos y materiales no es algo nuevo. Ya desde hace algún tiempo existen por ejemplo, recolectores de chatarra, reciclaje de residuos de papel y sistemas de depósito para botellas de refresco. En estos casos la recuperación de los productos utilizados es económicamente más atractiva que desecharlos (Fleischmann M., *et al.*, 1997). También es el caso del reciclaje de subproductos de origen animal (Meeker D., *et al.*, 2006), como son: cueros, pieles, pelo, pluma, pezuñas, cuernos, patas, cabezas, huesos, uñas, etc. Estos subproductos se han utilizado durante siglos para muchos usos importantes. Los productos fabricados a partir de materias primas “no comestibles” contribuyen de manera económica importante a industrias conexas y a la sociedad. Además, el proceso de reciclado y la utilización de subproductos contribuyen a mejorar la calidad ambiental, y la salud animal y humana.

En Europa, los esquemas de reciclaje son muy variados. Holanda reporta el 30% de reciclaje, 30% de compostaje, 30% de incineración con recuperación de energía y 10% de vertido de residuos últimos. En Viena, el esquema es 50% de valorización energética, 29% de reciclaje, 12% de compostaje y 9% de vertedero. En España un 11% de los residuos se compostan, un 8% se destina al reciclaje y un 6% se valoriza energéticamente. El 75% de los residuos acaban en vertederos. Según el World Watch Institute, en los Estados Unidos la actividad de reciclado en la comunidad económica da empleo a más de 2 millones de personas (Martínez, 2007).

El reciclaje es una importante industria a nivel mundial, equivale al 44% del acero producido en el mundo, 36% del cobre y 25% del aluminio; 13% en los textiles; 30%

del papel y el cartón; 45% del plomo que es obtenido de la chatarra reciclada (Martínez, 2007).

En Europa el agua se recicla hasta siete veces, en México únicamente el 10% del agua es reciclada una vez. En muchos países, directivas comunitarias obligan a la recuperación o reciclado de muchos productos, bienes de consumo, envases y embalajes, componentes automotrices, material eléctrico y electrónico, por lo cual la basura y desechos no ponen en peligro los acuíferos, el medio ambiente y la salud de las comunidades (Carmona, 2007), sin embargo lo que ocurre en México, sobre todo en épocas de lluvia, las grandes urbes se ven afectadas por inundaciones debido al mal manejo de basura y desechos.

Hablando de salud, e inclusive de la vida de las personas, tenemos el caso de Toyota Motor Corp., publicado en Internet en CNNEXPANSION.com el 21 de enero de 2010 (Reuters, 2010) donde la empresa acepta la responsabilidad de retirar 2.3 millones de vehículos en Estados Unidos para resolver posibles defectos del pedal del acelerador, admitiendo serios problemas en sus autos y camionetas. El problema con los pedales causa que los autos se aceleren sin la instrucción del conductor. La empresa japonesa Toyota Motor prometió reparar 8.5 millones de vehículos, con una logística inversa que implica retirar del domicilio del usuario el vehículo y llevarlo a los centros de reparación, así como proveer de transporte alternativo a los clientes afectados, ya sea con autos rentados o reembolsándoles los gastos de taxis mientras los clientes no pueden usar sus vehículos. Analistas económicos han estimado que la suspensión de ventas puede costar a la firma al menos 550 millones de dólares mensuales en ganancias operacionales.

Después de esta noticia, en el mismo canal de publicación CNNEXPANSION.com, puede leerse el siguiente encabezado *“Epidemias de fallas ataca a firmas. Toyota es solo un ejemplo de los desperfectos, y ahora otras empresas ponen sus barbas a remojar”*, y en relación a esto, se anuncia lo siguiente: La Procuraduría Federal del Consumidor (PROFECO) inmovilizó en México más de 3,600 andaderas y corrales para bebé por carecer de las medidas mínimas de seguridad establecidas por la ley.

Chrysler Group anunció el retiro de 24,117 autos por un posible defecto en el sistema de frenos que puede resultar en un inesperado fallo en el mecanismo. En México, la empresa contacto en febrero de 2010 a los clientes de 2,963 unidades de modelos 2010 Chrysler Sebring, Dodge Avenger y Nitro, y de Jeep Liberty, los vehículos deportivos Commander y Grand Cherokee, además las camionetas Dodge Ram modelo 2009- 2010 para realizar las revisiones correspondientes y corregir el problema encaso de existir. Honda anunció también que solicitará la devolución de 646,000 camionetas compactas vendidas en todo el mundo, para reparar un defecto cerca de las ventanas, que puede causar el incendio del vehículo.

Estos son solo algunos datos que nos motivan a analizar los aspectos de la Logística Inversa (LI) y pensar en todas las actividades que esta implica.

Aunque los consultores y expertos de LI no hablan de un número preciso de compañías que la estén implementando en México – pues es considerada en el país como algo nuevo-, coinciden en que, sobre todo en estos tiempos de crisis, ha habido un incremento en la preocupación de las empresas por aprovechar al máximo las ventajas de la logística inversa incrementando hasta en un 5% (Ortiz, 2009) sus utilidades y así conservan y ganan clientes lo que sin duda las hace más competitivas.

1.2 Problema de Investigación.

La preocupación internacional de algunas firmas, tales como automotrices (Volkswagen, Daimler, BMW), de vidrio e industria química (DSM, BASF, Union Carbide, Dupont), de computadoras (Dell e IBM), y equipos de oficina (Xerox, Hewlett Packard), por preservar el medio ambiente se ha incrementado. Esto se refleja en el gran interés de coleccionar los productos averiados por un lado para que no causen contaminación y por otro para recuperar recursos. Por lo cual, poner en práctica la logística inversa permitirá ahorros en costos de inventario, costos de transporte de los productos que regresan, mejorará la lealtad al cliente y mejorará las ventas futuras.

Un área de gran importancia para las compañías en el mundo globalizado es la integración de la Logística espacio-temporal (Carmona, 2007) donde se integran dos conceptos “tiempo y espacio”. Las decisiones logísticas que se han tomado en diferentes estudios consideran estos dos aspectos por separado. La importancia de combinar estos dos conceptos se puede apreciar por ejemplo en los problemas de distribución que enfrentan las empresas en grandes urbes mexicanas como el Distrito Federal, Guadalajara, Monterrey, entre otras, donde el número de vehículos circulando ha aumentado de manera exponencial en los últimos años, o bien, simplemente llevar o regresar productos desde el norte hasta el sur de la república mexicana y pensar en que lleguen a tiempo y en forma, resulta una operación bastante complicada. Más aún, si pensamos en los productos que regresan para ser re-manufacturados de los clientes a los productores donde los flujos reversos no necesariamente son iguales en número y dirección de los flujos directos, entonces la situación se complica.

Por esta razón, proponemos un modelo donde se analicen conjuntamente las diferentes formas de transporte de regreso (Olivares E., González JL. y Ríos R, 2010.) (Naviero, autotransporte carretero, ferroviario, aéreo y ductos), así como la gestión logística de apertura de centros potenciales de distribución, centros de devoluciones, centros de desensamble y centros de eliminación en el caso de la industria re-manufacturera.

1.3 Justificación.

En la cadena de suministro, la planificación y organización de flujos directos presenta una gran complejidad debido a factores tales como, la previsión de ventas, tiempos de proceso, técnicas de gestión de inventarios, tiempos de entrega, etc. (Fernández y García, 2007), y al incluir flujos reversos (reciclado, canibalización, re-

fabricación, reacondicionamiento, reparación) aumenta notablemente esta complejidad, existiendo entonces muy pocos modelos que consideren la integración del flujo directo e inverso al mismo tiempo (Fleischmann M., *et al.*, 1997). Sin embargo, también influyen otros factores tales como; la imprevisibilidad de las cantidades de retorno, la variedad, condición o estado de los artículos retornados, los momentos de tiempo en los que estos artículos se recuperarán, etc., La presencia de esta complejidad de planificación y organización en LI, ha motivado a diferentes autores a proponer soluciones para los diferentes casos de LI.

Rommert Dekker (2010), líder de REVLOG en una mesa redonda de Logística inversa en Europa y América, menciona que *“es necesario que los socios y fabricantes que participen dentro de un proyecto se vean involucrados en la organización para descubrir formas de reducir costos a la hora por ejemplo de devolver productos”*. Y agregó que, *“En estudios que hemos realizado, hemos observado que las compañías que hacen su logística de forma externa tendrán costos más bajos que los que la realizan de manera interna”*.

Guillermo Utrilla, gerente de Price Waterhouse Coopers (PWC), dice: *“se empieza por definir qué es lo que se está poniendo en riesgo en términos de negocio si no manejamos la logística inversa; varía en función de la industria y según el requerimiento de la empresa, de acuerdo con su forma de operar”*. Y agrega: *“Podemos tener simplemente devoluciones de una empresa de productos de consumo, puede tener devoluciones de sus clientes porque a lo mejor el producto venía en malas condiciones o simplemente deciden que no es el producto que van a vender en ese primer tiempo y cambian la decisión de la compra, entonces devuelven el producto”* (Ortiz, 2009).

La cita de estos especialistas en LI nos permita afirmar la importancia de modelarla matemáticamente para encontrar soluciones que permitan la puesta en práctica de la logística inversa especialmente en devoluciones del producto con la finalidad de buscar no sólo los ahorros en costo de inventario, en costo del transporte, en costo de eliminación debido a los productos vueltos, sino también la mejora de la lealtad del cliente y de las ventas futuras en una firma.

1.4 Objetivos de la investigación.

1.4.1 Objetivo general.

El objetivo general de la investigación consiste en proponer un modelo matemático multi-objetivo de logística inversa en un ámbito de la industria de re-manufactura donde se analice la apertura de centros potenciales de distribución, centros de devolución, centros de eliminación y centros de desensamble, minimización de costo y tiempo total de envío, así como las formas de enviar los productos entre cada par de instalaciones.

1.4.2 Objetivos específicos.

Los objetivos específicos de la investigación son:

- Analizar la problemática de la logística inversa en la re-manufactura.
- Diseñar un modelo de programación lineal-entero mixto que describa la problemática de la red logística inversa de re-manufactura de ocho escalones para minimizar el costo y tiempo total de envíos directos y reversos, considerando la apertura de centros potenciales de distribución, centros de devoluciones, centros de desensamble y centros de eliminación, considerando el envío gradual de diferentes productos por al menos dos canales diferentes de transporte disponibles para cada par de instalaciones entre los escalones.
- Construir diferentes instancias para validar el modelo.
- Realizar la implementación del modelo en el programa de optimización LINGO versión 10.
- Resolver el modelo con una heurística o meta-heurística.

1.5 Preguntas de investigación.

- ¿Los flujos inversos influyen en las decisiones sobre la localización y la asignación de instalaciones en la logística inversa de la industria de re-manufactura?
- ¿Es posible diseñar modelos de programación lineal-entero mixto que involucren la problemática de la red logística inversa de re-manufactura de ocho escalones para minimizar el costo y tiempo total de envíos directos y reversos y el costo fijo de apertura de los centros de desmontaje y procesamiento, considerando la apertura de centros potenciales de distribución, centros de devoluciones, centros de desensamble y centros de eliminación, considerando el envío gradual de diferentes productos por dos canales diferentes de transporte disponibles para cada par de instalaciones entre los escalones?
- ¿Existen ventajas que la industria de re-manufactura puede obtener al utilizar la logística inversa?
- ¿Existen procesos inversos acertados y eficientes de la logística que colaboren a lo largo de la cadena de suministro en reversa?
- ¿Es posible elaborar un modelo de colaboración de la producción para el planeamiento estratégico, dentro de un ambiente de re-manufactura?
- ¿Los métodos de solución propuestos pueden permitir obtener soluciones de calidad óptimos locales u óptimos globales?
- ¿Las herramientas computacionales disponibles nos permiten solucionar el problema de logística inversa?
- ¿Cómo se ajustan el modelo y métodos de solución propuestos al caso de logística inversa?
- ¿Cómo evaluar la calidad de una solución propuesta (óptima)?

1.6 Alcances y limitaciones.

1.6.1 Alcances.

- Se tendrá un modelo matemático multi- objetivo determinístico que describa la red logística inversa de la industria de re-manufactura con ocho escalones, cuatro tipos de instalaciones diferentes y dos canales de transporte de flujo directo y de regreso entre cada par de instalaciones.
- Se resolverá el modelo con el software LINGO, versión 10.
- Se buscará algún Algoritmo Evolutivo para resolver el problema, o bien, se propondrá alguna heurística como medio de resolución del modelo obtenido para logística inversa de la industria re-manufacturera.
- Se construirán diferentes escenarios de prueba.

1.6.2 Limitaciones.

- Contar con software y computadora adecuado para resolver el modelo.
- Contar con instancias adecuadas para la prueba del modelo.
- La puesta en práctica del modelo.
- Analizar las ventajas que la industria de re-manufactura puede obtener al utilizar la logística inversa.
- Buscar los procesos acertados y eficientes de la logística que colaboren a lo largo de la cadena de suministro en reversa.
- Proponer un modelo de colaboración de la producción para el planeamiento estratégico, dentro de un ambiente de re-manufactura.

La estructura de la tesis es la siguiente: en el capítulo 2, se encuentra el marco teórico, en los capítulos 3 y 4 se encuentran artículos de este trabajo de investigación presentados en congresos, internacional y nacional respectivamente como avances de la investigación. En el capítulo 5 se encuentra el artículo que será enviado a una revista arbitrada. En el capítulo 6, se describe el trabajo futuro y las conclusiones finales y por último se encuentran las referencias.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

La logística inversa es un área de investigación que ha traído la atención de la comunidad académica en años recientes y está reflejada en los principales artículos de investigación y en investigación de operaciones (Rubio, Chamorro y Miranda, 2006).

El concepto de logística inversa se ha ido modificando a través de los años hasta lograr su consolidación (Brito y Dekker, 2004, Fernández, 2005). Entre las muchas definiciones que han sido sugeridas para este concepto (Stock 1992, Rogers y Tibben-Lembke 1999, Dowlatshahi 2000, entre otros), se encuentra la propuesta por el European Working Group on Reverse Logistics (REVLOG): “*Logística Inversa es el proceso de planear, implementar y controlar los flujos hacia atrás de materias primas, en proceso de inventarios, productos de embalaje y acabados, desde un punto de fabricación, distribución o uso, a un punto de recuperación o punto de adecuada disposición*” (Brito y Dekker, 2004, p.5). El concepto de logística inversa no debe confundirse con los conceptos de “ecología industrial, cadenas de suministro verdes, gestión de residuos, etc.”

Muchos autores (Tibben-Lembke y Rogers, 2002) han discutido que la planeación de logística inversa es más difícil que la planeación directa, debido a la gran incertidumbre involucrada en la logística inversa. Una de las grandes diferencias entre logística directa e inversa es el número de puntos orígenes y destinos. Mientras que en el flujo directo, el movimiento de productos va de un origen a muchos destinos, en el flujo inverso el movimiento de productos va de muchos orígenes a un destino.

Rubio, Chamorro y Miranda (2006) presentan un análisis de publicaciones serias sobre logística inversa (*European Journal of Operational Research* tiene 24 artículos, *Harvard Business Review* cuenta con 2 artículos, *IEEE Transactions on Engineering Management* 1 artículo, *IIE Transactions*, con 5 artículos, *Industrial Marketing Management* 2 artículos, *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management* con 10 artículos. *International Journal of Production Economics* con 29 artículos, *International Journal of Production Research* con 25 artículos, *International Journal of Technology Management* y *Journal of the Operational Research*, con 1 artículo de 1995 al 2005. Mencionan que antes de estas fechas existen algunos artículos y monografías (Guiltinan y Nwokoye 1975, Fuller 1978, Gintor y Starling 1978, Stock 1992, Kopicki et al. 1993).

Para determinar los principales tópicos de investigación en el campo de logística inversa, siguen la clasificación de Dekker et al. (2004) quienes identifican tres áreas fundamentales de investigación en la logística inversa:

- Gestión de la recuperación y distribución de productos al final de su vida útil (EOL, por sus siglas en inglés).

- Planificación de la producción y gestión de inventario.
- Problemas en la dirección de la cadena de suministro de la logística inversa.

Clasifican los artículos de acuerdo al tema de investigación, examinan el título, resumen, palabras claves y el cuerpo principal del documento. Clasifican a la logística inversa como un área de investigación en el campo de la producción y dirección de operaciones. En el periodo en el que analizan los artículos se ve un gran interés por el tema y esto se refleja en el aumento de artículos de investigación sobre logística inversa (ver figura 2.1). Algunas publicaciones que ellos mencionan son: en 1999 *Computers & Industrial Engineering* dedica su edición al análisis de los procesos de fabricación que respeten el medio ambiente (una fabricación ambiental consiente), en el año 2000 *Interfaces* publica una monografía con el título “*Sustainable Business*”, en el 2001 *OR Spectrum* y *Production and Operations Management* publica “*Operational Research and Environmental Management*” y “*Environmental Management and Operations*”; más tarde en el 2003 *Interfaces* publica otra edición especial donde lanza problemas de la Cadena de Suministro cerrada. Finalmente, en el 2004, *California Management Review* edita “*Closed-loop Supply Chains Management*”.

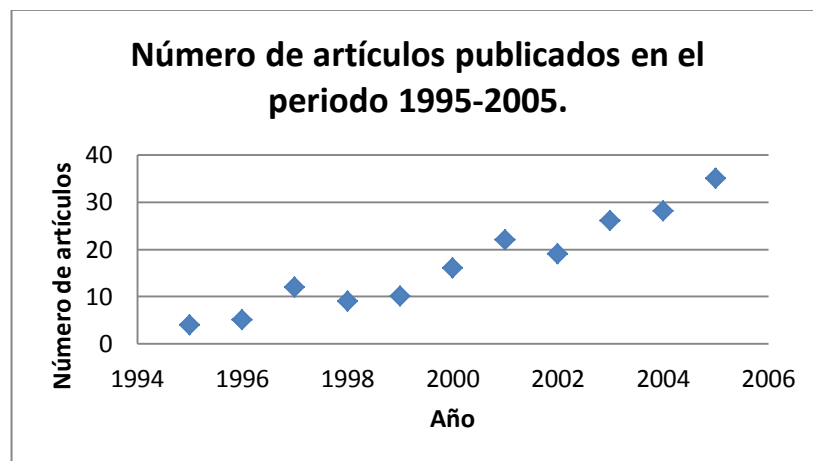


Figura 2.1. Número de artículos de logística inversa publicados de 1995 a 2005 .Fuente: elaboración propia basada en datos de Rubio, Chamorro y Miranda, 2006.

En el 2006 aparecen más publicaciones de logística inversa (*Omega* en “*Reverse production systems*”, *International Journal of Production Economics* en “*Sustainable supply chain management*”, *OR Spectrum* en “*Product recovery*” y *Production and Operations Management*. Los trabajos mencionados presentan desde modelos matemáticos, casos de estudio, revisión de literatura hasta desarrollos teóricos. Analizando los artículos del tópico de investigación, observaron que el 56.45% pueden ser incluidos en el tópico “*planificación de la producción y gestión de inventario*”, el 31.18% analiza cuestiones de carácter estratégico y se pueden enmarcar en el tema “*dirección de la cadena en logística inversa*”, mientras que el 12.37% de los artículos analizados se pueden ubicar en el tópico “*dirección de*”.

recogida y distribución de productos al final de su vida útil”. Sin embargo, observaron que el tema “*problemas de gestión de la cadena de suministro de logística inversa*” atrajo la atención de los investigadores en los últimos años. De hecho, la mayoría de los trabajos publicados en 2004 y 2005 están dentro de este tema de investigación. Encontraron que solo en años recientes se observa una gran tendencia a utilizar modelos matemáticos en el tema “*dirección de la cadena en logística inversa*. Sin embargo “*la gestión de la recuperación y distribución de productos al final de su vida útil*” está en una posición intermedia entre las metodologías cuantitativas y cualitativas.

Resulta interesante observar la tabla 2.1 que Rubio, Chamorro y Miranda (2006) encontraron en su trabajo de investigación, con la finalidad de enunciar las técnicas de solución empleadas por diferentes autores para resolver los tópicos de logística inversa. Resultando que las técnicas de programación matemática son las más utilizadas en los problemas que surgen en la gestión de la recuperación y distribución de productos al final de su vida útil. Hay que tener en cuenta que este tema incluye problemas de asignación y localización (tradicionalmente formulados y resueltos mediante programación lineal). Las obras que tratan problemas de la gestión de la cadena de suministro de logística inversa, emplean análisis descriptivo y el estudio de caso. Por último, observaron que la simulación, junto con programación matemática, optimización y teoría de colas, son las técnicas más comunes dentro de la planificación de la producción y gestión de inventarios.

Técnicas de Análisis								
Tópicos de investigación	Análisis de caso %	Teoría de control %	Análisis descriptivo %	Programación matemática %	Optimización %	Teoría de colas y procesos de Markov %	Simulación %	Otro %
Dirección de la recuperación y distribución de productos al final de su vida útil.	30.43	0.00	8.70	43.48	4.35	0.00	4.35	8.70
Planeación de la producción y dirección de inventarios	4.76	9.52	1.90	16.19	16.19	16.19	20.95	14.29
Dirección de la cadena de suministro de logística inversa	27.59	0.00 5	29.31	12.07	3.45	1.72	6.90	18.97

Tabla 2.1 Porcentaje de Técnicas empleadas en la solución de problemas de logística inversa. Fuente: Rubio, Chamorro y Miranda, 2006.

Con lo que respecta al origen de las publicaciones analizadas, Rubio, Chamorro y Miranda (2006) la ubican en tres países: USA (31.72%), Netherlands (16.67 %) y

Germany (11.29 %). Además, el 22.58 % de los trabajos tienen autores de diferentes orígenes, aunque el 64.29 % de estos casos su autor principal pertenece alguno de los tres países mencionados. Entonces se puede decir que las investigaciones en logística inversa están concentradas en estos tres países, o al menos se observa claramente la influencia de ellos en este tópico de investigación.

Fleischmann, M., *et al.*, (1997) proponen modelos separados para los flujo directo e inverso. El flujo directo va desde el productor hasta el usuario pasando por centros de distribución. El flujo inverso va del usuario hasta los productores pasando por centros recolectores y de reciclaje (figura 2.2).

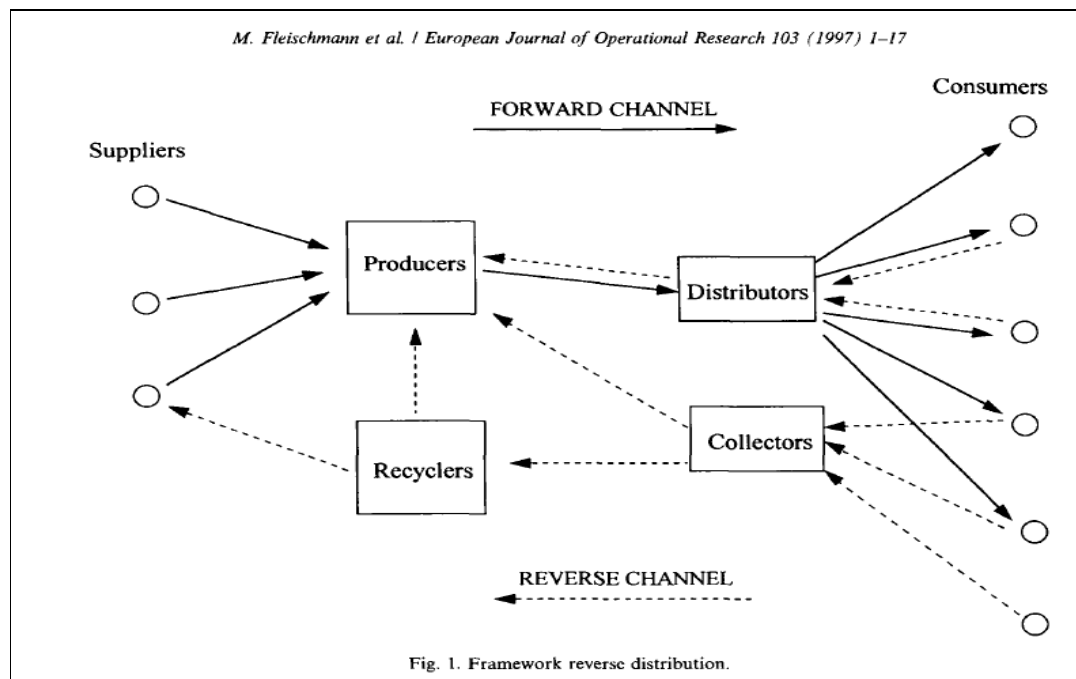


Figura 2.2 Propuesta de Fleischmann M., *et al.*, (1997). Para flujo de distribución directo e inverso.

Fleischmann M., *et al.* (1997), mencionan varios autores en relación al modelaje del flujo inverso:

- Mirchandani y Francis (1989) han propuesto modificaciones a los modelos tradicionales de ubicación de instalaciones para el diseño de red de distribución inversa.
- Ginter y Starling (1978) establecen una red con muchas fuentes o fábricas para satisfacer la demanda de solo algunos puntos, “*muchos a pocos*”. Pero tradicionalmente los modelos de localización suelen considerar una estructura de red divergente donde muchas fuentes satisfacen muchas demandas.

- Batta Chiu, (1988) y Erkut (1996) han estudiado la eliminación de residuos peligrosos.
- Caruso *et al.* (1993), describe un sistema de gestión de residuos sólidos, incluida la recogida, transportación, incineración, compostaje, reciclaje y eliminación. Un modelo de localización multi-objetivo y algunas heurísticas son usadas para planear el sistema de gestión de residuos.
- Barros *et al.* (1996) presentan una red de reciclaje de residuos de arena para la construcción. Donde se debe localizar dos tipos de instalaciones intermedias. Almacenes regionales reciben de las compañías la arena de materiales de piedra, prueban su nivel de contaminación, y almacenan la arena limpia. Instalaciones de tratamientos especializados reciben la arena contaminada para la limpieza y posterior almacenamiento. Ambos tipos de instalaciones proveen arena a proyectos de gran escala para la construcción de carreteras. Es modelado como un problema de localización multi-nivel de almacenamiento. Utilizan análisis de escenarios para atender la incertidumbre en la localización de puntos de demanda y en los flujos de retorno.
- Spengler *et al.* (1997) desarrollan un modelo de programación mixto entero para el reciclaje de productos industriales de la industria alemana del acero. Las compañías acereras necesitan decidir que procesos o cadenas de procesos de reciclaje son más favorables desde un punto de vista económico. Por otra parte se debe decidir la capacidad de las plantas de reciclaje así como su ubicación. El modelo se basa en un problema de localización multi-objetivo de capacidad de almacenamiento modificado por la estructura especial del problema.
- Otra particularidad de las redes de distribución inversa es su alto grado de incertidumbre de tipos de productos devueltos por los consumidores. Por ejemplo, productos de alta calidad pueden justificar mayores costos de transporte (y por lo tanto una estructura de red más centralizada), mientras que el transporte de productos de bajo valor resulta anti-económico.

Fleischmann M., *et al.* (1997), mencionan la poca contribución de modelos relacionados con la integración de los flujos de distribución directos e inversos, utilizando las mismas instalaciones tanto para el flujo directo como para el inverso. Sin embargo en la práctica existe la necesidad de integrar ambos flujos (por ejemplo, en industrias refresqueras donde las botellas deben reutilizarse). En la parte de diseño de red se adiciona un costo a los costos de transporte que representan la recolección y manejo de retorno de los productos. Las rutas se planifican de tal manera que las botellas vacías deberían ser recogidas junto con las entregas (Salomon *et al.*, 1996). Del Castillo y Cochran (1996), citados por Fleischmann M., *et al.* (1997), estudian la planificación y distribución de productos entregados en envases reutilizables. Su modelo incluye el regreso de contenedores vacíos a las plantas. Su modelo se aplica al estudio de caso de una empresa de refrescos con botellas retornables.

Una segunda área clave de la logística inversa es la gestión de inventario, que tiene como objetivo controlar pedidos de componentes y la recuperación de componentes devueltos para garantizar el nivel de servicio requerido y minimizar

los costos fijos y variables. Los productos devueltos pueden ser usados como nueva materia prima, tal es el caso de la industria automotriz o la electrónica (Thierry, 1997; Ferrer, 1997, citados por Fleischmann M., *et al.*, 1997).

Kwok y Yiming en el 2009 presentan un análisis sistemático de los factores internos y externos que afectan la implementación de logística inversa en países en desarrollo como China en el caso de estudio de la industria electrónica, donde intervienen cuatro fabricantes y un gran número de consumo de productos electrónicos. Determina los factores comunes externos e internos para la implementación de logística inversa, así como los obstáculos enfrentados por la industria electrónica. Identifican las diferencias entre las teorías y los modelos actuales y las prácticas reales en China, proponen medidas para acelerar la implantación de LI en mencionado país y presentan un claro entendimiento de lo que podría facilitar la formulación en todo el país de la política de logística inversa y la estrategia a través del apoyo del gobierno y la inversión de los fabricantes.

Hokey Min y Hyun-Jeung Ko, (2007). Proponen un modelo de programación lineal entera mixta (MILP, por sus siglas en inglés) para el diseño de red de logística inversa, con las siguientes suposiciones: los almacenes son privados, algunos almacenes pueden funcionar como instalaciones de reparación parcial y ser puntos de recolección inicial de los productos devueltos. La capacidad de los almacenes puede aumentar. Analizan un problema mono-objetivo para minimizar costos de transporte, almacenamiento y de expansión. Utilizan algoritmo genético para resolverlo.

Zhou Yongsheng y Wang Shouyang, (2008). Proponen un modelo genérico para la recuperación de productos, considerando solo reparación y re-manufactura simultáneamente. El modelo está basado en un caso de estudio (Copy Magic) propuesto por Thierry ^[1], *et al.*, (1995). En el modelaje suponen cuatro tipos de participantes: clientes, centros de distribución, centros de recolección central (CRC, por sus siglas en inglés) y fábricas, ver figura 2.3. Los clientes finales devuelven sus productos usados a los CRC en donde son inspeccionados y clasificados en dos grupos: reparación y re-fabricación. El primer grupo comprende productos que han sido utilizados durante un tiempo muy corto. Estos productos son reparados en los CRC y enviados de regreso a los centros de distribución. El segundo grupo se compone de productos que necesitarán operaciones de re-manufactura. Estos productos son enviados desde los CRC hasta las fábricas para formar parte de un nuevo producto. El resto de los productos inspeccionados pueden ser eliminados. Este es un problema de red de logística inversa de tres escalones, con tres diferentes tipos de instalaciones para decidir su apertura: fábricas, centros de distribución y CRCs. Lo modelan como un MILP de localización de instalaciones. Resuelven el problema usando un solver estándar MILP de Lingo 8.0 en una máquina Celeron ® 1.60 GHz, corriendo en Windows XP Professional.

[1] Thierry M. Salomon M., Van Nunen J, *et al.* Strategic issues in product recovery management. California Management Review, 1995, 37(2): 114-135

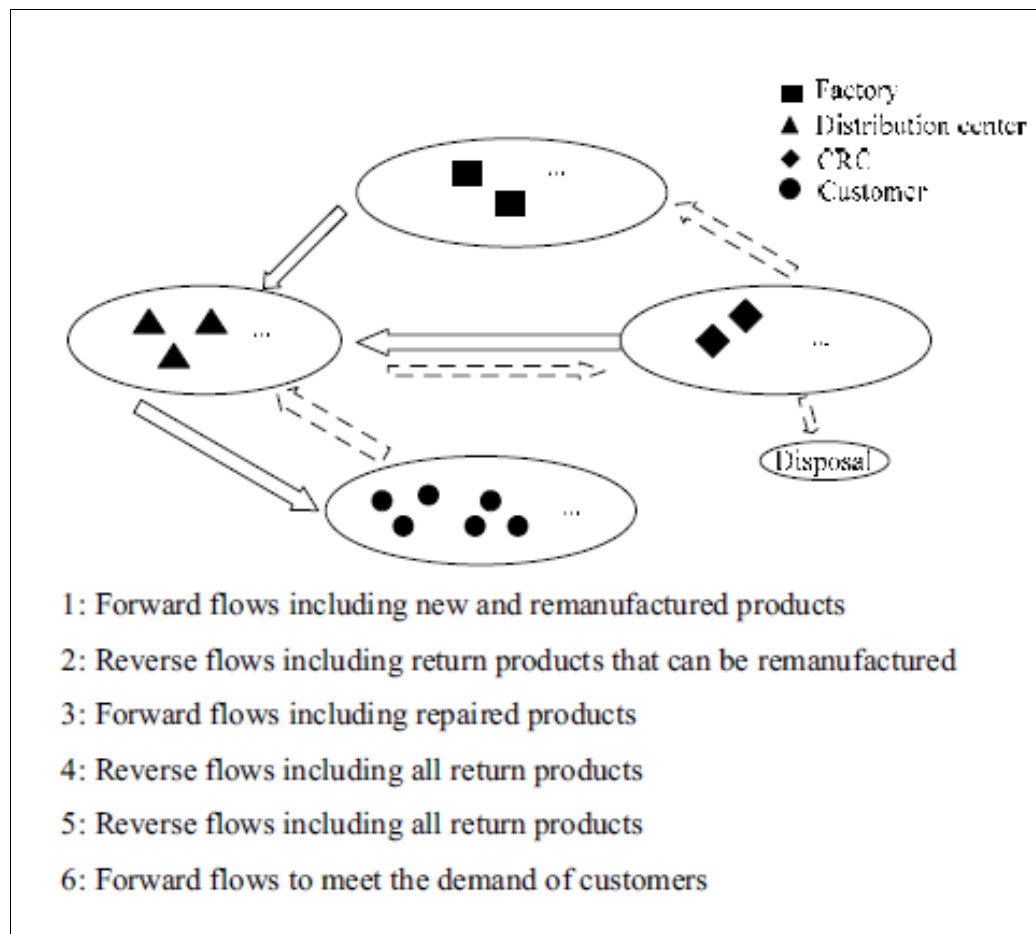


Figura 2.3 Red de recuperación de productos propuesta por Zhou Yongsheng & Wang Shouyang, 2008.

Para un sistema de re-manufactura Zhiqiang Lua & Nathalie Bostelb, (2007), suponen cuatro tipos de participantes: clientes, centros intermediarios, centros de re-manufactura y productores (ver figura 2.4). Los clientes devuelven productos. Los centros intermedios solo son utilizados en el canal inverso y son responsables de actividades esenciales, tales como limpieza, desensamble, recuento y clasificación, antes de que los productos sean enviados de vuelta a los centros de re-manufactura. Los centros de re-manufactura aceptan las devoluciones de los centros intermedios y son responsables del proceso de re-manufactura, también pueden enviarse los productos a eliminación, si es el caso. En un problema de localización, con estructura del canal inverso de dos niveles y el número y localización de posibles instalaciones para ser decididas es de tres tipos diferentes: productores, centros de re-manufactura y centros intermediarios. Proponen un algoritmo basado en relajación Lagrangiana.

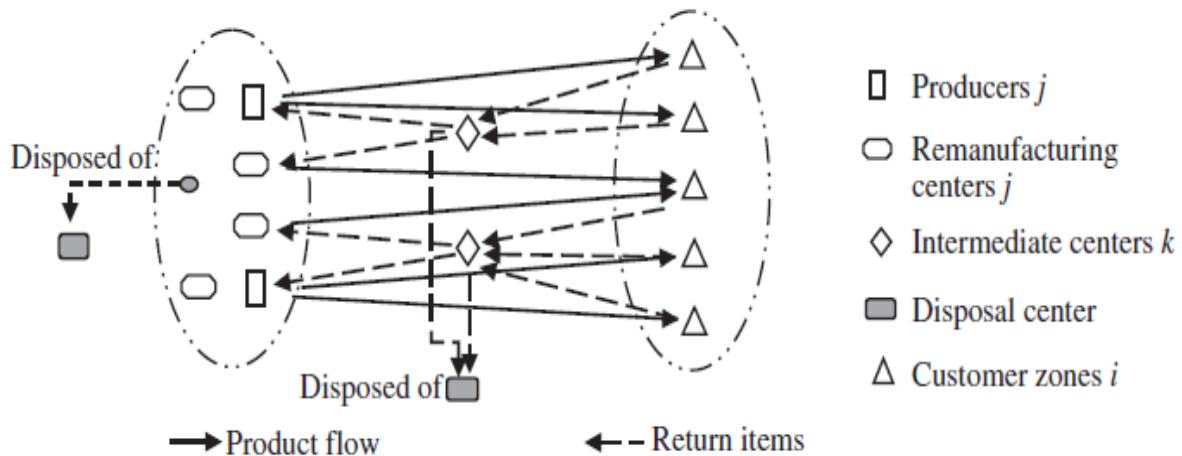


Figura 2.4 Problema de localización de un sistema de re-manufactura propuesta por Zhiqiang Lua & Nathalie Bostelb, 2007.

Jeong-Eun Lee, Mitsuo Gen & Kyong-Gu Rhee (2009), proponen un problema de red de logística inversa multi-etapas (m-rLNP, por sus siglas en inglés), ver figura 2.5, en el cual consideran la minimización del costo total de envío y los costos fijos de apertura de los centros de desmontaje y los centros de procesamiento en el canal inverso. En el proceso de re-manufactura, las partes que son desmontadas de los productos de recuperación son enviadas a los centros de procesamiento. Estas partes pueden ser convertirse en nuevos productos. Consideran dos situaciones. La primera situación es que los productos se envían directamente desde el centro de devolución al centro de procesamiento, según el tipo de producto. Y la segunda situación es que las piezas de los productos se envían desde los centros de desensamble a reciclaje, según el tipo de pieza. Lo modelan como un problema de programación lineal multi-etapa, donde minimizan el número de centros de desensamble y centros de procesamiento para ser abiertos, así como el costo total de envío, sujeto a las capacidades de los centros de desensamble y centros de procesamiento y la satisfacción de la demanda. Proponen un nuevo algoritmo genético con operador de cruce llamado cruce de peso de asignación. Utilizan un algoritmo genético híbrido para resolver el problema.

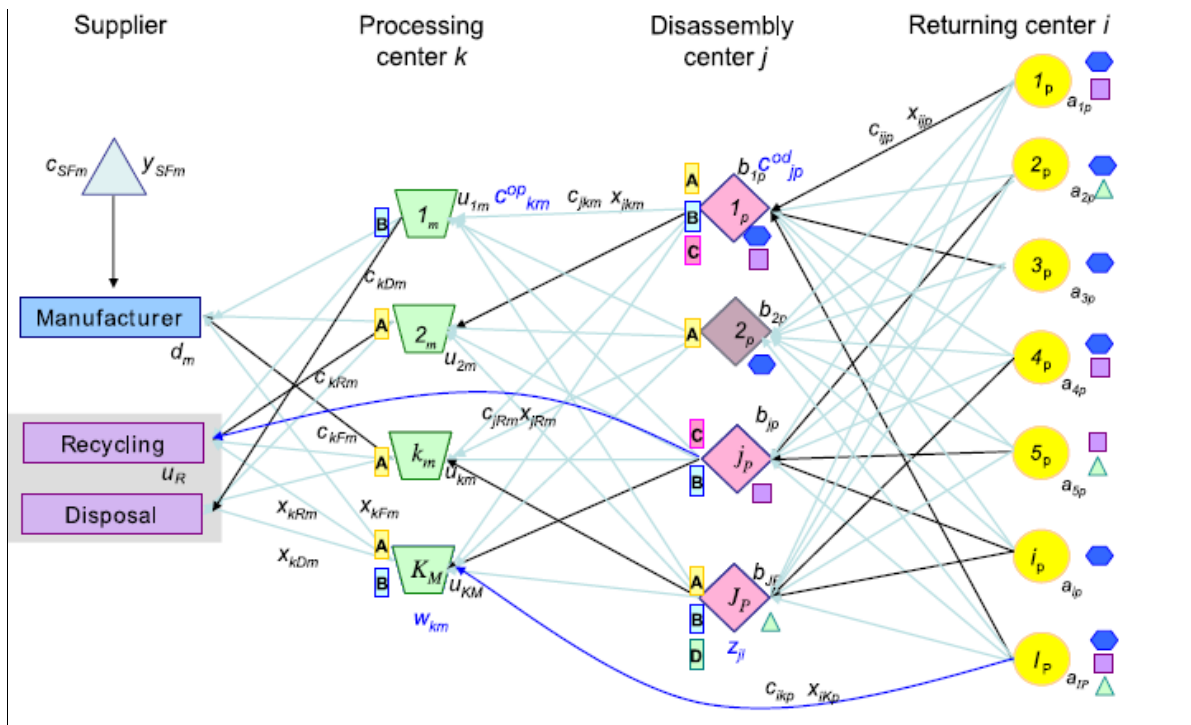


Figura 2.5 Modelo de red logística inversa multi-etapa, propuesta por Jeong-Eun Lee, Mitsuo Gen & Kyong-Gu Rhee, 2009.

CAPÍTULO 3

MODELO DE OPTIMIZACIÓN BI-OBJETIVO PARA EL DISEÑO DE UNA RED LOGÍSTICA EN EL MEDIO AMBIENTE DE RE-MANUFACTURA

El presente artículo se publicó en las memorias de la The 15th Annual International Conference on Industrial Engineering Theory, Applications & Practice. October 17-20, 2010. Mexico City, México, con ISBN#97809652558-6-8. Como un avance de mi investigación doctoral.

Bi-objective Optimization Model for a Reverse Logistics Network Design in a Re-manufacturing Environment.

Araceli López y López¹, José Luis Martínez Flores², Elías Olivares-Benitez²

¹Universidad Autónoma de Tlaxcala
Av. Universidad No.1.La Loma Xicoténcatl.
Tlaxcala, Tlax., CP. 90062 México.
alopez040164@yahoo.com

²Universidad Popular Autónoma del Estado de Puebla,
21 Sur 1103, Colonia Santiago, CP 72410
Puebla, Puebla, México
jose Luis.martinez01@upaep.mx
elias.olivares@upaep.mx

Abstract: This paper proposes a mathematical model for a reverse logistics network design with three echelons in a remanufacturing environment. The model takes into account decision making about the transportation channel between echelons pair of facilities. The problem was modeled like one of bi-objective optimization, where is reduced to the minimum the cost and time, as well as the decision of opening disassembly centers and processing centers with multi-product back. We use the ε -constraint method for display numerical results of an instance.

Keywords: reverse logistics, network design, facility location, bi-objective optimization.

3.1. Introduction

The international concern of some firms to take care of the environment has increased and it is reflected in the great interest to collect damaged products (Akshay & Shaligram, 2009) to reduce pollution and to recover resources. A good

return policy is a factor valued by the customer (Yongsheng & Shouyang, 2008), and therefore, an element that generates value. An important area for the firms, in the globalized world, is the integration of the concepts “time and cost” (Cruz & Ertel, 2009). The logistic decisions that have been taken in different studies consider these two aspects separately (Hokey & Hyun, 2008; Zhiqiang & Bostel, 2007). In this article, a reverse logistics network design (Jeong, Mitsuo & Kyong, 2009) with three echelons in a remanufacturing environment is analyzed considering the opening of disassembly and processing centers, as well as the option of reverse transportation between each pair of facilities. The decision to use certain transportation channels has impact in the delivery time of the product, which frequently is an indicator of attention to the customer. These channels of transportation can be considered like transportation modes (truck, bus, train, airplane, ship, etc.) or delivery services (urgent, normal, overnight, etc.). The problem is modeled as a bi-objective optimization problem, and we used the ϵ -constraint method in an instance to show results.

3.2 Problem description and mathematical model.

The remanufacturing process that we consider takes into account that the products returned by the customers are sent from the return centers to the disassembly centers and, as soon as possible, are sent to the processing centers. Also they can be sent directly from return centers to processing centers, according to their physical condition. Additionally, we consider that they can be transported by two different channels between each pair of centers of different type.

Parameters:

I : set of return centers; $i = 1, 2, \dots, I$.

J : set of disassembly centers; $j = 1, 2, \dots, J$.

K : set of processing centers; $k = 1, 2, \dots, K$.

P : set of products; $p = 1, 2, \dots, P$.

L : set of transportation channels; $l = 1, 2, \dots, L$.

a_{ip} : amount of product p that the customers deliver in the return center i .

b_{jp} : capacity to receive and process product p at the disassembly center j .

u_{kp} : capacity of the processing centers k .

C_{ijpl} : unit cost of shipment from return center i to disassembly center j for product p by transportation channel l .

C_{ikpl} = unit cost of shipment from return center i to processing center k for product p by transportation channel l .

$C_{jkm l}$ = unit cost of shipment from disassembly center j to processing center k for product p by transportation channel l .

C_{jp}^{adesen} = the fixed opening cost for disassembly center j for the product p .

C_{kp}^{ap} = the fixed opening cost for processing center k for the product p .

TD_{ijpl} = time for transporting any quantity of product p from return center i to disassembly center j by transportation channel l .

TP_{jkpl} = time for transporting any quantity of product p from disassembly center j to processing center k by transportation channel l .

TDP_{ikpl} = time for transporting any quantity of product p from returns center i to processing center k by transportation channel l .

Decision Variables:

$Xdevo_{ijpl}$ = amount shipped of the product p from return center i to disassembly center j by transportation channel l .

$Xdesen_{jkpl}$ = amount shipped of the product p from disassembly center j to processing center k by transportation channel l .

$Xdevopro_{ikpl}$ = amount shipped of the product p from return center i to processing center k by transportation channel l .

$Ydesen_j$ = binary variable equal to 1 if disassembly center j is open and equal to 0 otherwise.

$Yproces_k$ = binary variable equal to 1 if processing center k is open and equal to 0 otherwise.

$Arcdevo_{ijpl}$ = binary variable equal to 1 if transportation channel l is used to transport product p from returning center i to disassembly center j and equal to 0 otherwise.

$Arcdesen_{jkpl}$ = binary variable equal to 1 if transportation channel l is used to transport product p from disassembly center j to processing center k and equal to 0 otherwise.

$Arcdp_{ikpl}$ = binary variable equal to 1 if transportation channel l is used to transport product p from returning center i to processing center k and equal to 0 otherwise.

Min (f_1, f_2)

$f_1 =$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I C_{ijpl} X_{devo_{ijpl}} + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I C_{ikpl} X_{devopro_{ikpl}}$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J C_{jkpl} X_{desen_{jkpl}} + \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J C_{jp}^{adesen} Y_{desen_{jp}} +$$

$$\sum_{k=1}^K \sum_{p=1}^P C_{kp}^{ap} Y_{proces_{kp}}$$

Sujeta a:

$$f_2 = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I TD_{ijpl} Arcdevo_{ijpl} + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J TP_{jkpl} Arcdesen_{jkpl} +$$

$$+ \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{i=1}^I TDP_{ikpl} Arcdp_{ikpl} \leq \varepsilon \quad (1)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J X_{devo_{ijpl}} \geq a_{ip} \quad \forall i \in I \quad (2)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J X_{devo_{ijpl}} = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K X_{desen_{jkpl}} \quad \forall i \in I \forall j \in J \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I X_{devo_{ijpl}} = b_{jp} * Y_{desen_j} \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J X_{desen_{jkpl}} + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I X_{devopro_{ikpl}} =$$

$$= u_{kp} * Y_{proces_k} \quad \forall k \in K \quad (5)$$

$$\sum_{l=1}^L Arcdevo_{ijl} \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{l=1}^L Arcdesen_{jkl} \leq 1 \quad \forall j \in J, \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{l=1}^L Arcdp_{ikl} \leq 1 \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (8)$$

$$X_{devo_{ijpl}} - Arcdevo_{ijl} \geq 0 \quad \forall i \in I, \forall k \in K \quad (9)$$

$$X_{desen_{jkpl}} - Arcdesen_{jkl} \geq 0 \quad \forall j \in J, k \in K, p \in P, l \in L \quad (10)$$

$$X_{devopro_{ikpl}} - Arcdp_{ikl} \geq 0 \quad \forall i \in I, k \in K, p \in P, l \in L \quad (11)$$

$$a_{jp} * Arcdevo_{ijl} - X_{devo_{ijpl}} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P, l \in L \quad (12)$$

$$b_{jp} * Arcdesen_{jkl} - X_{desen_{jkpl}} \geq 0 \quad \forall j \in J, k \in K, p \in P, l \in L \quad (13)$$

$$u_{kp} * Arcdp_{ikl} - Xdevopro_{ikpl} \geq 0 \quad \forall i \in I, k \in K, p \in P, l \in L \quad (14)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I Arcdevo_{ijpl} - Ydesen_j \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (15)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J Arcdesen_{jkpl} + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I Arcdp_{ikpl} - Ypoces_k \geq 0 \quad \forall k \in K \quad (16)$$

$$Xdevo_{ijpl}, Xdesen_{jkpl}, Xdevopro_{jkpl}, TD_{ijpl}, TP_{jkpl}, TDP_{ikpl} \geq 0$$

$$\forall i \in I, j \in J, k \in K, p \in P, l \in L \quad (17)$$

$$Arcdevo_{ijl}, Arcdesen_{jkl}, Arcdp_{ikl}, Ydesen_j, Yproces_k \in \{0,1\}$$

$$\forall i \in I, j \in J, k \in K, p \in P, l \in L \quad (18)$$

In this model, the objective function (f_1) minimizes the sum of the transportation costs and the opening costs of centers. The objective function (f_2) minimizes the sum of the transportation times in all the system. The equation (2) is formulated to indicate that the return centers should manage a quantity a_{ip} that is returned by the customers. The constraints (3) are used to keep the balance in a facility (disassembly center). The constraints (4) and (5) declare that the flow that leaves the return, disassembly, and processing centers do not exceed their respective capacities, but at the same time is required that the product flows only pass through the open disassembly and processing centers. The constraints (6) - (8) establish that at least an arc must be selected between the nodes $i-j$, $j-k$, and the nodes $i-k$. The constraints (9) - (11) indicate that the arcs will be deactivated if there is no flow through them. The product flow only can become through the active arcs in the constraints (12) - (14). The equations (15) and (16) indicate that the centers can be closed if there is no flow through them. The constraints (17) are of non-negativity. The constraints (18) represent binary variables.

3.3 Computational Experience.

We used the ϵ -constraint method to solve an instance of three echelons with three returns centers, three disassembly centers and two processing centers, see figure 1. The model was programmed in LINGO 10 and solved in a Pentium (R) Dual- core CPU with 4:00 GB in RAM and 2.10GHz.

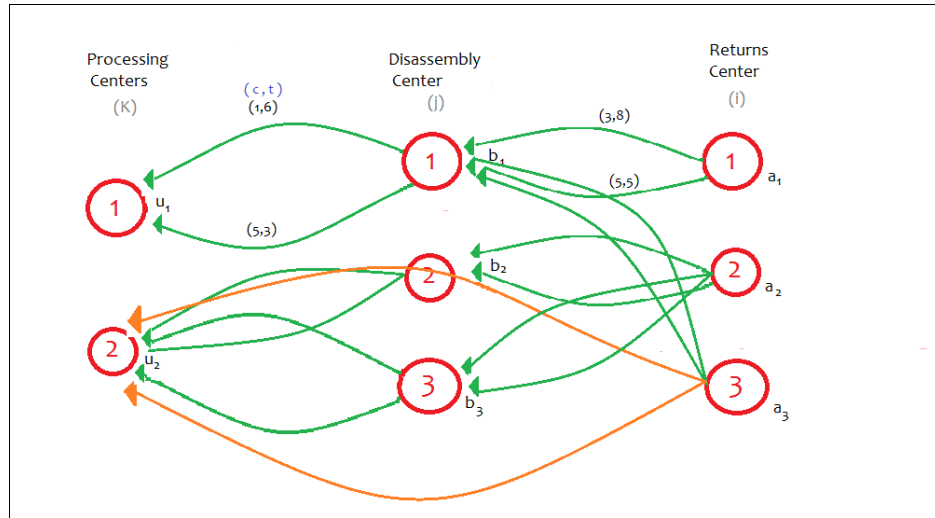


Figure 3.1. An instance with three return centers, three disassembly centers and two processing centers. Data source: own elaboration

The Pareto front for this instance is shown in Figures 3.2, 3.3 and 3.4 for step size of 10, 3, and 1 in the change of the epsilon values for f_2 , respectively.

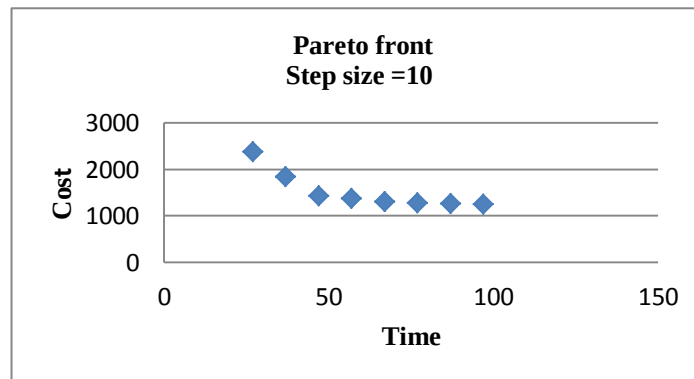


Figure 3.2 Pareto front for step size = 10. Data source: own elaboration

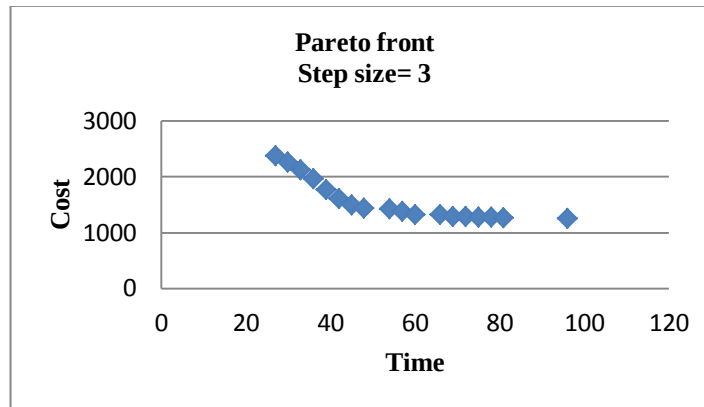


Figure 3.3 Pareto front for step size = 3. Data source: own elaboration

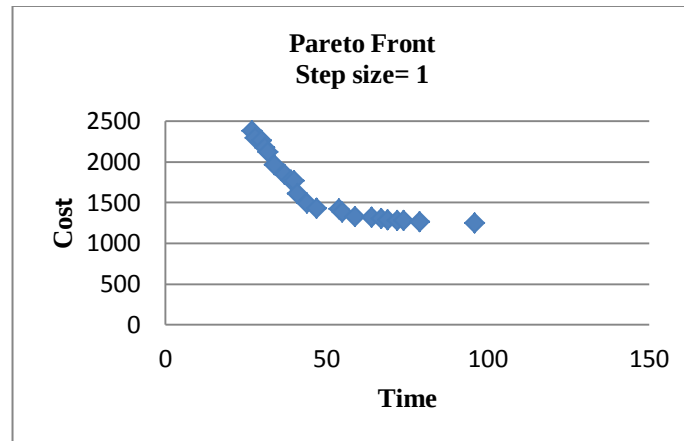


Figure 3.4 Pareto front for step size = 1. Data source: own elaboration

Graphical solutions are shown in Figures 3.5, 3.6 and 3.7 for Pareto front of step size = 1.

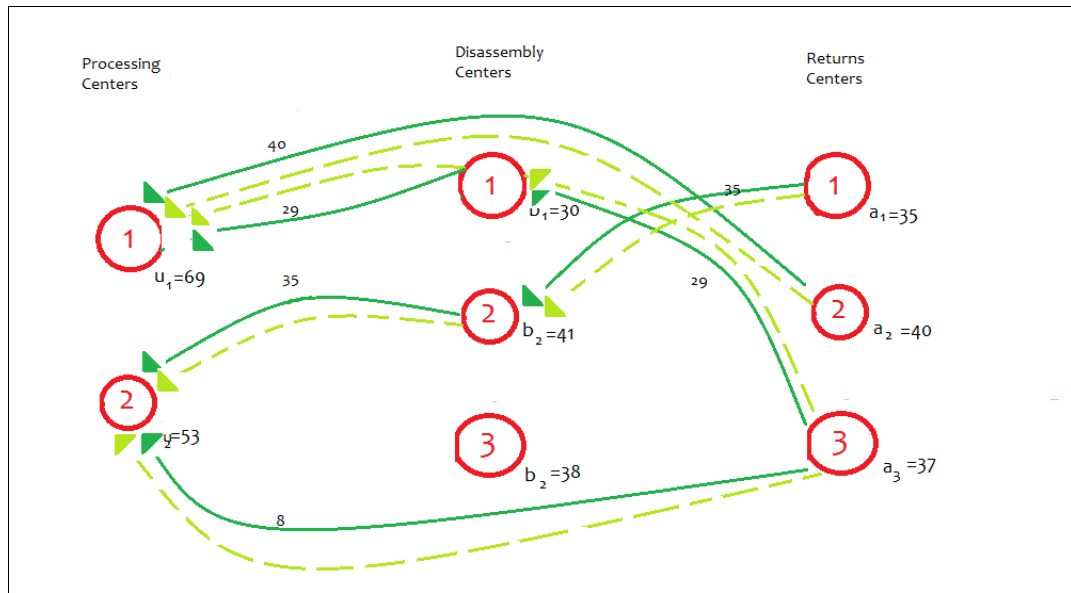


Figure3.5 Solution $f_1= 2375$, $f_2= 27$. Variables, $Y_{desen1}=1$, $Y_{desen2}=1$, $Y_{proces1}=1$, $Y_{proces2}=1$. Data source: own elaboration

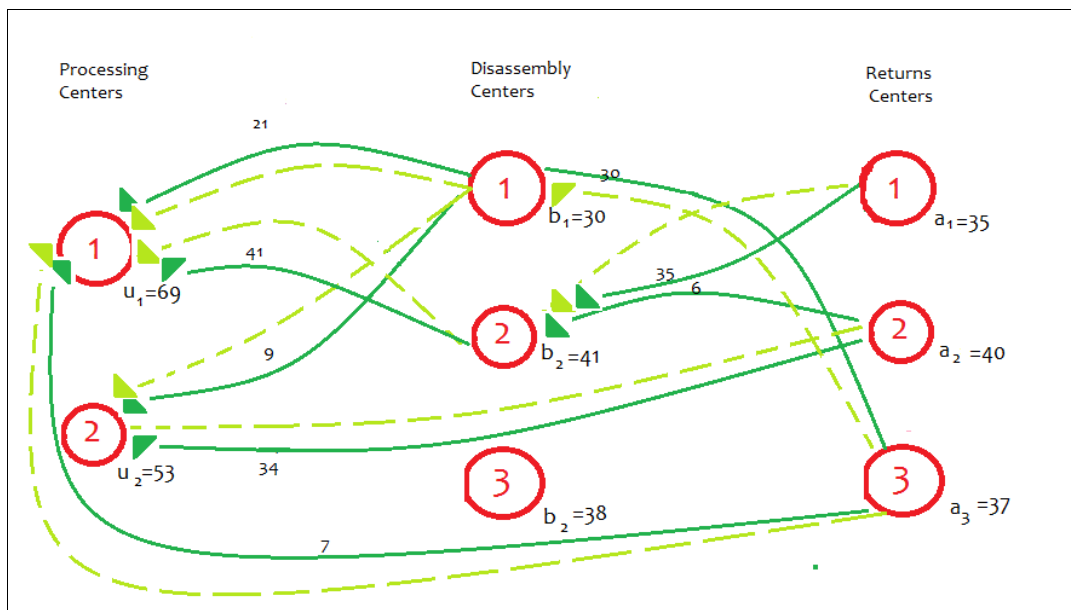


Figure3.6 Solution $f_1= 1606$, $f_2=41$. Variables, $Y_{desen1}=1$, $Y_{desen2}=1$, $Y_{proces1}=1$, $Y_{proces2}=1$. Data source: own elaboration

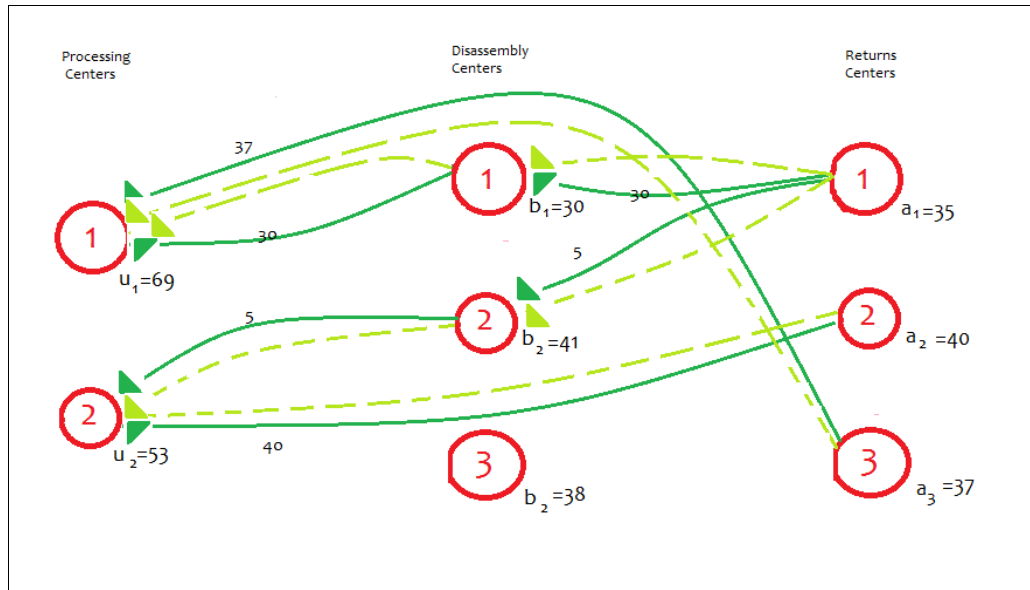


Figure 3.7 Solution $f_1=1245$, $f_2=97$. Variables, $Y_{desen1}=1$, $Y_{desen2}=1$, $Y_{proces1}=1$, $Y_{proces2}=1$. Data source: own elaboration

3.4 Conclusions.

This paper is the result from researching work in process, in which is important to design models, methods and find solutions for problems related to collecting damaged products to reduce pollution and to recover resources. In this paper we proposed a model of this type of problems, then, we chose the ϵ -constraint method to find solutions for an instance. For the solution of this instance, we have considered the flow of a single product p . In further work we must take into account a greater number of facilities as well as of echelons in an attempt to approach to more realistic models.

3.5 References.

- Akshay, M., and Shaligram, P. (2009). Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules. *Computers & Industrial Engineering*, 56: 334–346.
- Cruz, R., and Ertel, J. (2009). Reverse logistics network design for the collection of End-of-Life Vehicles in Mexico. *European Journal of Operational Research*, 196: 930–939.

Hokey, M., and Hyun, J. (2008). The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers. *International Journal of Production Economics*, 113: 176–192.

Jeong, L., Mitsuo, G., and Kyong, R. (2009). Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 56: 951–964.

Yongsheng, Z., and Shouyang, W. (2008). Generic Model of Reverse Logistics Network Design. *Journal of transportation systems engineering and information technology*, 8(3): 71-78.

Zhiqiang, L., and Bostel, N. (2007). A facility location model for logistics systems including reverse flows: the case of remanufacturing activities. *Computers & Operations Research* 34: 299–323.

CAPÍTULO 4

Un Modelo Bi-objetivo para la Cadena de Suministro de un Sistema de Manufactura.

En este capítulo se presenta el artículo que se publicó en las memorias del 4º Coloquio Interdisciplinario de Doctorado, 2011. UPAEP con ISBN: 978-607-8093-11-3. Como avance de mi investigación. En el capítulo 3 se modelaron 3 escalones, en este capítulo se modelan 8 escalones del diseño de red logística inversa en el ambiente de re-manufactura.

Araceli López y López.
Universidad Autónoma de Tlaxcala.
Av. Universidad No. 1. La Loma Xicoténcatl.
Tlaxcala, Tlax.CP.90062Mexico. alopez040164@yahoo.com

4.1 Resumen.

Este artículo presenta el problema matemático de diseño de cadena de suministro directa e inversa de un sistema de manufactura con ocho escalones, considerando la decisión de seleccionar el canal de transporte entre cada par de instalaciones. el problema es modelado como uno de optimización bi-objetivo, donde se minimizan los criterios de costo y tiempo, así como la decisión de apertura de centros potenciales de distribución, centros de devolución, centros de desensamble y centros de Eliminación con el regreso de múltiples productos. Se utilizó el método ε – *Constraint* en una instancia para mostrar resultados.

4.2 Introducción

La preocupación internacional de algunas firmas por preservar el medio ambiente se ha incrementado y esto se refleja en el gran interés de coleccionar productos averiados (Akshay & Shaligram, 2009) para disminuir la contaminación y recuperar recursos. Una buena política de devolución es un factor valorado por el cliente (Yongshengy & Shouyang, 2008) y por lo tanto un elemento que genera valor. Un área de gran importancia para las compañías en el mundo globalizado es la integración de los conceptos “tiempo y costo” (Cruz y Ertel, 2009). Las decisiones logísticas que se han tomado en diferentes estudios consideran estos dos aspectos por separado (Hokey & Hyun, 2008; Zhiqiangy & Bostel, 2007). En este artículo se analiza un problema de diseño de la cadena de suministro directa e inversa (Jeong, Mitsuo & Kyong, 2009) en un sistema de manufactura de ocho escalones, donde se analizan conjuntamente la gestión logística de apertura de centros potenciales de distribución, centros de devolución, centros de desensamble y centros de eliminación, así como la opción de transporte entre cada par de instalaciones. La

decisión de utilizar cierto canal de transporte se ve reflejada en el tiempo de entrega del producto que frecuentemente es un indicador de nivel de atención al cliente. Estos canales de transportación se pueden considerar como modos de transporte (camioneta, autobús, tren, avión, barco o servicio de envío urgente, normal, de noche, etc.). El problema es modelado como uno de optimización bi-objetivo, se utilizó el método $\varepsilon - Constraint$ (Coello C, Lamont G. y Veldhuizen D., 2007) en una instancia para mostrar resultados.

4.3 Un modelo de ubicación de instalaciones para un sistema de manufactura con opción de transporte de regreso.

El proceso de manufactura que se propone considera el flujo directo como el envío de unidades desde las fábricas a los centros potenciales de distribución y de estos últimos a los clientes. El flujo inverso es considerado cuando los clientes tienen devoluciones y estas son enviadas a los centros de devolución, los cuales pueden enviarlas a su vez a los centros de eliminación o a los centros de desensamble o directamente a las fábricas, según el estado físico de las unidades. Y las unidades de desensamble pueden ir a las fábricas o bien ser eliminadas. Se considera además que el flujo de unidades entre cada par de instalaciones debe realizarse por diferentes opciones de transporte. Esta problemática es considerada como un problema de diseño de cadena de suministro directa e inversa de un sistema de manufactura con ocho escalones, con cuatro diferentes tipos de instalaciones y dos canales de transporte.

4.4 Modelo propuesto.

MODELO.

$$\text{Min } (f_1, f_2)$$

$$\begin{aligned} f_1 = & \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I C_{ijpl} * X_{facpd_{ijpl}} + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J C_{jkpl} * X_{cpdk_{jkpl}} + \\ & \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K C_{kqpl} * X_{kdevo_{kqpl}} + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R \sum_{q=1}^Q C_{qrpl} * X_{devoelim_{prpl}} + \\ & \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S \sum_{q=1}^Q C_{qspl} * X_{devodesen_{qspl}} + \\ & + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{q=1}^Q C_{qippl} * X_{devofa_{qippl}} + \\ & \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S C_{srpl} * X_{desenelim_{srpl}} + \\ & \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S C_{sipl} * X_{desenfa_{sipl}} + \\ & \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J C_{apercpd_{jp}} * Y_{cpd_{jp}} + \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q C_{aperdevo_{qp}} * Y_{devo_{qp}} + \\ & \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R C_{aperelim_{rp}} * Y_{elim_{rp}} + \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S C_{aperdesen_{sp}} * Y_{desen_{sp}} \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned}
f_2 = & \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I Tfcpd_{ijpl} * Arcfacpd_{ijpl} + \\
& + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J Tcpgk_{jkpl} * Arccpgk_{jkpl} \\
& + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K Tkdevo_{kqpl} * Arkdevo_{kqpl} + \\
& \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R \sum_{q=1}^Q Tdevoelim_{qrpl} * Arcdevoelim_{qrpl} + \\
& \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S \sum_{q=1}^Q Tdevodesen_{qspl} * Arcdevodesen_{qspl} + \\
& \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{q=1}^Q Tdevofa_{qi pl} * Arcdevofa_{qi pl} + \\
& \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S Tdesenfa_{s i pl} * Arcdesenfa_{s i pl} + \\
& + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S Tdesenelim_{srpl} * Arcdesenelim_{srpl} \leq \varepsilon
\end{aligned} \tag{2}$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J Xfacpd_{ijpl} \leq a_{ip} \quad \forall i \in I \tag{3}$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I Xfacpd_{ijpl} \leq b_{jp} * Ycpd_j \quad \forall j \in J \tag{4}$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I Xfacpd_{ijpl} = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K Xcpdk_{jkpl} \quad \forall j \in J \tag{5}$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K Xcpdk_{jkpl} \leq b_{jp} \quad \forall j \in J \tag{6}$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J Xcpdk_{jkpl} = demanda_{kp} \quad \forall k \in K \tag{7}$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q Xkdevo_{kqpl} = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \alpha_k Xcpdk_{jkpl} \quad \forall k \in K, \quad \alpha_k \in [0,1] \tag{8}$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K Xkdevo_{kqpl} \leq devo_{qp} * Ydevo_{qp} \quad \forall q \in Q \quad \forall p = 1, 2, \dots, P \tag{9}$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \beta_m * Xkdevo_{kqpl} = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R Xdevoelim_{qrpl} \quad \forall q \in Q \tag{10}$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \gamma_m * Xkdevo_{kqpl} = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S Xdevodesen_{qspl} \quad \forall q \in Q \tag{11}$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \delta_m * Xkdevo_{kqpl} = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I Xdevofa_{qi pl} \quad \forall q \in Q \tag{12}$$

$$\beta_m, \gamma_m, \delta_m \geq 0 \quad \beta_m + \gamma_m + \delta_m = 1 \quad \forall m \in M$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \beta_m^1 * Xdevoelim_{qrpl} + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S \gamma_m^1 * Xdesenelim_{srpl} \leq$$

$$\leq elim_{rp} * Yelim_{rp} , \quad \beta_m^1, \gamma_m^1 \in [0,1] \quad \forall m \in M, \forall r \in R \quad (13)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \alpha_m^1 * Xdevodesen_{qspl} \leq desen_{sp} * Ydesen_{sp} \quad (14)$$

$$\alpha_m^1 \in [0,1] \quad \forall m \in M, \quad \forall r \in S$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^L \sum_{q=1}^Q \beta'_q * Xdevodesen_{qspl} = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I Xdesenf_{a_{sipl}} \quad \forall s \in S \quad (15)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^L \sum_{q=1}^Q \gamma'_q * Xdevodesen_{qspl} = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R Xdesenelim_{srpl} \quad \forall s \in S \quad (16)$$

$$\beta'_q, \gamma'_q \geq 0 \quad \beta'_q + \gamma'_q = 1 \quad \forall q \in Q$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q Xdevofa_{qi pl} + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{a=1}^A Xdesenf_{a_{sipl}} \leq a_{ip} \quad \forall i \in I \quad (17)$$

$$\sum_{l=1}^L Arcfacpd_{ijpl} \leq 1 \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P \quad (18)$$

$$\sum_{l=1}^L Arccpdk_{jkpl} \leq 1 \quad \forall j \in J, k \in K, p \in P \quad (19)$$

$$\sum_{l=1}^L Arkckdevo_{kqpl} \leq 1 \quad \forall k \in K, q \in Q, p \in P \quad (20)$$

$$\sum_{l=1}^L Arcdevoelim_{qrpl} \leq 1 \quad \forall q \in Q, r \in R, p \in P \quad (21)$$

$$\sum_{l=1}^L Arcdevodesen_{qrpl} \leq 1 \quad \forall q \in Q, r \in R, p \in P \quad (22)$$

$$\sum_{l=1}^L Arcdevofa_{qi pl} \leq 1 \quad \forall i \in I, q \in Q, p \in P \quad (23)$$

$$\sum_{l=1}^L Arcdesenf_{a_{sipl}} \leq 1 \quad \forall s \in S, i \in I, p \in P \quad (24)$$

$$\sum_{l=1}^L Arcdesenelim_{srpl} \leq 1 \quad \forall s \in S, r \in R, p \in P \quad (25)$$

$$Xfacpd_{ijpl} - Arcfacpd_{ijpl} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P, l \in L \quad (26)$$

$$Xcpdk_{jkpl} - Arccpdk_{jkpl} \geq 0 \quad \forall j \in J, k \in K, p \in P, l \in L \quad (27)$$

$$Xkdevo_{kqpl} - Arkckdevo_{kqpl} \geq 0 \quad \forall k \in K, q \in Q, p \in P, l \in L \quad (28)$$

$$Xdevoelim_{prpl} - Arcdevoelim_{qrpl} \geq 0 \quad \forall q \in Q, r \in R, p \in P, l \in L \quad (29)$$

$$Xdevodesen_{qspl} - Arcdevodesen_{qspl} \geq 0 \quad \forall q \in Q, s \in S, p \in P, l \in L \quad (30)$$

$$Xdevofa_{qipl} - Arcdevofa_{qipl} \geq 0 \quad \forall q \in Q, i \in I, p \in P, l \in L \quad (31)$$

$$Xdesenfa_{sipl} - Arcdesenfa_{sipl} \geq 0 \quad \forall s \in S, i \in I, p \in P, l \in L \quad (32)$$

$$Xdesenelim_{srpl} - Arcdesenelim_{srpl} \geq 0 \quad \forall s \in S, r \in R, p \in P, l \in L \quad (33)$$

$$a_{ip} * Arcfacpd_{ijpl} - Xfacpd_{ijpl} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P, l \in L \quad (34)$$

$$b_{jp} Arccpdk_{jkpl} - Xpdk_{jkpl} \geq 0 \quad \forall j \in J, k \in K, p \in P, l \in L \quad (35)$$

$$demanda_{kp} * Arcckdevo_{kqpl} - Xkdevo_{kqpl} \geq 0 \quad \forall k \in K, q \in Q, p \in P, l \in L \quad (36)$$

$$devo_{qp} * Arcdevoelim_{qrpl} - Xdevoelim_{qrpl} \geq 0 \quad \forall q \in Q, r \in R, p \in P, l \in L \quad (37)$$

$$devo_{qp} * Arcdevodesen_{qspl} - Xdevodesen_{qspl} \geq 0 \quad \forall q \in Q, s \in S, p \in P, l \in L \quad (38)$$

$$devo_{qp} * Arcdevofa_{qipl} - Xdevofa_{qipl} \geq 0 \quad \forall q \in Q, i \in I, p \in P, l \in L \quad (39)$$

$$desen_{sp} * Arcdesenfa_{sipl} - Xdesenfa_{sipl} \geq 0 \quad \forall s \in S, i \in I, p \in P, l \in L \quad (40)$$

$$desen_{sp} * Arcdesenelim_{srpl} - Xdesenelim_{srpl} \geq 0 \quad \forall s \in S, r \in R, p \in P, l \in L \quad (41)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I Arcfacpd_{ijpl} - Ycpd_{jp} \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (42)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K Arcckdevo_{kqpl} - Ydevo_{qp} \geq 0 \quad \forall q \in Q \quad (43)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q Arcdevoelim_{qrpl} + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S Arcdesenelim_{srpl} - Yelim_{rp} \geq 0 \quad \forall r \in R \quad (44)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S Arcdevodesen_{qspl} - Ydesen_{sp} \geq 0 \quad \forall q \in Q \quad (45)$$

$$Xfacpd_{ijpl}, Xcpdk_{jkpl}, Xkdevo_{kqpl}, Xdevoelim_{qrpl}, Xdevodesen_{qspl}, Xdevofa_{qipl}, Xdesenelim_{srpl}, Xdesenfa_{sipl} \geq 0, \quad y \text{ enteras.} \quad (46)$$

$$Tfcpd_{ijpl}, Tcpdk_{jkpl}, Tkdevo_{kqpl}, Tdevoelim_{qrpl}, Tdevodesen_{qspl}, Tdevofa_{qipl}, Tdesenelim_{srpl}, Tdesenfa_{sipl} \geq 0 \quad (47)$$

$$\forall i \in I, j \in J, k \in K, p \in P, q \in Q, r \in R, s \in S, \quad l \in L$$

$$Arcfacpd_{ijpl}, Arccpdk_{jkpl}, Arcckdevo_{kqpl}, Arcdevoelim_{qrpl},$$

$$Arcdevodesen_{qspl}, Arcdevofa_{qipl}, Arcdesenelim_{srpl}, Arcdesenfa_{sipl}, Ycpd_{jp},$$

$$Y_{devo_{qp}}, Y_{elim_{rp}}, Y_{desen_{sp}} \in \{0,1\} \quad (48)$$

$$\forall i \in I, j \in J, k \in K, q \in Q, r \in R, s \in S, p \in P, l \in L$$

En este modelo, la función objetivo f_1 (1) minimiza la suma de los costos de transportación y los costos de apertura de los centros. La ecuación (2) representa la función objetivo f_2 que minimiza la suma de los tiempos de transportar unidades de un escalón a otro.

Las ecuaciones (3), son formuladas para indicar las capacidades de cada fábrica. Las restricciones (4) y (6) se utilizan para indicar las capacidades de los centros potenciales de distribución pero al mismo tiempo se requiere que los flujos de productos solo pueden hacerse a través de centros potenciales de distribución abiertos.

Las restricciones (5) indican que el flujo que entra a los centros potenciales de distribución debe ser el mismo que sale de ellos. Las restricciones (7) declaran que la demanda del cliente se debe cumplir. Las restricciones (8) indican que las devoluciones a los centros de devoluciones deben ser menores que las respectivas demandas de los clientes.

Las restricciones (9) se utilizan para indicar las capacidades de los centros de devolución pero al mismo tiempo se requiere que los flujos de productos solo pueden hacerse a través de centros de devolución abiertos. Las restricciones (10), (11) y (12) indican que las devoluciones pueden ir al eliminación, a desensamble o directamente a fábricas.

Las restricciones (13) y (14) se utilizan para indicar las capacidades de los centros de eliminación y las capacidades de los centros de desensamble pero al mismo tiempo se requiere que los flujos de productos solo pueden hacerse a través de centros de eliminación y desensamble respectivamente abiertos. Las restricciones (15) y (16) indican que las unidades devueltas pueden ir de los centros de desensamble a las fábricas o a los centros de eliminación.

Las restricciones (17) indican que las unidades que regresan a las fábricas no deben excederlas capacidades de estas últimas. Las restricciones (18)-(26) indican que por lo menos un arco debe ser elegido para transportar unidades.

Las restricciones (27)-(34) indican que los arcos serán desactivados si no existe flujo en ellos. Las restricciones (35)-(42) indican que el flujo de unidades solo puede hacerse a través de los arcos activos.

Las restricciones (43)-(46) indican que los centros pueden ser cerrados si no hay flujo en ellos. Las restricciones (47) indican restricciones de no negatividad. Las restricciones (48) representan variables binarias.

4.5 Solución de una instancia.

Se utilizó el método $\varepsilon - Constraint$ (Coello C, Lamont G. y Veldhuizen D., 2007) en una instancia con dos fábricas, dos centros potenciales de distribución, tres clientes, dos centros de devoluciones, tres centros de desensamble y dos centros de eliminación. Con un solo producto en la cadena de suministro directa e inversa. En la figura 4.4.1, se muestran los óptimos de Pareto con tamaño de paso 10, en la

figura 4.4.2 se muestran los óptimos de Pareto con tamaño de paso 5, en la figura 4.4.3 se muestra una solución gráfica.

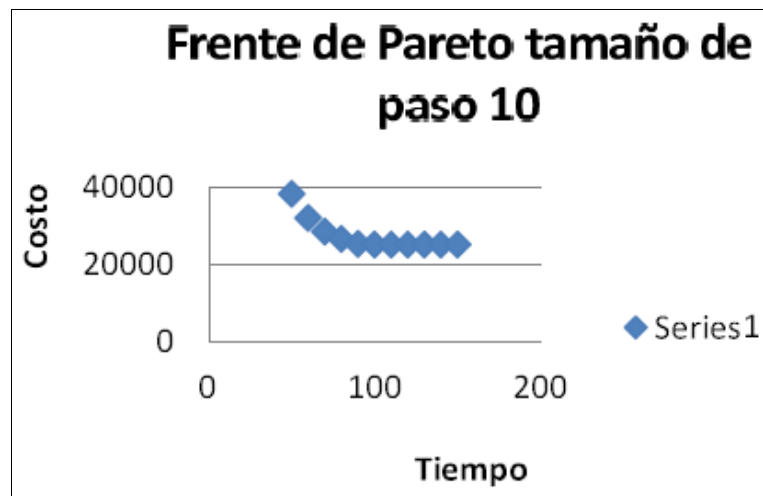


Figura 4.5.1. Frente de Pareto con tamaño de paso 10. Fuente: elaboración propia.

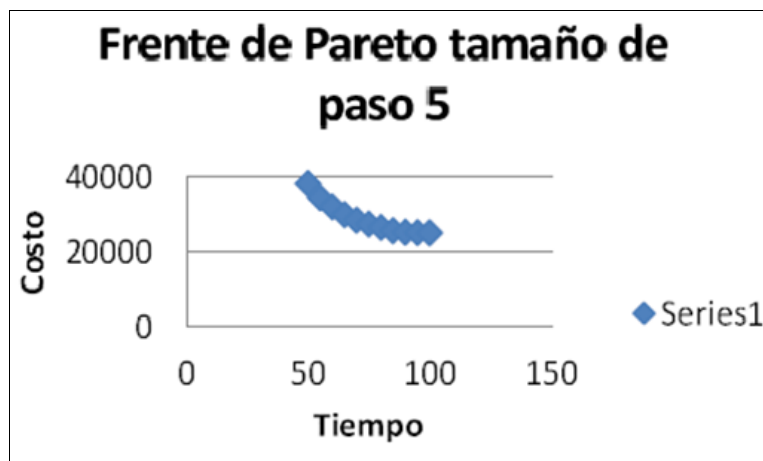


Figura 4.5.2 Frente de Pareto con tamaño de paso 5. Fuente: elaboración propia.

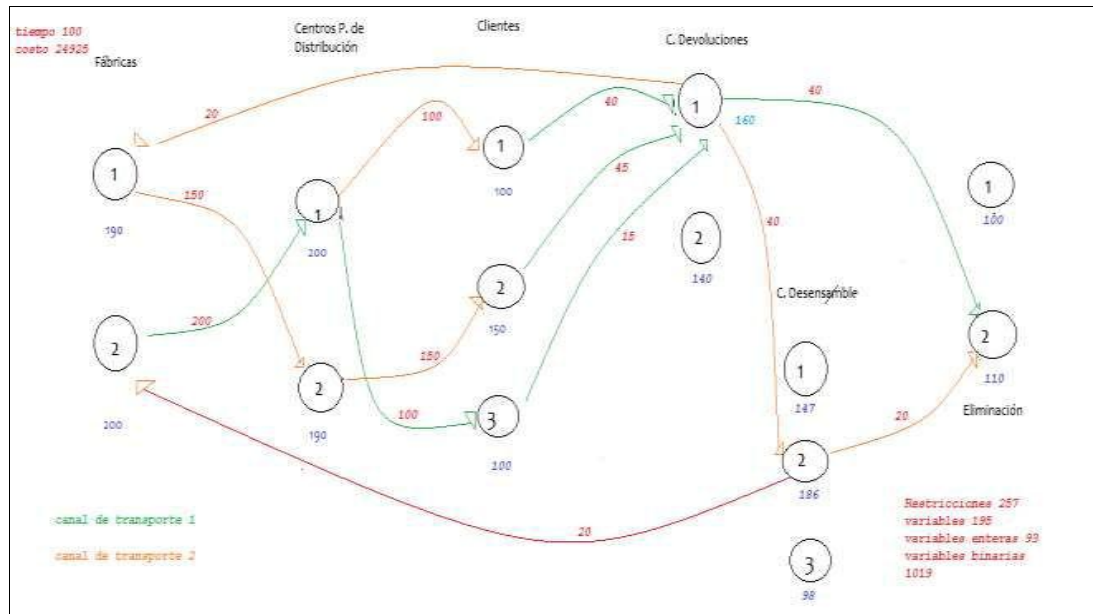


Figura 4.5.3 Solución gráfica de una instancia del envío y regreso de un solo producto. Fuente: elaboración propia.

4.6 Conclusiones.

Este trabajo es el resultado de una investigación en proceso, en donde es importante diseñar modelos, métodos y encontrar soluciones a problemas relacionados con la recolección de productos dañados para reducirla contaminación y recuperar recursos. Se propone un modelo matemático para un diseño de red de Logística Inversa con ocho escalones para un ambiente de manufactura, considerando la decisión de seleccionar el canal de transporte entre cada par de instalaciones. El problema se modela como uno de optimización bi-objetivo, donde se reducen al mínimo los criterios de costo y tiempo, así como la decisión de apertura de centros potenciales de distribución, centros de devolución, centros de desensamblaje y centros de eliminación con el regreso de múltiples unidades. Se eligió el método de ϵ - *Constraint* para encontrar soluciones a una instancia con el flujo de una sola unidad. El siguiente trabajo a realizar es probar el modelo considerando múltiples unidades de envío tanto en el flujo directo como en el flujo inverso.

4.7 Referencias.

Akshay, M., Shaligram, P. (2009). Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules. *Computers & Industrial Engineering*, 56, pp. 334 346.

Coello C., Lamont G, Veldhuizen D., (2007). Libro: *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. 2ad. Edition. Springer.

Cruz, R., Ertel, J. (2009). Reverse logistics network design for the collection of End-of-Life Vehicles in Mexico. *European Journal of Operational Research*, 196, pp. 930-939.

Hokey, M., Hyun, J. (2008). The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers. *Int. J. Production Economics*, 113, pp. 176-192.

Jeong, L., Mitsuo, G., Kyong, R. (2009). Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm. *Computers & Industrial Engineering*, 56, pp. 951-964.

Yongsheng, Z., Shouyang, W. (2008). Generic Model of Reverse Logistics Network Design. *Journal of transportation systems engineering and information technology*. *J Transpn Sys Eng & IT*, 2008, 8 (3), pp. 71-78.

Zhiqiang, L., Bostel, N. (2007). A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities. *Computers & Operations Research*, 34, pp. 299-323.

Capítulo 5

Modelo Matemático Bi-objetivo Determinístico de Red Logística Directa e Inversa de la Industria de Re-manufactura.

La presente sección será enviada como artículo a la revista de ingeniería, investigación y tecnología de la UNAM.

5.1 Resumen.

Este capítulo presenta el modelo matemático de un problema de diseño de cadena de suministro directa e inversa de un sistema de manufactura con ocho escalones, considerando la decisión de seleccionar el canal de transporte entre cada par de instalaciones. El problema es modelado como uno de optimización Bi-objetivo, donde se minimizan los criterios de costo y tiempo, así como la decisión de apertura de centros potenciales de distribución, centros de devolución, centros de desensamble y centros de eliminación con el regreso de múltiples productos. Se utilizó el método ε – *Constraint* y la heurística NSGA II en diferentes instancias para mostrar resultados.

5.2 Introducción.

Las situaciones en las que se produce la reutilización son diversas y se pueden clasificar de acuerdo a una serie de criterios que van desde la motivación de la reutilización, el tipo de materiales recuperables, la forma de reutilización hasta los actores involucrados. Cada uno de estos aspectos tiene importantes implicaciones para el tipo de planificación y formulación de modelos adecuados.

Una imagen “verde” se ha convertido en un elemento importante de marketing. Este aspecto ha estimulado a una serie de empresas para explorar opciones para la recogida y recuperación de sus productos (Thierry, 1997). Pero también existe la motivación económica para realizar actividades de reutilización, como es el caso de la re-manufactura de partes de máquinas (Zhiqiang Lu, Nathalie Bostel, 2007, Jeong Ean, et al., 2009, Cruz y Jurgen, 2009). Cuyo objetivo es recuperar valor de un producto usado. Los productos después de pasar por una revisión pueden ser utilizados como repuestos o venderse en mercados secundarios, requiriendo tan solo una pequeña fracción de los costos de producción original para su recuperación.

Las principales categorías de elementos que se recuperan son paquetes (pallets, botellas, embalajes), repuestos (partes de máquinas, partes de televisión) y bienes del consumidor (fotocopiadoras, frigoríficos). Estas categorías difieren con respecto a cuándo y por qué los elementos se devuelven. Los paquetes serán devueltos con bastante rapidez puesto que ya no son necesarios una vez que su contenido ha sido entregado. Los repuestos se devuelven en caso de fallo o mantenimiento preventivo, generalmente después de un tiempo largo y con un posible defecto. En

cambio los bienes del consumidor al final de su vida útil en su mayoría no regresan, su regreso puede ser bastante largo y podría implicar desactualización del producto o bien el contrato de garantía ha expirado. En este último caso, el momento de regreso se conoce de antemano y por lo tanto puede ser previsto. Todos estos aspectos influyen en las formas posibles de reutilizar el elemento considerado (Fleischmann M., *et al.*, 1997).

Muchos autores utilizan la clasificación de Thierry *et al.*, (1995) para la reutilización de productos. Que consiste en la reutilización directa, reparación, reciclaje y re-manufactura como opciones principales. Ejemplos de artículos que se pueden reutilizar directamente sin antes operaciones de reparación (aunque posiblemente después de ser limpiados y de un mantenimiento menor) son paquetes reutilizables tales como botellas, paletas o contenedores. El objetivo de la reparación es restablecer los productos no la orden de trabajo, aunque posiblemente con una pérdida de calidad como por ejemplo, electrodomésticos, máquinas industriales y equipos electrónicos. El reciclaje denota la recuperación de materiales sin la conservación de las estructuras del producto, por ejemplo el reciclaje de metales a partir de chatarra, vidrio y papel reciclado y el reciclaje de plástico. Por el contrario la re-manufactura conserva la identidad del producto y trata de llevar el producto de nuevo en un “como nuevo”, en este caso es necesario el desmontaje, la revisión y las operaciones de sustitución. Algunos ejemplos de estos casos son motores de aviones y máquinas-herramientas, fotocopiadoras. En los años 94, 95, la re-manufactura recibió gran atención en los EE.UU. Existe una importante distinción entre el material de recuperación (reciclaje) y la recuperación de valor añadido (reparación, re-manufactura), (Fleischmann M., *et al.*, 1997).

La distribución inversa es la recogida y el transporte de las devoluciones de productos, una distribución de marcha atrás que puede llevarse a cabo a través del canal original, a través de un canal de retorno por separado, o a través de combinaciones de los canales hacia adelante o de retorno (Guiltinan y Nwokoye, 1975, citados por Fleischmann M., *et al.*, 1997) puede considerar actividades de reciclaje, reutilización, eliminación, restauración, reparación o re-manufactura (Hokey y Hyun, 2008).

Pohlen y Farris (1992), citados por Fleischmann M., *et al.*, (1997) afirman que el canal de retorno puede tomar varias formas diferentes dependiendo de las funciones de los miembros individuales del canal y la capacidad para llevar a cabo tareas de reciclado o re-manufactura.

Una cuestión importante en el sistema de distribución inverso consiste en cómo integrar el canal inverso, y plantear las siguientes cuestiones:

- ¿Quiénes son los actores del canal de distribución inversa? Los actores pueden ser miembros del canal hacia adelante (fabricantes, minoristas, proveedores de servicios, etc.) o de partes especializadas (vendedores de material secundario, instalaciones de recuperación de materiales, etc.).
- ¿Qué funciones tienen que ser llevadas a cabo en el canal de distribución inverso y dónde? Posibles funciones en el canal de distribución inversa son: extracción, verificación, clasificación, transporte y procesamiento.

- ¿Cuál es la relación entre los canales de distribución directo e inverso? El reciclaje a menudo puede ser descrito como un sistema de circuito abierto, es decir los productos no volverán a ser el producto original, sino que se utiliza en otras industrias. La posibilidad de integración de ambos canales es escasa. Sin embargo la re-manufactura y la reutilización a menudo conducen a un sistema de circuito cerrado: los empaques del producto vuelven al productor original. Entonces la distribución inversa, puede asumir su flujo a través de la red original, con los intermedios tradicionales o a través de proveedores de logística especializada. Pero incluso si los mismos actores están involucrados, la integración de la distribución directa e inversa puede ser difícil desde la recogida y entrega que pueden requerir de distinto manejo.

El propósito de este capítulo es modelar el siguiente proceso de manufactura (ver figura 5.3.1); se considera el flujo directo como el envío de unidades desde las fábricas a los centros potenciales de distribución y de estos últimos a los clientes. El flujo inverso es considerado como la devolución de unidades por parte de los clientes y estas son enviadas a los centros de devolución, los cuales pueden enviarlas a su vez a los centros de eliminación o a los centros de desensambles o directamente a las fábricas, según el estado físico de las unidades. Y las unidades desensambladas pueden ir a las fábricas o bien ser eliminadas. Se considera además que el flujo de unidades entre cada par de instalaciones debe realizarse por dos diferentes opciones de transporte (camioneta, autobús, tren, avión, barco o servicios de envío urgente, normal, de noche, etc.). Esta problemática es considerada como un problema de diseño de cadena de suministro directa e inversa de un sistema de manufactura con ocho escalones, con cuatro diferentes tipos de instalaciones y dos canales de transporte entre cada par de instalaciones. Este problema de red logística directa e inversa de la industria de manufactura se formula como un modelo de programación entera mixta, clasificándose como un problema NP-Hard. Se diseñaron instancias en C++ para el problema debido a la ausencia de datos reales para probar soluciones. Se resolvió por el método ε – *Constraint* (Coello C, Lamont G. y Veldhuizen D., 2007) y la técnica branch and bound, así como por y la heurística NSGA II (Deb, *et al.*, 2002).

5.3 Modelo propuesto.

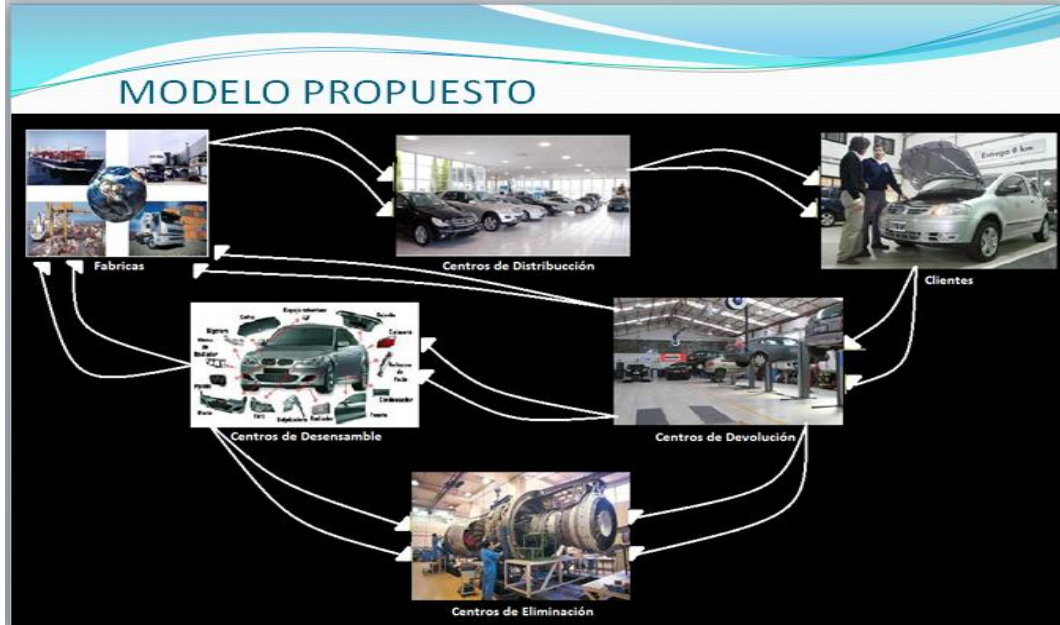


Figura 5.3.1 Modelo propuesto de diseño de red logística directa e inversa Fuente: elaboración propia.

INDICES.

$I =$ Conjunto de índices de Fábricas $i = 1, 2, \dots, I$.

$J =$ Conjunto de índices de los Centros Potenciales de Distribución $j = 1, 2, \dots, J$.

$K =$ conjunto de índices de Clientes $k = 1, 2, \dots, K$.

$P =$ Conjunto de productos $p = 1, 2, \dots, P$.

$Q =$ Conjunto de índices de los Centros de Devolución $q = 1, 2, \dots, Q$.

$E =$ Conjunto de índices de los Centros de Eliminación $r = 1, 2, \dots, R$.

$S =$ Conjunto de índices de los Centros de Desensamble $s = 1, 2, \dots, S$.

$L =$ Conjunto de índices de arcos $l = 1, 2, \dots, L$.

$a_{ip} =$ Capacidad de la Fábrica i para el producto p .

$b_{jp} =$ Capacidad del Centro Potencial de Distribución j para el producto p .

$demand_{kp} =$ Demanda del producto p para el Cliente k .

$devo_{qp} =$ Capacidad del Centro de Devolución q para el producto p .

$elim_{rp}$ = Capacidad del Centro de Eliminación r para el producto p .

$desen_{sp}$ = Capacidad del Centro de Desensamble s para el producto p .

COSTOS.

C_{ijpl} = Costo unitario de envío desde la Fábrica i hasta el Centro Potencial de Distribución j del producto p por el arco ijl .

C_{jkpl} = Costo unitario de envío desde el Centro Potencial de Distribución j hasta el Cliente k del producto p por el arco jkl .

C_{kqpl} = Costo unitario de envío desde el Cliente k hasta el Centro de Devolución q del producto p por el arco kql .

C_{qrpl} = Costo unitario de envío desde el Centro de Devolución q hasta el Centro de Eliminación r del producto p por el arco qrl .

C_{qspl} = Costo unitario de envío desde el Centro de Devolución q hasta el Centro de Desensamble s del producto p por el arco qsl .

C_{qippl} = Costo unitario de envío desde el Centro de Devolución q hasta la Fábrica i del producto p por el arco qil .

C_{srpl} = Costo unitario de envío desde el Centro de Desensamble s hasta el Centro de Eliminación r del producto p por el arco srl .

C_{simpl} = Costo unitario de envío desde el Centro de Desensamble s hasta la Fábrica i del producto p por el arco sil .

$C_{apercpd}_{jp}$ = Costo de apertura del Centro Potencial de Distribución j para el producto p .

$C_{aperdevo}_{qp}$ = Costo de apertura del Centro de Devolución q para el producto p .

$C_{aperelim}_{rp}$ = Costo de apertura del Centro de Eliminación r para el producto p .

$C_{aperdesen}_{sp}$ = Costo de apertura del Centro de Desensamble s para el producto p .

PARÁMETROS

$Tfcpd_{ijpl}$ = Tiempo para transportar cualquier cantidad del producto p desde la Fábrica i hasta el Centro Potencial de Distribución j por el arco l .

$Tcpdk_{jkpl}$ = Tiempo para transportar cualquier cantidad del producto p desde el Centro Potencial de Distribución j hasta el Cliente k por el arco l .

$Tkdevo_{kqpl}$ = Tiempo para transportar cualquier cantidad del producto p desde el Cliente k hasta el Centro de Devolución q por el arco l .

$Tdevoelim_{qrpl}$ = Tiempo para transportar cualquier cantidad del producto p desde el Centro de Devolución q hasta el Centro de Eliminación r por el arco l .

$Tdevodesen_{qspl}$ = Tiempo para transportar cualquier cantidad del producto p desde el Centro de Devolución q hasta el Centro de Desensamble s por el arco l .

$Tdevofa_{qippl}$ = Tiempo para transportar cualquier cantidad del producto p desde el Centro de Devolución q hasta la Fábrica i por el arco l .

$Tdesenfa_{simpl}$ = Tiempo para transportar cualquier cantidad del producto p desde el Centro de Desensamble s hasta la Fábrica i por el arco l .

$Tdesenelim_{srpl}$ = Tiempo para transportar cualquier cantidad del producto p desde el Centro de Desensamble s hasta el Centro de Eliminación r por el arco l .

VARIABLES DE DECISIÓN.

$Xfacpd_{ijpl}$ = Cantidad del producto p enviada desde la Fábrica i hasta el Centro Potencial de Distribución j utilizando el arco ijl .

$Xcpdk_{jkpl}$ = Cantidad del producto p enviada desde el Centro Potencial de Distribución j hasta el Cliente k utilizando el arco jkl .

$Xkdevo_{kqpl}$ = Cantidad del producto p enviada desde el Cliente k hasta el Centro de Devolución q utilizando el arco kql .

$Xdevoelim_{qrpl}$ = Cantidad del producto p enviada desde el Centro de Devolución q hasta el Centro de Eliminación r utilizando el arco qrl .

$X_{devodesen_{qspl}}$ = Cantidad del producto p enviada desde el Centro de Devolución q hasta el Centro de Desensamble s utilizando el arco qsl .
 $X_{devofa_{qip}}$ = Cantidad del producto p enviada desde el Centro de Devolución q hasta la Fábrica i utilizando el arco qil .
 $X_{desenfa_{sipl}}$ = Cantidad del producto p enviada desde el Centro de Desensamble s hasta la Fábrica i utilizando el arco sil .
 $X_{desenelim_{srpl}}$ = Cantidad del producto p enviada desde el Centro de Desensamble s hasta el Centro de Eliminación r utilizando el arco srl .
 $Y_{cpd_{jp}}$ = variable binaria igual a uno si el Centro Potencial de Distribución j es abierto para el producto p , 0 en caso contrario.
 $Y_{devo_{qp}}$ = variable binaria igual a uno si el Centro de Devolución q es abierto para el producto p , 0 en caso contrario.
 $Y_{elim_{rp}}$ = variable binaria igual a uno si el Centro de Eliminación r es abierto para el producto p , 0 en caso contrario.
 $Y_{desen_{sp}}$ = variable binaria igual a uno si el Centro de Desensamble s es abierto para el producto p , 0 en caso contrario.
 $Arc_{facpd_{ijpl}}$ = variable binaria igual a 1 si el arco ijl es utilizado para transportar el producto p desde la Fábrica i hasta el Centro Potencial de Distribución j , cero en caso contrario.
 $Arc_{cpdk_{jkpl}}$ = variable binaria igual a 1 si el arco jkl es utilizado para transportar el producto p desde el Centro Potencial de Distribución j hasta el Cliente k , cero en caso contrario.
 $Arc_{kdevo_{kqpl}}$ = variable binaria igual a 1 si el arco kql es utilizado para transportar el producto p desde el Cliente k hasta el Centro de Devolución q , cero en caso contrario.
 $Arc_{devoelim_{qrpl}}$ = variable binaria igual a 1 si el arco qrl es utilizado para transportar el producto p desde el Centro de Devolución q hasta el Centro

de Eliminación r , cero en caso contrario.

$Arcdevodesen_{qspl} =$ variable binaria igual a 1 si el arco qsl es utilizado para transportar el producto p desde el Centro de Devolución q hasta el Centro de Desensamble s , cero en caso contrario.

$Arcdevofa_{qip} =$ variable binaria igual a 1 si el arco qip es utilizado para transportar el producto p desde el Centro de Devolución q hasta la Fábrica i , cero en caso contrario.

$Arcdesenelim_{srpl} =$ variable binaria igual a 1 si el arco srl es utilizado para transportar el producto p desde el Centro de Desensamble s hasta el Centro de Eliminación r , cero en caso contrario.

$Arcdesenfa_{sipel} =$ variable binaria igual a 1 si el arco sip es utilizado para transportar el producto p desde el Centro de Desensamble s hasta la Fábrica i , cero en caso contrario.

MODELO.

$Min (f_1, f_2)$

$$\begin{aligned}
 f_1 = & \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I C_{ijpl} * Xfacpd_{ijpl} + \\
 & + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J C_{jkpl} * Xcpdk_{jkpl} + \\
 & + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K C_{kqpl} * Xkdevo_{kqpl} + \\
 & + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R \sum_{q=1}^Q C_{qrpl} * Xdevoelim_{qrpl} + \\
 & + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S \sum_{q=1}^Q C_{qspl} * Xdevodesen_{qspl} + \\
 & + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{q=1}^Q C_{qip} * Xdevofa_{qip} + \\
 & + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S C_{srpl} * Xdesenelim_{srpl} + \\
 & + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S C_{sipel} * Xdesenfa_{sipel} +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \text{Capercpd}_{jp} * Ycpd_{jp} + \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \text{Caperdevo}_{qp} * Ydevo_{qp} + \\
& + \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R \text{Caperelim}_{rp} * Yelim_{rp} + \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S \text{Caperdesen}_{sp} * Ydesen_{sp} \quad (1)
\end{aligned}$$

Sujeto a:

$$\begin{aligned}
f_2 = & \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \sum_{i=1}^I Tfcpd_{ijpl} * Arcfacpd_{ijpl} + \\
& + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \sum_{j=1}^J Tcpgk_{jkpl} * Arccpgk_{jkpl} \\
& + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \sum_{k=1}^K Tkdevo_{kqpl} * Arkdevo_{kqpl} + \\
& + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R \sum_{q=1}^Q Tdevoelim_{qrpl} * Arkdevoelim_{qrpl} + \\
& + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S \sum_{q=1}^Q Tdevodesen_{qspl} * Arkdevodesen_{qspl} + \\
& + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{q=1}^Q Tdevofa_{qip} * Arkdevofa_{qip} + \\
& + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I \sum_{s=1}^S Tdesenfa_{simpl} * Arkdesenfa_{simpl} + \\
& + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S Tdesenelim_{srpl} * Arkdesenelim_{srpl} \leq \varepsilon \quad (2)
\end{aligned}$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J Xfacpd_{ijpl} \leq a_{ip} \quad \forall i \in I \quad (3)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I Xfacpd_{ijpl} \leq b_{jp} * Ycpd_j \quad \forall j \in J \quad (4)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I Xfacpd_{ijpl} = \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K Xcpdk_{jkpl} \quad \forall j \in J \quad (5)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K Xcpdk_{jkpl} \leq b_{jp} \quad \forall j \in J \quad (6)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J Xcpdk_{jkpl} = demanda_{kp} \quad \forall k \in K \quad (7)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q Xkdevo_{kqpl} \geq \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{j=1}^J \alpha_k Xcpdk_{jkpl} \quad (8)$$

$$\forall k \in K, \quad \alpha_k \in [0,1]$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K Xkdevo_{kqpl} \leq devo_{qp} * Ydevo_{qp} \quad \forall q \in Q \quad \forall p = 1, 2, \dots, P \quad (9)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \beta_m * Xkdevo_{kqpl} \leq \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R Xdevoelim_{qrpl} \quad \forall q \in Q \quad (10)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \gamma_m * Xkdevo_{kqpl} \leq \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S Xdevodesen_{qspl} \quad \forall q \in Q \quad (11)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K \delta_m * Xkdevo_{kqpl} \leq \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I Xdevofa_{qip l} \quad \forall q \in Q \quad (12)$$

$$\beta_m, \gamma_m, \delta_m \geq 0 \quad \beta_m + \gamma_m + \delta_m = 1 \quad \forall m \in M$$

$$\begin{aligned} \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \beta_m^1 * Xdevoelim_{qrpl} + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S \gamma_m^1 * Xdesenelim_{srpl} \leq \\ \leq elim_{rp} * Yelim_{rp} \quad \beta_m^1, \gamma_m^1 \in [0,1] \quad \forall m \in M, \forall r \in R \end{aligned} \quad (13)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \alpha_m^1 * Xdevodesen_{qspl} \leq desen_{sp} * Ydesen_{sp} \quad (14)$$

$$\alpha_m^1 \in [0,1] \quad \forall m \in M, \quad \forall r \in S$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \beta'_q * Xdevodesen_{qspl} \leq \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I Xdesenf_{a_{sipl}} \quad \forall s \in S \quad (15)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q \gamma'_q * Xdevodesen_{qspl} \leq \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{r=1}^R Xdesenelim_{srpl} \quad \forall s \in S \quad (16)$$

$$\beta'_q, \gamma'_q \geq 0 \quad \beta'_q + \gamma'_q = 1 \quad \forall q \in Q$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q Xdevofa_{qip l} + \sum_{l=1}^L \sum_{pa=1}^{Pa} \sum_{s=1}^S Xdesenf_{a_{sipl}} \leq a_{ip} \quad \forall i \in I \quad (17)$$

$$\sum_{l=1}^L Arcfacpd_{ijpl} \leq 1 \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P \quad (18)$$

$$\sum_{l=1}^L Arccpdk_{jkpl} \leq 1 \quad \forall j \in J, k \in K, p \in P \quad (19)$$

$$\sum_{l=1}^L Arckdevo_{kqpl} \leq 1 \quad \forall k \in K, q \in Q, p \in P \quad (20)$$

$$\sum_{l=1}^L Arcdevoelim_{qrpl} \leq 1 \quad \forall q \in Q, r \in R, p \in P \quad (21)$$

$$\sum_{l=1}^L Arcdevodesen_{qrpl} \leq 1 \quad \forall q \in Q, r \in R, p \in P \quad (22)$$

$$\sum_{l=1}^L Arcdevofa_{qip l} \leq 1 \quad \forall i \in I, q \in Q, p \in P \quad (23)$$

$$\sum_{l=1}^L Arcdesenf_{a_{sipl}} \leq 1 \quad \forall s \in S, i \in I, p \in P \quad (24)$$

$$\sum_{l=1}^L Arcdesenelim_{srpl} \leq 1 \quad \forall s \in S, r \in R, p \in P \quad (25)$$

$$Xfacpd_{ijpl} - Arcfacpd_{ijpl} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P, l \in L \quad (26)$$

$$Xcpdk_{jkpl} - Arccpdk_{jkpl} \geq 0 \quad \forall j \in J, k \in K, p \in P, l \in L \quad (27)$$

$$Xkdevo_{kqpl} - Arckdevo_{kqpl} \geq 0 \quad \forall k \in K, q \in Q, p \in P, l \in L \quad (28)$$

$$Xdevoelim_{prpl} - Arcdevoelim_{qrpl} \geq 0 \quad \forall q \in Q, r \in R, p \in P, l \in L \quad (29)$$

$$Xdevodesen_{qspl} - Arcdevodesen_{qspl} \geq 0 \quad \forall q \in Q, s \in S, p \in P, l \in L \quad (30)$$

$$Xdevofa_{qipl} - Arcdevofa_{qipl} \geq 0 \quad \forall q \in Q, i \in I, p \in P, l \in L \quad (31)$$

$$Xdesenfa_{sipl} - Arcdesenfa_{sipl} \geq 0 \quad \forall s \in S, i \in I, p \in P, l \in L \quad (32)$$

$$Xdesenelim_{srpl} - Arcdesenelim_{srpl} \geq 0 \quad \forall s \in S, r \in R, p \in P, l \in L \quad (33)$$

$$a_{ip} * Arcfacpd_{ijpl} - Xfacpd_{ijpl} \geq 0 \quad \forall i \in I, j \in J, p \in P, l \in L \quad (34)$$

$$b_{jp} * Arccpdk_{jkpl} - Xpdk_{jkpl} \geq 0 \quad \forall j \in J, k \in K, p \in P, l \in L \quad (35)$$

$$demanda_{kp} * Arkdevo_{kqpl} - Xkdevo_{kqpl} \geq 0 \quad \forall k \in K, q \in Q, p \in P, l \in L \quad (36)$$

$$devo_{qp} * Arcdevoelim_{qrpl} - Xdevoelim_{qrpl} \geq 0 \quad \forall q \in Q, r \in R, p \in P, l \in L \quad (37)$$

$$devo_{qp} * Arcdevodesen_{qspl} - Xdevodesen_{qspl} \geq 0 \quad \forall q \in Q, s \in S, p \in P, l \in L \quad (38)$$

$$devo_{qp} * Arcdevofa_{qipl} - Xdevofa_{qipl} \geq 0 \quad \forall q \in Q, i \in I, p \in P, l \in L \quad (39)$$

$$desen_{sp} * Arcdesenfa_{sipl} - Xdesenfa_{sipl} \geq 0 \quad \forall s \in S, i \in I, p \in P, l \in L \quad (40)$$

$$desen_{sp} * Arcdesenelim_{srpl} - Xdesenelim_{srpl} \geq 0 \quad \forall s \in S, r \in R, p \in P, l \in L \quad (41)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{i=1}^I Arcfacpd_{ijpl} - Ycpd_{jp} \geq 0 \quad \forall j \in J \quad (42)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{k=1}^K Arkdevo_{kqpl} - Ydevo_{qp} \geq 0 \quad \forall q \in Q \quad (43)$$

$$\begin{aligned} & \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{q=1}^Q Arcdevoelim_{qrpl} + \sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S Arcdesenelim_{srpl} - \\ & - Yelim_{rp} \geq 0 \quad \forall r \in R \end{aligned} \quad (44)$$

$$\sum_{l=1}^L \sum_{p=1}^P \sum_{s=1}^S Arcdevodesen_{qspl} - Ydesen_{sp} \geq 0 \quad \forall q \in Q \quad (45)$$

$$\begin{aligned} & Xfacpd_{ijpl}, Xcpdk_{jkpl}, Xkdevo_{kqpl}, Xdevoelim_{qrpl}, Xdevodesen_{qspl}, Xdevofa_{qipl}, \\ & Xdesenelim_{srpl}, Xdesenfa_{sipl} \geq 0, \text{ y enteras} \end{aligned} \quad (46)$$

$$\begin{aligned} & Tfacpd_{ijpl}, Tcpdk_{jkpl}, Tkdevo_{kqpl}, Tdevoelim_{qrpl}, Tdevodesen_{qspl}, \\ & Tdevofa_{qipl}, Tdesenelim_{srpl}, Tdesenfa_{sipl} \geq 0 \end{aligned} \quad (47)$$

$$\forall i \in I, j \in J, k \in K, p \in P, q \in Q, r \in R, s \in S, l \in L$$

$$\begin{aligned}
& Arcfacpd_{ijpl}, Arcpdk_{jkpl}, Arckdevo_{kqpl}, Arcdevoelim_{qrpl}, Arcdevodesen_{qspl}, \\
& Arcdevofa_{qipl}, \quad Arcdesenelim_{srpl}, Arcdesenf_{sipl}, Ycpd_{jp}, Ydevo_{qp}, \\
& Yelim_{rp}, Ydesen_{sp} \in \{0,1\}
\end{aligned} \tag{48}$$

$$\forall i \in I, j \in J, k \in K, q \in Q, r \in R, s \in S, p \in P, l \in L$$

En este modelo, la función objetivo f_1 (1) minimiza la suma de los costos de transportación y los costos de apertura de los centros. La ecuación (2) representa la función objetivo f_2 (2) que minimiza la suma de los tiempos de transportar unidades de un escalón a otro.

Las ecuaciones (3), son formuladas para indicar las capacidades de cada fábrica. Las restricciones (4) y (6) se utilizan para indicar las capacidades de los centros potenciales de distribución pero al mismo tiempo se requiere que los flujos de productos solo pueden hacerse a través de centros potenciales de distribución abiertos. Las restricciones (5) indican que el flujo que entra a los centros potenciales de distribución debe ser el mismo que sale de ellos. Las restricciones (7) declaran que la demanda del cliente se debe cumplir. Las restricciones (8) indican que las devoluciones a los centros de devoluciones deben ser menores que las respectivas demandas de los clientes. Las restricciones (9) se utilizan para indicar las capacidades de los centros de devolución pero al mismo tiempo se requiere que los flujos de productos solo pueden hacerse a través de centros de devolución abiertos. Las restricciones (10), (11) y (12) indican que las devoluciones pueden ir al eliminación, a desensamble o directamente a fábricas. Las restricciones (13) y (14) se utilizan para indicar las capacidades de los centros de eliminación y las capacidades de los centros de desensamble pero al mismo tiempo se requiere que los flujos de productos solo pueden hacerse a través de centros de eliminación y desensamble respectivamente abiertos. Las restricciones (15) y (16) indican que las unidades devueltas pueden ir de los centros de desensamble a las fábricas o a los centros de eliminación. Las restricciones (17) indican que las unidades que regresan a las fábricas no deben excederlas capacidades de estas últimas. Las restricciones (18)-(26) indican que por lo menos un arco debe ser elegido para transportar unidades. Las restricciones (27)-(34) indican que los arcos serán desactivados si no existe flujo en ellos. Las restricciones (35)-(42) indican que el flujo de unidades solo puede hacerse a través de los arcos activos. Las restricciones (43)-(46) indican que los centros pueden ser cerrados si no hay flujo en ellos. Las restricciones (47) indican restricciones de no negatividad. Las restricciones (48) representan variables binarias.

5.4 Generación de instancias.

Consideraremos que una instancia es la asignación de valores específicos a los diferentes parámetros que intervienen en el modelo, como son: número y capacidades de fábricas, de Centro Potenciales de Distribución (CPD's), de Clientes, de Centros de Devolución, de Centros de Desensamble y de Centros de

Eliminación, las que en general llamaremos instalaciones, así como valores específicos para los parámetros de costos y tiempos de transporte.

Las instancias para probar el modelo de cadena cerrada de logística inversa que se propone se programaron en C++ y se construyen de la siguiente manera:

5.4.1 Capacidades de las instalaciones del flujo directo.

El flujo directo se considera de dos escalones, el primer escalón va de Fábricas a los CPD's, el segundo escalón va de los CPD's a los clientes. Las capacidades de cada una de estas instalaciones están determinadas por la demanda total de los clientes la cual denotamos por D_{Total} :

$$D_{Total} = Demanda\ Total$$

En cada escalón supondremos que n es el número de instalaciones requeridas, donde cada una de las instalaciones tendrá una capacidad mínima, para garantizar que ninguna instalación tenga capacidad cero, y una máxima, para garantizar la pertinencia de las diferentes instalaciones. Pudiendo ser estas capacidades diferentes para cada instalación.

La capacidad mínima de una instalación se representa por $Capmin$ y viene dado de la siguiente manera:

$$Capmin = Capacidad\ mínima = \frac{D_{Total}}{n+1}.$$

La capacidad máxima de una instalación la denotamos por $Capmax$ y esta dada por:

$$Capmax = Capacidad\ máxima = 2 * Capmin$$

Denotaremos por $Capinst_i$ la capacidad de la i – ésima instalación para $i = 1, 2, \dots, n - 1$ y se calcula como sigue:

$$\begin{aligned} Capinst_i &= Capacidad\ de\ la\ instalación\ i = \\ &= Capmin + No.Aleatorio(Capmin\ y\ Capmax), \end{aligned}$$

donde $No.Aleatorio(Capmin\ y\ Capmax)$ calcula una capacidad aleatoria entre las capacidades mínima ($Capmin$) y máxima ($Capmax$).

La capacidad de la última instalación, $Capinst_n$ se calcula como la diferencia de la demanda total y la demanda asignada a las $n-1$ instalaciones, es decir,

$$Capinst_n = D_{Total} - \sum_{i=1}^{n-1} Capinst_i.$$

Es importante mencionar que la capacidad de la última instalación tiene como mínimo la capacidad mínima ($Capmin$). Además de garantizar siempre la satisfacción al cliente. En caso de que la instancia generada no cumpla con los requerimientos de la demanda de los clientes, se genera otra instancia.

5.4.2 Costos y tiempos de transporte para el flujo directo.

Los tiempos de envío entre cada par de instalación, se representan como T_{ij} y representa el tiempo de transporte de la instalación i a la instalación j . Los tiempos de envío se calculan de forma aleatoria como:

$$T_{ij} = No. Aleatorio (t_1 y t_2) ,$$

donde el rango para enviar una unidad de la instalación i a la instalación j se encuentra entre un tiempo mínimo t_1 , y un tiempo máximo t_2 .

Es razonable suponer que al existir diferentes formas de envío los tiempos para cada una de ellas sean diferentes, por lo que, T_{ij} es un tiempo que no debe repetirse entre los arcos que van de la instalación i a la instalación j .

Con respecto a los costos de transporte, se utiliza una función lineal decreciente para describir el costo de transporte de la instalación i a la instalación j , debido a que un servicio de entrega rápido de un producto tiene un costo mayor al de un servicio más lento. Por ejemplo, un envío por avión, en muchas de las ocasiones es más caro que un envío terrestre.

Representaremos con $Costo_{ij}(t)$ el costo de envío de un producto de la instalación i a la instalación j , utilizando un servicio que requiere de un tiempo t , por simplicidad lo denotaremos por $C_{ij}(t)$, el cual viene dado por:

$$Costo_{ij}(t) = C_{ij}(t) = Cmax - m * (t - t_1),$$

donde la pendiente esta dada por:

$$m = \frac{Cmax - Cmin}{t_2 - t_1}.$$

Y $Cmin, Cmax$ son costos de envío, mínimos y máximos, respectivamente entre cada par de instalación. Para algunas de las instancias que se mostrarán más adelante se tiene que los costos de envío son: $Cmin = 800, Cmax = 16000$ y sus respectivos tiempos de entrega son: $t_1 = 2, t_2 = 20$ días para el flujo directo y el inverso.

5.4.3 Capacidades de las instalaciones del flujo inverso.

El flujo inverso consiste de seis escalones y se describen de la siguiente manera: el tercer escalón de la cadena cerrada de logística inversa va de los Clientes a los Centros de Devolución, el cuarto escalón va de los Centros de Devolución a los Centros de Eliminación, el quinto escalón va de los Centros de Devolución a los Centros de Desensamble, el sexto escalón va de los Centros de Devolución a las Fábricas, el séptimo escalón va de los Centros de Desensamble a los Centros de Eliminación y el octavo escalón va de los Centros de Desensambles a las Fábricas.

Tercer escalón.

Considerando que los clientes pueden devolver diferentes porcentajes de unidades o productos, sin que esto implique la devolución total de su demanda, supondremos que las devoluciones son valores aleatorios entre 0% y 40%. Se considera que n es el número de centros de devolución, denotaremos como $Devo_{Total}$ a la devolución total de todos los clientes, se calculan las siguientes capacidades: capacidad mínima de devolución denotada por $Capmindevo$ y capacidad máxima de devolución denotada por $Capmaxdevo$ de los centros de devolución de la siguiente manera:

$$Capmindevo = \text{Capacidad de devolución mínima} = \frac{Devo_{Total}}{n + 1}$$

$$Capmaxdevo = \text{Capacidad de devolución máxima} = 2 * Capmindevo.$$

Denotaremos por $CapCendevo_i$ la capacidad del i – ésimo centro de devolución para $i = 1, 2, \dots, n - 1$ y se calcula como sigue:

$$\begin{aligned} CapCendevo_i &= \text{Capacidad del centro de devolución } i = \\ &= Capmindevo + No.Aleatorio (Capmindevo y Capmaxdevo), \end{aligned}$$

donde $No.Aleatorio (Capmindevo y Capmaxdevo)$ calcula una capacidad aleatoria entre las capacidades mínima de devolución ($Capmindevo$) y máxima de devolución ($Capmaxdevo$).

La capacidad del último centro de devolución, denotada por $CapCendevo_n$, se calcula como la diferencia entre la devolución total y la capacidad de devolución asignada a los $n - 1$ centros de devolución, es decir,

$$CapCendevo_n = Devo_{Total} - \sum_{i=1}^{n-1} CapCendevo_i.$$

Es importante mencionar que la capacidad del último centro de devolución tiene como mínimo la capacidad mínima de devolución ($Capmindevo$).

Se considera que cada uno de los centros de devolución envía el $\beta\%$ de las devoluciones a los centros de eliminación, el $\gamma\%$ de las devoluciones son enviadas a los centros de desensamble y el $\delta\%$ de las devoluciones son enviadas a las

fábricas. El $\gamma^1\%$ de las unidades de desensamble son enviadas a los centros de eliminación y el $\beta^1\%$ de las unidades de desensamble son enviadas a las fábricas.

Cuarto escalón.

Para el cuarto escalón de flujo inverso denotaremos como $CapCenDevo_{Total}$ a la suma de las capacidades de todos los centros de devolución y a n como el número de centros de eliminación requeridos, se calculan las siguientes capacidades: capacidad mínima de los centro de eliminación denotada por $Capminelim$ y capacidad máxima de los centros de eliminación denotada por $Capmaxelim$ de la siguiente manera:

$$Capminelim = \frac{CapCenDevo_{Total}}{n + 1}$$

$$Capmaxelim = 2 * Capminelim.$$

Denotaremos por $CapCenElim_i$ la capacidad del i – ésimo centro de eliminación para $i = 1, 2, \dots, n - 1$ y se calcula como sigue:

$$CapCenElim_i = Capminelim + No.Aleatorio (Capminelim y Capmaxelim).$$

donde $No.Aleatorio (Capminelim y Capmaxelim)$ calcula una capacidad aleatoria entre las capacidades mínima de los centros de eliminación ($Capminelim$) y máxima de los centros de eliminación ($Capmaxelim$).

La capacidad del último centro de eliminación, denotada por $CapCenElim_n$, se calcula como la diferencia de la suma total de las capacidades de los centros de devolución ($CapCenDevo_{Total}$) y la capacidad de devolución asignada a los $n - 1$ centros de eliminación, es decir,

$$CapCenElim_n = CapCenDevo_{Total} - \sum_{i=1}^{n-1} CapCenElim_i.$$

Es importante mencionar que la capacidad del último centro de eliminación tiene como mínimo la capacidad mínima $Capminelim$.

Quinto escalón.

Para el quinto escalón de flujo inverso denotaremos como $CapCenDevo_{Total}$ a la suma de las capacidades de todos los centros de devolución y a n como el número de centros de desensamble requeridos, se calculan las siguientes capacidades: capacidad mínima de los centro de desensamble denotada por $Capmindesen$ y capacidad máxima de los centros de desensamble denotada por $Capmaxdesen$ de la siguiente manera:

$$Capmindesen = \frac{CapCenDevo_{Total}}{n + 1}$$

$$Capmaxdesen = 2 * Capmindesen.$$

Denotaremos por $CapCenDesen_i$ la capacidad del i – ésimo centro de desensamble para $i = 1, 2, \dots, n - 1$ y se calcula como sigue:

$$CapCenDesen_i = Capmindesen + No.Aleatorio (Capmindesen y Capmaxdesen),$$

donde $No.Aleatorio (Capmindesen y Capmaxdesen)$ calcula una capacidad aleatoria entre las capacidades mínima de los centros de desensamble ($Capmindesen$) y máxima de los centros de desensamble ($Capmaxdesen$).

La capacidad del último centro de desensamble, denotada por $CapCenDesen_n$, se calcula como la diferencia de la suma total de las capacidades de los centros de devolución ($CapCenDevo_{Total}$) y las capacidades asignadas a los $n - 1$ centros de desensamble, es decir,

$$CapCenDesen_n = CapCenDevo_{Total} - \sum_{i=1}^{n-1} CapCenDesen_i.$$

Es importante mencionar que la capacidad del último centro de desensamble tiene como mínimo la capacidad mínima $Capmindesen$.

Sexto escalón.

Para el sexto escalón de flujo inverso denotaremos como $CapCenDevo_{Total}$ a la suma de las capacidades de todos los centros de devolución y a n como el número de fábricas existentes, se calculan las siguientes capacidades: capacidad mínima de las fábrica denotada por $Capminfa$ y capacidad máxima de las fábricas denotada por $Capmaxfa$ de la siguiente manera:

$$Capminfa = \frac{CapCenDevo_{Total}}{n + 1}$$

$$Capmaxfa = 2 * Capminfa.$$

Denotaremos por $Capdevofa_i$ la capacidad de devolución para la i – ésima fábrica para $i = 1, 2, \dots, n - 1$ y se calcula como sigue:

$$Capdevofa_i = Capminfa + No.Aleatorio (Capminfa y Capmaxfa),$$

donde $No.Aleatorio (Capminfa y Capmaxfa)$ calcula una capacidad aleatoria entre las capacidades mínima de devolución para las fábricas ($Capminfa$) y máxima de devolución para las fábricas ($Capmaxfa$).

La capacidad de devolución para la última fábrica, denotada por $Capdevofa_n$, se calcula como la diferencia de la suma total de las capacidades de los centros de devolución ($CapCenDevo_{Total}$) y las capacidades asignadas a las $n - 1$ fábricas, es decir;

$$Capdevofa_n = CapCenDevo_{Total} - \sum_{i=1}^{n-1} Capdevofa_i.$$

La capacidad de devolución de la última fábrica tiene como mínimo la capacidad mínima *Capminfa*.

5.4.4 Costos y tiempos de transporte para el Flujo inverso.

Los costos y tiempos de envío entre cada par de instalación para el flujo inverso se calculan de manera análoga a los tiempos y costos del flujo directo.

5.5 Experiencia computacional.

En esta sección se describe el tipo de instancias que se utilizaron para probar el modelo. Se utilizó el método ε -constraint (Coello C, Lamont G. y Veldhuizen D., 2007) en el software Lingo versión 10. Así como la heurística NSGA II (Deb, *et al.*, 2002) programada en MATLAB para el problema determinístico de red logística directa e inversa de la industria de re-manufactura, descrito en la introducción. Para todas las instancias tanto en Lingo como en la heurística NSGA II se utilizó una máquina con procesador Pentium® Dual-Core CPU. [T4300@2.10GHz](#).

5.5.1 Instancia 01.

La instancia 01 consiste de 2 Fábricas, 2 Centros Potenciales de Distribución (CPD), 3 Clientes, 2 Centros de Devolución, 2 Centros de Eliminación, 2 Centros de Desensamble. Los costos y tiempos de transporte, así como las capacidades de las instalaciones que se muestran a continuación, se calcularon utilizando la sección 5.4. Cabe mencionar que las capacidades de las instalaciones han sido aumentadas para darle más holgura a la solución del problema.

Demanda total: 783

	Costos de transportación	Tiempos de transportación	Canales de envío
Mínimo	10	1	2
Máximo	700	10	2

Tabla 5.5.1. Cotas para los costos y tiempos de transportación, y el número de canales de envío, para la instancia 01.
Fuente: elaboración propia.

PRIMER ESCALON:

Capacidad de la Fabrica 1: 694

Capacidad de la Fabrica 2: 875

	CPD 1		CPD 2	
	Tiempo	Costo	Tiempo	Costo

Fábrica 1	7	244	9	92
	3	548	8	168
Fábrica 2	4	472	2	624
	2	624	1	700

Tabla 5.5.2 Tiempos y costos de transportación de las Fábricas a los Centros Potenciales de Distribución, para la instancia 01. Fuente: elaboración propia.

SEGUNDO ESCALON:

Capacidad del Cpd 1: 708

Capacidad del Cpd 2: 754

La demanda del cliente 1 es 374, demanda del cliente 2 es 199, demanda del cliente 3 es 210.

	Cliente 1		Cliente 2		Cliente 3	
	Tiempo	Costo	Tiempo	Costo	Tiempo	Costo
CPD 1	4	472	6	320	6	320
	7	244	8	168	3	548
CPD 2	8	168	2	624	2	624
	3	548	7	244	8	168

Tabla 5.5.3 Tiempos y costos de transportación de los Centros Potenciales de Distribución a los Clientes, para la instancia 01. Fuente: elaboración propia.

TERCER ESCALON:

Capacidad del Centro de Devolución 1: 398

Capacidad del Centro de Devolución 2: 393

	C. Devo 1		C. Devo 2	
	Tiempo	Costo	Tiempo	Costo
Cliente 1	7	244	2	624
	1	700	9	92
Cliente 2	2	624	1	700
	9	92	6	320
Cliente 3	3	548	6	320

	4	472	5	396
--	---	-----	---	-----

Tabla 5.5.4 Tiempos y costos de transportación de los Clientes a los Centros de Devolución, para la instancia 01. Fuente: elaboración propia

CUARTO ESCALON:

Capacidades del Centro de Desensamble 1: 342

Capacidades del Centro de Desensamble 2: 333

	C. Desen 1		C. Desen 2	
	Tiempo	Costo	Tiempo	Costo
C. Devo 1	4	472	6	320
	8	168	3	548
C. Devo 2	9	92	8	168
	2	624	1	700

Tabla 5.5.5 Tiempos y costos de transportación de los Centros de Devolución a los Centros de Desensamble, para la instancia 01. Fuente: Elaboración propia.

QUINTO ESCALON:

Capacidad del Centro de Eliminación 1: 377.

Capacidad del Centro de Eliminación 2: 371.

	C. Elim 1		C. Elim 2	
	Tiempo	Costo	Tiempo	Costo
C. Devo 1	4	472	3	548
	6	320	5	396
C. Devo 2	1	700	7	244
	6	320	1	700

Tabla 5.5.6 Tiempos y costos de transportación de los Centros de Devolución a los Centros de Eliminación, para la instancia 01.

SEXTO ESCALON:

Capacidad de devolución de la Fabrica 1: 339.

Capacidad de devolución de la Fabrica 2: 346.

	Fábrica 1		Fábrica 2	
	Tiempo	Costo	Tiempo	Costo
C. Devo 1	1	700	2	624
	3	548	6	320
C.Devo 2	5	396	3	548
	2	624	6	320

Tabla 5.5.7 Tiempos y costos de transportación de los Centros de Devolución a las Fábricas, para la instancia 01.Fuente: elaboración propia.

SEPTIMO ESCALON:

Capacidades del Centro de Desensamble 1: 342.

Capacidades del Centro de Desensamble 2: 333.

	C. Elim 1		C. Elim 2	
	Tiempo	Costo	Tiempo	Costo
C. Desen 1	7	244	4	472
	6	320	7	244
C.Desen 2	2	624	2	624
	4	472	5	392

Tabla 5.5.8 Tiempos y costos de transportación de los Centros de Desensamble a los Centros de Eliminación, para la instancia 01.

OCTAVO ESCALON:

	Fábrica 1		Fábrica 2	
	Tiempo	Costo	Tiempo	Costo
C. Desen 1	2	624	1	700
	7	244	4	472
C.Desen 2	4	472	7	244
	9	92	1	700

Tabla 5.5.9 Tiempos y costos de transportación de los Centros de Desensamble a las Fábricas, para la instancia 01. Fuente: elaboración propia.

Para calcular los costos de apertura de cada uno de los centros potenciales de distribución, centros de devolución, centros de desensamble y centros de eliminación se han considerado todos los costos que intervienen en cada uno de

ellos (costos entrantes y salientes) multiplicados por un factor de 50. Como se muestra en la Tabla 5.5.10.

	Costos entrantes	Costos salientes	Total	50* total
CPD 1	1888	2070	3958	197900
CPD 2	1584	2376	3960	198000
C.Devo 1	2680	5436	8116	405800
C.Devo 2	2452	5436	7888	394400
C. Desen 1	1356	3320	4676	233800
C.Desen 2	1736	3620	5356	267800
C. Elim 1	3472	0	3472	173600
C. Elim 2	3620	0	3620	181000

Tabla 5.5.10 Costos de apertura de los CPD's, Centros de Devolución y Centros de Desensamble, para la instancia 01. Fuente: elaboración propia.

La tabla 5.5.11 muestra el tipo de instancias que se utilizaron en el presente trabajo y fueron diseñadas como se menciona en la sección 5.4.

Instancia	Tipo de Instalaciones	Demanda
02	2 fábricas, 3 CPD's, 5 clientes, 3 Centros de Devolución, 2 Centros de Eliminación y 2 Centros de Desensamble.	3424
03	3 fábricas, 4 CPD's, 9 clientes, 4 Centros de Devolución, 2 Centros de Eliminación y 2 Centros de Desensamble.	10890
04	3 fábricas, 3 CPD's, 6 clientes, 3 Centros de Devolución, 2 Centros de Eliminación y 2 Centros de Desensamble.	10500

Tabla 5.5.11 Tipos de instancias utilizadas para validar el modelo. Fuente: elaboración propia.

5.6 Resultados.

En esta sección primero mostraremos los resultados para la instancia 01 que se obtuvieron con el método ϵ -constraint (Coello C, Lamont G. y Veldhuizen D., 2007) programado en Lingo versión 10 y con la heurística NSGA II (Deb, *et al.*, 2002), programada en MATLAB, después comentaremos los resultados que se obtienen para las instancias 02, 03, 04 con Lingo 10.

Los resultados que se obtuvieron con Lingo versión 10, para la instancia 01, son los siguientes: Tiempo ejecución = 9 seg., con Épsilon = 265. No. Total de variables = 155, total de variables enteras=132, No. ceros = 963, No. Restricciones = 225, memoria usada: 135K, No. Iteraciones = 45640. Objetivo 1, costos= 1528972, Objetivo 2, tiempos = 100.

En la figura 5.6.1, se muestra una de las soluciones de la instancia 01.

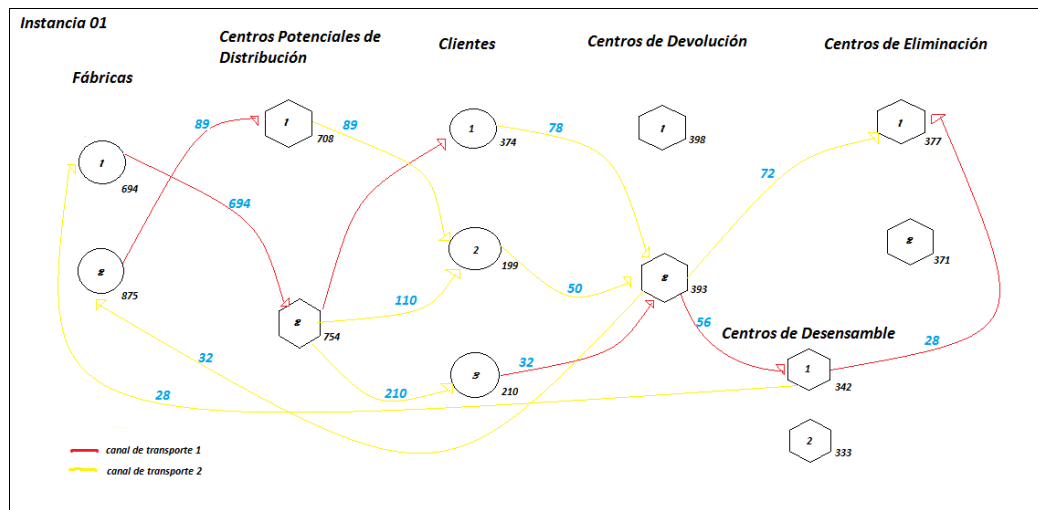


Figura 5.6.1 Una solución gráfica de la instancia 01, utilizando Lingo 10. Fuente: elaboración propia.

Utilizando diferentes tamaños de Épsilon en la instancia 01 con Lingo 10, se tiene la siguiente tabla.

Tiempo ejecución	Objetivo 1 costos	Objetivo 2 tiempos	Épsilon	Centros Abiertos
8 seg.	1528972	100	215	Cpd1, Cpd2, Devo2, Elim1, Desen 1
6 seg.	1528972	100	205	Cpd1, Cpd2, Devo2, Elim1, Desen 1
7 seg.	1528972	100	165	Cpd1, Cpd2, Devo2, Elim1, Desen 1
6 seg.	1528972	100	150	Cpd1, Cpd2, Devo2, Elim1, Desen 1
8 seg.	1528972	100	115	Cpd1, Cpd2, Devo2, Elim1, Desen 1
10 seg.	1528972	100	100	Cpd1, Cpd2, Devo2, Elim1, Desen 1
32 min, 58 seg.	1592004	80	80	Cpd1, Cpd2, Devo2, Elim2, Desen 1
18 min, 45 seg.	1663188	65	65	Cpd1, Cpd2, Devo2, Elim2, Desen 1
5 min, 28 seg.	1783448	50	50	Cpd1, Cpd2, Devo2, Elim2, Desen 1
1 min, 09 seg.	1957184	40	40	Cpd1, Cpd2, Devo2, Elim2, Desen 1
45 seg.	2289608	30	30	Cpd1, Cpd2, Devo2, Elim2, Desen 1
1 seg.	infactible		20	

Tabla 5.6.1 Óptimos de Pareto para la instancia 01 con Lingo 10. Fuente: elaboración propia.

Entonces los puntos óptimos de Pareto con Lingo 10 para la instancia 01, con diferente tamaño de paso están representados en la siguiente figura.

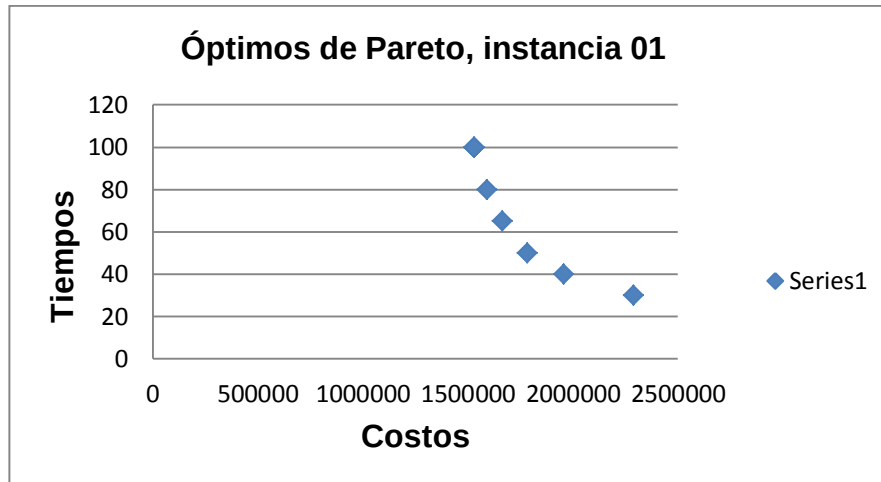


Figura 5.6.2 Óptimos de Pareto para la instancia 01, con Lingo versión 10. Fuente: elaboración propia.

Observe que a medida que la función objetivo tiempo disminuye, la función costo aumenta.

Ahora mostraremos los resultados para la instancia 01 que se obtuvieron con la heurística NSGA II.

Utilizando NGPM- A NSGA II. Program in Matlab, versión 1.4, en la instancia 01, y considerando que las variables son acotadas con respecto a la capacidad de sus instalaciones correspondientes, es decir, las variables $X_{facpd_{ijl}}$ son acotadas por las capacidades de las fábricas, las variables $X_{cpdk_{ijl}}$ son acotadas por las capacidades de los centros potenciales de distribución, etc. Se tiene la siguiente información:

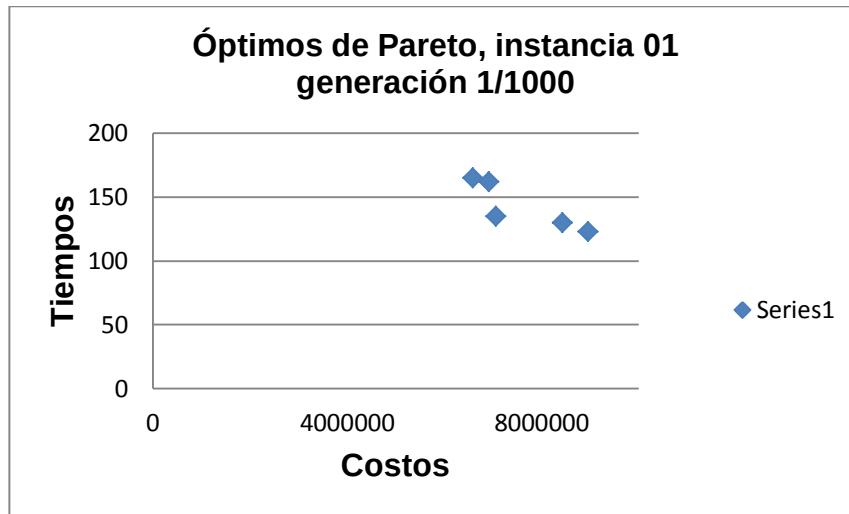


Figura 5.6.3 Óptimos de Pareto para la instancia 01, con NSGA II, generación 1 de 1000 y 50 individuos.
Fuente: elaboración propia.

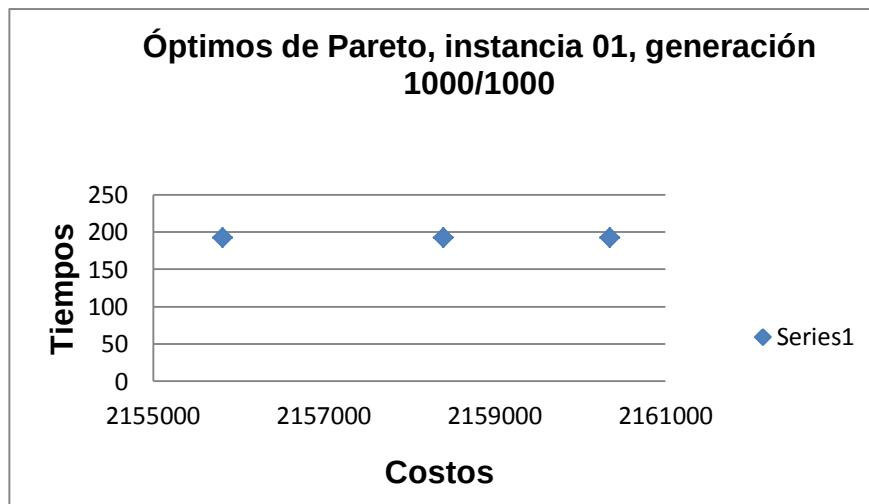


Figura 5.6.4 Óptimos de Pareto para la instancia 01, con NSGA II, generación 1000 de 1000 y 50 individuos.
Fuente: elaboración propia.

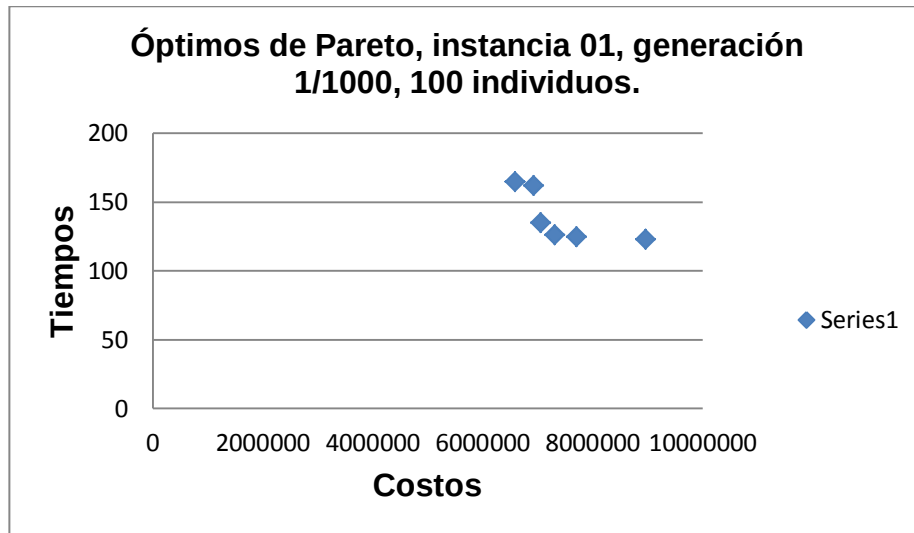


Figura 5.6.5 Óptimos de Pareto para la instancia 01, con NSGA II, generación 1 de 1000 y 100 individuos. Fuente: elaboración propia.

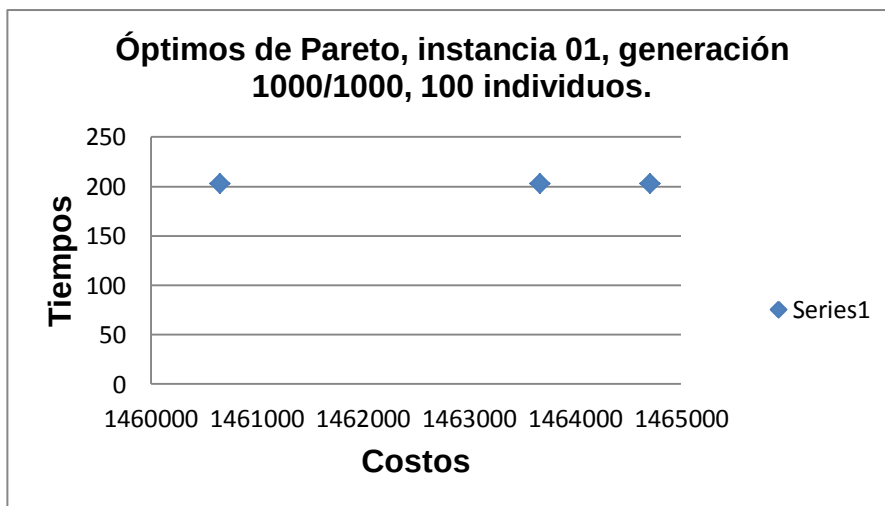


Figura 5.6.6 Óptimos de Pareto para la instancia 01, con NSGA II, generación 1000 de 1000 y 100 individuos. Fuente: elaboración propia.

En una segunda corrida de la heurística NSGA II, se inicia con la última generación de una primera corrida.

En las figuras 5.6.7 y 5.6.8, en una segunda corrida con la heurística NSGA II, la población inicial es la generación 10000 de 10000 generaciones, con una población de 50 individuos, cada una, y se muestran sus respectivos óptimos de Pareto.

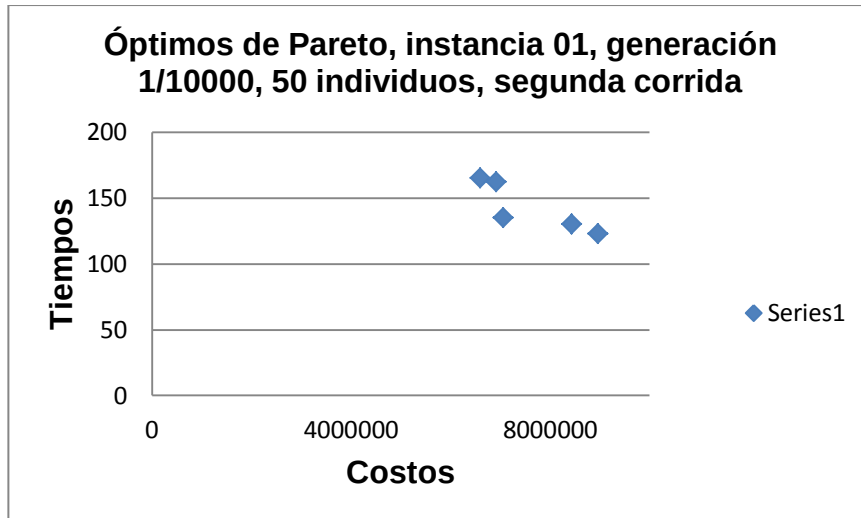


Figura 5.6.7 Óptimos de Pareto para la instancia 01, con NSGA II, generación 1 de 10000 y 50 individuos, segunda corrida. Fuente: elaboración propia.

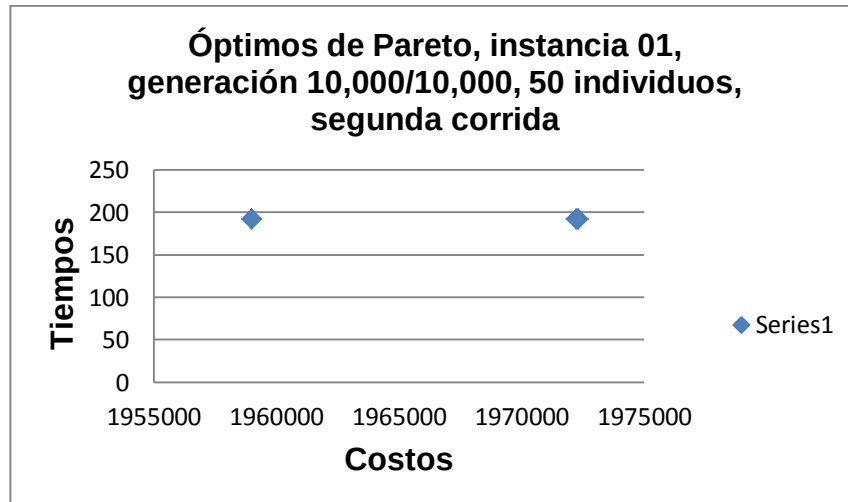


Figura 5.6.8 Óptimos de Pareto, para la instancia 01, generación 10000 de 10000, con una población de 50 individuos, segunda corrida. Fuente: elaboración propia.

Para evaluar el desempeño de Lingo versión 10 y la heurística NSGA II, en el problema de diseño de red de logística directa e inversa que proponemos usamos la medida de desempeño citada por Altıparmak & et. al. (2006), que se calcula como sigue:

Sean P_1 y P_2 los conjuntos de soluciones óptimas de Pareto obtenidas por Lingo 10 y la heurística NSGA II, respectivamente, y sea P la unión de los conjuntos de soluciones óptimas de Pareto (i.e. $P = P_1 \cup P_2$), este incluye solamente soluciones no-dominadas. La tasa de soluciones óptimas de Pareto en P_1 que son no-dominadas, por cualquier otra solución en P , es calculada por la siguiente ecuación:

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

Donde $Y < X$, significa que las soluciones X dominadas por la solución Y en P , son eliminadas del conjunto solución P_i . La más alta tasa $R_{pos}(P_i)$ indica el mejor conjunto solución P_i .

Denotemos al conjunto de óptimos de Pareto obtenido con Lingo, versión 10 como *OPlingo* y a la triada (α, β, γ) como el conjunto de óptimos de Pareto obtenido con NSGA II, de tal manera que α denota la α –ésima generación de un total de β generaciones y con una población de γ individuos.

Entonces la Tabla 5.6.2 muestra algunos $R_{pos}(P_i)$, calculados para comparar *OPlingo* contra cada (α, β, γ) .

		$R_{pos}((\alpha, \beta, \gamma))$					
	<i>OPlingo</i>	(1,1000,50) 1ª. Corrida	(1000,1000,50) 1ª. Corrida	(1,1000,50) 2ª. Corrida	(1000,1000,50) 2ª. Corrida	(1,1000,100) 1ª. Corrida	(1000,1000,100) 1ª. Corrida
Instancia 01	1	0	0	0	0	0	0

Tabla 5.6.2 Valores de $R_{pos}((\alpha, \beta, \gamma))$ para la instancia 01. Fuente: elaboración propia.

Esto indica que las soluciones obtenidas con Lingo 10, son mejores que las que se obtienen por la heurística NSGA II.

Las Tablas 5.6.3, 5.6.4, 5.6.5, presentan los resultados de las instancias 02, 03 y 04 con Lingo 10.

Instancia 02	
Tiempo ejecución	23 segundos
Épsilon	1433
Demanda total	3424
Total de variables	261
Variables enteras	134
Restricciones	368
Memoria usada	212 k
Objetivo 1: costos	13946550

Objetivo 2: tiempos	302
	Solución entera

Tabla 5.6.3. Resultados de la instancia 02 con Lingo, versión 10. Fuente: elaboración propia.

Para esta misma instancia, con Épsilon = 200, se obtienen: Objetivo 1 costos = 16608360, Objetivo 2 tiempos = 200, con un tiempo de ejecución de 38 horas., 44 min., 05 segundos.

Para la instancia 03. A las 51 horas. de haber iniciado su ejecución se interrumpe su corrida en lingo, Se tienen los siguientes resultados.

Instancia 03	
Tiempo ejecución	Más de 51 horas
Épsilon	1971
Demanda total	10890
Total de variables	532
Variables enteras	404
Restricciones	690
Memoria usada	347 k
Bets obj =	115098000
Obj bound =	115094000
Objetivo 2: tiempos	489
	Solución entera

Tabla 5.6.4. Resultados de la instancia 03 con Lingo, versión 10. Fuente: elaboración propia

Para la instancia 04, el tiempo de ejecución se interrumpió a las 24 horas. con la condición de que las variables involucradas en el flujo inverso sean enteras, y Épsilon = 2237. Se obtuvo lo siguiente: Objetivo 1 costos = 119044900, Objetivo 2 tiempos = 842.

Instancia 04	
Tiempo ejecución	Más de 24 horas
Épsilon	2237
Demanda total	10500
Objetivo 1: costos=	119044900
Objetivo 2: tiempos	842
	Solución entera

Tabla 5.6.5. Resultados de la instancia 04 con Lingo, versión 10. Fuente: elaboración propia.

5.7 Conclusiones.

Se Diseñó un modelo de programación lineal entero-mixto que describe la problemática de la red logística directa e inversa de re-manufactura de ocho escalones para minimizar el costo y tiempo total de envíos directos y reversos, considerando la apertura de centros potenciales de distribución, centros de devoluciones, centros de desensamble y centros de eliminación, considerando el envío gradual de multi-productos por al menos dos canales diferentes de transporte disponibles para cada par de instalaciones entre los escalones. Se diseñaron diferentes instancias para validar el modelo. Se utilizó el método ϵ -constraint implementado en el software de optimización LINGO versión 10. Se adaptó la heurística NSGA II implementada en MATLAB al problema propuesto. Por simplicidad solo se ha considerado en las pruebas del modelo el envío de un solo producto. De los resultados obtenidos se concluye que en Lingo 10 se pueden resolver instancias pequeñas, donde tanto el número de instalaciones como el número de clientes no es mas de 5, para problemas más grandes digamos donde le número de clientes es mas de 6, las ejecuciones tardan mas de 51 hrs., pero se tienen soluciones factibles enteras, sin embargo con la heurística NSGA II, el tiempo de ejecución es de 30 minutos con 1000 generaciones y 50 individuos, para 10000 generaciones y 50 individuos el tiempo de ejecución es de 3 hrs., aproximadamente, aun así no se pudieron encontrar soluciones factibles con esta última heurística.

Como trabajo futuro, se tiene el seguir probando con diferentes tamaños de poblaciones y generaciones la heurística NSGA II programada en MATLAB, o bien buscar otras heurísticas que den soluciones factibles para el problema propuesto. Validar el modelo con el envío de múltiples productos, así como el envío de unidades por más de dos canales de transporte.

5.8 Referencias.

Altıparmak F., et. al. (2006). *A genetic algorithm approach for multi-objective optimization of supply chain networks*. Computer & Industrial Engineer 51 (2006) 197-216. ELSEVIER.

Coello C., Lamont G, Veldhuizen D. (2007). Libro: *Evolutionary algorithms for solving multi-objective problems*. 2ad. Edition. Springer.

Cruz & Ertel. (2009). *Reverse logistics network design for the collection of End-of-Life Vehicles in Mexico*. European Journal of Operational Research 196- 930–939. ELSEVIER.

Fleischmann M., et al. (1997). *Quantitative models for reverse logistics: A review*. European Journal of Operational Research 103. 1-17.

Jeong-Eun Lee, Mitsuo Gen & Kyong-Gu Rhee. (2009). *Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm*. Computers & Industrial Engineering 56 (2009) 951–964. ELSEVIER.

Kalyanmoy Deb, *et al.* (2002). *A Fast and Elitist Multiobjective Genetic Algorithm: NSGA-II*. IEEE Transactions on Evolutionary Computation, vol. 6, no. 2,

NGPM-A NSGA-II. Program in Matlab, Versión 1.4. (2007). LIN Song .Aerospace Structural Dynamics Research Laboratory College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, China. Email: lsesswc@163.com

Thierry, M.C. (1997). *An Analysis of the Impact of Product Recovery Management on Manufacturing Companies*. Ph.D. Thesis, Erasmus University Rotterdam, The Netherlands.

Zhiqiang Lua & Nathalie Bostel. (2007). *A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities*. Computers & Operations Research 34 (2007) 299–323. ELSEVIER.

Capítulo 6

Trabajo futuro y conclusiones finales.

6.1 Trabajo futuro. Las investigaciones futuras que proponemos son las siguientes :

- Considerar una versión de software profesional que resuelva problemas multi-objetivo.
- Analizar otras heurísticas para encontrar óptimos de Pareto del problema propuesto.
- Probar un algoritmo propio basado en la solución del problema de transporte con un Algoritmo Genético.
- Considerara el problema de diseño de red de Logística Inversa con ocho escalones para un ambiente de manufactura, considerando la decisión de seleccionar más de dos canales de transporte entre cada par de instalaciones y el envío de multi-productos, así como considerar el caso estocástico.
- Considerar en el modelo restricciones de capacidad de envío entre cada par de instalaciones entre los diferentes escalones.

6.2 Conclusiones finales.

Aunque los consultores y expertos de Logística Inversa no hablan de un número preciso de compañías que la estén implementando en México – pues es considerada en el país como algo nuevo-, coinciden en que, sobre todo en estos tiempos de crisis, ha habido un incremento en la preocupación de las empresas por aprovechar al máximo las ventajas de la logística inversa incrementando hasta en un 5% sus utilidades y así conservan y ganan clientes lo que sin duda las hace más competitivas.

La puesta en práctica de la logística inversa especialmente en devoluciones del producto busca no sólo los ahorros en costo de inventario, en costo del transporte, en costo de eliminación debido a los productos vueltos, sino también la mejora de la lealtad del cliente y de las ventas futuras en una firma.

Se ha propuesto un modelo matemático Bi-objetivo de logística directa e inversa en un ámbito de la industria de re-manufactura de ocho escalones, donde se analiza la apertura de centros potenciales de distribución, centros de devolución, centros de eliminación y centros de desensamble, considerando el envío gradual de diferentes productos por canales diferentes de transporte disponibles para cada par de instalaciones entre los escalones y teniendo como objetivos la minimización de costos y tiempos de transporte. El problema es modelado como uno de optimización Bi-objetivo, Se utilizó el método ε – *Constraint* y la heurística NSGA II en diferentes instancias para mostrar resultados.

Por simplicidad solo se ha considerado en las pruebas del modelo el envío de un solo producto. De los resultados obtenidos se concluye que en Lingo 10 se pueden resolver instancias pequeñas, donde tanto el número de instalaciones como el número de clientes no es mas de 5, para problemas más grandes digamos donde le número de clientes es mas de 6, las ejecuciones tardan mas de 51 horas., pero se obtienen soluciones factibles enteras, sin embargo con la heurística NSGA II, el tiempo de ejecución es de 20 minutos para por lo menos 1000 generaciones con una población de 50 individuos, para 10000 generaciones y una población de 50 individuos el tiempo de ejecución es de 3 horas., aproximadamente, no se encontraron soluciones factibles con esta heurística.

En el capítulo 3 se analizo la problemática de diseño de red logística inversa con solo 3 escalones, en le capítulo 4 se analizó la problemática de red logística directa e inversa con ocho escalones y en el capítulo 5 se diseñaron instancias para validar el modelo con Lingo 10 y con la heurística NSGA II.

El trabajo de investigación de tesis se ha presentado en:

- The 15th Annual International Conference on Industrial Engineering Theory, Applications & Practice. October 17- 20, 2010. México City, México. Y se puede encontrar en las memorias de mencionado evento con ISBN#97809652558-6-8.
-
- En el 4° Coloquio Interdisciplinario de Doctorado, 2011. UPAEP. Y se puede encontrar en las memorias de mencionado evento con ISBN: 978-607-8093-11-3.
-
- En el Taller de Modelación Matemática y Computacional realizado en La XXI ENOAN 2011. Cuernavaca, Morelos, México.
-
- En el VIII Seminario de Matemáticas Aplicadas. Universidad Autónoma de Tlaxcala. Agosto 2011. Apizaco Tlaxcala.

REFERENCIAS.

Carranza O., Sabría F. (2008). *Logística. Mejores prácticas en Latinoamérica*. México, Thomson Learning. Industria farmacéutica. Nuevas plantas e inversiones. Quiminet. CEDIFA & OFSA. España.

García A. (2006). *Implementar un programa de logística inversa*. Ed. Eumed.net <http://www.eumed.net/libros/2006a/aago/1a.htm>.

Carmona G. (2007). *Manufactura. Distribución: En buenas manos* <http://www.cnnexpansion.com/manufactura/operacion-de-la-planta/2007/01/01/distribucion-en-buenas-manos>

Fernández I., García N. (2007). *Efectos de la implicación en actividades de recuperación de valor sobre la función de aprovisionamientos*. Asociación Científica de Economía y Dirección de Empresas (ACEDE).ISSN (versión impresa):1138-5758. Madrid España.

Fleischmann M., et al., (1997). *Quantitative models for reverse logistics: A review*. European Journal of Operational Research 103. 1-17.

Hokey Min, Hyun-Jeung Ko, (2007). *The dynamic design of a reverse logistics network from the perspective of third-party logistics service providers*. International Journal of Production Economics.Int. J. Production Economics 113 (2008) 176–192. ELSEVIER

Jeong-Eun Lee, Mitsuo Gen & Kyong-Gu Rhee (2009). *Network model and optimization of reverse logistics by hybrid genetic algorithm*. Computers & Industrial Engineering 56 (2009) 951–964.ELSEVIER

Kwok Hung Lau, Yiming Wang (2009). *Reverse logistics in the electronic industry of China: a case study*. El número actual de texto completo de esta revista está disponible en www.emeraldinsight.com/1359-8546.htm Supply Chain Management: An International Journal 14/6 (2009) 447-465. @ Emerald Group Publishing Limited [ISSN 1359-8546] [DOI10.1108/13598540910995228].

NGPM-A NSGA-II. Program in Matlab, Versión 1.4, (2007). LIN Song .Aerospace Structural Dynamics Research Laboratory College of Astronautics, Northwestern Polytechnical University, China. Email: lssswc@163.com

Martínez J. (2007). *El reciclaje. La forma más fácil de mantener nuestro planeta vivo*. GestioPolis.com

Meeker L., et al., (2006). *Lo imprescindible del Reciclaje*. National Renderers Association. Kirby Lithographic Company. ISBN: 0-9654660-3-5, pag. 17 Inc. Arlington, Virginia, EUA.

Ortíz S., (2009). *Logística inversa: al revés no es igual*

<http://www.cnnexpansion.com/manufactura/2009/05/06/logistica-inversa-al-reves-no-es-igual>

Rommert Dekker. (2010). *Mesa Redonda en Logística Inversa en Europa y América.*

2010.<http://www.programaempresa.com/empresa/empresa.nsf/paginas/172A45A2031C6567C1257066003075AD?OpenDocument>.

Rubio S., Chamorro A., Miranda F., (2006). *Characteristics of the Research on Reverse Logistics (1995-2005)*. International Journal of Production Research. ID: TPRS-2006-IJPR-0357.R1.

Ronald S. Tibben-Lembke, Dale S. Rogers, (2002) *"Differences between forward and reverse logistics in a retail environment"*, Supply Chain Management: An International Journal, Vol. 7 Iss: 5, pp.271 – 282

Thierry, M.C., (1997). *An Analysis of the Impact of Product Recovery Management on Manufacturing Companies*. Ph.D. Thesis, Erasmus University Rotterdam, The Netherlands.

Zhou Yongsheng & Wang Shouyang (2008). *Generic Model of Reverse Logistics Network Design*. *Journal of transportation systems engineering and information technology*. Volume 8, Issue 3, June 2008. Online English edition of the Chinese language journal. ScienceDirect.

Zhiqiang Lua & Nathalie Bostelb. (2007). *A facility location model for logistics systems including reverse flows: The case of remanufacturing activities*. Computers & Operations Research 34 (2007) 299–323. ELSEVIER.