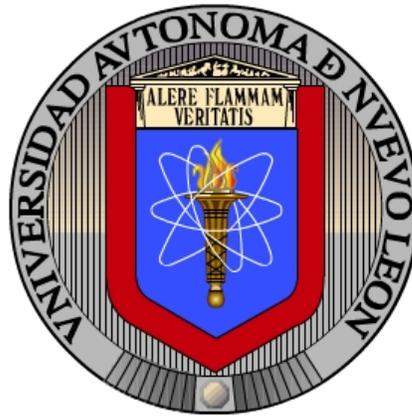


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



DISEÑO DETERMINISTA DE UNA RED DE
LOGÍSTICA INVERSA MULTIPERIODO

POR

BRUNO RODRIGO FUENTES LÓPEZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

MAYO 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



DISEÑO DETERMINISTA DE UNA RED DE
LOGÍSTICA INVERSA MULTIPERIODO

POR

BRUNO RODRIGO FUENTES LÓPEZ

EN OPCIÓN AL GRADO DE

MAESTRÍA EN CIENCIAS

EN INGENIERÍA DE SISTEMAS

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN

MAYO 2011

Universidad Autónoma de Nuevo León
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica
División de Estudios de Posgrado

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis «Diseño de-terminista de una red de logística inversa multiperiodo», realizada por el alumno Bruno Rodrigo Fuentes López, con número de matrícula 1210651, sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas.

El Comité de Tesis

Dr. Igor Litvinchev

Asesor

Dra. Ada M. Alvarez Socarrás

Revisor

Dra. Gabriela García Ayala

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Moisés Hinojosa Rivera

División de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Mayo 2011

Dedicado a

A mi hija Kassandra Ivonne Fuentes Lozano que es la mas grande razón de mi vida, para que esto la motive a nunca conformarse, a siempre buscar más, no para ser la mejor, sino para sentirse satisfecha con ella misma.

A mi esposa Carolina Lozano Banda, que además de ser m esposa también es mi amiga y mi compañera, sin duda el amor de mi vida.

A mis padres, María de Lourdes López Jimnez y Ricardo Nicolás Fuentes Gutiérrez, por creer en mí en todo momento y por haberme dado todo lo que necesité.

A mis hermanos, Ricardo Baruch Fuentes López y Brando Roberto Fuentes López, por escucharme y apoyarme en todo momento.

*A mi familia en general, por el cario y atención que siempre me han mostrado.
Por ustedes y para todos ustedes es este trabajo.*

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	XI
1. Introducción	1
1.1. Antecedentes	2
1.2. WEEE en México	3
1.3. Acopio y Reciclaje de WEEE en México	5
1.4. Objetivo	7
1.5. Hipótesis	7
1.6. Justificación	8
1.7. Contribución Esperada	8
1.8. Metodología	9
1.9. Diagrama General de Nuestro Problema	9
1.10. Estructura de la Tesis	9
2. Diseño de una Red de Logística Inversa	11
2.1. Principales Características de las Redes LI	11
2.2. Repaso de la Literatura	17

3. Planteamiento y Formulación del Problema	25
3.1. Planteamiento del Problema	25
3.1.1. Características del Modelo	26
3.1.2. Consideraciones del Modelo	27
3.2. Formulación Matemática del Modelo	28
3.2.1. Variables y Parámetros	28
3.2.2. Modelo Matemático	30
4. Metodología de Solución	32
4.1. Linealizando el Modelo	33
4.1.1. Búsqueda de la Sección Dorada	33
4.2. Descomposición de Benders	33
4.2.1. Subproblema de Benders	34
5. Resultados Computacionales	37
5.1. Método de Generación de Instancias.	37
5.1.1. Tamaño de Instancias	38
5.1.2. Asignación de Valores a los Parámetros	39
5.2. Comparación del Desempeño de los Métodos de Solución.	40
5.3. Mejorando Nuestro Método de Solución	41
5.4. Método Alternativo de Generación de Instancias.	48
6. Conclusiones y Trabajo Futuro	52

6.1. Conclusiones	52
6.2. Áreas de oportunidad	54
A. Apéndice	56

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Acopio y Reciclaje de WEEE.	4
1.2. Panorama general de nuestra red de logística inversa.	10
2.1. Flujo de retorno en diferentes puntos de la cadena de suministros. . .	14
5.1. Gráfico comparativo del comportamiento del tiempo contra el tamaño de instancia para los métodos de solución propuestos.	42
5.2. Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para instancias pequeñas.	45
5.3. Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para instancias medianas.	45
5.4. Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para instancias grandes.	46
5.5. Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para instancias pequeñas con GAP relativo al 30%.	47
5.6. Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para instancias medianas con GAP relativo al 30%.	47

5.7. Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para instancias grandes con GAP relativo al 30%.	48
5.8. Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para las nuevas instancias pequeñas con GAP relativo al 0%.	50
5.9. Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para las nuevas instancias medianas con GAP relativo al 0%.	50
5.10. Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para las nuevas instancias grandes con GAP relativo al 0%.	51

ÍNDICE DE TABLAS

5.1. Tabla de clasificación de tamaños de instancias.	39
5.2. Tabla comparativa de desempeño de métodos de solución para instancias pequeñas.	40
5.3. Tabla comparativa de desempeño de métodos de solución para instancias medianas y grandes.	41
5.4. Tabla de porcentajes del tiempo promedio de solución al variar el GAP relativo.	43
5.5. Tabla de porcentajes de la desviación promedio del valor objetivo al variar el GAP relativo.	43
5.6. Tabla de porcentajes de la desviación promedio del valor de L al variar el GAP relativo.	44

AGRADECIMIENTOS

A mi asesor: Dr. Igor Litvinchev por el apoyo y la atención que presto a mi situación.

A mis revisores: Dra. Ada M. Alvarez Socarrás y Dra. Gabriela García Ayala por sus comentarios, retroalimentación y compromiso con este trabajo.

Al CONACYT, FIME y UANL por el apoyo brindado, el cual me permitió cursar este Posgrado.

A los Doctores de PISIS por compartirme sus conocimientos y experiencias.

A las 6 maravillas del PISIS restantes: Minería, Alondriga, Angeliux, Jadeosa, Olivec-tor y Leo Infecciones.

A mis demás compañeros y amigos que tuve la oportunidad de conocer durante el Posgrado.

A todos ustedes...

Gracias.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En la última década, los gobiernos de distintos países, principalmente de la unión europea, han creado e implementado políticas ambientales con el fin de reducir las cantidades de desechos de cualquier tipo, con el fin de reducir los daños causados por éstos al medio ambiente. En el caso específico de los desechos de equipos eléctricos y electrónicos (WEEE por sus siglas en inglés) existe una gran preocupación debido a que este tipo de dispositivos tienen ciclos de vida útil muy cortos y generalmente contienen componentes nocivos para el medio ambiente.

En diversos países se han puesto en marcha regulaciones o políticas para la reducción de los WEEE. Este trabajo se basa en una política gubernamental que se implementó en los países de la Unión Europea. Dicha política hace responsables a los productores de dispositivos eléctricos y electrónicos del manejo de estos una vez que llegan al final de su vida útil. Entonces, los productores se ven obligados a efectuar actividades de logística inversa para recolectar dichos artículos. Esto beneficia en gran medida al medio ambiente, pero no es el único beneficio, ya que al recolectar los productos, los productores tienen la ventaja de reutilizar partes de estos productos para la fabricación de nuevos, contribuyendo a disminuir su costo de producción.

En esta tesis, nos enfocamos en un problema de diseño de logística inversa en múltiples periodos. El principal objetivo es localizar centros de distribución, centros de inspección y plantas remanufacturadoras, determinando el precio de adquisición de productos recolectados para su remanufactura, determinando el precio de adquisición y la cantidad de productos recolectados, dependiendo esto de la ganancia por

unidad recuperada y el precio de adquisición de nuestra competencia.

Se decidió extender a múltiples periodos para poder analizar de una forma más real el comportamiento de nuestra cadena de suministros, tomando como un periodo un intervalo fijo de tiempo, ya sea un mes, un bimestre, un semestre, etc. Justificamos esta extensión con el análisis a largo plazo entre los costos de recuperación de un producto, y las ganancias que este producto nos ofrece al ser recuperado para su remanufactura.

La coordinación de los flujos primario (envío) y secundario (retorno) también es tomada en consideración, ya que juega un papel muy importante a la hora de minimizar los costos de transportación, los costos fijos y por ultimo los costos de adquisición de los productos recolectados.

Como resultado de nuestra modelación, formulamos un problema entero-mixto no-lineal, para el cual se sugieren métodos exactos para su solución, ya que cuando el precio de adquisición es fijado en un valor, el problema resultante es entero-mixto pero lineal, el cual podemos resolver por métodos exactos como Ramificación y Acotamiento, Descomposición de Benders, etc.

Para fijar el valor del precio de adquisición que minimice la función de costo de nuestro problema y de esta forma linealizarlo, sugerimos técnicas de parametrización como la Búsqueda de la Sección Dorada o la Búsqueda Binaria.

1.1 ANTECEDENTES

La importancia de la logística inversa (LI) [40] se ha incrementado en las últimas décadas. La reutilización de productos ha traído como consecuencia un flujo de los mismos desde los clientes de vuelta a los fabricantes. El manejo de este flujo inverso opuesto al flujo tradicional, es el principal tema de estudio de la LI. Debido a la poca vida que ha tenido esta actividad, hoy en día aún no existen estimadores del beneficio económico a largo plazo de las actividades de reuso, pero el número de

empresas afiliadas a este sector está creciendo rápidamente debido a la oportunidad de ahorro al reutilizar productos, y a la legislación de responsabilidad extendida del productor que cada vez más países utilizan. Obligaciones de recolección, presión por parte del cliente, y motivación económica han estimulado a muchas compañías a explorar la opción de recuperación de sus productos [45, 42]. Desafortunadamente, a pesar de este crecimiento del mercado de la LI en años recientes, aun no existen suficientes modelos analíticos que proporcionen asistencia en decisiones estratégicas sobre como planear, implementar y administrar una red de LI.

La Unión Europea (UE) tiene dos directivas para lidiar con el rápido incremento en el deshecho de equipo eléctrico y electrónico (WEEE): El primero es el reciclaje de equipos eléctricos y electrónicos caseros (2002/96/EC WEEE). El segundo es acerca de la limitación sobre el uso de algunos materiales peligrosos (2002/95/EC RoHS). La directiva WEEE cubre un amplio rango de productos, como juguetes, equipo de telecomunicaciones, equipo de iluminación, herramientas eléctricas, equipo deportivo, dispositivos médicos, dispositivos de monitoreo y control, etc. La figura 1.1 ejemplifica la recolección y reuso de WEEE.

A escala mundial la cantidad de basura electrónica oscila entre 20 y 50 millones de toneladas, según indica el Programa de Naciones Unidas para el Medio Ambiente [32], cantidad suficiente para cargar un tren que le daría la vuelta al planeta.

1.2 WEEE EN MÉXICO

La generación de basura electrónica alcanza alrededor de 250,000 toneladas por año en nuestro país, de las cuales tan solo el 5 % se recicla [17]. Cerca de 15 toneladas diarias de WEEE se producen en una ciudad con 1 millón de habitantes solamente. Aún no existe una conciencia ecológica en México, por lo que este tipo de desechos se tiran en cualquier basurero o se tratan igual que a la basura tradicional, lo cual daña en gran medida a nuestro medio ambiente.

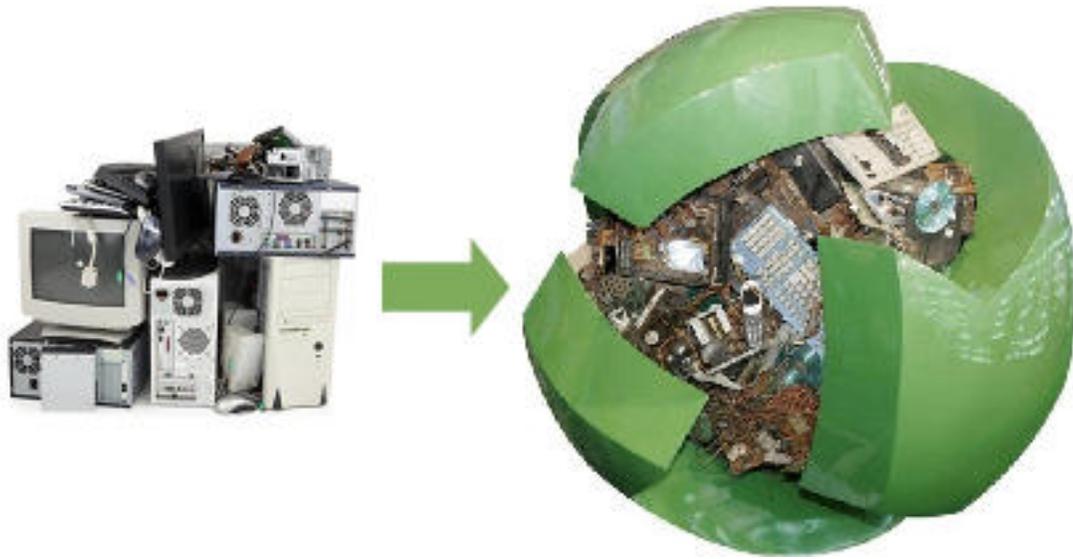


Figura 1.1: Acopio y Reciclaje de WEEE.

El rescate de materiales de esta tecnología, cuando se realiza, se hace de manera inadecuada, lo que ocasiona la liberación de toxinas y metales pesados en el medio ambiente, lo cual provoca contaminación del suelo principalmente. Sin embargo, eso no es todo, ya que los metales pesados contenidos en los equipos electrónicos están asociados a las sustancias reconocidas como cancerígenas, lo cual, asociado con el mal manejo que se les da, propicia daños a la salud de la personas que trabajan con ellos.

Aunque sí existen leyes en materia de reciclaje de equipo de cómputo y electrónicos, México no cuenta actualmente con un programa de regulación de WEEE que lo ayude a ser redituable y seguro. No existen medidas gubernamentales para la regulación de información y manejo de estos desechos. “Tenemos una idea de cuántos equipos se comercializan a escala nacional y cuántos se desechan; pero es fundamental saber que por las condiciones de la economía nacional, estos aparatos tienen una vida útil muy larga”, señala Édgar del Villar, coordinador de asesores de la subsecretaría de Fomento y Normatividad Ambiental.

En junio del 2004 se contempló por primera vez el tema de los residuos electrónicos y de cómputo con la Ley General para la Prevención y Gestión Integral

de los Residuos. En 2006 surge el Reglamento para dicha Ley, la cual especifica y clasifica los residuos tecnológicos.

De acuerdo con el diagnóstico sobre la generación de basura en México elaborado por el Instituto Politécnico Nacional (IPN) y el Instituto Nacional de Ecología, la vida útil de las computadoras es de 5 años; de los televisores 10, celulares 3, reproductores de sonido 6 y teléfonos inalámbricos 6 años. Estos productos electrónicos contienen sustancias y materiales tóxicos como Plomo, Mercurio, Cadmio y Cromo hexavalente, que según el tiempo y cantidad de exposición de una persona pueden ser mortales, además pueden causar daños cerebrales y ocasionar cáncer, mientras que los compuestos orgánicos policromados como bifenilos policlorados y éteres bifenilos polibromados son cancerígenos, bioacumulables y permanecen largos períodos en el medio ambiente.

1.3 ACOPIO Y RECICLAJE DE WEEE EN MÉXICO

En nuestro país las marcas de tecnología no cuentan con programas integrales de acopio-reciclado en gran medida porque no hay tecnología propia para tratamiento de estos residuos. La tecnología extranjera de nivel básico cuesta alrededor de 2 millones de euros y no cubre al 100 % la disposición del material [16]. Algunas plantas recicladoras existentes tan solo extraen el material básico (cobre y aluminio) y desechan el resto de los residuos en los rellenos sanitarios.

El tiempo de vida útil de un equipo computacional es de alrededor de 3 a 5 años. Actualmente existen más de 20 años de inventario de equipos que no se han recolectado. La situación del equipo de cómputo obsoleto es alarmante en México. La mayoría de los fabricantes manejan diferentes estándares regionales. Por ejemplo, HP tiene en Estados Unidos, Europa, China, India y Filipinas, entre otros países, programas de reciclaje de equipo de cómputo que incluso puede ser de cualquier marca, no necesariamente HP. Pero en México sólo tiene un programa de devolución de artículos de impresión y es exclusivo para “clientes de negocios selectos”. Para

recibir y reciclar equipos de cómputo cobran una tarifa, lo cual deja de ser atractivo y conveniente para los clientes finales, quienes a fin de cuentas, son los que tienen el papel más importante en este ciclo. IBM/Lenovo sólo tiene programas de acopio y reciclaje en la Unión Europea, China y otros países, pero no en México. En cambio Dell, ofrece en México reciclado gratuito de todos los productos de su marca. Para participar en este programa basta con llenar una forma en el portal de reciclaje de su sitio web y ellos se encargarán de recoger el equipo. No existen cargos a menos que se cambie por petición la fecha previamente programada para el acopio. Lamentablemente, no es una política abierta que promuevan de forma masiva.

Con respecto a las medidas para la regulación y reglamentación de los desechos electrónicos, el documento del IPN considerará planes de manejo y promoción de lineamientos gubernamentales para la aplicación de programas para las empresas y en las que se trabaje en la elaboración de una norma de manejo. Hasta ahora el IPN ya ha propuesto cinco equipos considerados bajo estudios “peligrosos” para el medio ambiente, pero beneficiosos para el reciclaje por su ciclo de renovación alto tales como refrigeradores, computadoras de escritorio, computadoras portátiles, celulares y teléfonos fijos.

Greenpeace presentó en enero de 2010 la nueva edición de la guía verde de electrónicos, la cual contiene la revisión de las Restricciones de Substancias Peligrosas que realiza la directiva de electrónicos de la Unión Europea, y que apunta que varias compañías redujeron sus marcadores en esta edición en el segmento de sustancias perjudiciales.

En forma paralela, la Cámara Nacional de la Industria Electrónica, de Telecomunicaciones y Tecnologías de la Información de México (CANIETI), ha propuesto un programa nacional que abarca la logística de regulación y manejo de material electrónico desechado, desde cómo recopilar los equipos obsoletos, cómo trasladarlos a plantas de reciclaje y cómo aprovechar los productos que salgan de éstos. Dicho programa fue proporcionado a la Semarnat para su evaluación y su posible tratamiento en las Cámaras de Diputados y Senadores.

Un caso emblemático es el del proyecto EWR-Remsa, firma mexicana que se encarga de reciclar equipos de cómputo a partir de la recolección de donaciones de equipos obsoletos en puntos estratégicos. Este proyecto ofrece la opción de monitorear el estatus de lo que se hará con cada una de las partes que se aprovecharán del equipo reciclado.

Hace falta mucha infraestructura y tecnología propia, hecha en México, que nos ayude a tener programas funcionales para la recolección de los equipos, su tratado, su valoración y lo más importante, su reciclaje.

1.4 OBJETIVO

El objetivo de esta investigación, es determinar la estrategia de recolección de productos usados en un marco de logística inversa. Se ampliará nuestra perspectiva a múltiples periodos para analizar el comportamiento de nuestra cadena de suministros de una forma más real, analizando la relación a largo plazo entre los costos de recuperación de productos y las ganancias o ahorros que estos productos recuperados nos dan al ser remanufacturados en cada periodo para su posterior distribución.

1.5 HIPÓTESIS

Las empresas hoy en día no están dispuestas a invertir tiempo y recursos en actividades que, a su juicio, no traerán ningún beneficio para ellas. Sin embargo, mediante leyes bien desarrolladas, el gobierno no sólo puede orillarlas a implementar estas medidas, sino también motivarlas a hacerlo, dándoles apoyo y soporte sobre cómo diseñar e implementar su red de LI, e incluso ofreciendo algún tipo de incentivo, que les ayude a la adaptación de sus instalaciones para hacer posible la recuperación y remanufactura de productos, promoviendo así la conservación del medio ambiente.

Para lograr lo anteriormente mencionado, es necesario desarrollar y analizar modelos como el que proponemos, ya que uno de los principales factores por los

cuales las grandes empresas no se deciden a recuperar y remanufacturar productos, es porque no existen indicadores a largo plazo de los beneficios que esto puede traer, tanto económicos como ambientales.

1.6 JUSTIFICACIÓN

Hoy en día se necesitan técnicas de investigación que obtengan los mejores resultados de cómo manejar el flujo de productos a través de una cadena de suministros, logrando minimizar los costos de transporte y analizando que tan conveniente es recuperar productos que los clientes ya no quieren o desechan, para utilizar los componentes útiles de estos para la producción de nuevos productos del mismo rubro.

El problema se basa en determinar la ubicación de instalaciones a partir de Fábricas y Zonas de Clientes ya conocidas, de tal forma que se minimice el costo de transporte de nuestros productos, tanto de las Fábricas a los Clientes, como de los Clientes a las Plantas de Remanufactura.

Nos enfocaremos en un problema que las empresas mexicanas deberían de empezar a planificar, ya que se pueden enfrentar a él en un futuro próximo, ya sea por objetivos propios como disminuir costos de producción, o al verse obligadas por nuevas leyes ambientales.

1.7 CONTRIBUCIÓN ESPERADA

Se espera desarrollar una herramienta para la ayuda a la toma de la decisión sobre qué modificaciones serían necesarias y cuánto tendríamos que invertir para ampliar nuestra red de distribución de productos actual a un marco de Logística Inversa, además de poder analizar qué tan conveniente sería realizar estas adaptaciones a mediano y largo plazo.

Sugeriremos una estrategia tanto para la adquisición de productos usados, como

para el diseño de la red de recolección. Desarrollaremos un modelo matemático para dar solución a preguntas tales como “¿Cuánto debo invertir para hacer posible esta técnica en mi empresa?” y “¿Cómo se debe diseñar y aplicar una red de recolección?”. También sugerimos diferentes técnicas de solución y las comparamos en base a su eficiencia y precisión.

1.8 METODOLOGÍA

Estudiar los antecedentes sobre el diseño de redes de logística inversa, así como su motivación en la industria. Extensión de los modelos deterministas convencionales a múltiples períodos para un mejor análisis a mediano y largo plazo, y utilizar técnicas exactas de solución para nuestro modelo que nos permitan brindar conclusiones acertadas sobre nuestro problema.

1.9 DIAGRAMA GENERAL DE NUESTRO PROBLEMA

Es importante mencionar que al ser una cadena de suministros de ciclo cerrado, nuestro problema está compuesto por los flujos de envío y de retorno, considerados simultáneamente al momento de resolver nuestro problema. Pero esta no es la única consideración importante, ya que debemos recordar que estamos manejando múltiples períodos, lo que añade un mayor grado de dificultad a la solución del mismo. La figura 1.2 nos muestra el diseño general de nuestra cadena de suministros de ciclo cerrado.

1.10 ESTRUCTURA DE LA TESIS

La tesis está organizada de la siguiente manera: El segundo capítulo resume las principales características de las redes de LI, e incluye un repaso de la literatura mas relevante. El modelo matemático está formulado en el capítulo 3. La metodología

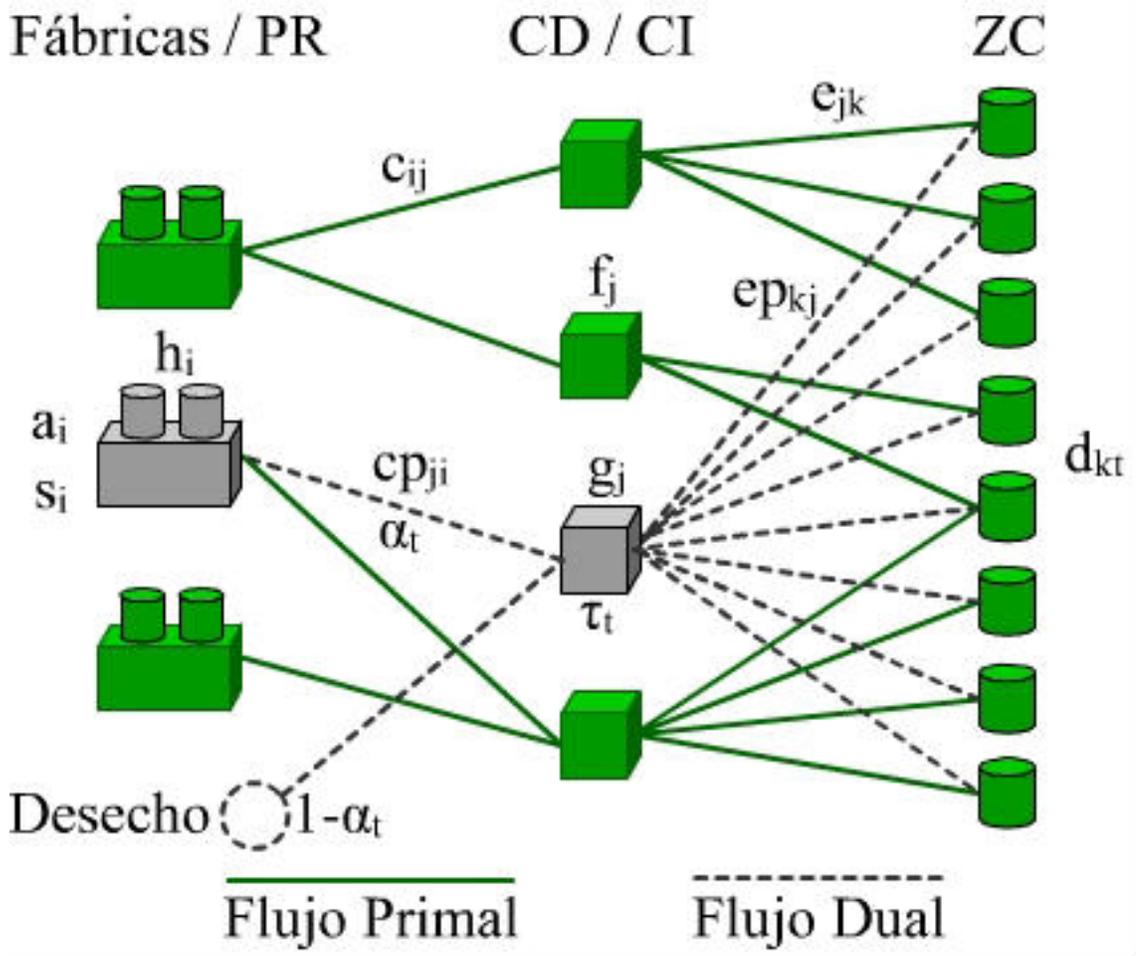


Figura 1.2: Panorama general de nuestra red de logística inversa.

de solución propuesta es explicada en el capítulo 4, al igual que la literatura relacionada con cada técnica. Los resultados obtenidos en instancias generadas por un método aleatorio, son presentados en el capítulo 5. Finalmente, el capítulo 6 contiene conclusiones y sugerencias para investigación futura.

CAPÍTULO 2

DISEÑO DE UNA RED DE LOGÍSTICA INVERSA

2.1 PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LAS REDES LI

Existe una gran variedad de definiciones para LI en la literatura. La primera definición que se conoció fue publicada por The Council of Logistics Management [40] como: “el término comúnmente utilizado para referirse a la actividad de logística en el reciclaje, desecho de basura, y manejo de materiales peligrosos. Una mayor perspectiva incluye todo lo relacionado con la logística necesaria para reducción de recursos, reciclaje, sustitución, reutilización de materiales y desechos”. El Grupo Europeo de Trabajo en Logística Inversa [33] define LI de la siguiente forma: “El proceso de planear, implementar y controlar los flujos de materiales, en procesos de inventario, y productos terminados de un fabricante, distribuidor o algún otro punto, a un punto de recuperación o algún punto designado para su desecho”. De acuerdo con Carter y Ellram [8], LI es la distribución inversa que incluye reducción de recursos. Distribución inversa es el movimiento en contra de la cadena de un producto o material obtenido de la reutilización, reciclaje o desecho. Reducción de recursos es la minimización de desechos, lo cual resulta en procesos de distribución mucho más eficientes. La LI es diferente del manejo de desechos y de la Logística Verde (Green Logistic), y puede verse como parte del desarrollo sustentable [9].

Fleischmann et al. [14] enlistan las actividades presentes en la recuperación de

productos de la siguiente forma:

- Recolectar los productos usados (retornos).
- Determinar la condición de los productos por inspección y/o separación.
- Remanufacturar los retornos para capturar su valor restante.
- Desechar los productos que fueron considerados irrecuperables debido a razones tecnológicas y/o económicas.
- Redistribuir los productos remanufacturados.

Brito y Dekker [9] analizaron el tema desde tres puntos de vista principales: ¿por qué?, ¿qué? y ¿cómo?.

¿Por qué las cosas son devueltas?: enlistaron las razones de devoluciones de acuerdo a la jerarquía usual de la cadena: manufactura, distribución y devoluciones de los clientes.

- Manufactura:
 - Exceso de materia prima.
 - Devoluciones de control de calidad.
 - Sobrantes de la producción.
- Distribución:
 - Recuperación de productos encontrados peligrosos o defectuosos.
 - Devoluciones comerciales (saldos, productos dañados).
 - Ajustes de inventario.
- Clientes:
 - Devoluciones por garantía.

- Devoluciones de servicio (reparaciones y reemplazo de piezas).
- Devoluciones por desuso (obsoleto).
- Devoluciones por fin de vida del producto.

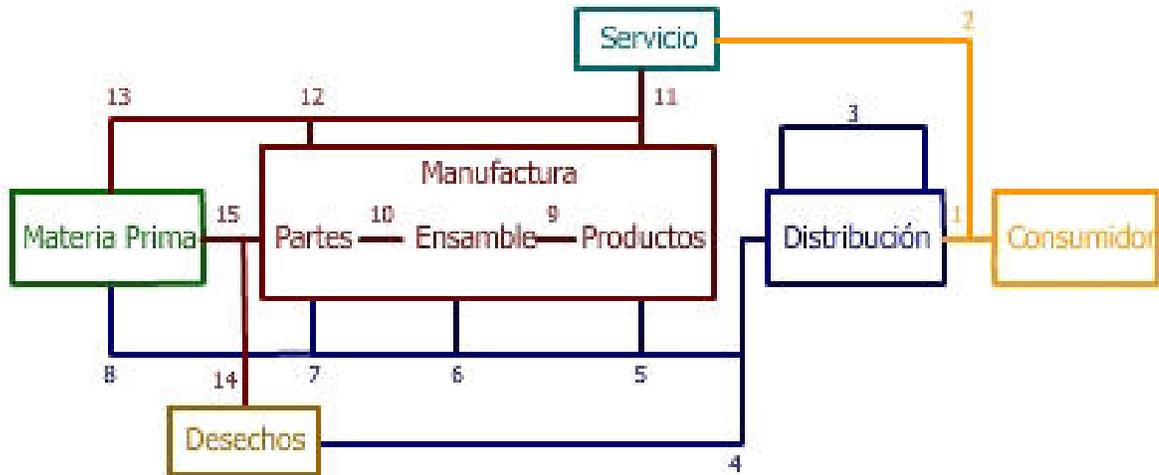
¿Qué es lo que se devuelve?: describieron las características del producto (composición, patrón de uso y deterioración) lo cual vuelve al producto recuperado atractivo o repulsivo, y dieron algunos ejemplos basados en casos reales. La composición del producto es importante desde el punto de vista de facilidad de desensamblaje, homogeneidad de los elementos que lo constituyen, presencia de materiales peligrosos, y facilidad de transporte. El patrón de uso del producto muestra la ubicación y la intensidad de uso, así como la duración del uso.

¿Cómo la LI funciona en la práctica?: Enlistaron los actores y los procesos (cómo se recupera el valor de los productos). Los actores son los que devuelven, los que reciben y los que recolectan. Los tipos de recuperación son recuperación de producto, recuperación de componente, recuperación de material y recuperación de energía. Existen cuatro tipos principales de procesos de LI: recolección, la combinación de inspección-selección-ordenamiento, re-procesamiento o recuperación directa, y finalmente la redistribución.

La figura 2.1 muestra los flujos de logística inversa en varios estados de la cadena de suministros (Adaptado de Thierry et al. [31]). Lund [28] y Jacobsson [19] describieron tres diferentes tipos de compañías que realizan la remanufactura:

- Fabricantes Originales de Equipo (OEM), quienes remanufacturan sus propios productos.
- Remanufacturadores por Contrato, que son contratados para remanufacturar productos en representación de otras compañías.
- Remanufacturadores Independientes, quienes casi no tienen contacto con el OEM, y la mayoría de las veces son ellos mismos quienes deben realizar todo

el proceso de recuperación e inspección de los productos. Algunas veces, estas compañías son contratadas por el distribuidor para recoger los productos desechados.



1. Fin de vida útil del producto.
2. Garantía.
3. Redistribución comercial.
4. Productos totalmente inservibles.
5. Reconstrucción de productos de retornos comerciales.
6. Remanufactura de piezas de retornos comerciales.
7. Recuperación de componentes de retornos comerciales.
8. Reciclaje de retornos comerciales.
9. Remanufactura de productos defectuosos.
10. Recuperación de piezas de productos defectuosos.
11. Reparación de productos defectuosos.
12. Recuperación de componentes de productos defectuosos.
13. Reciclaje de piezas de productos defectuosos.
14. Partes totalmente inservibles.
15. Reciclaje de componentes de productos defectuosos.

Figura 2.1: Flujo de retorno en diferentes puntos de la cadena de suministros.

Geyer y Jackson [15] examinaron las siguientes restricciones para el reciclaje y la reutilización de los productos:

- Acceso limitado a los productos que han llegado al fin de su vida útil.
- Factibilidad limitada de reprocesamiento de productos en el fin de su vida útil.

- Demanda de mercado limitada para productos salidos del reprocesamiento.

Blackburn et al. [7] mostraron que el valor de los productos retornados varía ampliamente entre las industrias y las categorías de los productos. Fisher [12] clasificó las estrategias de retorno como eficientes y reactivas. Una estrategia eficiente es elegida cuando es más importante distribuir productos a un costo mínimo, como es el caso de productos funcionales con un mercado ya establecido. Elegimos una estrategia reactiva cuando necesitamos agilizar la distribución, lo cual ocurre con productos nuevos e innovadores.

Sundin [41] estudió cómo el diseño de procesos y productos puede contribuir a una exitosa remanufactura, respondiendo las siguientes preguntas:

- ¿Es ambientalmente preferible la remanufactura de productos en comparación a la manufactura de nuevos productos?
- ¿Qué pasos deben de ser incluidos en un proceso genérico de remanufactura?
- ¿Qué propiedades del producto son preferibles para su remanufactura?
- ¿Cómo las plantas de remanufactura pueden volverse más eficientes?
- ¿Cómo podemos integrar este diseño a las compañías de manufactura?

Brito y Dekker [9] desarrollaron un marco de decisión para la LI, el cual está desarrollado en tres niveles: estratégico, táctico y operativo. La estrategia de recuperación, el diseño del producto, la capacidad y diseño de la red, y las herramientas estratégicas conforman el nivel estratégico. El nivel táctico esta dirigido a integrar las devoluciones de productos con la organización general. El flujo de retorno, la coordinación, la planeación de la producción, el manejo de inventario, el mercadeo, y los aspectos de información y tecnología son considerados en este nivel. El nivel operativo consiste en la programación y control de la producción, y en la administración de la información.

Fleischmann et al. [13] dividieron la LI en tres áreas principales, llamadas planeación de la distribución, control de inventario, y planeación de la producción. Planeación de la distribución involucra el flujo de retorno de los productos usados desde los clientes finales hasta el fabricante. El control de inventario incluye la transformación de los productos usados recuperados en productos nuevamente útiles. La planeación de la producción consiste de la programación de las actividades de producción relacionadas con el reuso de productos y materiales. Ellos enumeraron las principales características de las redes LI de la siguiente forma:

- Incertidumbre de suministro.
- Complejidad en la estructura de la red al incluir inspección de calidad y transporte de flujos combinado (recolección y distribución).
- Gran número de fuentes y bajos volúmenes de flujo.

El ciclo de vida de los productos y la variabilidad en la cantidad de retornos sobre el tiempo, son factores altamente importantes al analizar las redes LI para la tomar decisiones según Serrato et al. [38]. Algunos de los factores que afectan la cantidad de retornos son:

- La longitud del ciclo de vida de un producto, y en qué punto de éste se encuentra el producto.
- El decremento del valor de producto con respecto al tiempo.
- Costo de administrar los retornos.
- Precio de adquisición ofrecido por cada producto usado recolectado.
- Cantidad de productos que maneja la compañía.
- Volumen de ventas del producto.
- Esfuerzo necesario para lograr la remanufactura.

- Inversión necesaria.
- Servicio al cliente requerido.
- Riesgo y control.

2.2 REPASO DE LA LITERATURA

Muchos investigadores han mostraron interés en el diseño de redes de recolección desde diferentes puntos de vista, pero sigue habiendo falta de entendimiento sobre el tema. Fleischmann et al. [14] realizaron un resumen de diseños de redes de recuperación de productos. La mayoría de ellos tan solo consideraba el flujo de retorno y clasificaron estos casos estudiados en tres grupos: redes de reciclaje a granel, redes de remanufactura de productos ensamblados, y redes de artículos reutilizables.

En el primer grupo, Barros et al. [14] estudiaron un problema multinivel de localización de instalaciones capacitado como un problema entero mixto lineal, cuando el volumen y la ubicación de la demanda no son conocidas de antemano. Ellos determinaron la cantidad óptima, la capacidad y la localización de los centros de limpieza para el reciclaje de arena de los desechos de construcción. Louwers et al. [26] determinaron la ubicación y capacidad apropiadas para los centros regionales de recuperación, utilizando los costos de inversión, procesamiento y transportación para el reuso de desecho de tapetes. Ellos utilizaron costos dependientes del volumen, y desarrollaron un modelo continuo no lineal que resolvieron utilizando programas convencionales. Ammons et al. [1] utilizaron nuevamente un modelo multinivel de localización de instalaciones capacitado lineal para el reciclaje de tapetes, el cual encontraba la cantidad y ubicación de centros de recolección y plantas de procesamiento, además de la cantidad de tapetes recolectados cuando los centros de entrega para el material recolectado son conocidos. Realff et al. [2] mostraron que el volumen es fundamental para el diseño de la red utilizando el modelo anterior. Spengler et al. [39] propusieron un modelo multinivel de ubicación de centros de distribución para el

reciclaje de acero, con función de costo lineal a trozos. Ellos resolvieron qué procesos de reciclaje instalar en qué instalaciones y a qué nivel de capacidad.

En el segundo grupo, Thierry [31] desarrolló un modelo lineal capacitado cuando las ubicaciones de las instalaciones son fijadas al combinar los flujos de envío y de retorno, para determinar el flujo óptimo para la recuperación de copadoras. Berger y Debaillie [6] determinaron la ubicación de centros de desensamblaje para extender una red de distribución existente. Ellos propusieron MILPs (Modelo Entero Mixto Lineal por sus siglas en inglés) capacitados multinivel para diferentes versiones del problema para determinar la ubicación de centros de desensamblaje/reparación y centros de inspección de forma separada. Jayaraman et al. [20] presentaron un modelo multi-producto de localización de centros de distribución, donde el número y localización óptimos de las fábricas de remanufactura y el número de productos recolectados son determinados considerando la inversión, la transportación, los costos de procesamiento y almacenamiento de una empresa remanufacturadora de equipo electrónico en EUA. Krikke et al [41] aplicaron un modelo MILP a un fabricante de copadoras en Holanda para el diseño e implementación de una red LI. Ellos optimizaron el flujo y ubicación de centros para el proceso de recuperación de productos, además de la elección entre dos ubicaciones de interés.

El tercer grupo incluye el artículo de Kroon y Vrijens [23], quienes se enfocaron en un sistema de depósito para contenedores de plástico en renta. Ellos modelaron el problema de centros de distribución no capacitados como un MILP.

El diseño de redes LI requiere muchos tipos de consideraciones en una perspectiva multi-dimensional. Ammons et al [3] caracterizaron la producción y distribución de envío de partes, así como el flujo de retorno para la reutilización, el reciclado, y el desecho de productos y empaques usados para EARPS (Electronic Assembly Reverse Production Systems), una compañía dedicada a la recuperación de productos electrónicos usados. Ellos desarrollaron un modelo entero mixto lineal para brindar soporte a la toma de decisiones para el diseño y operación de sistemas de retorno efectivos, y respondieron las siguientes preguntas:

- ¿El ordenamiento de productos electrónicos usados debería ser centralizado o descentralizado?
- ¿Se debe establecer un solo centro o múltiples centros de reciclaje?
- ¿Qué tipo de tecnología se debe emplear para la tarea de reciclaje?
- ¿Cuál debe ser el plan de expansión para hacer crecer la red?
- ¿Cuáles son los productos más beneficiosos y cómo la localización de sus centros de reciclaje afecta la rentabilidad de la red?
- ¿Qué volúmenes de material se necesitan para justificar las tareas intensivas de reciclaje?
- ¿Se debe almacenar el material sobrante para su futuro procesamiento si la capacidad actual es excedida?

Krikke et al. [22] desarrollaron modelos cuantitativos para el apoyo a las decisiones sobre el diseño estructural de un producto (reparabilidad, reciclabilidad) y el diseño estructural de la red de logística. Los impactos ambientales son medidos en función de la cantidad de energía y la cantidad de desecho. Los costos son modelados como una función lineal de los volúmenes con un nivel de componentes fijos para las instalaciones. Bajo estas consideraciones, ellos aplicaron este modelo al diseño de una cadena de suministros de ciclo cerrado para refrigeradores, utilizando datos obtenidos de estudios reales de las operaciones en Europa de una compañía japonesa de electrónicos. El modelo fue resuelto para diferentes configuraciones de parámetros, como procesamiento centralizado versus procesamiento descentralizado, diseños alternativos de productos, variación de cantidad y calidad de los retornos, y potenciales leyes ambientales basadas en la responsabilidad extendida del productor.

Otra consideración que se debe hacer al diseñar redes LI es el valor comercial de los productos recuperados [18]. La temporada, el tipo de producto, y los mercados globales son algunos factores que afectan la cantidad de retornos. Decidir entre

estructuras centralizadas (eficientes en cuanto a costo) o descentralizada (reactivas en cuanto a tiempo) depende en gran medida del costo en los retrasos de tiempo y de su efecto en la recuperación de los productos. De esta forma, la capacidad óptima de manejo de productos en los centros de inspección y plantas reamanufacturadoras, la elección de los medios de transporte con diferentes niveles de obligación del fabricante, y la elección de las estrategias de recuperación deben de ser decididas. Souza et al. [18] estudiaron una red de colas simple para identificar los componentes del diseño de una cadena de suministros y analizar como el tiempo de transporte generalmente afecta la elección entre una red de retornos eficiente y una reactiva.

Dos de las principales estrategias de diseño de redes LI son de depósito (drop-off) y de recolección (pick-up). Wojanowski et al. [48] se enfocaron en el uso de requerimientos de tipo depósito-reembolso por parte del gobierno cuando las cantidades de recolección calculadas son insuficientes para una participación voluntaria de la empresa. Utilizaron un marco de modelación continua para diseñar una red tipo depósito y para determinar el precio de venta que maximice la ganancia de la empresa bajo un requerimiento tipo depósito-reembolso. Se utiliza un modelo discreto con utilidades estocásticas, y se realiza un análisis paramétrico para determinar el valor neto que puede ser recuperado de un producto recolectado, esto para alentar a la compañía a comprometerse a la recolección de forma voluntaria. Los autores concluyeron que un requerimiento de depósito-reembolso mínimo no logra grandes cantidades de recuperaciones para productos con valor de devolución bajo, pero propusieron dos políticas complementarias que el gobierno puede implementar. Ellos propusieron que la efectividad de recolección depende de la voluntad del consumidor de regresar un producto usado al momento de que éste se vuelve inservible y de la accesibilidad a las instalaciones de recolección. Ellos también establecieron que incentivar al cliente al momento de que realice una entrega incrementaría en gran medida la voluntad de seguirlo haciendo, de igual forma al establecer una política del tipo recolección, en donde se programa la recolección del producto usado en la casa del cliente. Estos son aspectos sumamente importantes que afectan directamente la cantidad de productos recuperados. Wojanowski et al [47] también estudiaron

estrategias de recolección de productos basadas en incentivos, utilizando un modelo continuo con utilidad estocástica. Ellos compararon las políticas de depósito y recolección con respecto a la adquisición de productos usados. También examinaron los efectos de costos de recuperación y cantidad de productos recuperados variables para la elección de estrategias de recolección.

Listes y Dekker [25] presentaron una aproximación estocástica de cómo un modelo determinista de localización para el diseño de una red de recuperación debe ser extendido para lidiar con la incertidumbre. Ellos implementaron el modelo en el ambiente GAMS y utilizaron CPLEX para solucionarlo.

Listes [24] estudió un modelo estocástico genérico para el diseño de sistemas en redes LI. Utilizó un método de descomposición basado en Ramificación y Corte conocido como el método entero L-shaped, para resolver el problema y concluir que el volumen de recuperación es un factor fundamental en las redes integradas con características de remanufactura.

Ferrer y Swaminathan [11] analizaron un modelo multi-período en el que los productos nuevos y los remanufacturados son indistinguibles, y concluyó que si la remanufactura es económicamente muy conveniente, la compañía intente incrementar el número de productos recuperados para su remanufactura.

La mayoría de modelos existentes en el contexto de LI se centran en modelar cada aspecto del problema y utilizan software comercial para resolver sus modelos resultantes, principalmente por la gran complejidad de este tipo de modelos. Verter y Aras [46] presentaron un método basado en Relajación Lagrangeana, evaluaron su eficiencia y desempeño de tiempo de solución. Resolviendo secuencialmente el mismo problema (optimizando primero el flujo primal y luego el dual), lograron identificar bajo qué condiciones el método secuencial provee buenas soluciones en comparación con el método integrado.

Lu y Bostel [27] también utilizaron Relajación Lagrangeana para resolver un problema de localización de instalaciones con flujos de retorno y tres tipos de instala-

ciones. A pesar que su modelo tiene grandes similitudes con el nuestro al considerar manufactura, remanufactura, centros de distribución y de inspección, ellos no consideran precio de adquisición de los productos recolectados.

Marin y Pelegrin [29] analizaron un modelo MILP de localización de instalaciones considerando flujos de envío y retorno, y desarrollaron una heurística de solución basada en Descomposición Lagrangeana. Ellos asumieron que el número de productos recolectados es proporcional a la demanda para cada cliente, y que la capacidad de remanufactura de una planta es proporcional a su capacidad de manufactura.

Aras y Aksen [4] investigaron un problema MINLP de localización de diferentes tipos de instalaciones bajo una estrategia de depósito, para determinar tanto la ubicación óptima de los centros de recolección como el valor del incentivo por cada tipo de producto retornado. La motivación de los clientes para realizar retornos se basa en el incentivo otorgado por el retorno así como la distancia al centro de recolección más cercano. Ellos propusieron una heurística anidada basada en Búsqueda Tabú para la elección de los centros de recolección, y Búsqueda Fibonacci para encontrar el mejor incentivo.

Aras et al. [5] desarrollaron un modelo MINLP de localización de instalaciones para encontrar tanto la ubicación óptima de un número predeterminado de centros de recolección, como el valor óptimo de los incentivos para diferentes tipos de productos bajo una estrategia de recolección. Vehículos con capacidad limitada viajan de los centros de recolección a las zonas de clientes para la recolección de los productos. Ellos propusieron la búsqueda de Nelder-Mead para obtener el mejor valor de los incentivos, y Búsqueda Tabú para la ubicación de los centros de recolección.

Salema et al. [35] propusieron una formulación MILP para el diseño de una red LI basada en la ubicación de centros de distribución, donde tanto el flujo de envío como el de retorno son considerados de forma simultánea. Ellos definieron primero un modelo con un solo tipo de producto y no capacitado, después extendieron este

modelo a multi-producto capacitado. Ellos utilizaron software comercial como GAMS y CPLEX para darle solución.

En el trabajo desarrollado por Salema et al. [36], se propuso un modelo multi-producto con restricciones de capacidad, y con incertidumbre en la demanda y en la cantidad de retornos. Ellos, al igual que nosotros, propusieron el método de Ramificación y Acotamiento para darle solución.

Salema et al. [37] desarrollaron un modelo de localización estratégica para el diseño simultáneo de cadenas de suministro de envío y retorno. Las decisiones estratégicas como el diseño de la red son consideradas al mismo tiempo que las decisiones tácticas, como planeación de la producción, almacenamiento, y distribución. La integración entre decisiones estratégicas y tácticas es lograda desarrollando una escala de dos tiempos, con una estructura completamente interconectada. Esta escala incluye un macro tiempo relacionado con las decisiones estratégicas, y un micro tiempo relacionado con las decisiones tácticas. Se obtuvo una formulación MILP, la cual fue resuelta con técnicas de Ramificación y Acotamiento.

Min et al. [30], y Ko y Evans [21] utilizaron algoritmos genéticos para resolver modelos LI, los cuales incluían elementos no lineales al igual que en nuestro caso. Min et al. [30] resolvieron solamente la red LI para retorno de productos. Su modelo incluye disminuciones en el costo de transportación para grandes volúmenes. Los productos retornados debían ser recolectados en puntos de consolidación para poder lograr beneficiarse con los descuentos de transportación. Existe una tasa de intercambio entre los costos de almacenamiento de los puntos de consolidación y los descuentos en el costo de transporte. Ko y Evans [21] no solo resolvieron el flujo de retorno, sino también el flujo de envío al igual que en nuestro modelo. La capacidad de sus instalaciones podía ser expandida gradualmente a varios niveles, esto provocaba la no-linealidad del modelo.

Uster et al. [44] utilizaron Descomposición de Benders para resolver un problema de diseño de cadena de suministros multi-producto de ciclo cerrado con un solo

origen. Ellos generaron múltiples cortes fuertes de Benders aprovechando la especial estructura de descomposición de los problemas con un solo origen.

Por último, los siguientes estudios nos brindan una mejor y más comprensible perspectiva del trabajo realizado sobre el diseño de redes LI. Rubio et al. [34] conformó una base de datos con los artículos sobre logística inversa publicados en las revistas más importantes durante el periodo 1995-2005. Demirel y Gokcen [10] revisaron y clasificaron los estudios sobre diseño de redes LI para recuperación de productos, y analizaron sus principales características.

CAPÍTULO 3

PLANTEAMIENTO Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En esta sección explicaremos a detalle nuestro problema, las características y consideraciones del mismo, y por último el modelo que adaptamos para representar nuestra problemática en particular.

3.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A partir del análisis de un problema determinístico de tipo entero mixto no lineal (MINLP), se modificó y extendió el modelo original para su aplicación a varios períodos, esto se hace para analizar de una mejor forma el comportamiento de una cadena de suministros de ciclo cerrado real, en la que los productos devueltos por los clientes en cada período, varían de acuerdo al tipo de producto y al tiempo de vida útil del mismo.

Nuestro modelo principalmente determina la localización de Centros de Inspección (CI), Centros de Distribución (CD) y Plantas Remanufacturadoras de productos (PR), de tal forma que se minimice el costo total. Los CD distribuyen el producto que llega de las Fábricas y de las PR hacia las Zonas de Clientes (ZC), esto para satisfacer la demanda total de cada ZC. Un CI recolecta el material devuelto por las ZC, el cual es inspeccionado con el fin de determinar qué porcentaje de lo recolectado sigue siendo útil, y por lo tanto será enviado a las PR para su remanufactura,

y que porcentaje es considerado sin utilidad, el cual será desechado. Una PR es una adaptación de una Fabrica ya existente para poder realizar el proceso de remanufactura y así poder utilizar los productos recolectados e inspeccionados en los CI como materia prima para la elaboración de nuevos productos, que a su vez, serán devueltos al mercado para su venta y distribución.

En nuestro modelo sólo consideramos un producto que fluye a lo largo de nuestra red, el cual es elaborado por las Fábricas y PR exclusivamente para su posterior envío a los CD. Al decidir abrir PR, CD y CI incurriremos en costos fijos para cada uno de ellos, los cuales afectan nuestro costo total. Para determinar qué PR abrir, se toma como base el conjunto de plantas existentes, mientras que para los CD y CI se cuenta con un conjunto potencial de ubicaciones. La ubicación y cantidad de ZC y de Fábricas es conocida de antemano, por lo que la principal decisión es localizar las instalaciones en los mejores puntos, de tal forma que se minimice el costo total.

3.1.1 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO

Una de las características de nuestro modelo es que toda la demanda se debe satisfacer, ya sea por producción de las Fábricas exclusivamente, o con mezcla de producción entre las Fabricas y las PR. Debemos tomar en cuenta que como al remanufacturar estamos ahorrando costos de producción, preferimos producir artículos en nuestras PR mientras sea posible, y completar la demanda con productos de nuestras Fábricas, esto ya que la ganancia por venta de productos remanufacturados y productos nuevos es la misma en nuestro modelo debido a que los productos recolectados se utilizan como materia prima para la fabricación de nuevos productos. Una vez terminado, el producto es enviado a los CD, los cuales se encargan de distribuir a cada ZC su correspondiente demanda. Esta parte de nuestra red forma el flujo primal o flujo de envío.

Una fracción de la demanda total de cada período proveniente de las ZC es

recolectada por los CI. Una vez ahí es inspeccionada y clasificada en dos gupos, material útil y material de desecho. El material de desecho no es útil para ser remanufacturado, por lo cual es desechado. Por su parte, el material encontrado útil es enviado a las PR para ser transformado en materia prima de nuevos productos. Esta parte de nuestra red forma el flujo dual o flujo de retorno.

La cantidad de productos recolectada está en función de nuestro precio de adquisición y el precio de adquisición de la competencia, y como en nuestro modelo tan solo consideramos un competidor, esta cantidad es directamente proporcional con nuestro precio de adquisición e inversamente proporcional al de la competencia. Debido a lo anterior, es de gran importancia calcular de forma óptima el valor de nuestro precio de adquisición que maximice nuestra ganancia.

3.1.2 CONSIDERACIONES DEL MODELO

- Consideramos un problema determinístico con 2 períodos.
- La ubicación de instalaciones será exclusivamente en el primer período.
- Sólo consideramos 1 producto para nuestra red.
- Sólo consideramos 1 competidor para nuestro modelo.
- Nuestra función objetivo está compuesta de 4 partes, los costos fijos de ubicar instalaciones, los costos de envío del flujo primal, los costos de retorno del flujo dual y la ganancia por unidad remanufacturada.
- La cantidad y ubicación de las Fábricas es conocida de antemano.
- El conjunto potencial de PR es conformado por las Fábricas ya existentes.
- Las ubicación y demanda de cada ZC son conocidas de antemano.
- Las potenciales ubicaciones para los CD y CI son conocidas.
- Los costos fijos en los que incurrimos al ubicar instalaciones son conocidos.

- Nuestros CD y CI no tienen restricciones de capacidad, por lo que pueden recibir cada período tanto producto como necesiten.
- Nuestros CD y CI no pueden almacenar, por lo que deben enviar todo lo que recibieron cada período.
- El conjunto de CD y CI puede ser el mismo o pueden ser conjuntos independientes, en nuestro caso tomaremos conjuntos independientes.
- Nuestra Fábricas y PR tiene capacidad limitada.
- La cantidad de productos recolectados en cada período depende del precio de adquisición nuestro y del precio de adquisición del competidor.
- La tasa de retorno de productos es fija y depende del período.
- El porcentaje de productos recolectados encontrados útiles es fijo y depende del período.
- Nuestra red está formada por 2 flujos diferentes, el primal o de envío que va de las Fábricas y PR a los CD, y de los CD a las ZC y el dual o de retorno que va de las ZC a los CI, y de los CI a las PR.
- Cuando el modelo devuelve que el precio de adquisición nuestro debe ser 0, quiere decir que la recuperación de productos para su remanufactura no es conveniente para este caso en particular.

3.2 FORMULACIÓN MATEMÁTICA DEL MODELO

3.2.1 VARIABLES Y PARÁMETROS

Indices.

i Índice de Fábricas y PR.

j Índice de CD y CI.

- k Índice de zona de clientes.
 t Índice para los períodos.

Variables Binarias.

- H_i Indica cuándo una PR es ubicada en la zona i .
 Y_j Indica cuándo un CD es ubicado en la zona j .
 T_j Indica cuándo un CI es ubicado en la zona j .

Variables Continuas.

- U_{ijt} Monto enviado de Fábrica i al CD j en el período t .
 X_{jkt} Monto enviado del CD j a la ZC k en el período t .
 W_{kjt} Monto enviado de la ZC k a CI j en el período t .
 V_{jit} Monto enviado del CI j a la PR i en el período t .
 R_{kt} Total recuperado de la ZC k en el período t .
 L Precio de adquisición nuestro.

Parámetros.

- d_{kt} Demanda de la ZC k en el periodo t .
 c_{ij} Costo de enviar una unidad de la Fábrica i al CD j .
 e_{jk} Costo de enviar una unidad del CD j a la ZC k .
 ep_{kj} Costo de enviar una unidad de la ZC k al CI j .
 cp_{ji} Costo de enviar una unidad del CI j a la PR i .
 h_i Costo fijo de ubicar una PR en i .
 f_j Costo fijo de ubicar un CD en j .
 g_j Costo fijo de ubicar un CI en j .
 s_i Capacidad de manufactura de la Fábrica i .
 a_i Capacidad de remanufactura de la PR i .
 α_t Porcentaje de producto recolectado encontrado útil en el periodo t .
 τ_t Porcentaje de producto recuperado en el periodo t .
 b Ganancia por unidad útil recuperada.

l Precio de adquisición del competidor.

3.2.2 MODELO MATEMÁTICO

$$z = \min \sum_j f_j Y_j + \sum_j g_j T_j + \sum_i h_i H_i + \sum_t \left(\sum_i \sum_j c_{ij} U_{ijt} \right) \\ + \sum_j \sum_k e_{jk} X_{jkt} + \sum_j \sum_i c_{pji} V_{jit} + \sum_k \sum_j e_{pkj} W_{kjt} + \sum_k (L - b) R_{kt}$$

Sujeto a

$$\sum_j X_{jkt} = d_{kt} \quad \forall k, t. \quad (3.1)$$

$$\sum_j W_{kjt} = R_{kt} \quad \forall k, t. \quad (3.2)$$

$$\sum_k X_{jkt} = \sum_i U_{ijt} \quad \forall j, t. \quad (3.3)$$

$$\alpha_t \sum_k W_{kjt} = \sum_i V_{jit} \quad \forall j, t. \quad (3.4)$$

$$\sum_j U_{ijt} - \sum_j V_{jit} \leq s_i \quad \forall i, t. \quad (3.5)$$

$$\sum_j V_{jit} \leq \sum_j U_{ijt} \quad \forall i, t. \quad (3.6)$$

$$\sum_j V_{jit} \leq a_i H_i \quad \forall i, t. \quad (3.7)$$

$$X_{jkt} \leq d_{kt} Y_j \quad \forall j, k, t. \quad (3.8)$$

$$W_{kjt} \leq T_j \sum_p \tau_p d_{k(t-p+1)} \quad \forall j, k, t. \quad (3.9)$$

$$R_{kt} = \frac{L}{L+l} \sum_p \tau_p d_{k(t-p+1)} \quad \forall j, t. \quad (3.10)$$

$$X_{jkt}, W_{kjt}, U_{ijt}, V_{jit}, L, R_{kt} \geq 0 \quad \forall i, j, k, t. \quad (3.11)$$

$$Y_j, T_j, H_i \in (0, 1) \quad i, j. \quad (3.12)$$

La función objetivo esta organizada en cuatro partes, primero los costos fijos

de ubicar instalaciones, después los costos de envío del flujo primal, luego los costos de retorno del flujo dual y por último la ganancia por unidad remanufacturada. La ecuación (3.1) establece que toda la demanda de los clientes debe ser cubierta para cada periodo. Cabe señalar que el cliente puede ser abastecido de uno o más centros de distribución, ya que no existe alguna restricción que lo impida. En la ecuación (3.2) establecemos que todo lo que se recolecta en cada período de cada ZC será enviado a los CI para su clasificación. Para la ecuación (3.3) estamos validando que todo el flujo que pasa por los CD sea enviado a las ZC, ya que los CD no tienen propiedades de almacenaje. Para (3.4) estamos validando que todo el porcentaje de productos encontrados útiles después de su inspección en los CI (α) sea enviado a las PR para su remanufactura, ya que al igual que los CD los CI no tienen propiedades de almacenaje. La ecuación (3.5) asegura que la cantidad de productos enviados para su remanufactura no exceda la capacidad de las PR. La restricción (3.6) nos indica que no es posible remanufacturar más productos de los que se produjeron en cada periodo. La ecuación (3.7) nos asegura que si no adaptamos la Fábrica ubicada en i a PR, no podemos enviar productos a ella desde nuestro CI. La restricción (3.8) nos indica que si no ubicamos un CD en j , no podemos enviar productos a nuestras ZC desde el. La restricción (3.9) nos asegura que si no ubicamos un CI en j , no le podemos enviar productos desde nuestras ZC. (3.10) describe que el producto recolectado en cada periodo además de estar en función del precio de adquisición nuestro y del competidor, depende también de la tasa de retorno de cada periodo (τ_i). Las restricciones (3.11) y (3.12) representan las restricciones de no negatividad y de integralidad respectivamente. Estas restricciones representan el problema establecido anteriormente, al cual daremos solución con diversos métodos en los capítulos posteriores.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA DE SOLUCIÓN

Con base en lo observado en el capítulo anterior, sabemos que el problema al que nos enfrentamos es entero mixto no lineal (MINLP), esto debido a que en nuestra función objetivo aparece una multiplicación de variables, al igual que en la restricción 3.10, en donde tenemos una división de variables. Cabe mencionar que en ambos casos, una de las variables involucradas es L , la cual representa nuestro precio de adquisición de productos usados.

El primer intento para solucionar nuestro problema fue utilizando solvers no lineales como el Dicopt, esto debido a la naturaleza de nuestro problema, pero al evaluar la calidad de las soluciones encontradas nos dimos cuenta que a pesar de la rapidez de solución que nos ofrecen, estas soluciones no son nada eficientes, incluso en muchas ocasiones no fueron ni siquiera factibles para nuestro problema. Debido a esto, nos vimos obligados a explorar diversas técnicas de solución para así poder comparar y determinar la mejor forma de solucionar este tipo de problemas.

El punto clave para abrir las puertas a una gran diversidad de técnicas ya bien desarrolladas, era linealizar nuestro problema. Como explicamos anteriormente, nuestro modelo perdía linealidad en dos partes, en la función objetivo y en una de las restricciones. También encontramos que en ambas partes, la variable implicada en la pérdida de linealidad era nuestra L , por lo que fijando el valor de la misma lograríamos eliminar la no linealidad del problema y así convertirlo en un problema entero mixto lineal (MILP), el cual, a diferencia del no lineal, podemos resolver mediante métodos exactos como Ramificación y Acotamiento (Branch and Bound),

Descomposición de Benders, etc.

4.1 LINEALIZANDO EL MODELO

Al fijar el valor de la variable L , nuestro problema puede ser manejado como un problema entero mixto lineal. Para fijar este valor, hemos propuesto dos métodos de parametrización, el primero es el método de la Búsqueda de la Sección Dorada (Golden Section Search), la cual presenta la ventaja de recortar el dominio de búsqueda de una forma inteligente para agilizar la búsqueda. El otro método es el de la tradicional parametrización de valores, que a pesar de ser evidentemente más lento, también es más preciso al recorrer prácticamente todo el dominio de valores.

4.1.1 BÚSQUEDA DE LA SECCIÓN DORADA

La optimización de una sola variable tiene como meta encontrar el valor de la variable que genere un extremo, ya sea un máximo o un mínimo de la función. La búsqueda de la sección dorada es una técnica simple de búsqueda unidimensional que debe su eficiencia a la acertada elección de los puntos medios a evaluar. El algoritmo propuesto para este método se encuentra en el Apéndice A.

4.2 DESCOMPOSICIÓN DE BENDERS

El método de Descomposición de Benders ha sido aplicado de forma satisfactoria en la literatura a la resolución de muchos problemas enteros mixtos lineales. Este procedimiento se basa en el principio de que cada problema entero mixto puede separarse en dos problemas, el subproblema de Benders (SP_B) que contiene las variables continuas, y el problema maestro (PM_B) con las variables enteras y una variable continua adicional. Resolviendo estos 2 problemas de forma iterativa, nos lleva a encontrar soluciones eficientes a problemas con la estructura adecuada.

El proceso trata de ir resolviendo relajaciones del PM_B , es decir considerando solo algunas restricciones del problema. En cada iteración buscaremos saber si hay alguna restricción que no ha sido considerada que esté siendo violada y en dicho caso incorporarla. Para ello resolveremos el SP_B para encontrar la restricción que esté siendo violada en mayor magnitud, y esa será la restricción que agregaremos.

4.2.1 SUBPROBLEMA DE BENDERS

Al fijar el valor de la variable L a un valor \bar{L} y el valor de las variables binarias H_i, Y_j y T_j a valores factibles \bar{H}_i, \bar{Y}_j y \bar{T}_j , generamos el siguiente SP_B :

$$SP_B = \min \sum_t \left(\sum_i \sum_j c_{ij} U_{ijt} + \sum_j \sum_k e_{jk} X_{jkt} + \sum_j \sum_i cp_{ji} V_{jit} + \sum_k \sum_j ep_{kj} W_{kjt} \right)$$

s.a

$$\sum_j X_{jkt} = d_{kt} \quad \forall k, t. \quad (4.1)$$

$$\sum_j W_{kjt} = \frac{\bar{L}}{\bar{L} + l} \sum_p \tau_p d_{k(t-p+1)} \quad \forall k, t. \quad (4.2)$$

$$\sum_k X_{jkt} = \sum_i U_{ijt} \quad \forall j, t. \quad (4.3)$$

$$\alpha \sum_k W_{kjt} = \sum_i V_{jit} \quad \forall j, t. \quad (4.4)$$

$$\sum_i U_{ijt} - \sum_j V_{jit} \leq s_i \quad \forall i, t. \quad (4.5)$$

$$\sum_j V_{jit} \leq U_{ijt} \quad \forall i, t. \quad (4.6)$$

$$\sum_j V_{jit} \leq a_i \bar{H}_i \quad \forall i, t. \quad (4.7)$$

$$X_{jkt} \leq d_{kt} \bar{Y}_j \quad \forall j, k, t. \quad (4.8)$$

$$W_{kjt} \leq \bar{T}_j \sum_p \tau_p d_{k(t-p+1)} \quad \forall j, k, t. \quad (4.9)$$

$$X_{jkt}, W_{kjt}, U_{ijt}, V_{jit} \geq 0 \quad \forall i, j, k, t. \quad (4.10)$$

Utilizando nuevas variables duales $\lambda_{kt}, \beta_{kt}, \gamma_{jt}, \theta_{jt}, \mu_{it}, \omega_{it}, \epsilon_{it}, \sigma_{jkt}$, y ψ_{jkt} correspondientes a las restricciones (4.1), (4.2), (4.3), (4.4), (4.5), (4.6), (4.7), (4.8), y (4.9) respectivamente, podemos construir el subproblema dual SPD_B de nuestro SP_B de la siguiente forma:

$$SPD_B : \max Z_{SPD} = \sum_t \left(\sum_k d_{kt} \lambda_{kt} - \sum_i \mu_{it} s_i - \sum_i \epsilon_{it} a_i \bar{H}_i - \sum_j \sum_k \sigma_{jkt} d_{kt} \bar{Y}_{jt} \right. \\ \left. - \sum_j \sum_k \psi_{jkt} \bar{T}_j \sum_p \tau_p d_{k(t-p+1)} + \sum_k \beta_{kt} \frac{\bar{L}}{\bar{L}+l} \sum_p \tau_p d_{k(t-p+1)} \right)$$

s.a

$$-\gamma_{jt} - \mu_{it} + \omega_{it} \leq c_{ij} \quad \forall i, j, t$$

$$\lambda_{kt} + \gamma_{jt} - \sigma_{jkt} \leq e_{jk} \quad \forall j, k, t$$

$$-\theta_{jt} + \mu_{it} - \omega_{it} - \epsilon_{it} \leq cp_{ji} \quad \forall i, j, t$$

$$\beta_{kt} + \alpha \theta_{jt} - \psi_{jkt} \leq ep_{kj} \quad \forall j, k, t$$

$$\mu_{it}, \omega_{it}, \epsilon_{it}, \sigma_{jkt}, \psi_{jkt} \geq 0, \quad \forall i, j, t$$

$$\lambda_{kt}, \beta_{kt}, \gamma_{jt}, \theta_{jt} \quad \text{sin restricción de signo}$$

La solución de SPD_B es usada para generar cortes que iterativamente agregaremos al PM_B relajado de la siguiente forma:

$$\min Z_0$$

s.a

$$Z_0 \geq \sum_j f_j \bar{Y}_j + \sum_j g_j \bar{T}_j + \sum_i h_i \bar{H}_i + \sum_k (\bar{L} - b) \frac{\bar{L}}{\bar{L}+l} \sum_p \tau_p d_{k(t-p+1)} + Z_{SPD}$$

Si la solución del SPD_B es no acotada, un vector de dirección es agregado al problema maestro relajado, el cual podemos encontrar resolviendo el siguiente problema:

$$\max \text{dummy}$$

$$\sum_t \left(\sum_k d_{kt} \lambda_{kt} - \sum_i \mu_{it} s_i - \sum_i \epsilon_{it} a_i \bar{H}_i - \sum_j \sum_k \sigma_{jkt} d_{kt} \bar{Y}_{jt} \right)$$

$$\begin{aligned}
-\sum_j \sum_k \psi_{jkt} \bar{T}_j \sum_p \tau_p d_{k(t-p+1)} + \sum_k \beta_{kt} \frac{\bar{L}}{\bar{L}+l} \sum_p \tau_p d_{k(t-p+1)} &= 1 \\
-\gamma_{jt} - \mu_{it} + \omega_{it} &\leq 0 \quad \forall i, j, t \\
\lambda_{kt} + \gamma_{jt} - \sigma_{jkt} &\leq 0 \quad \forall j, k, t \\
-\theta_{jt} + \mu_{it} - \omega_{it} - \epsilon_{is} &\leq 0 \quad \forall i, j, t \\
\beta_{kt} + \alpha \theta_{jt} - \psi_{jkt} &\leq 0 \quad \forall j, k, t
\end{aligned}$$

CAPÍTULO 5

RESULTADOS COMPUTACIONALES

Para dar solución a nuestro modelo, se evaluó el problema mediante dos alternativas anteriormente propuestas, la primera mediante Ramificación y Acotamiento y la segunda mediante la programación del método iterativo de la Descomposición de Benders. Para linealizar nuestro modelo, se utilizaron dos técnicas de parametrización, la Búsqueda de la Sección Dorada y una parametrización tradicional sobre el espacio de búsqueda.

El código desarrollado para estos métodos fue escrito en el lenguaje de modelación GAMS y solucionado en una terminal con Procesador Sun Fire v440, conectado a 4 Procesadores de 1602 MHz Ultra SPARC III con 1MB de cache y 8GB de Memoria RAM.

Se generaron instancias de diversos tamaños y se evaluaron solamente con 1 periodo, esto para comparar contra el modelo original[43], con la finalidad de probar que los valores obtenidos para ambos modelos fueran iguales en el caso en que solo se considerara un solo periodo.

5.1 MÉTODO DE GENERACIÓN DE INSTANCIAS.

Las instancias que se utilizaron fueron generadas mediante una hoja de cálculo de Microsoft Excel. En ella se generaron números pseudo-aleatorios entre 0 y 1 para la generación de coordenadas que indicaran la localización de las Fábricas y ZC,

además de las ubicaciones potenciales de nuestros CD y CI. Para calcular los costos de transporte de cada nivel, se utilizaron los puntos aleatorios de la ubicación de las instalaciones, y se calculo la distancia euclidiana de cada par de puntos comunicados entre si. También generamos números entre 0 y 100 para que representaran las demandas de cada una de las ZC para cada uno de los períodos. Estos datos fueron transformados mediante GAMS a archivos tipo GDX, los cuales son fáciles de incluir en programas creados en GAMS.

5.1.1 TAMAÑO DE INSTANCIAS

Para compara el desempeño de cada una de las técnicas propuestas, decidimos fijar varios tamaños de instancias, y generar al menos 4 instancias diferentes para cada tamaño fijado. De esta forma podríamos resolver cada instancia de cada tamaño con ambos métodos, y al final comparar los elementos de interés para nosotros, como lo son el valor de la función objetivo, el valor de la variable L , el tiempo de solución, la estructura de la red, etc.

Al hablar de un tamaño de instancia en específico, nos referimos a ella como una instancia de tamaño 1-2-3, a continuación la explicacion de cada número:

- 1: Cantidad de Fábricas existentes y potenciales ubicaciones de PR.
- 2: Cantidad de ubicaciones potenciales para nuestros CD y CI.
- 3: Cantidad de ZC consideradas para nuestro problema.

De acuerdo al tamaño de cada instancia, ésta puede ser clasificada de 3 formas, pequeña, mediana o grande. La tabla 5.1 nos muestra los tamaños de instancia que establecimos y la clasificación de cada uno de ellos según su tamaño.

Tipo	Tamaño	Clasificación
1	5-10-20	Pequeña
2	5-10-40	Pequeña
3	5-15-50	Pequeña
4	8-15-50	Mediana
5	8-20-70	Mediana
6	10-20-40	Mediana
7	10-30-60	Mediana
8	10-50-80	Mediana
9	15-30-80	Grande
10	15-50-100	Grande

Tabla 5.1: Tabla de clasificación de tamaños de instancias.

5.1.2 ASIGNACIÓN DE VALORES A LOS PARÁMETROS

Los parámetros de entrada de los costos fijos para ubicar PR, CD y CI fueron de 10000, 7500 y 5000 unidades respectivamente, de igual forma se fijó un precio de adquisición del competidor l en 10 unidades y la ganancia por unidad recuperada encontrada útil b en 15. Para las capacidades de manufactura de las Fábricas y re-manufactura de las PR, se implementaron las siguientes fórmulas que nos garantizan factibilidad al generar las instancias:

$$a_i = \frac{\alpha_1 \tau_1 \sum_k d_{k1}}{n}$$

$$s_i = \frac{\sum_k d_{k1}}{n}$$

Donde n representa la cantidad de Fábricas existentes.

5.2 COMPARACIÓN DEL DESEMPEÑO DE LOS MÉTODOS DE SOLUCIÓN.

Primeramente se evaluaron ambos métodos, tanto Descomposición de Benders como Ramificación y Acotamiento, en instancias pequeñas, esto para observar el comportamiento de cada método en la solución de instancias pequeñas y sencillas. Debemos recordar que para aplicar estos métodos, es necesario fijar previamente el valor de nuestra variable L , razón por la cual anidamos estos métodos dentro de la Búsqueda de la Sección Dorada. Observemos la tabla 5.2, la cual nos muestra los resultados obtenidos para estas pruebas:

Tamaño de Instancia	Ramificación y Acotamiento			Descomposición de Benders		
	Objetivo	L	Tiempo(seg)	Objetivo	L	Tiempo(seg)
5-10-20	950.28	7.76	39.44	950.28	7.76	790.33
5-10-40	2126.30	6.98	74.44	2126.30	6.98	3115.55
5-15-50	2602.41	6.93	269.40	2602.41	6.93	6468.07

Tabla 5.2: Tabla comparativa de desempeño de métodos de solución para instancias pequeñas.

Es fácil de observar en la tabla que el método de Descomposición de Benders no ha tenido buen desempeño comparado con el de Ramificación y Acotamiento, pero aún no es muy clara la tendencia, ya que el tiempo no tiene incrementos constantes a medida que el tamaño de instancia crece. Como Tombus [43] señala que el método de Descomposición de Benders tiene un mejor desempeño a medida que las instancias crecen, decidimos evaluar las instancias medianas y grandes en un tiempo límite de 18000 segundos (5 horas). Los resultados son presentados en la tabla 5.3.

En la tabla 5.3, (*) indica optimalidad, por lo que en comparación podemos decir que el método de Ramificación y Acotamiento mostró un mejor desempeño que la Descomposición de Benders, alcanzando el valor óptimo para los 7 tamaños de instancias utilizados, mientras que la Descomposición de Benders tan solo para 5 de los

Tamaño de Instancia	Ramificación y Acotamiento			Descomposición de Benders		
	Objetivo	L	Tiempo(seg)	Objetivo	L	Tiempo(seg)
8-15-50	6630.10*	6.37	558.88	6630.10*	6.37	6874.35
8-20-70	4602.41*	6.23	827.56	4602.41*	6.23	7997.83
10-20-40	9332.38*	6.45	1107.84	9332.38*	6.45	9868.07
10-30-60	5003.39*	7.51	1635.91	5003.39*	7.51	12278.89
10-50-80	3632.71*	5.93	2557.45	3632.71*	5.93	15673.72
15-30-80	7462.18*	5.52	5385.05	10769.49	6.73	19781.34
15-50-100	6822.13*	5.98	9367.21	15952.47	9.36	25000+

Tabla 5.3: Tabla comparativa de desempeño de métodos de solución para instancias medianas y grandes.

7 casos. También hay que considerar que el tiempo de solución siguió siendo mucho mejor para Ramificación y Acotamiento, lo que nos motiva a seguir implementando este método y descartar la Descomposición de Benders.

Finalmente presentamos el gráfico 5.1 donde observamos el comportamiento del tiempo contra el tamaño de instancia en ambos métodos. Podemos observar que el incremento de tiempo parece ser exponencial para ambos métodos.

5.3 MEJORANDO NUESTRO MÉTODO DE SOLUCIÓN

Una vez elegido Ramificación y Acotamiento como el método de solución, nos propusimos a mejorar su funcionamiento modificando algunos parámetros de control propios del método. La primera y mas sencilla idea fue aumentar el valor de nuestro GAP relativo, ya que en las pruebas anteriores lo estuvimos utilizando al 0% lo cual significa resolver hasta optimalidad. En base a esto, fijamos 4 valores diferentes de GAP para nuestras instancias, 0%, 5%, 15% y 30%, y se procedió a resolver cada instancia con estos cuatro valores de GAP. La tabla 5.4 muestra los porcentajes del tiempo promedio que tardó cada instancia en ser solucionada. Tomamos el 100% como el tiempo que tardaron las instancias con GAP de 0%, y en base a ese tiempo,

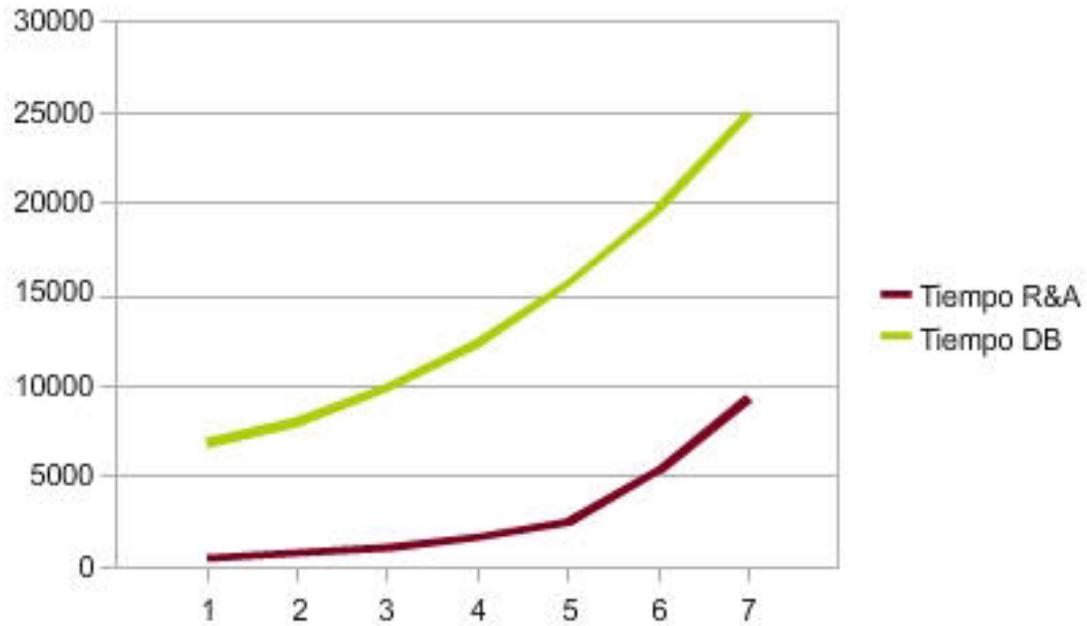


Figura 5.1: Gráfico comparativo del comportamiento del tiempo contra el tamaño de instancia para los métodos de solución propuestos.

se calculan los demás porcentajes.

La tabla 5.5 muestra los porcentajes de la desviación promedio del valor objetivo de cada tamaño de instancia. Tomamos el 0% como el valor de las funciones objetivo con GAP de 0%, y en base a este se calculan los demás porcentajes.

Por último, la tabla 5.6 muestra los porcentajes de la desviación promedio del valor de L de cada tamaño de instancia. Tomamos el 0% como la desviación de la L con GAP de 0%, y en base a este se calculan los demás porcentajes.

Al analizar en conjunto las tablas 5.4, 5.5 y 5.6, no es difícil darse cuenta de la gran ventaja que nos brinda el aumentar el GAP relativo al momento de solucionar nuestro problema, ya que el tiempo de solución mejora casi 9 veces con un GAP al 30%, y tanto la desviación del valor objetivo como la desviación del valor de la variable L , son relativamente muy pequeñas aún, por lo que podemos decir que al utilizar esta configuración para solucionar nuestras instancias, obtendremos una muy buena solución en un corto tiempo, lo cual es muy deseable en muchas ocasiones.

Instancia	GAP 0 %	GAP 5 %	GAP 15 %	GAP 30 %
1	100.00 %	57.31 %	38.35 %	33.08 %
2	100.00 %	64.50 %	36.24 %	18.71 %
3	100.00 %	26.69 %	11.21 %	8.54 %
4	100.00 %	39.67 %	16.92 %	8.14 %
5	100.00 %	26.16 %	13.43 %	6.57 %
6	100.00 %	30.63 %	12.94 %	7.57 %
7	100.00 %	35.58 %	13.12 %	6.03 %
8	100.00 %	19.67 %	12.17 %	2.40 %
9	100.00 %	23.73 %	9.12 %	3.56 %
10	100.00 %	18.46 %	10.89 %	2.91 %
Mejora	0.00 %	266.48 %	528.62 %	878.82 %

Tabla 5.4: Tabla de porcentajes del tiempo promedio de solución al variar el GAP relativo.

Instancia	GAP 0 %	GAP 5 %	GAP 15 %	GAP 30 %
1	0 %	0.06 %	0.11 %	4.34 %
2	0 %	0.00 %	0.03 %	1.71 %
3	0 %	0.41 %	0.67 %	0.67 %
4	0 %	0.89 %	1.12 %	1.12 %
5	0 %	0.30 %	0.43 %	0.58 %
6	0 %	0.52 %	1.43 %	1.43 %
7	0 %	0.27 %	1.35 %	1.10 %
8	0 %	0.32 %	2.89 %	5.54 %
9	0 %	0.29 %	2.33 %	1.06 %
10	0 %	0.37 %	1.79 %	0.94 %
Promedio	0 %	0.35 %	1.00 %	2.06 %

Tabla 5.5: Tabla de porcentajes de la desviación promedio del valor objetivo al variar el GAP relativo.

Instancia	GAP 0 %	GAP 5 %	GAP 15 %	GAP 30 %
1	0 %	0.06 %	0.45 %	14.67 %
2	0 %	0.00 %	0.07 %	5.38 %
3	0 %	2.25 %	0.00 %	0.00 %
4	0 %	0.20 %	0.00 %	0.00 %
5	0 %	0.00 %	0.00 %	0.00 %
6	0 %	0.82 %	0.00 %	0.00 %
7	0 %	0.00 %	0.53 %	0.00 %
8	0 %	0.67 %	9.35 %	0.00 %
9	0 %	0.07 %	0.03 %	0.00 %
10	0 %	0.23 %	0.05 %	0.70 %
Promedio	0 %	0.43 %	1.048 %	2.075 %

Tabla 5.6: Tabla de porcentajes de la desviación promedio del valor de L al variar el GAP relativo.

Una vez que encontramos una configuración para obtener muy buenos resultados en poco tiempo, decidimos realizar una nueva prueba comparativa. Nos interesaba saber que tan bien estaba funcionando la búsqueda de la sección dorada en nuestro problema, por lo que decidimos compararlo contra la tradicional técnica de la parametrización. Esto nos serviría no solo para evaluar el desempeño de la búsqueda de la sección dorada, sino también para analizar el comportamiento de nuestra función objetivo según el valor de la variable L fuera cambiando.

Para realizar la parametrización, decidimos fijar 50 valores en el intervalo de 0 a b , donde b representa nuestra ganancia por unidad útil recuperada. Primeramente decidimos solo realizar esta prueba con un GAP de 0 % y una instancia de cada tamaño, esto debido a que el tiempo de solución para una instancia con el método de parametrización, tarda mas de 2 veces el tiempo que tarda en solucionarse una instancia con la búsqueda de la sección dorada. Las gráficas 5.2, 5.3 y 5.4 muestran los resultados de esta comparación para instancias pequeñas, medianas y grandes respectivamente.

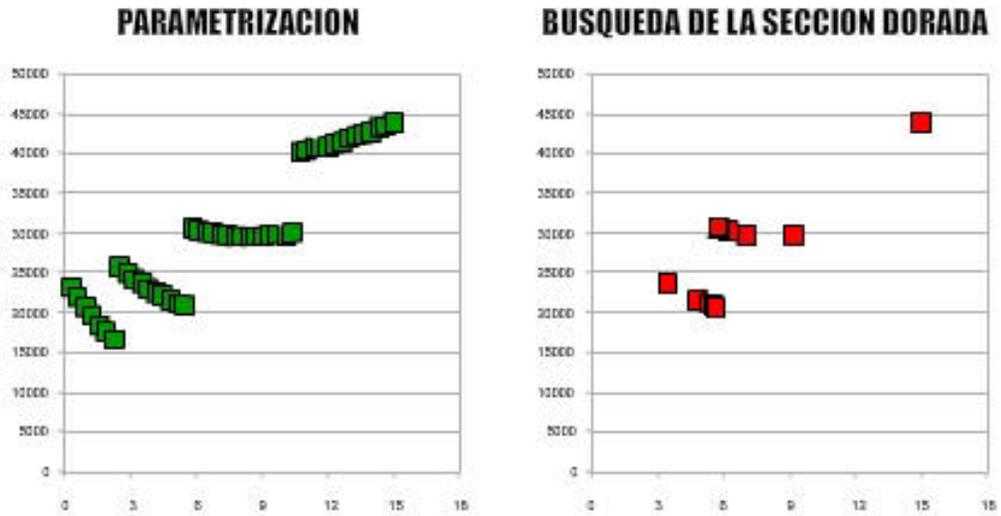


Figura 5.2: Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para instancias pequeñas.

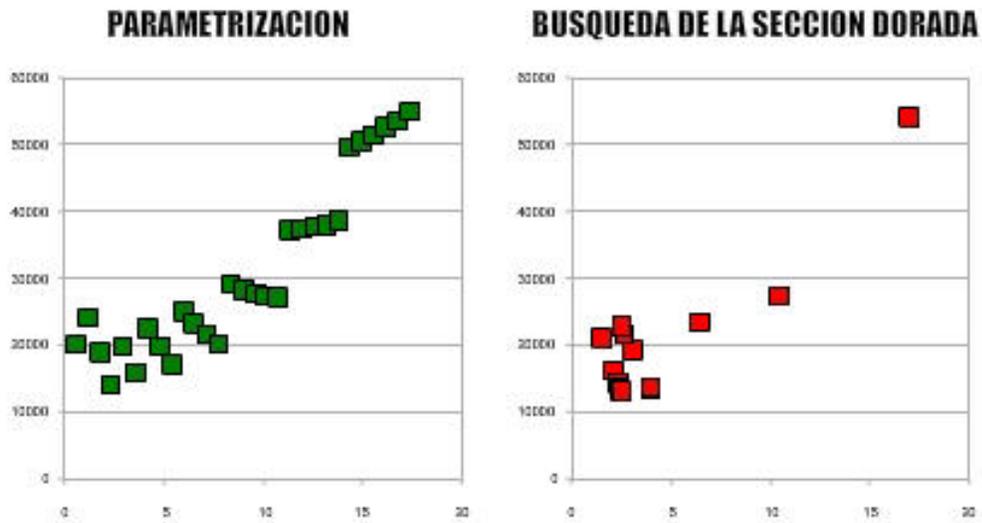


Figura 5.3: Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para instancias medianas.

Podemos observar como nuestra función se va haciendo mas uniforme a medida que el tamaño de instancia va creciendo, la búsqueda de la sección dorada encuentra mejores resultados, ya que para las instancias pequeñas este método se pierde, encontrando óptimos locales bastante lejanos al optimo global, mientras que para instancias medianas, logra encontrar soluciones tan buenas como la técnica de la

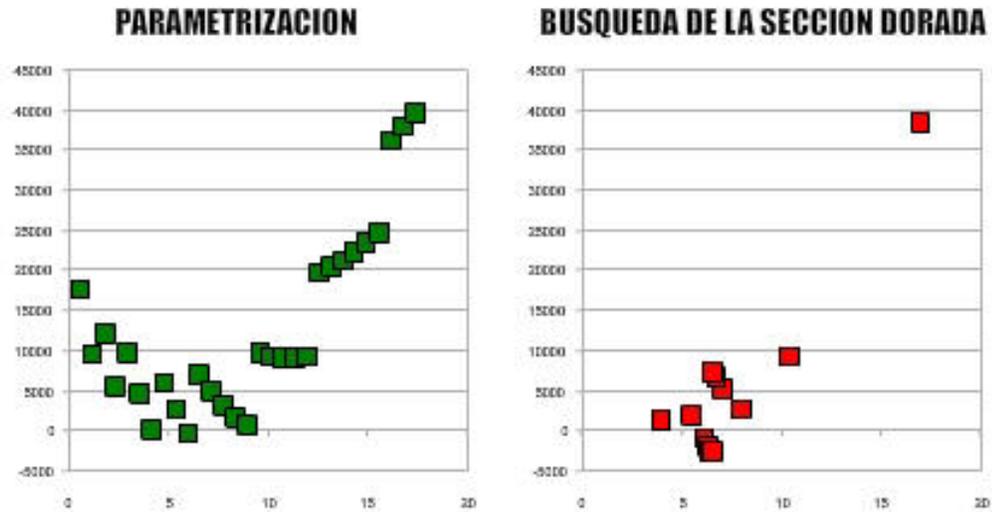


Figura 5.4: Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para instancias grandes.

parametrización, e incluso mejores soluciones para instancias grandes.

Una vez realizada esta prueba, decidimos analizar que sucedía al aumentar el GAP relativo al 30 %, y comparar de igual forma el comportamiento de nuestra función objetivo al implementar estas dos técnicas. Las gráficas 5.5, 5.6 y 5.7 muestran los resultados de esta comparación para instancias pequeñas, medianas y grandes respectivamente.

Es claro que al aumentar el GAP del 0 % al 30 %, el comportamiento de nuestra función objetivo se vuelve mas uniforme que en las gráficas 5.2, 5.3 y 5.4, lo cual, como habíamos analizado previamente, provoca que la búsqueda de la sección dorada obtenga buenos resultados para todos los tamaños de instancias. Como muestra, solo basta observar que para instancias pequeñas, el desempeño de la búsqueda mejora notablemente, mientras que para instancias medianas y grandes mantiene prácticamente los mismos resultados que la prueba con GAP al 0 %. Esto nos motiva a seguir utilizando esta configuración para dar solución a futuras instancias, ya que además de agilizar el tiempo de solución de nuestras instancias, nos garantiza mejores soluciones por el comportamiento de nuestra función objetivo.

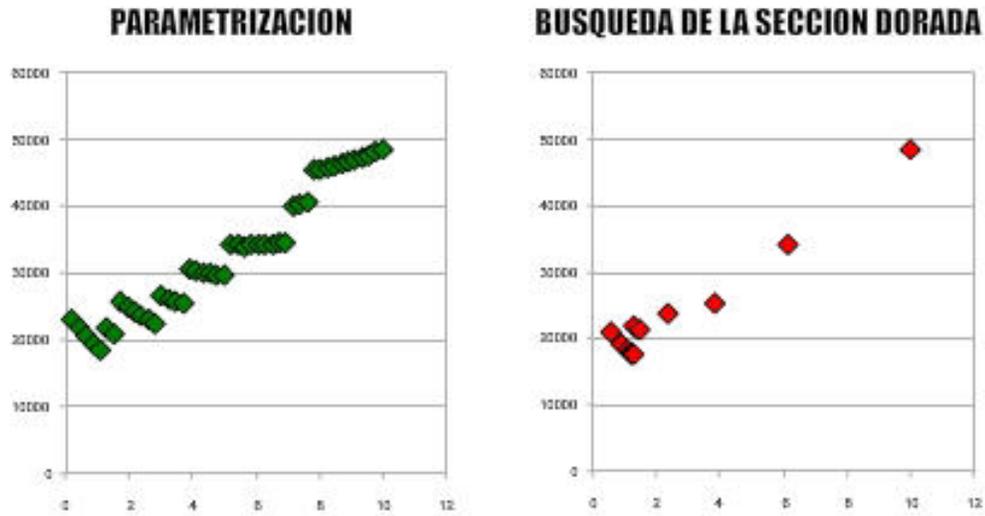


Figura 5.5: Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para instancias pequeñas con GAP relativo al 30 %.

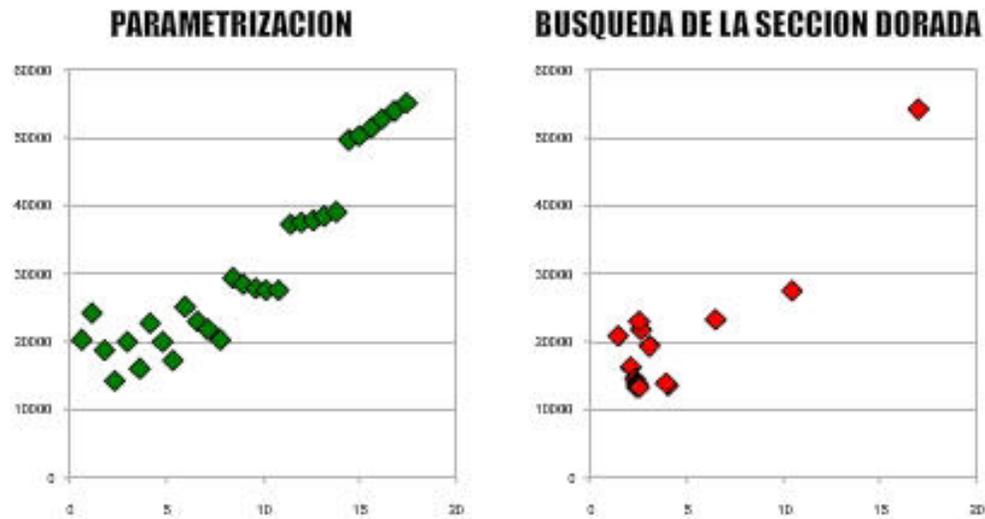


Figura 5.6: Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para instancias medianas con GAP relativo al 30 %.

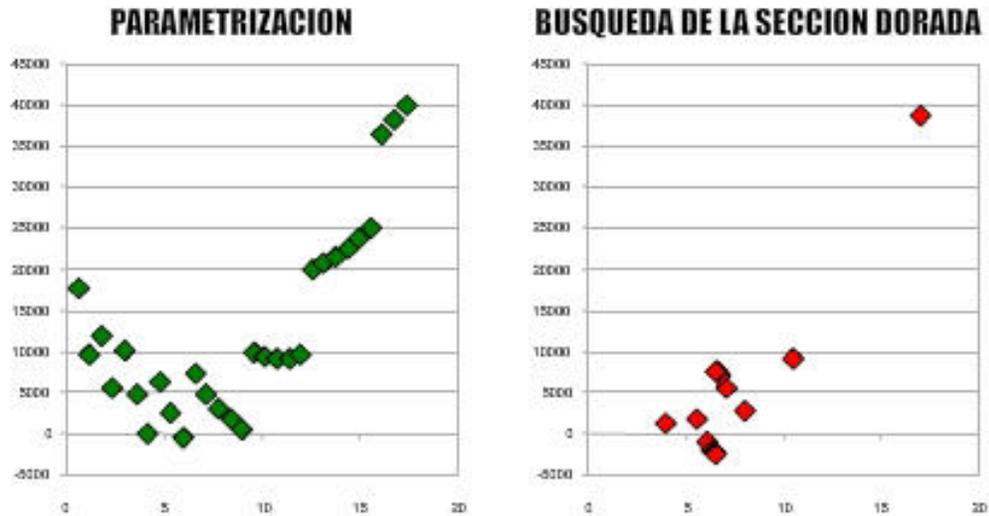


Figura 5.7: Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para instancias grandes con GAP relativo al 30 %.

5.4 MÉTODO ALTERNO DE GENERACIÓN DE INSTANCIAS.

En nuestro método original de generación de instancias propusimos costos fijos, los cuales eran independientes del tamaño de la instancia, lo cual puede provocar un funcionamiento no deseado de nuestro modelo ya que para instancias pequeñas los costos fijos podrían ser demasiado grandes en comparación con los costos de transporte, por lo que el método de solución se centraría principalmente en minimizar estos costos fijos, dejando a un lado los costos de menor impacto que son en este caso los de transporte. Por otro lado, si las instancias son muy grandes, estos costos fijos podrían pasar a segundo termino, ya que los costos de transporte seria el principal costo a minimizar.

En esta sección proponemos un nuevo método de generación de nuestras instancias, donde todo quedará igual con excepción de la forma de generar los costos fijos de apertura y adaptación de instalaciones. La nueva forma de generar estos costos esta en función del tamaño de nuestra instancia, esto para mantener una proporción

de los costos en todo momento, y también porque de esta forma es más apegada a la realidad. Los costos serán generados de la siguiente forma:

$$h_i = \frac{100 * (PC + ZC)}{n} + U[0, 100]$$

$$f_j = \frac{100 * ZC}{n} + U[0, 100]$$

$$g_j = \frac{100 * ZC}{n} + U[0, 100]$$

- n : cantidad de Fábricas existentes.
- ZC : número de zonas de clientes.
- PC : número de potenciales ubicaciones para los CD / CI.
- $U[0, 100]$: número uniforme entre 0 y 100.

Aplicando esta nueva configuración de valores a nuestras instancias ya existentes, procedimos a realizar el mismo análisis sobre el comportamiento de nuestra función objetivo a medida que se varia el precio de adquisición de los productos usados. Los resultados fueron agrupados nuevamente según el tamaño de instancia, resultando las siguientes gráficas:

Como podemos observar, el comportamiento de nuestra función objetivo es ahora mucho más uniforme. Sin importar el tamaño de instancia, este nuevo método de generación de datos nos ayuda a mantener una proporción entre los costos de transporte y los costos fijos, lo cual hace que nuestros métodos de búsqueda mejoren en gran medida, principalmente la Búsqueda de la Sección Dorada, el cuál es el de nuestro mayor interés, ya que muestra un gran desempeño al implementarlo con este nuevo método de generación de instancias, logrando muy buenas soluciones en un tiempo bastante más reducido al del método de parametrización.



Figura 5.8: Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para las nuevas instancias pequeñas con GAP relativo al 0%.

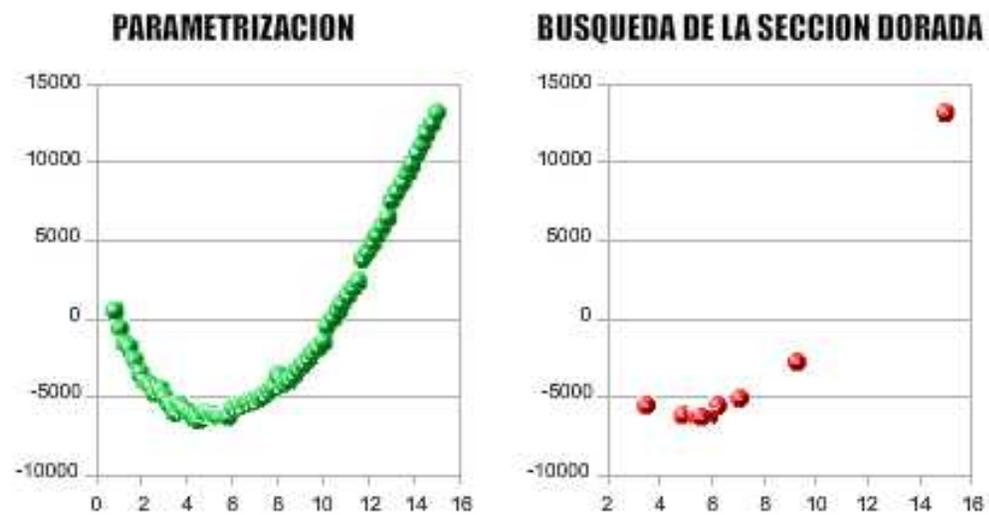


Figura 5.9: Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para las nuevas instancias medianas con GAP relativo al 0%.



Figura 5.10: Gráfico comparativo del comportamiento de nuestra función objetivo al variar el valor de L para las nuevas instancias grandes con GAP relativo al 0%.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

6.1 CONCLUSIONES

En esta tesis, nos enfrentamos a un problema de diseño de una red logística inversa entero mixto no lineal. Los productos nuevos y los remanufacturados son enviados desde Fábricas y Plantas Remanufacturadoras hacia los Centros de Distribución, los cuales a su vez, distribuyen los productos a las Zonas de Clientes para satisfacer su demanda. Los productos usados son recolectados de las Zonas de Clientes y enviados a Centros de Inspección. Asumimos que los incentivos ofrecidos por nuestra compañía y por la competencia determinan la voluntad de los clientes por regresar sus productos usados. La finalidad de esta investigación es analizar y desarrollar metodologías de solución para un modelo con un alto grado de dificultad.

Nos basamos principalmente en los métodos utilizados por Tombus [43], ya que nuestro modelo es una extensión del suyo, por lo que sus métodos y resultados podrían aplicar de igual forma para nuestro modelo. Utilizamos las técnicas más efectivas ahí desarrolladas, como la Descomposición de Benders y Ramificación y Acotamiento. Para atacar la restricción no lineal, utilizamos la Búsqueda de la Sección Dorada en conjunto con cada una de las técnicas antes mencionadas. Estos métodos se basan en la observación de que al fijar el valor del costo de adquisición de productos usados, el problema resultante se convierte en un MILP. El valor del precio de adquisición que minimiza el costo total es encontrado mediante la Búsqueda de la Sección Dorada de una forma iterativa. El resultante MILP es resuelto con

Descomposición de Benders y con Ramificación y Acotamiento.

Al comparar estos dos métodos de solución, encontramos que Ramificación y Acotamiento es sumamente superior a la Descomposición de Benders para nuestro caso en particular, ya que mejora en gran medida el tiempo de solución, y la calidad de la solución sigue siendo la misma. Otra gran ventaja que encontramos, es que podemos reducir aun más el tiempo de solución de nuestros problemas aumentando el valor del GAP relativo al momento de mandar solucionar nuestras instancias, ya que como analizamos en el capítulo anterior, mejoramos en casi nueve veces el tiempo de solución de nuestros problemas, y a pesar de que no podemos asegurar que se encontrará el resultado óptimo, sabemos que obtendremos una muy buena solución, por lo que se convierte en una excelente opción cuando se necesita una buena respuesta en un tiempo relativamente corto.

También es importante resaltar que al implementar el segundo método de generación de instancias se lograron mejores resultados, tanto de tiempo como de calidad de solución, ya que mediante este nuevo método, la función se vuelve prácticamente una parábola, lo cual facilitaba en gran medida el desempeño del método de la Búsqueda de la Sección Dorada, por lo que nos garantizaba encontrar mejores soluciones que al generar las instancias con el primer método implementado. Otra ventaja de esta forma alternativa de generación de instancias es que se mantiene una relación entre los valores de los parámetros y el tamaño de la instancia, lo cual ayuda a no perder de vista alguno de estos costos al momento de minimizar el costo total, lo cual si ocurría con el primero de los métodos.

En base a las soluciones obtenidas para cada instancia y a los tiempos de solución de cada una de ellas, podemos concluir que cuando tenemos suficiente tiempo para dar solución a una instancia en particular, es conveniente utilizar Ramificación y Acotamiento con un GAP relativo al 0%, lo cual nos garantizara encontrar una solución óptima o muy cercana al óptimo. Cuando no contamos con el tiempo suficiente para solucionar una instancia a optimalidad, es sumamente conveniente utilizar un GAP relativo del 30%, esto nos permite encontrar una muy buena solución en un

tiempo relativamente corto, en ocasiones incluso la calidad de la solución puede ser tan buena como con un GAP al 0% y en un tiempo de hasta nueve veces menor.

6.2 ÁREAS DE OPORTUNIDAD

Es importante mencionar que el modelo utilizado en esta investigación fue adaptado en gran medida para representar la problemática real en lo mas posible, pero algunas adaptaciones siguen siendo necesarias, y a medida que los estudios sobre este tema avancen, más cambios serán necesarios cada vez. A continuación se presentan algunos de las adaptaciones que consideramos importantes y no fueron realizadas por falta de tiempo.

Una de las adaptaciones más importantes según mi criterio, sería agregar capacidad a los Centros de Distribución y a los Centros de Inspección, ya que al no contemplar esta restricción, en la solución de nuestras instancias solo se optara por abrir los que minimicen los costos de transporte de las Fábricas a las Zonas de Clientes, sin importar si la cantidad enviada a ese Centro es demasiada. Entonces, al agregar restricciones de capacidad, se abrirán los que minimicen los costos de transporte, pero al ser los mas convenientes, saturaran su capacidad y la cantidad de productos restante deberá ser asignada a otro Centro, tal y como sucede en la vida real.

Otra adaptación que se visualiza prometedor, es la de agregar a nuestra cadena de suministros un segundo producto, ya que nuestro modelo tan solo considera la distribución y recolección de uno solo. De esta forma, al agregar un segundo producto, sería un caso mucho mas real, ya que la mayoría de compañías hoy en día, comercializan con mas de un producto, por lo que es necesario contemplar múltiples productos para nuestro modelo.

Otra área de oportunidad diferente a las adaptaciones también es de suma importancia, esta es la modificación de parámetros de nuestro método de solución.

Nosotros optamos experimentar con el GAP relativo, variándolo en cierto rango de valores para observar sus resultados, pero el GAP relativo no es el único valor con el que podemos jugar, existen muchos otros que explotan la estructura de los problemas, como lo es el método de selección de nodo, el tiempo máximo de solución por nodo, la cantidad máxima de nodos a explorar, etc. Variando uno o varios de estos valores a la vez, podríamos encontrar una mejor configuración de parámetros que nos lleve a encontrar mejores soluciones, o a soluciones de la misma calidad pero en un tiempo mas reducido.

Otra modificación posible a nuestro modelo, seria incorporar un sistema de entrega-recolección, esto es, recolectar los productos devueltos por los clientes en el mismo viaje en que se entregan los nuevos productos provenientes de los Centros de Distribución, de esta forma se reducirían en gran medida los costos de transporte, ya que el mismo viaje se aprovecha para entrega y recolección de productos. Este sistema lo implementan ya varias empresas para diferentes productos, como llantas, colchones, baterías de carros, etc.

También sería muy interesante investigar para que otro tipo de productos se puede adaptar nuestro modelo, ya que al ser una cadena de suministros de ciclo cerrado, se puede aplicar prácticamente a cualquier problema de reciclaje de productos, o de recolección de materiales peligrosos. Necesitaríamos ver que elementos faltan o sobran en nuestro modelo para poder transformarlo en un problema diferente, lo cual no debería de representar tanta dificultad analizando la similitud de las estructuras de funcionamiento.

APÉNDICE A

APÉNDICE

Algoritmo 1 Método de la Sección Dorada

Entrada: $L_i \leftarrow 0 \vee L_u \leftarrow l \vee D > 0$

Salida: L_b

- 1: Calcula número dorado mediante $R = \frac{\sqrt{5}-1}{2}$
 - 2: **mientras** $D > \epsilon$ **hacer**
 - 3: $L_1 \leftarrow L_i + D$
 - 4: $L_2 \leftarrow L_u - D$
 - 5: Evalúa $F(L_1)$ mediante el método propuesto.
 - 6: Evalúa $F(L_2)$ mediante el método propuesto.
 - 7: **si** $F(L_1) < F(L_2)$ **entonces**
 - 8: $L_i \leftarrow L_2$
 - 9: **en otro caso**
 - 10: $L_u \leftarrow L_1$
 - 11: **fin si**
 - 12: $D = R * (L_u - L_i)$
 - 13: **fin mientras**
 - 14: $L_i \leftarrow L_b$
 - 15: **devolver** L_b
-

Algoritmo 2 Algoritmo del Método de Descomposición de Benders

- 1: Inicializa
 - 2: Fija las variables binarias en valores factibles.
 - 3: Define $LB := -\infty$
 - 4: Define $UB := \infty$
 - 5: **mientras** $UB - LB > \epsilon$ **hacer**
 - 6: Resuelve el SPD_B
 - 7: **si** No acotado **entonces**
 - 8: Obtén un corte de factibilidad.
 - 9: Agrega el corte al problema maestro.
 - 10: **en otro caso**
 - 11: Obtén un corte de optimalidad.
 - 12: Agrega un corte al problema maestro
 - 13: Resuelve y actualiza UB si el valor de la solución de SPD_B es mejor.
 - 14: **fin si**
 - 15: resuelve el problema maestro
 - 16: $\text{mín}_{Y,T,H}\{z|\text{cortes}\}$
 - 17: Actualiza LB como \bar{z}
 - 18: **fin mientras**
-

BIBLIOGRAFÍA

- [1] AMMONS, J., M. J. REALFF y D. NEWTON, «Reverse Production System Design And Operation for Carpet Recycling», , 1997.
- [2] AMMONS, J., M. J. REALFF y D. NEWTON, «Carpet Recycling: Determining the Reverse Production System Design», *The Journal of Polymer-Plastics Technology and Engineering*, **38**(3), págs. 547–567, 1999.
- [3] AMMONS, J., M. J. REALFF y D. NEWTON, «Infrastructure Determination for Electronic Assembly Reverse Production Systems», *Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, 1999.
- [4] ARAS, N. y D. AKSEN, «Locating Collection Centers for Distance and Incentive Dependent Returns», *International Journal of Production Economics*, **111**(2), págs. 316–333, 2008.
- [5] ARAS, N., D. AKSEN y A. G. TANUĞUR, «Locating Collection Centers for Incentivedependent Returns under a Pick-up Policy with Capacitated Vehicles», *European Journal of Operational Research*, **191**(3), págs. 1223–1240, 2008.
- [6] BERGER, T. y B. DEBAILLIE, Tesis de Maestría, Location of Disassembly Centres for Re-use to Extend an Existing Distribution Network., 1997.
- [7] BLACKBURN, J., J. V. GUIDE, G. SOUZA y L. V. WASSENHOVE, «Reverse Supply Chains for Commercial Returns», *California Management Review*, **46**(2), págs. 6–22, 2004.

-
- [8] CARTER, C. y L. ELLRAM, «Reverse Logistics: A Review of the Literature and Framework for Future Investigation», *Journal of Business Logistics*, **19**(1), págs. 85–102, 1998.
- [9] DE BRITO, M. P. y R. DEKKER, «Reverse Logistics A Framework», *Technical report*, 2002.
- [10] DEMIREL, N. O. y H. GÖKCEN, «Logistics Network Design for Recoverable Manufacturing Systems: Literature Survey», *Journy of the Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University*, **23**(4), págs. 903–912, 2008.
- [11] FERRER, G. y J. M. SWAMINATHAN, «Managing New and Remanufactured Products», *Management Science*, **52**(1), págs. 15–26, 2006.
- [12] FISHER, M., «What is the Right Supply Chain for Your Product?», *Harvard Business Review*, **75**(2), págs. 83–93, 1997.
- [13] FLEISCHMANN, M., J. BLOEMHOF-RUWAARD, R. DEKKER, E. VAN DER LAAN, J. VAN NUNEN y L. V. WASSENHOVE, «Quantitative Models for Reverse Logistics: A Review», *European Journal of Operational Research*, **103**(1), págs. 1–17, 1997.
- [14] FLEISCHMANN, M., R. D. H. KRIKKE y S. FLAPPER, «A Characterization of Logistics Networks for Product Recovery», *Omega*, **28**, págs. 653–666, 2000.
- [15] GEYER, R. y T. JACKSON, «Supply Loops and Their Constraints: The Industrial Ecology of Recycling and Reuse», *California Management Review*, **46**(2), págs. 55–73, 2004.
- [16] GREENPEACE, «Greenpeace Mexico», , 2008, URL <http://www.greenpeace.org/mexico/es/>.
- [17] GREENPEACE, «Greenpeace Mexico», , 2010, URL <http://www.greenpeace.org/mexico/es/>.

- [18] GUIDE, V. D. R., L. N. W. G. SOUZA y J. D. BLACKBURN, «Time Value of Commercial Product Returns», *Management Science*, **52**(8), págs. 1200–1214, 2006.
- [19] JACOBSSON, N., *Emerging Product Strategies - Selling Services of Remanufactured Products*, Tesis de Maestría, The International Institute for Industrial Environmental Economics, Lund University, 2000.
- [20] JAYARAMAN, V., V. GUIDE y R. SRIVASTAVA, «A Closed-loop Logistics Model for Remanufacturing», *Journal of the Operational Research Society*, **50**(5), págs. 197–508, 1999.
- [21] KO, H. J. y G. W. EVANS, «A Genetic Algorithm-based Heuristic for the Dynamic Integrated Forward/reverse Logistics Network for 3PLs», *Computers and Operations Research*, **34**(2), págs. 346–366, 2007.
- [22] KRIKKE, H., J. BLOEMHOF-RUWAARD y L. N. V. WASSENHOVE, «Concurrent Product and Closed-loop Supply Chain Design with an Application to Refrigerators», *International Journal of Production Research*, **41**(16), págs. 3689–3719, 2003.
- [23] KROON, L. y G. VRIJENS, «Returnable Containers: An Example of Reverse Logistics», *International Journal of Physical Distribution & Logistics Management*, **25**(2), págs. 55–68, 1995.
- [24] LISTES, O., «A Generic Stochastic Model for Supply-and-return Network Design», *Computers & Operations Research*, **34**(2), págs. 417–442, 2007.
- [25] LISTES, O. y R. DEKKERI, «A Stochastic Approach to a Case Study for Product Recovery Network Design», *European Journal of Operational Research*, **160**(1), págs. 268–287, 2005.
- [26] LOUWERS, D., B. KIP, E. PETERS, F. SOUREN y S. FLAPPER, «A Facility Location Allocation Model for Re-using Carpet Materials», *Computers and Industrial Engineering*, **36**(4), págs. 1–15, 1999.

- [27] LU, Z. y N. BOSTEL, «A Facility Location Model for Logistics Systems Including Reverse Flows: The Case of Remanufacturing Activities», *Computers and Operations Research*, **34**(2), págs. 299–323, 2007.
- [28] LUND, R., «Remanufacturing: The Experience of the United States and Implications for Developing Countries», *Technical report*.
- [29] MARIN, A. y B. PELEGRIN, «The Return Plant Location Problem: Modelling and Resolution», *European Journal of Operational Research*, **104**(2), págs. 375–392, 1998.
- [30] MIN, J. K., H. y C. KO, «A Genetic Algorithm Approach to Developing the Multi-echelon Reverse Logistics Network for Product Returns», *Omega*, **34**(1), págs. 56–69, 2006.
- [31] M. THIERRY, M. SALOMON, J. VAN NUNEN y L. VAN WASSENHOVE, «Strategic Issues in Product Recovery Management», *California Management*, **37**(2), págs. 114–135, 1995.
- [32] PNUMA, «Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente», URL <http://www.pnuma.org/>.
- [33] REVLOG, «The European Working Group on Reverse Logistics», , 1998, URL <http://www.fbk.eur.nl/OZ/REVLOG/>.
- [34] RUBIO, S., A. CHAMARRO y F. MIRANDA, «Characteristics of the Research on Reverse Logistics (1995-2005)», *International Journal of Production Research*, **46**(4), págs. 1099–1120, 2008.
- [35] SALEMA, M., A. PÓVOA y A. NOVAIS, «A Warehouse-based Design Model for Reverse Logistics», *Journal of the Operational Research Society*, **57**(6), págs. 615–629, 2006.
- [36] SALEMA, M., A. PÓVOA y A. NOVAIS, «An Optimization Model for the Design of a Capacitated Multi-product Reverse Logistics Network with Uncertainty», *European Journal of the Operational Research*, **179**(3), págs. 1063–1067, 2007.

- [37] SALEMA, M., A. PÓVOA y A. NOVAIS, «A Strategic and Tactical Model for Closedloop Supply Chains», *OR Spectrum*, **31**(3), págs. 573–599, 2009.
- [38] SERRATO, M., S. RYAN y J. GAYTAN, «Characterization of Reverse Logistics Networks for Outsourcing Decisions», *Informe técnico*, Department of Industrial and Manufacturing Systems Engineering, Iowa State University, 2004.
- [39] SPENGLER, T., H. PÜCHERT, T. PENKUHN y O. RENTZ, «Environmental Integrated Production and Recycling Management», *European Journal of Operational Research*, **97**(2), págs. 308–326, 1997.
- [40] STOCK, J., «Reverse Logistics», , 1992.
- [41] SUNDIN, E., *Product and Process Design for Successful Remanufacturing*, Tesis de Maestría, Linköpings University, 2004.
- [42] THIERRY, M., «An Analysis of the Impact of Product Recovery Management on Manufacturing Companies», , 1997.
- [43] TOMBUS, A. C., *Quantitative model for decision making in reverse logistics network design*, Tesis Doctoral, Bogazici University, Turkey, 2009.
- [44] ÜSTER, H., G. EASWARAN, E. AKCALI y S. CETINKAYA, «Benders Decomposition with Alternative Multiple Cuts for a Multi-product Closed-loop Supply Chain Network Design Model», *Naval Research Logistics*, **54**(8), págs. 890–907, 2007.
- [45] VANDERMERWE, S. y M. OLIFF, «Customers Drive Corporations Green», *Long Range Planning*, **23**(6), págs. 10–16.
- [46] VERTER, V. y N. ARAS, «Designing Distribution Systems with Reverse Flows», *Informe técnico*, McGill University, 2006.
- [47] WOJANOWSKI, R., V. VERTER y T. BOYACI, «Incentive Based Collection Strategies for Product Recovery», *Informe técnico*, Faculty of Management, McGill University, 2003.

-
- [48] WOJANOWSKI, R., V. VERTER y T. BOYACI, «Retailcollection Network Design under Deposit-refund», *Computers & Operations Research*, **34**(2), págs. 324–345, 2007.

FICHA AUTOBIOGRÁFICA

Bruno Rodrigo Fuentes López

Candidato para el grado de Maestro en Ciencias
con especialidad en Ingeniería de Sistemas

Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

DISEÑO DETERMINISTA DE UNA RED DE
LOGÍSTICA INVERSA MULTIPERÍODO

Nací en la ciudad de México, Distrito Federal, el 8 de Diciembre de 1985. Soy hijo del Ing. Ricardo Nicolás Fuentes Gutiérrez y la Sra. María de Lourdes López Jiménez. Inicié mis estudios de primaria en la escuela Agustín Yáñez, cursando allí 1º y 2º grado. De 3º a 6º año de primaria los cursé en la primaria Alfonso Reyes. Seguí con mis estudios de secundaria en el Colegio Bilingüe Madison, obteniendo gran control sobre el idioma Inglés. Logré ingresar al Centro de Investigación y Desarrollo de la Educación Bilingüe, el cual tiene fama de ser del más alto nivel educativo. Cursé la licenciatura durante el periodo 2003-2008 en la Facultad de Ciencias Físico-Matemáticas, obteniendo el grado de Licenciado en Ciencias Computacionales. En enero de 2009 inicié los estudios de Maestría en Ciencias en Ingeniería de Sistemas en la Universidad Autónoma de Nuevo León obteniendo una beca completa de cuota

interna por parte de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica y una beca de manutención por parte del CONACYT.