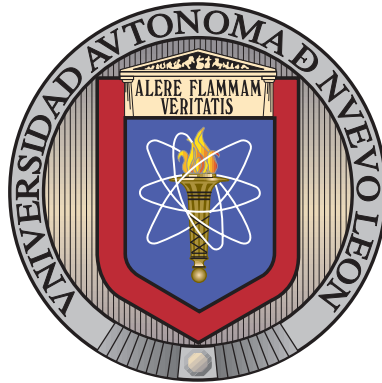


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



MODELO MATEMÁTICO PARA UN PROBLEMA DE
PLANEACIÓN EN UNA EMPRESA DE
REMANUFACTURA.

POR

ING. ORLANDO LÁZARO RUILOBA TORRES

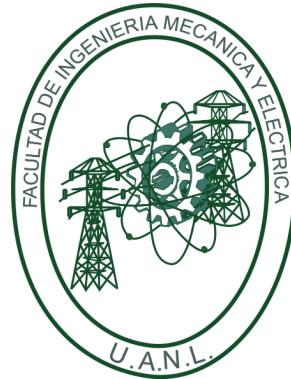
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN SISTEMAS

JULIO 2020

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



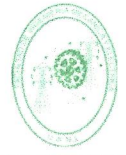
MODELO MATEMÁTICO PARA UN PROBLEMA DE
PLANEACIÓN EN UNA EMPRESA DE
REMANUFACTURA.

POR

ING. ORLANDO LÁZARO RUILOBA TORRES

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN SISTEMAS

JULIO 2020



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO

Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la Tesis Modelo matemático para un problema de planeación en una empresa de remanufactura. realizada por el alumno(a) Orlando Lázaro Ruiloba Torres ,con número de matrícula 1985270 , sea aceptada para su defensa como opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con orientación en Sistemas

El Comité de Tesis

Dra. Iris Abril Martínez Salazar

Director

Dr. Romeo Sánchez Nigenda

Revisor

Dr. Samuel Moisés Nucamendi Guillén

Revisor

Vo. Bo.

Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado



029

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, 20 de julio de 2020

ÍNDICE GENERAL

| | |
|---|----------|
| 1. Introducción | 1 |
| 1.1. Alcance de la investigación | 2 |
| 1.2. Problema de la investigación | 3 |
| 1.3. Hipótesis | 3 |
| 1.4. Objetivos de la investigación | 3 |
| 1.4.1. Objetivo general | 3 |
| 1.4.2. Objetivos específicos | 3 |
| 1.5. Metodología de la investigación | 4 |
| 1.6. Resumen del Contenido | 5 |
| 2. Marco Teórico | 6 |
| 2.1. Introducción | 6 |
| 2.2. Surgimiento de la remanufactura como industria | 7 |
| 2.3. Esquemas de remanufactura | 8 |
| 2.3.1. Planta única | 8 |

| | |
|--|-----------|
| 2.3.2. Múltiples plantas | 9 |
| 2.4. Problemas más comunes presentes en la industria de remanufactura | 9 |
| 2.5. La logística inversa como complemento fundamental en la industria de remanufactura | 12 |
| 2.6. Papel de la industria remanufacturera en el contexto nacional | 15 |
| 2.7. Planeación de la producción | 17 |
| 3. Descripción del problema | 20 |
| 3.1. Introducción | 20 |
| 3.2. Descripción de la línea de producción | 21 |
| 3.3. Modelación matemática | 25 |
| 3.3.1. Parámetros del Problema | 25 |
| 3.3.2. Variables del Problema | 26 |
| 3.3.3. Modelo matemático | 26 |
| 3.3.4. Descripción | 29 |
| 3.3.4.1. Función objetivo | 29 |
| 3.3.4.2. Restricciones | 29 |
| 4. Experimentación Computacional | 32 |
| 4.1. Equipo de cómputo | 32 |
| 4.2. Generación de Instancias | 32 |
| 4.3. Experimentación con la Formulación Matemática | 36 |

| | |
|--|-----------|
| 4.4. Análisis de resultados | 46 |
| 5. Conclusiones y Trabajo Futuro | 56 |
| 5.1. Conclusiones | 56 |
| 5.2. Trabajo a Futuro | 57 |
| A. Apéndice A | 58 |
| A.1. Elementos y expresiones utilizadas para generar las instancias del problema | 58 |
| A.1.1. Cantidad de producto recibida directamente del cliente | 58 |
| A.1.2. Costos asociados al transporte interplanta | 59 |
| A.1.3. Costos asociados a inventario | 59 |
| A.1.4. Estimación de la demanda | 59 |
| A.1.5. Capacidad vehicular | 60 |
| A.1.6. Capacidad de producción/reparación de cada planta | 61 |

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

De acuerdo a [8] un sistema de producción comprende la totalidad de las actividades de transformación o conversión de los insumos (recursos) en productos (bienes y/o servicios).

Un sistema de producción según [38] consiste en insumos, procesos, productos y flujos de información, que lo conectan con los clientes y el ambiente externo. Los insumos incluyen recursos humanos (trabajadores y gerentes), capital (equipo e instalaciones), materiales y servicios comprados, tierra y energía.

Teniendo en cuenta las definiciones expuestas anteriormente, se hace necesario definir el término proceso, que de acuerdo a [38] es cualquier actividad o grupo de actividades mediante las cuales uno o varios insumos son transformados y adquieren un valor agregado, obteniéndose así un producto para un cliente.

En la actualidad el mundo de la producción constituye un sistema complejo de redes multinacionales de aprovisionamiento que, utilizando las nuevas tecnologías de información, comunicación y transporte, generan modelos de negocios con un nivel creciente de actividad productiva y financiera transfronteriza según lo expuesto en [1].

La sostenibilidad del medio ambiente a través de la gestión eficiente y eficaz

de los residuos, se ha convertido en foco de atención hace ya algunas décadas por parte de políticos, científicos e investigadores [10].

El factor ambiental juega un papel fundamental dentro del proceso productivo, por lo que es importante considerar que la remanufactura establece nuevamente el ciclo de vida del producto, aportando mayor durabilidad, sin embargo un producto defectuoso, se repara, y este proceso más o menos extiende su período de vida útil. En lo que se refiere a la propiedad, por ejemplo, un producto reparado se mantiene con su dueño original, mientras que en el caso del remanufacturado al ser productos en categoría de (como nuevo) y colocados nuevamente en el mercado, no tiene propietario [44].

Desarrollar el procedimiento anterior (remanufactura) trae consigo un número considerable de beneficios, no solo al medio ambiente sino también a la economía de los países que la aplican. Esta prácticamente nueva industria, se considera hoy la última forma de reciclaje debido a la cifra tan extensa de sectores en los que es posible desarrollarla [44].

Un producto se puede remanufacturar a un costo que representa aproximadamente la mitad de producir uno nuevo. Los precios de venta de estos productos oscilan entre el 40 % y el 80 % de uno nuevo, lo cual permite que el cliente adquiera el producto a un precio atractivo y el remanufacturador genere ganancias para su negocio [44].

1.1 ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN

En la presente investigación se estudiará el caso particular de una empresa, la cual presenta problemas centrales que afectan su desempeño, específicamente en el área de remanufactura de antenas de televisión paga. Vale mencionar que esta empresa repara varios productos y los surte a la compañía que ofrece el servicio.

1.2 PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN

El problema consiste en disminuir los costos operativos, en una empresa de remanufactura que cuenta en la actualidad con tres plantas, dos de ellas ubicadas en territorio nacional (Chihuahua y Reynosa) y la otra se encuentra en Memphis (EE.UU), las plantas de Memphis y Chihuahua funcionan como centros de recopilación, es decir las mismas cuentan con la capacidad necesaria para recibir mayor cantidad de producto, aunque la situada en Memphis en mayor cuantía aún.

1.3 HIPÓTESIS

La implementación de un modelo matemático que represente la operación de la empresa en su proceso de envío de productos a las plantas de remanufactura, favorecerá a minimizar los costos operativos de la misma.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

- Conformar un modelo matemático.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Preparar una recopilación de los elementos conceptuales fundamentales que constituyen el basamento teórico de la investigación.
- Describir la empresa objeto de estudio lo más genéricamente posible, de modo

que se comprenda su dinámica de funcionamiento.

- Identificar las particularidades de las plantas, así como los procesos que se llevan a cabo en cada una de ellas y sus características específicas.
- Construir un modelo matemático que sea lo suficientemente compacto, de manera que considere todos los aspectos esenciales involucrados.
- Validar a través de un experimento computacional, el modelo anterior.
- Precisar por medio de los resultados obtenidos, los factores que inciden en la problemática en cuestión.

1.5 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Desarrollar un modelo matemático, que permita determinar la asignación de piezas a las tres plantas con el fin de aprovechar las capacidades de trabajo en las mismas, de modo que se minimicen los costos operativos, para esto los pasos son los siguientes:

- Hacer una revisión de la literatura con el objetivo de poder apreciar cómo son los modelos que han sido propuestos para resolver problemas de este tipo.
- Expresar el problema en términos matemáticos, de modo que se definan las variables y parámetros que van a intervenir en dicho problema.
- Realizar una búsqueda o elaboración de las instancias necesarias para validar el problema.
- En base a lo expuesto anteriormente, conformar el modelo con sus variables de decisión, función objetivo y restricciones.
- Validar el mismo, sometiéndolo a prueba con las instancias anteriormente mencionadas, de modo que refleje los resultados esperados.

1.6 RESUMEN DEL CONTENIDO

En el capítulo 1 se presenta todo lo relacionado con el diseño de la investigación, es decir, una breve introducción vinculada con el problema, el alcance del mismo, hipótesis, los objetivos que se persiguen y la metodología a seguir.

En el segundo capítulo se aborda el basamento teórico necesario para la adecuada comprensión de la problemática en cuestión, a través de una revisión bibliográfica de aquellos artículos que contienen información referente al tema.

En el capítulo 3 se realiza una descripción del problema a tratar, de modo que se comprenda la dinámica de funcionamiento de la empresa objeto de estudio, así como sus particularidades. También se presenta la formulación matemática del problema desde la óptica de la investigación de operaciones.

En el capítulo 4 se desarrolla todo lo concerniente a la fase de experimentación, el proceso de confección de las instancias, se exponen los resultados obtenidos con la implementación del modelo matemático propuesto y se realiza un análisis de los mismos.

Finalmente, en el capítulo 5 se exponen las conclusiones a las cuales se llegaron a través de la presente investigación.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

En el presente capítulo se abordan, una breve introducción referida a la industria de la remanufactura, así como una serie de temáticas que constituyen el basamento teórico necesario para comprender el caso de estudio, éstas últimas desarrolladas a través de una revisión de literatura científica relacionada con la investigación.

2.1 INTRODUCCIÓN

La remanufactura ha sido descrita a través de los años, en la literatura, de múltiples maneras, algunas de ellas son: “industria invisible” [35], el “gigante invisible” [25], entre otras muchas, aunque sucede algo que es realmente palpable y es que a pesar de la relevancia de esta industria, existe una gran escasez de literatura a la que se pueda hacer referencia cuando se está buscando una guía real sobre la planeación y ejecución del remanufacturado de productos [4, 36].

Esta industria es actualmente generadora de empleos en los sectores de la sociedad que más lo requieren, o dicho de otra forma, en el extremo con menos preparación académica del mercado laboral. La remanufactura contempla en su desarrollo el deterioro ambiental, lo cual se refleja a través del ahorro de diversos recursos como son: energía, materiales, etc [21, 36].

2.2 SURGIMIENTO DE LA REMANUFACTURA COMO INDUSTRIA

A nivel empresarial, el medio ambiente siempre ha sido un punto fundamental para lograr una adecuada planeación de estrategias, pero no fue hasta la segunda mitad del siglo XX cuando realmente adquirió relevancia este punto, ya que se experimentó una transición de una cuestión de falta de recursos, a una de desarrollo sustentable, que considera los aspectos ambientales, sociales y económicos, esta transición permitió la creación de sistemas de recuperación de materiales que posibilitan aumentar la vida útil del producto, bien sea efectuando una reparación o remanufacturando, dejando como última opción el reciclaje. Los años setenta marcaron el inicio de un gran interés en lo que a remanufactura se refería [13].

Desde hace algunos años la remanufactura ha ido ganando terreno en diversos sectores industriales, debido a que la misma representa, además del proceso de fabricación convencional, otra vía en lo que a producción se refiere [19].

De modo progresivo, la población mundial ha ido tomando conciencia acerca de que el ritmo actual de consumo de recursos no renovables no puede sostenerse, y que se hace necesario cambiar los patrones asociados al mismo, por tanto las empresas se ven obligadas comercializar productos con una mayor sostenibilidad. En este sentido, la remanufactura desempeña un papel vital, con vistas a disminuir el consumo de materiales, energía y el desecho de productos al final de su período de vida útil [32].

En la literatura referida al marketing, se deja claro en muchas ocasiones, que los productos son sometidos a un ciclo de vida, que está formado por etapas, las cuales se encuentran estrechamente vinculadas a la velocidad de crecimiento del mercado. En principio no está definido cómo, pero que la tasa de crecimiento del mercado determine el tamaño probable del mismo para el próximo período, afecta claramente las decisiones de remanufactura de la empresa [5].

En la actualidad gran cantidad de productos son reutilizados, con frecuencia sin previo conocimiento del consumidor [22]. La remanufactura es un tema que se puede abordar desde diversos escenarios, en dependencia de las características de la empresa en cuestión [50].

En conclusión, esta industria llegó para quedarse, no solamente porque dirige el mundo del comercio hacia un desarrollo más sostenible y amigable con el entorno, sino también porque además de disminuir costos, trata de reducir la obsolescencia, a través de procedimientos que buscan la reutilización de la mayoría, o de ser posible la totalidad de las partes y piezas de un producto.

2.3 ESQUEMAS DE REMANUFACTURA

En la actualidad existen diversos esquemas de remanufactura, tanto para una sola planta como para múltiples.

2.3.1 PLANTA ÚNICA

El esquema de remanufactura para el caso de una sola planta, se basa en un sistema integral que se encarga de gestionar el flujo de materiales, de modo que provee la información necesaria para la confección de los cronogramas de producción, así como para la administración de los inventarios en la planta. También permite determinar el tipo y cantidad de núcleos (**cores**) que la planta puede recibir, así como cuáles de ellos desmontar y cuáles componentes ensamblar, para lograr satisfacer la demanda en tiempo y forma [52]. Vale mencionar que el término núcleo se refiere al dispositivo electrónico después de ser usado.

En gran número de organizaciones, el cambio del entorno de fabricación, de una única planta, al de varias de ellas trabajando al unísono, puede acarrear serios

inconvenientes en las áreas asociadas con la planeación y distribución de la producción, por lo que los tomadores de decisiones en los sistemas de múltiples plantas, tienen la responsabilidad de lograr alinear las tareas con el objetivo de elevar de forma íntegra la utilidad de la empresa [30, 33, 29].

2.3.2 MÚLTIPLES PLANTAS

Un caso particular para múltiples plantas es aquel donde se debe efectuar la selección de la planta donde se va a realizar la remanufactura (encontrándose las mismas en diferentes ubicaciones geográficas) además se deben seleccionar también las opciones (reemplazo, reparación y reacondicionamiento), este esquema considera un sistema de apoyo a la decisión de remanufactura y trata un solo tipo de producto con arribo estocástico. En el mismo, la probabilidad de que cada trabajo de remanufactura deba ser reelaborado depende de la opción de remanufactura seleccionada [11].

La transición hacia sistemas de múltiples plantas, ofrece a la empresa una gran variedad de oportunidades en cuanto a disminución de costos asociados a fabricación y logística se refiere, también ciertas ventajas competitivas en el rendimiento económico general. Además de todo lo anterior, la empresa pudiera establecer compromisos fidedignos con sus clientes de la forma más eficiente, maximizando el nivel de servicio al cliente [3, 23, 12, 48, 29].

2.4 PROBLEMAS MÁS COMUNES PRESENTES EN LA INDUSTRIA DE REMANUFACTURA

Para el correcto funcionamiento de una o varias plantas de remanufactura, se deben tener en cuenta una serie de aspectos que son de vital importancia, pues de

no ser así, se presentarían problemas que afectan de modo negativo su desempeño, algunos de los cuales se exponen a continuación.

En ocasiones, la decisión de remanufacturar se torna difícil, debido a que los directivos cuentan con escasa orientación y la práctica industrial es muy diversa. Por ejemplo existen empresas norteamericanas, que no saben cómo afecta exactamente la comercialización de productos remanufacturados, la venta de productos primarios, por lo que implementan heurísticas simples que posibilitan tomar decisiones acerca de la remanufactura [5].

La gestión de una planta remanufacturera es una tarea complicada, ya que la misma implica que se deban tener en cuenta aspectos como la incertidumbre, que normalmente existe no solo en el mercado sino también en la oferta de materia prima y en el rendimiento de ciertos procesos. Las compras en el mercado abierto, así como el uso de inventarios internos pueden ser opciones factibles cuando se trata de satisfacer la demanda de productos remanufacturados [52].

La secuencia de pasos a seguir para efectuar el proceso de remanufactura de un producto, depende fuertemente del mismo, aunque en efecto, se puede afirmar que existen algunos que son normalmente aplicados independientemente del producto en cuestión, entre los cuales resaltan, la inspección, limpieza, desmontaje, reparación, montaje, empaque, etc [40].

Cabe notar que las actividades desarrolladas durante este proceso generan información continuamente, lo cual implica que lograr obtener la medida exacta de la incertidumbre asociada a todas ellas, adquiere un carácter exhaustivo, debido a esto, se torna complejo confeccionar un modelo que incluya la totalidad de las variables, además de costoso en cuanto a dinero y tiempo se refiere, por lo que sería más adecuado realizar análisis de forma individual de los subsistemas y elementos que forman parte del sistema de remanufactura, así como identificar los aspectos relevantes relativos a la recuperación [40].

Generalmente en esta industria se persigue una única meta, bien sea minimizar

el costo total o maximizar el beneficio. El manejo de estos sistemas generalmente implica, la existencia de cierta incertidumbre asociada al costo, tiempo de espera y consumo de energía, debido a esto la meta propuesta anteriormente carece de precisión, esta situación resulta frecuentemente de información bien sea incompleta, no disponible o inaccesible [45].

La planeación de la producción en los sistemas de reciclaje y remanufactura es compleja y requiere de que se tengan en cuenta varios posibles escenarios, considerando dentro de estos una serie de productos, componentes, materiales, proveedores y máquinas [45].

Se puede afirmar que existe una relación divergente en cuanto a retorno de productos y demanda de los mismos remanufacturados, por lo que cuando un producto es novedoso en el mercado, la devolución de los **cores o núcleos** al finalizar su período de vida útil es casi siempre menor que la demanda potencial del producto remanufacturado. De manera que si sucede lo opuesto, o sea, cuando un producto permanece durante un largo período de tiempo en el mercado, el retorno de los **cores o núcleos** es bastante más alto, que la demanda del mismo remanufacturado [34].

Un problema muy importante que enfrenta la industria remanufacturera en la actualidad, es el que consiste en velar porque exista un suministro adecuado de **core** (*producto/componente base o núcleo sobre el que se realiza el proceso de remanufactura*) para apoyar las operaciones, ya que este lleva consigo un conjunto de actividades que demandan una coordinación prácticamente exacta, de modo que no ocurra una acumulación exagerada de inventario base o déficit, lo que conllevaría directamente a prestar al cliente un servicio inaceptable. Además generalmente existen fallas en los pronósticos a corto plazo realizados por el área directiva de la empresa, ya que las actividades asociadas a la planeación y control se desarrollan a través de métodos manuales, por lo cual se puede afirmar que el empleo de técnicas científicas constituye un área de oportunidad en la industria [9, 40].

Otro problema a destacar, es el asociado a la calidad con la que se recibe el **core**,

ya que esto provoca cierta incertidumbre a la hora de seleccionar las operaciones a aplicar en cada caso. Ciertos autores han referido el término “niveles de calidad” para clasificar las condiciones que permiten aceptar o rechazar un **core** [28, 40]. Mientras otros consideran dos posibles estados de llegada: buenos y malos, en el caso de que se reciba en buen estado se trata con el mismo proceso, en caso contrario, se procede a rescatarlo con procesos alternos [6, 40] y costos de remanufactura diversos dependiendo de la calidad del **core** a su llegada [17, 40].

De acuerdo a la práctica del continente europeo y en particular de los Estados Unidos de Norteamérica, el principal desafío que enfrenta la remanufactura en la actualidad, es la falta de reconocimiento por parte del mercado. Aunque de modo paulatino, los obstáculos técnicos se han ido resolviendo, las ventas de productos remanufacturados en el mercado, todavía no se pueden calificar como buenas, esto es consecuencia de la falta de comprensión acerca de este tipo de producto y los prejuicios que genera en el individuo el hecho de comprar un producto que ha sido usado previamente. Esta situación reduce el entusiasmo en las empresas de formar parte de esta industria [51].

2.5 LA LOGÍSTICA INVERSA COMO COMPLEMENTO FUNDAMENTAL EN LA INDUSTRIA DE REMANUFACTURA

A consecuencia de los problemas mencionados anteriormente, la logística inversa ha ido ganando un espacio realmente importante en lo que se refiere a los fabricantes de productos originales, ya que una diversidad de legislaciones que protegen al medio ambiente se han puesto en práctica con el fin de forzar a estos fabricantes, de cierta manera, a recuperar sus productos usados al concluir su período de vida útil, con el objetivo de garantizar eliminar al máximo la generación de desechos y conservar los recursos [31].

De cierta forma todas estas presiones legislativas han conducido a los fabricantes a tener que recurrir como estrategia para conservar sus productos en el mercado, al hecho de implementar un mejor diseño, construcción y elaboración de sus productos, de modo que los mismos se puedan reutilizar, remanufacturar, reciclar o eliminar, a través de una red que permita obtener el máximo valor posible de los productos usados [31].

Un factor esencial para lograr la creación de una red de logística inversa compleja, es que los fabricantes tengan el incentivo de que pueden agregar valor a sus productos usados, de lo contrario sería prácticamente imposible diseñar una red compleja y bien estructurada, ya que la misma no solo depende del diseño de puntos de red y; la asignación de capacidades no solo depende de la cantidad de productos devueltos sino también de la demanda de productos remanufacturados y partes de productos usados [31].

Existe una gran variedad de actividades que se desarrollan en una empresa que pueden estar contempladas dentro de lo que se considera logística inversa, también forman parte de las funciones de la cadena de suministro, algunas de ellas son las siguientes:

- remanufactura.
- remodelación.
- reciclaje.
- relleno sanitario.
- reenvasado.
- procesamiento de devoluciones.
- salvamento.

La logística inversa abarca dos áreas básicas generales, dependiendo directamente de si en el flujo inverso se encuentra primordialmente el producto o el empaque, ya que el mismo se puede encontrar en flujo inverso debido a varias causas, como pudieran ser la remanufactura, renovación o porque el cliente efectuó una devolución [39].

Existen diversos tipos de logística inversa según la opción de recuperación del producto, algunas de ellas son: reutilización directa, reventa, reparación, reacondicionamiento, remanufactura, etc, además estas opciones normalmente se dividen en tres grandes grupos o categorías: reutilización, reciclaje y remanufactura [24].

En el caso de la reutilización, el producto se puede usar en más de una ocasión de la misma manera, por supuesto después de ser sometido a limpieza y reprocesamiento. Por otra parte el reciclaje, permite la recuperación del material sin la preservación de la forma o estructura del producto y finalmente la remanufactura que se considera un proceso industrial en el cual los productos que han culminado su período de vida útil o bien han sufrido cierto desgaste por el tiempo de uso, se restauran a una condición llamada “como nuevo” [24].

La logística inversa, tal y como se ha referido anteriormente abarca la totalidad de la actividad logística e inicia desde que se comienza a consumir el producto, hasta lograr convertir el producto utilizado en un bien que sea posible colocar nuevamente en el mercado. Las actividades asociadas a la logística inversa generan competencia entre las empresas, mejoran el nivel de servicio al cliente y reducen los costos de producción, además de crear una imagen ecológica de las empresas que la ponen en práctica, provocando un aumento de la demanda de los clientes concientes por sus productos [14].

A diferencia de la logística tradicional, la logística inversa trata el tema de cómo recuperar productos de la manera más eficiente posible de los clientes. Una vez que la empresa ha decidido la opción correcta para efectuar la recuperación del producto, deben definir también el diseño de la red de logística inversa, existe una

gran variedad de configuraciones para estas redes, que dependen de la opción de recuperación seleccionada y las características del producto recuperado [14].

Otro problema de relevancia dentro de la industria de la remanufactura es el asociado al tamaño de lote, ya que debido al bajo nivel de automatización que existe en esta industria, el tamaño de los mismos suele ser pequeño [43, 26].

En la remanufactura, la cantidad, la calidad y el tiempo de los productos usados resulta difícil de controlar, ya que no sucede como en el proceso de fabricación (manufactura) con el tema del suministro [16, 26]. Esto se traduce en que realizar la planificación de la producción para la remanufactura es una tarea compleja [15, 46, 26].

La cadena de logística inversa es un elemento fundamental de la competencia en casi la totalidad de las industrias [27].

2.6 PAPEL DE LA INDUSTRIA REMANUFACTURERA EN EL CONTEXTO NACIONAL

El uso de materiales recuperados constituye uno de los principales desafíos para la totalidad de las industrias en la actualidad. La utilización de los desechos generados como materia prima para la confección de un nuevo producto, presenta un número sustancial de beneficios, entre ellos, la reducción del consumo de recursos primarios o vírgenes. Además permite el descenso considerable de la acumulación de materiales en los vertederos, además de reducir también el empleo de energía, residuos y las emisiones resultantes del proceso de transformación de la materia prima en el producto novedoso [7].

Se puede afirmar también que la remanufactura, desde el punto de vista del cliente, ofrece opciones que implican menor costo para la adquisición de productos de calidad superior, del mismo modo que genera mayores oportunidades de empleo

por ser una industria que tiene la tipicidad de necesitar mano de obra en mayor cuantía, debido a procesos fundamentales como el desensamblaje, inspección y posterior ensamble [37, 18].

La frontera norte de México debido a su cercanía estratégica con EE.UU, se caracteriza por un amplio desarrollo de esta industria, contando con alrededor de 17 empresas vinculadas con este sector de la economía, 11 de ellas se dedican a la remanufactura en las áreas eléctrica y electrónica, y 6 dedicadas a la rama automotriz, mismas que generan una cifra promedio de más de 6400 empleos directos [41].

Por otra parte de acuerdo a la **Secretaría de Desarrollo Económico (SE-DECO)** para el año 2014, la inversión extranjera directa en las empresas situadas en la franja fronteriza, ascendió para el caso del estado de Tamaulipas a más de 500 millones de dólares, y para el estado de Chihuahua a cerca de 1 200 millones de dólares [41]. Vale mencionar que estas compañías en su mayoría son de capital extranjero.

Por tanto la alternativa de remanufacturar piezas y componentes de determinado producto, no solamente se traduce en incrementar las alternativas de empleo y en un costo menor, sino también en la posibilidad de prolongar el período de vida útil del producto en general, en el cual se encuentra la pieza remanufacturada.

Debido a los beneficios anteriormente expuestos, las actividades asociadas a la remanufactura han logrado convertirse en un patrón fiable a seguir por las empresas que persiguen como objetivo, la ecologización de sus actividades comerciales.

Todo lo expuesto con anterioridad, pero principalmente los aspectos tratados en esta sección, maximizan la relevancia de la problemática en cuestión, misma que está enfocada a la reducción de los costos de operación en la empresa objeto de estudio, de manera que se logre a través de esta estrategia, hacer lo más eficiente posible su proceder.

2.7 PLANEACIÓN DE LA PRODUCCIÓN

Cabe notar que para el correcto desempeño de este tipo de empresas, se hace necesario efectuar una adecuada planificación de la producción, ya que esto permite gestionar de manera eficiente, los recursos de que disponen las mismas, de modo que sea posible encontrar la mejor manera de asignarlos con el objetivo de reducir costos del plan de producción.

Un factor esencial relacionado con esto, es el abastecimiento de materia prima, en el cual juega un papel vital el plan de requerimientos de material, ya que éste funge como enlace entre las actividades de producción y adquisición de materiales posibilitando programar las compras a proveedores en función del plan de producción previsto [49].

En la literatura existen una gran diversidad de modelos deterministas que están diseñados para efectuar la planeación de la producción y requerimiento de material, a modo general la función objetivo de los mismos persigue reducir costos asociados bien sea a capacidad, producción e inventarios, y en su mayoría se centran en la resolución de problemas multiproducto y multiperíodo [49].

En este caso para el desarrollo de la formulación matemática, se toma como base el modelo propuesto por J. Tang [47] que, a pesar de ser un modelo que presenta algunas características que no se encuentran en el problema objeto de estudio, como por ejemplo el hecho de que contempla incertidumbre en la demanda, tolerancia en ciertos parámetros del modelo y lógica difusa, presenta también varias que sí forman parte del problema, como la planificación a partir de un horizonte de tiempo preestablecido, múltiples productos, múltiples períodos, costos de inventario, además está dirigido a minimizar los costos totales.

La formulación matemática para el problema de planificación agregada de la producción multi-producto es la siguiente:

$$\text{Min } F(x, y, I) = \sum_{i=1}^n \sum_{t=1}^T [f_i(x_{it}, y_t) + c_i I_{it}] \quad (2.1)$$

$$I_{it} = x_{it} + I_{it-1} - d_{it} \quad i = 1, 2, \dots, n \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2.2)$$

$$0 \leq y_t \leq W_t \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2.3)$$

$$\sum_{i=1}^n I_{it} \leq K \quad t = 1, 2, \dots, T \quad (2.4)$$

$$x_{it} \geq 0, \quad I_{it} \geq 0, \quad t = 1, 2, \dots, T; \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (2.5)$$

Donde:

- n : Tipos de productos.
- T : Horizonte de planeación.
- d_{it} : Demanda de cada tipo de producto en cada período.
- W_t : Capacidad de producción en cada período.
- K : Capacidad del almacén.
- I_{i0} : Inventario inicial de producto tipo i .
- c_i : Costo unitario de inventario del producto i en cada período.
- x_{it} : Nivel de producción del producto i en el período t .
- I_{it} : Nivel de inventario del producto i al final del período t .
- y_t : Nivel de fuerza laboral asignado en el período t .
- $f_i(x_{it}, y_t)$: Costo de producción del producto i en el período t .

La **ecuación 2.1** representa la función objetivo y está dirigida a minimizar los costos totales de producción e inventario. La ecuación de balance producción-inventario está dada por **2.2**. La **ecuación 2.3** representa las restricciones asociadas a capacidad de producción en cada período. La capacidad del almacén esta dada por la **ecuación 2.4**. La **ecuación 2.5** implica las restricciones de no negatividad de las variables de decisión.

CAPÍTULO 3

DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

En el presente capítulo se hace referencia primeramente a una breve introducción acerca de las empresas remanufactureras a modo general, con énfasis en aquellas que siguen un esquema de múltiples plantas. Posteriormente se procede a describir la empresa en la cual se desarrolla la investigación, así como su línea de producción y por último se expone la formulación matemática generada.

3.1 INTRODUCCIÓN

Actualmente gran cantidad de empresas están poniendo en práctica programas de reciclaje y remanufactura, en los cuales se ven involucrados un número elevado de productos y componentes. Para las compañías que hoy forman parte de esta industria, no solo deben verlo como un buen negocio, sino también como una estrategia empresarial más sostenible y amigable con el medio ambiente, vale recalcar que muchas de estas empresas no operan únicamente efectuando remanufactura, sino que laboran en conjunto con plantas de manufactura, para entre ambos, satisfacer la demanda del mercado [2].

No obstante a lo expuesto con anterioridad, también existen empresas que poseen una característica en particular (**múltiples plantas remanufactureras**

trabajando al unísono), las cuales se ven obligadas a seguir un esquema de trabajo acorde con esta particularidad. Para estos casos, se evalúan diversos escenarios en los cuales la demanda juega un papel fundamental y la empresa debe responder a preguntas asociadas al (**cómo, cuándo y dónde**) enfocadas a factores como: **localización**, es decir, que cantidad de producto debe mantenerse en cada planta, **ordenamiento**, o sea, cuándo y cuánto solicitar de cada producto y **transporte** que se refiere a cómo debe realizarse la distribución de los mismos [42, 20].

3.2 DESCRIPCIÓN DE LA LÍNEA DE PRODUCCIÓN

La empresa en la que se desarrolla la investigación cuenta en la actualidad con tres plantas, la misma se encarga de la reparación de antenas de televisión paga. La ubicación geográfica de las plantas es la siguiente: la primera de ellas se encuentra ubicada en Memphis, Tennessee (EE.UU) y las dos restantes en territorio nacional, una en Chihuahua y la otra en Reynosa. Las plantas de Memphis y Chihuahua fungen como centro de recopilación (**plantas en las cuales se recibe el producto**), aunque la primera de ellas cuenta con una mayor capacidad, lo cual implica que está en condiciones de recibir aún mayor cantidad de producto.

La planta ubicada en Memphis cuenta con el personal técnico y equipamiento necesario para efectuar solamente el proceso de screening (pruebas funcionales, limpieza cosmética y empaque) a los productos, mientras que en las plantas de Chihuahua o Reynosa, además de este proceso, pueden ser reparadas, es decir se procesan fallas del screening y se hace uso de personal técnico con el fin de realizar diagnósticos más complejos.

Cada uno de estos procesos consiste en lo siguiente:

1. **Screening:** Este proceso, está compuesto por varios subprocesos que se llevan a cabo de manera consecutiva, y que ayudan a identificar a través de diagnósticos

sencillos, la(s) pieza(s) que presentan algún tipo de desperfecto e impiden el correcto funcionamiento del producto. Claro está, este proceso requiere de la interacción de un técnico con el mismo.

2. **Reparación:** Se refiere a un proceso un poco más profundo, en el cual se desarrollan diagnósticos más complejos, de modo que se procede a arreglar o solucionar cualquier descompostura que tenga el producto, por supuesto, se necesita de personal técnico experimentado para ello, ya que se debe tener conocimiento sobre la estructura, componentes y funcionamiento del producto en cuestión.

Una vez que llegan todas las piezas a remanufacturar a las plantas mencionadas anteriormente, se procede a tomar la decisión sobre el destino de cada una de ellas. Para el caso de la planta ubicada en Memphis, se debe tomar la decisión referente a su embarque a Chihuahua, a Reynosa, o si la planta cuenta con la capacidad suficiente para que sean remanufacturadas. Por su parte una vez el producto arriba a la planta de Chihuahua, se analiza la situación, y se decide si se deben embarcar a Reynosa o si permanecen allí para su posterior remanufactura. En el mapa (ver **Figura 3.1**) que aparece a continuación se muestra lo anteriormente descrito.

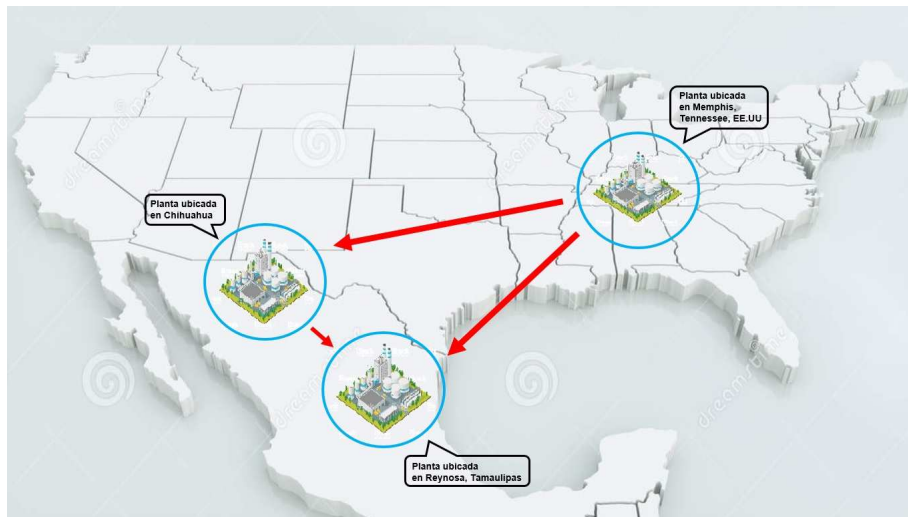


Figura 3.1: Ubicación geográfica y descripción del flujo de producto interplanta.

Es conveniente subrayar que los productos que son recibidos por los centros de recopilación, llegan a éstos clasificados en dos tipos: (1) *eco* y (2) *no eco*, el primero de ellos, es aquel que presenta algún desperfecto referido a su fabricación, y el segundo, es el producto que tiene algún otro tipo de descompostura. En el caso de que algún producto se encuentre clasificado como *eco*, directamente se le efectúa el proceso de reparación, en caso contrario, si lo está como *no eco* primeramente se le realiza screening y luego se determina si se finaliza el producto o si es necesaria una reparación. En el diagrama (ver **Figura 3.2**) se muestra la representación gráfica de la situación descrita anteriormente.

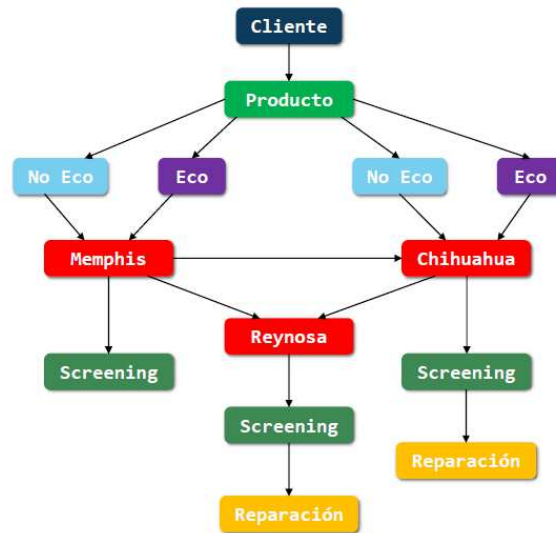


Figura 3.2: Diagrama de procesamiento de los productos.

La empresa cuenta con una gama de modelos de productos, los cuales se clasifican en familias, y debe surtir de los modelos de cada familia a sus clientes, teniendo en cuenta un estimado de cuántas piezas puede demandar el cliente en los próximos meses. Entre las tres plantas en su conjunto deben de lograr satisfacer la demanda del cliente semanalmente. La asignación de piezas en cada planta depende de varios factores, entre ellos resalta la mano de obra disponible en los períodos de trabajo, así como también el costo de envío de piezas inter-planta. De manera global el objetivo del problema es el siguiente:

Dado el volumen de piezas de cada familia que llega a las plantas de Memphis y Chihuahua, se desea determinar la asignación de piezas a las tres plantas, con la finalidad de aprovechar al máximo las capacidades de trabajo en las mismas, minimizando costos.

La información descrita anteriormente aparece resumida en la **Tabla 3.1**.

| Memphis | Chihuahua | Reynosa |
|---|--|--|
| Solo realiza screening | Realiza screening y reparación | Realiza screening y reparación |
| Distribuye a Chihuahua y a Reynosa | Distribuye a Reynosa | No distribuye |
| Recibe producto directo del cliente | Recibe producto directo del cliente y de Memphis | Recibe producto de Memphis y de Chihuahua (en menor cantidad que las dos anteriores) |
| Cantidad máxima de piezas a las que se le puede realizar screening mensualmente | Cantidad máxima de piezas a las que se le puede realizar screening y reparación mensualmente | Cantidad máxima de piezas a las que se le puede realizar screening y reparación mensualmente |
| Pronóstico de demanda del cliente por mes | | |

Tabla 3.1: Información relativa a las plantas.

3.3 MODELACIÓN MATEMÁTICA

Para describir la formulación matemática del problema, se hace necesario presentar primeramente, las variables y parámetros que se consideran, van a intervenir en la misma, a continuación se procede a identificar cada uno de ellos.

3.3.1 PARÁMETROS DEL PROBLEMA

Pe_{it} = cantidad de piezas de producto i que envía el cliente directamente a Memphis en el período t ,

Pc_{it} = cantidad de piezas de producto i que envía el cliente directamente a Chihuahua en el período t ,

Ce_{ijt} = costo unitario de enviar el producto i a la planta j desde Memphis en el período t ,

Cc_{it} = costo unitario de enviar el producto i de Chihuahua a Reynosa en el período t ,

B_j = costo de mantener en inventario una unidad de producto durante un período en la planta j ,

D_{it} = demanda del cliente de producto i en el período t ,

Ve_j = capacidad del vehículo que realiza el viaje de Memphis a la planta j ,

Vc = capacidad del vehículo que realiza el viaje de Chihuahua a Reynosa,

H_j = capacidad total de producción/reparación en la planta j .

3.3.2 VARIABLES DEL PROBLEMA

X_{ijt} = cantidad de piezas de producto i a enviar de Memphis a la planta j en el período t ,

Y_{it} = cantidad de piezas de producto i a enviar de Chihuahua a Reynosa en el período t ,

Z_{it} = cantidad de piezas de producto i a realizar screening en Memphis en el período t ,

Q_{it} = cantidad de piezas de producto i que se asigna a Chihuahua de un lote enviado directamente del cliente a esta planta durante el período t ,

I_{ijt} = inventario final de piezas de producto i que permanece en la planta j durante el período t ,

K_{ijt} = cantidad de piezas de producto i a producir/reparar en la planta j durante el período t ,

F_{it} = cantidad de piezas de producto i demandadas que no se pudieron producir durante el período t .

3.3.3 MODELO MATEMÁTICO

A continuación se presenta la formulación matemática del problema, en la cual (\mathbf{m}) indica la cantidad de modelos de productos, (\mathbf{k}) la cantidad de períodos que constituyen el horizonte de tiempo y (\mathbf{p}) el número de plantas con las que cuenta la empresa.

Debido a que la misma maneja treinta y tres productos, $i = \{1, \dots, 33\}$, en el modelo se considera un horizonte de planeación de un mes, dividido en cuatro semanas por lo tanto $t = \{1, \dots, 4\}$ y como los destinos a enviar piezas de Memphis

son dos, se tiene que, $j = \{1 = Chihuahua, 2 = Reynosa, 3 = Memphis\}$.

$$\text{Min} \left[1000 \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^k F_{it} + \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^k \sum_{j=1}^2 C e_{ijt} X_{ijt} + \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^k C c_{it} Y_{it} + \sum_{j=1}^p B_j \sum_{i=1}^m \sum_{t=1}^k I_{ijt} \right] \quad (3.1)$$

$$\sum_{j=1}^2 K_{ijt} + Z_{it} + F_{it} \geq D_{it} \quad \forall(i, t) \quad (3.2)$$

$$Z_{it} \leq 0.2 P e_{it} \quad \forall(i, t) \quad (3.3)$$

$$X_{i1t} + X_{i2t} \leq 0.8 P e_{it} \quad \forall(i, t) \quad (3.4)$$

$$P c_{it} + X_{i1t} - Y_{it} = Q_{it} \quad \forall(i, t) \quad (3.5)$$

$$X_{i3t} = Z_{it} \quad \forall(i, t) \quad (3.6)$$

$$\sum_{i=1}^m X_{ijt} \leq V e_j \quad \forall(j, t) \quad (3.7)$$

$$\sum_{i=1}^m Y_{it} \leq V c \quad \forall t \quad (3.8)$$

$$I_{i1t} = I_{i1t-1} + Pc_{it} + X_{i1t} - Y_{it} - K_{i1t} \quad \forall(i, t) \quad (3.9)$$

$$I_{i2t} = I_{i2t-1} + X_{i2t} + Y_{it} - K_{i2t} \quad \forall(i, t) \quad (3.10)$$

$$I_{i3t} = I_{i3t-1} + Pe_{it} - X_{i1t} - X_{i2t} - Z_{it} \quad \forall(i, t) \quad (3.11)$$

$$I_{i10} + I_{i20} + I_{i30} = 0 \quad \forall(i) \quad (3.12)$$

$$K_{i1t} \leq X_{i1t} + Q_{it} + I_{i1t-1} \quad \forall(i, t) \quad (3.13)$$

$$K_{i2t} \leq X_{i2t} + Y_{it} + I_{i2t-1} \quad \forall(i, t) \quad (3.14)$$

$$K_{i3t} \leq I_{i3t-1} + Z_{it} \quad \forall(i, t) \quad (3.15)$$

$$\sum_{i=1}^m K_{ijt} \leq H_j \quad \forall(t) \quad (j = 1, 2) \quad (3.16)$$

$$\sum_{i=1}^m Z_{it} \leq H_3 \quad \forall t \quad (3.17)$$

Finalmente se tiene la naturaleza de las variables.

$$X_{ijt}, Y_{it}, Z_{it}, Q_{it}, I_{ijt}, K_{ijt}, F_{it} \geq 0 \quad y \quad \text{enteros} \quad (3.18)$$

3.3.4 DESCRIPCIÓN

3.3.4.1 FUNCIÓN OBJETIVO

La función objetivo está dirigida a minimizar los costos operativos de la empresa objeto de estudio, lo cual se puede apreciar en la ecuación **3.1**

- El primer término de la función objetivo, expresa la penalización o costo en que se incurre, dado que exista producto que no se procesa o envía.
- El segundo término de la función objetivo, está asociado al costo que se genera a través del envío de producto de la planta ubicada en Memphis a las dos restantes.
- El tercero tiene que ver de igual forma, con el costo resultante de realizar el envío de producto de la planta ubicada en Chihuahua a la de Reynosa.
- El cuarto representa el costo relacionado a los inventarios existentes en cada una de las plantas de cada producto en cada período.

3.3.4.2 RESTRICCIONES

La cantidad total de piezas a reparar de los distintos productos en las plantas de Chihuahua y Reynosa, más la totalidad de las piezas a las que se les realiza screening, más la cantidad de piezas que no se pudieron producir, debe de ser mayor o igual a la demanda del cliente (**ver Ecuación 3.2**).

El número de piezas que permanecen en Memphis para realizarle screening, no debe sobrepasar el 20 % de la cantidad de piezas que recibe directamente del cliente (**ver Ecuación 3.3**).

La suma de la cantidad de producto enviado desde Memphis a las plantas de Chihuahua y Reynosa respectivamente, no debe exceder el 80 % del número de piezas que recibe directamente del cliente (**ver Ecuación 3.4**).

La cantidad de producto enviado directamente del cliente y que permanece en Chihuahua para su reparación, se obtiene a través de la ecuación **3.5**.

La cantidad de producto que permanece en Memphis, después de realizar la distribución, debe ser igual a la cantidad de piezas a las que se le realiza screening (**ver Ecuación 3.6**).

La capacidad del vehículo que distribuye el producto de Memphis a las plantas de Chihuahua y Reynosa debe ser respetada (**ver Ecuación 3.7**).

De forma similar, la capacidad del vehículo que distribuye el producto de Chihuahua a Reynosa debe ser respetada (**ver ecuación 3.8**) .

El inventario alcanzado por período en la planta de Chihuahua, se puede obtener a través de la ecuación **3.9**.

El inventario alcanzado por período en la planta de Reynosa, se puede obtener de manera similar, solo que en este caso no se recibe producto directamente del cliente (**ver Ecuación 3.10**).

El inventario alcanzado por período en la planta de Memphis, se puede obtener mediante la fórmula que describe la ecuación **3.11**.

El inventario inicial existente en cada planta en el período inicial, debe ser igual a cero (**ver Ecuación 3.12**).

La cantidad de piezas a reparar en la planta de Chihuahua, debe ser inferior o igual, a la suma de la cantidad de producto que recibe de Memphis, más la cantidad que se asigna a esta planta de un lote enviado directamente del cliente, más lo que tiene en inventario para este período (**ver Ecuación 3.13**).

Análogamente para la planta ubicada en Reynosa (**ver Ecuación 3.14**).

De forma similar para la planta de Memphis (**ver Ecuación 3.15**).

La cantidad de piezas a producir/reparar en cada una de las plantas, no debe superar la capacidad productiva de las mismas tal como lo refleja la ecuación **3.16**.

La cantidad de piezas a las que se le realiza screening en la planta ubicada en Memphis, debe ser inferior o igual a la capacidad de la misma (**ver Ecuación 3.17**).

CAPÍTULO 4

EXPERIMENTACIÓN COMPUTACIONAL

En el presente capítulo, se describen los resultados obtenidos a través del experimento computacional realizado, con el objetivo de validar y evaluar el desempeño en la práctica de la formulación matemática propuesta (ver **Capítulo 3**). Se hace referencia además, a las características del equipo de cómputo empleado y se describe a detalle el proceso de elaboración de las instancias utilizadas.

4.1 EQUIPO DE CÓMPUTO

La formulación matemática propuesta para esta investigación fue implementada en el lenguaje de programación AMPL, se utilizó el optimizador CPLEX 12.10.0.0 para la obtención de los resultados y fue ejecutada en una computadora con Procesador Intel(R) Core(TM) i3 CPU M350 @ 2.27GHz, RAM 3.00 GB, Windows 10 Pro.

4.2 GENERACIÓN DE INSTANCIAS

Para el desarrollo de este trabajo, se generaron instancias tomando como referencia la dinámica de producción en la empresa objeto de estudio (ver **epígrafe**

3.2). En las mismas se consideran un total de 10 parámetros, mismos que son:

- Cantidad de piezas de producto i que envía el cliente directamente a Memphis en el período t .
- Cantidad de piezas de producto i que envía el cliente directamente a Chihuahua en el período t .
- Costo unitario de enviar el producto i a la planta j desde Memphis en el período t (**este deriva en 2, por referirse al envío desde Memphis a las 2 plantas restantes**).
- Costo unitario de enviar el producto i de Chihuahua a Reynosa en el período t .
- Costo de mantener en inventario una unidad de producto durante un período en la planta j .
- Demanda del cliente de producto i en el período t .
- Capacidad del vehículo que realiza el viaje de Memphis a la planta j .
- Capacidad del vehículo que realiza el viaje de Chihuahua a Reynosa.
- Capacidad total de producción/reparación en la planta j .

Fueron creadas un total de 60 instancias, variando en ellas la demanda y el costo de inventario, las mismas se encuentran divididas en 6 escenarios principales (10 instancias para cada escenario): demanda pequeña, demanda justa y demanda superior, se contemplan en cada escenario de demanda, costos de inventario pequeños y grandes.

Para la construcción de las mismas, se consideran los siguientes aspectos:

Se definen los valores de las cantidades de producto que reciben directamente del cliente, las plantas ubicadas en Memphis y Chihuahua, para el primer caso se

considera un valor aleatorio entre 1500 y 3000 piezas de producto, dado que esta planta es la que posee mayor capacidad, mientras que para el segundo caso se toma de igual forma, un valor aleatorio entre 200 y 500 piezas de producto, de cada tipo en cada período respectivamente.

Posteriormente se halla la suma de las cantidades anteriormente referidas y para cada período se determina su desviación estándar DE_t , valor que se utiliza más adelante para realizar la estimación de la demanda.

Para el caso de los costos asociados al transporte interplanta, se asignaron valores fijos arbitrarios entre 21 y 49 unidades monetarias por pieza de producto trasladada, para cada par de plantas entre las que debe existir flujo de mercancía.

El costo de inventario en cada planta, para el cual se debe considerar (**costo pequeño (CP)** y **costo grande (CG)**), se determina para cada caso mediante las siguientes expresiones:

- $CP = \textit{Promedio de los costos de transporte} * 0.05$
- $CG = \textit{Promedio de los costos de transporte} * 0.25$

Para efectuar la estimación de la demanda en los diferentes escenarios (**demanda pequeña (DP)**, **demanda justa (DJ)** y **demanda superior (DS)**), se elige un valor aleatorio que va a estar determinado para cada caso, en el rango que cubren las siguientes expresiones:

- $DP = 0.75 * SD_{it} - DE_t \leq D_{it} \leq 0.75 * SD_{it} + DE_t$
- $DJ = SD_{it} - DE_t \leq D_{it} \leq SD_{it} + DE_t$
- $DS = SD_{it} \leq D_{it} \leq SD_{it} + DE_t$

Donde:

- $i = 1, \dots, 33$ tipos de producto.
- $t = 1, 2, 3, 4$ semanas (equivalente a 1 mes)
- Suma de las cantidades recibidas directamente del cliente, por tipo de producto en cada período en las plantas de Memphis y Chihuahua (SD_{it}).
- Desviación estándar de la suma por período (DE_t).
- Demanda de cada tipo de producto en cada período (D_{it}).

Con relación a la capacidad vehicular, la misma se obtiene para cada caso en particular mediante las expresiones siguientes:

- $CVM-C = 0.38 * CPM$
- $CVM-R = 0.40 * CPR$
- $CVC-R = 0.38 * CPC$

Donde:

- Capacidad del vehículo que transporta la mercancía desde la planta ubicada en Memphis a la ubicada en Chihuahua (CVM-C).
- Capacidad del vehículo que transporta la mercancía desde la planta ubicada en Memphis a la ubicada en Reynosa (CVM-R).
- Capacidad del vehículo que transporta la mercancía desde la planta ubicada en Chihuahua a la ubicada en Reynosa (CVC-R).
- Capacidad de la planta ubicada en Memphis (CPM).
- Capacidad de la planta ubicada en Reynosa (CPR).
- Capacidad de la planta ubicada en Chihuahua (CPC).

Por último, con respecto a la capacidad de producción/reparación de cada una de las plantas, se determina lo siguiente:

Para el caso de la planta de Memphis, y por ser ésta la de mayor capacidad, se le asignó un valor arbitrario grande de modo que cumpla con los parámetros de factibilidad del problema.

Para el caso de los dos restantes, considerando sus características, sus valores están dados por:

- $CPC = CPM - (0.20 * CPM)$
- $CPR = CPM - (0.40 * CPM)$

4.3 EXPERIMENTACIÓN CON LA FORMULACIÓN MATEMÁTICA

El modelo matemático fue implementado en lenguaje de programación AMPL, haciendo uso del optimizador CPLEX 12.10.0.0 para su resolución.

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada una de las instancias, atendiendo a los 6 escenarios en los que se encuentran divididas. Cabe notar que las 60 instancias analizadas se resolvieron a optimalidad.

De acuerdo a que se trabaja con un horizonte de planeación de cuatro semanas (**1 mes aproximadamente**) y treinta y tres productos, para un mejor entendimiento de la situación, se decide utilizar la cifra global del mes para cada caso, es decir la sumatoria de la cantidad de producto de cada tipo que se debe enviar a cada planta en las cuatro semanas.

En la tabla 4.1 se exponen los resultados obtenidos para las 10 instancias que pertenecen al escenario asociado con demanda y costo de inventario pequeños. En

la primera columna se encuentra el nombre de la instancia. En la segunda columna de la misma, **(M)** se encuentran los valores que representan la cantidad de producto que debe permanecer en la planta ubicada en Memphis para realizarle el proceso de screening. En la tercera, **(M-C)** aparece la cantidad que debe ser enviada desde la planta ubicada en Memphis a la de Chihuahua, bien sea para realizarle screening, reparación o ambos. En la cuarta, **(M-R)** aparece la cifra cuyo valor está dado por la cantidad que debe ser enviada de la planta ubicada en Memphis a la de Reynosa para su procesamiento en la misma. En la quinta columna, **(C-R)** se muestra la cantidad concerniente al envío de producto entre la planta localizada en Chihuahua y la de Reynosa. Por último, en la sexta columna, **(F.O (U.M))** se refleja el valor que representa el costo en unidades monetarias, en el cual se incurre al efectuar la distribución de producto interplanta de esa forma, para cada instancia en particular.

| Distribución de producto interplanta | | | | | |
|---|----------|------------|------------|------------|-----------------|
| Instancia | M | M-C | M-R | C-R | F.O (UM) |
| data_dp_01 | 60822 | 114000 | 41207 | 0 | 5926520 |
| data_dp_02 | 59252 | 114000 | 36965 | 0 | 5808280 |
| data_dp_03 | 59166 | 114000 | 37481 | 0 | 5675010 |
| data_dp_04 | 62108 | 114000 | 45298 | 0 | 6067130 |
| data_dp_05 | 59775 | 114000 | 41182 | 0 | 5881400 |
| data_dp_06 | 58673 | 114000 | 33229 | 0 | 5636110 |
| data_dp_07 | 59767 | 114000 | 42405 | 0 | 5873910 |
| data_dp_08 | 58705 | 114000 | 34682 | 0 | 5670750 |
| data_dp_09 | 59653 | 114000 | 39246 | 0 | 5762800 |
| data_dp_10 | 58757 | 114000 | 35940 | 0 | 5731880 |

Tabla 4.1: Resultados obtenidos para las instancias con DP y CP.

El resto de las tablas siguen la misma estructura, solamente varía el escenario en que se encuentran las instancias.

| Distribución de producto interplanta | | | | | |
|---|----------|------------|------------|------------|-----------------|
| Instancia | M | M-C | M-R | C-R | F.O (UM) |
| data_dj_01 | 60822 | 114000 | 72000 | 0 | 59121500 |
| data_dj_02 | 59252 | 114000 | 72000 | 0 | 56462900 |
| data_dj_03 | 59166 | 114000 | 72000 | 0 | 57234200 |
| data_dj_04 | 62108 | 114000 | 72000 | 0 | 66810000 |
| data_dj_05 | 59775 | 114000 | 72000 | 0 | 55311800 |
| data_dj_06 | 58673 | 114000 | 72000 | 0 | 52504700 |
| data_dj_07 | 59767 | 114000 | 72000 | 0 | 56673200 |
| data_dj_08 | 58705 | 114000 | 72000 | 0 | 54247500 |
| data_dj_09 | 59653 | 114000 | 72000 | 0 | 58064400 |
| data_dj_10 | 58757 | 114000 | 72000 | 0 | 51646200 |

Tabla 4.2: Resultados obtenidos para las instancias con DJ y CP.

| Distribución de producto interplanta | | | | | |
|---|----------|------------|------------|------------|-----------------|
| Instancia | M | M-C | M-R | C-R | F.O (UM) |
| data_ds_01 | 60822 | 114000 | 72000 | 0 | 94565500 |
| data_ds_02 | 59252 | 114000 | 72000 | 0 | 87761000 |
| data_ds_03 | 59166 | 114000 | 72000 | 0 | 84537600 |
| data_ds_04 | 62108 | 114000 | 72000 | 0 | 98085900 |
| data_ds_05 | 59775 | 114000 | 72000 | 0 | 85783900 |
| data_ds_06 | 58673 | 114000 | 72000 | 0 | 82969500 |
| data_ds_07 | 59767 | 114000 | 72000 | 0 | 87337400 |
| data_ds_08 | 58705 | 114000 | 72000 | 0 | 82880300 |
| data_ds_09 | 59653 | 114000 | 72000 | 0 | 92225800 |
| data_ds_10 | 58757 | 114000 | 72000 | 0 | 85909500 |

Tabla 4.3: Resultados obtenidos para las instancias con DS y CP.

| Distribución de producto interplanta | | | | | |
|---|----------|------------|------------|------------|-----------------|
| Instancia | M | M-C | M-R | C-R | F.O (UM) |
| data_dp_01 | 60822 | 114000 | 56504 | 0 | 7637180 |
| data_dp_02 | 59252 | 114000 | 50120 | 0 | 7437600 |
| data_dp_03 | 59166 | 114000 | 53288 | 0 | 7240760 |
| data_dp_04 | 62108 | 114000 | 58221 | 0 | 7797450 |
| data_dp_05 | 59775 | 114000 | 54616 | 0 | 7454860 |
| data_dp_06 | 58673 | 114000 | 52747 | 0 | 7203430 |
| data_dp_07 | 59767 | 114000 | 57169 | 0 | 7451530 |
| data_dp_08 | 58705 | 114000 | 52751 | 0 | 7268900 |
| data_dp_09 | 59653 | 114000 | 54794 | 0 | 7372190 |
| data_dp_10 | 58757 | 114000 | 52612 | 0 | 7348040 |

Tabla 4.4: Resultados obtenidos para las instancias con DP y CG.

| Distribución de producto interplanta | | | | | |
|---|----------|------------|------------|------------|-----------------|
| Instancia | M | M-C | M-R | C-R | F.O (UM) |
| data_dj_01 | 60822 | 114000 | 72000 | 0 | 60385000 |
| data_dj_02 | 59252 | 114000 | 72000 | 0 | 57581700 |
| data_dj_03 | 59166 | 114000 | 72000 | 0 | 58260800 |
| data_dj_04 | 62108 | 114000 | 72000 | 0 | 68154400 |
| data_dj_05 | 59775 | 114000 | 72000 | 0 | 56392000 |
| data_dj_06 | 58673 | 114000 | 72000 | 0 | 53433200 |
| data_dj_07 | 59767 | 114000 | 72000 | 0 | 57799100 |
| data_dj_08 | 58705 | 114000 | 72000 | 0 | 55240200 |
| data_dj_09 | 59653 | 114000 | 72000 | 0 | 59124000 |
| data_dj_10 | 58757 | 114000 | 72000 | 0 | 52692300 |

Tabla 4.5: Resultados obtenidos para las instancias con DJ y CG.

| Distribución de producto interplanta | | | | | |
|---|----------|------------|------------|------------|-----------------|
| Instancia | M | M-C | M-R | C-R | F.O (UM) |
| data_ds_01 | 60822 | 114000 | 72000 | 0 | 95795100 |
| data_ds_02 | 59252 | 114000 | 72000 | 0 | 88855100 |
| data_ds_03 | 59166 | 114000 | 72000 | 0 | 85519300 |
| data_ds_04 | 62108 | 114000 | 72000 | 0 | 99405900 |
| data_ds_05 | 59775 | 114000 | 72000 | 0 | 86834300 |
| data_ds_06 | 58673 | 114000 | 72000 | 0 | 83877300 |
| data_ds_07 | 59767 | 114000 | 72000 | 0 | 88431100 |
| data_ds_08 | 58705 | 114000 | 72000 | 0 | 83850000 |
| data_ds_09 | 59653 | 114000 | 72000 | 0 | 93257400 |
| data_ds_10 | 58757 | 114000 | 72000 | 0 | 86915000 |

Tabla 4.6: Resultados obtenidos para las instancias con DS y CG.

A través de las tablas anteriores se puede apreciar de forma detallada cómo debe efectuarse el proceso de distribución de mercancía interplanta, teniendo en cuenta a cuál de los escenarios pertenece cada grupo de instancias.

Por otra parte saltan a la vista ciertos aspectos que son relevantes para el análisis, uno de ellos es que para ninguno de los grupos de instancias analizados se requiere efectuar traslado de producto de la planta ubicada en Chihuahua a la de Reynosa.

Por su parte para los dos grupos de instancias que presentan demanda pequeña, existe diferencia significativa en cuanto a la cantidad de producto enviado de la planta ubicada en Memphis a la de Reynosa con respecto a los otros dos grupos, esto se debe a que para los casos que contemplan tanto demanda justa como superior, se satura la capacidad del vehículo que transporta la mercancía entre estas dos plantas en cada período (ver **Tablas 4.1 y 4.4**).

Para el caso de los grupos pertenecientes a los escenarios que contemplan demanda justa y superior, tanto la cantidad de producto que permanece en la planta ubicada en Memphis para realizarle el proceso de screening, como la cantidad de producto enviada de ésta a las dos plantas restantes son iguales, para cada caso y grupo independientemente del costo de inventario asociado.

El comportamiento del valor de la función objetivo para cada caso en particular se analiza más adelante.

Para la confección de las tablas genéricas anteriores, se utiliza el procedimiento que a continuación se describe detenidamente, a través de una de las instancias analizadas (**data_ds_01 con costo de inventario grande**).

Como referencia para la explicación se toman las tablas resultado de la instancia mencionada anteriormente, por una cuestión de espacio no aparecen los valores de todos los productos pero como se ha referido con anterioridad son 33.

De la segunda a la quinta columna de las tablas 4.1 a 4.6, aparece la sumatoria de las cantidades de cada tipo de producto que se debe enviar cada semana entre aquellas plantas que puede existir flujo de mercancía. Por último, en la sexta columna, se exponen los valores que toma la función objetivo, es decir, el costo asociado a cada esquema de trabajo cuyo valor va a estar dado por la **ecuación 3.1** (ver **subepígrafe 3.3.3**).

En la tabla 4.7 aparece la cantidad de producto que debe permanecer en la planta ubicada en Memphis, para cada tipo de producto en cada semana.

| Producto | Períodos (semanas) | | | |
|----------|--------------------|-----|-----|-----|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 360 | 528 | 542 | 477 |
| 2 | 408 | 502 | 453 | 415 |
| 3 | 508 | 571 | 312 | 453 |
| 4 | 476 | 562 | 337 | 515 |
| 5 | 560 | 459 | 469 | 349 |
| 6 | 314 | 463 | 531 | 342 |
| 7 | 487 | 527 | 367 | 412 |
| 8 | 536 | 571 | 599 | 546 |
| 9 | 593 | 340 | 335 | 372 |
| 10 | 572 | 334 | 415 | 322 |
| 11 | 431 | 388 | 486 | 556 |
| 12 | 531 | 532 | 352 | 502 |
| 13 | 363 | 411 | 475 | 514 |
| 14 | 453 | 461 | 491 | 590 |
| 15 | 496 | 542 | 596 | 313 |
| 16 | 588 | 511 | 319 | 466 |
| 17 | 486 | 422 | 484 | 384 |
| . | . | . | . | . |
| 33 | . | . | . | . |

Tabla 4.7: Cantidad de producto por período que debe permanecer en Memphis.

Para este caso en particular el valor de la sumatoria aparece en la segunda columna, es 60822 (ver **Tabla 4.6**).

En la tabla 4.8 se muestran los valores asociados a la cantidad de producto que debe ser trasladado de la planta ubicada en Memphis a la de Chihuahua, para cada tipo de producto en cada semana.

| Producto | Períodos (semanas) | | | |
|----------|--------------------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 374 | 0 | 2168 | 1910 |
| 2 | 0 | 2008 | 1814 | 1660 |
| 3 | 0 | 11 | 1248 | 0 |
| 4 | 1904 | 2248 | 682 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 1396 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 1368 |
| 7 | 0 | 2110 | 0 | 0 |
| 8 | 2147 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 2291 | 1336 | 0 | 650 |
| 11 | 0 | 0 | 1945 | 2224 |
| 12 | 2126 | 2128 | 1411 | 2011 |
| 13 | 1454 | 1644 | 1901 | 2057 |
| 14 | 1814 | 1844 | 1964 | 2360 |
| 15 | 1987 | 2168 | 2386 | 1255 |
| 16 | 2352 | 2046 | 1276 | 1865 |
| 17 | 1947 | 1688 | 1936 | 1539 |
| . | . | . | . | . |
| 33 | . | . | . | . |

Tabla 4.8: Envío de producto por período de la planta ubicada en Memphis a la de Chihuahua.

Para este caso en particular el valor de la sumatoria es 114000 y aparece en la tercera columna (ver **Tabla 4.6**).

En la tabla 4.9 aparece la cantidad de producto que debe ser enviado desde la planta ubicada en Memphis a la de Reynosa, para cada tipo de producto en cada semana.

| Producto | Períodos (semanas) | | | |
|----------|--------------------|------|------|------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 1069 | 2112 | 0 | 0 |
| 2 | 1632 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 2034 | 2276 | 0 | 1812 |
| 4 | 0 | 0 | 666 | 2062 |
| 5 | 2241 | 1839 | 1876 | 0 |
| 6 | 1256 | 1855 | 2127 | 0 |
| 7 | 1950 | 0 | 1468 | 1648 |
| 8 | 0 | 2284 | 2396 | 2184 |
| 9 | 2372 | 1360 | 1340 | 1491 |
| 10 | 0 | 0 | 1663 | 638 |
| 11 | 1725 | 1552 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| . | . | . | . | . |
| 33 | . | . | . | . |

Tabla 4.9: Envío de producto por período de la planta ubicada en Memphis a la de Reynosa.

Para este caso el valor de la sumatoria aparece en la cuarta columna y asciende a 72000 (ver **Tabla 4.6**).

En la tabla 4.10 se muestran los valores asociados a la cantidad de producto que debe ser enviado de la planta ubicada en Chihuahua a la de Reynosa, para cada

tipo de producto en cada semana.

| Producto | Períodos (semanas) | | | |
|----------|--------------------|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 2 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 3 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 4 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 5 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 6 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 7 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 8 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 9 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 10 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 11 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 12 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 13 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 14 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 15 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 16 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 17 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| . | . | . | . | . |
| 33 | . | . | . | . |

Tabla 4.10: Envío de producto por período de la planta ubicada en Chihuahua a la de Reynosa.

Para este caso en particular el valor de la sumatoria es 0, tal cual se refleja en la quinta columna, el valor de la función objetivo aparece en la sexta y asciende a 95795100 (ver **Tabla 4.6**).

4.4 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A continuación se realiza un análisis gráfico del comportamiento de los valores que toma la función objetivo (**costo**) para cada escenario en particular.

En la figura 4.1 se muestra la gráfica para el caso de los grupos de instancias que contemplan demanda pequeña, tanto para costo de inventario pequeño, como para costo de inventario grande. En el eje horizontal aparecen los grupos de instancias, en el eje vertical se encuentran los valores de la función objetivo y en la parte inferior aparece una leyenda, donde cada instancia está representada por un color.

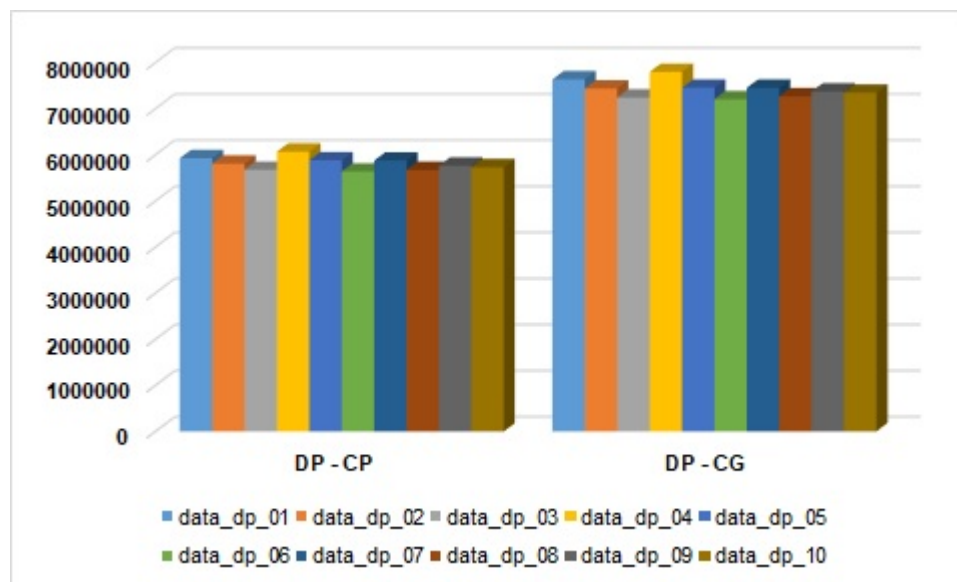


Figura 4.1: Comportamiento de la función objetivo para demanda pequeña.

A través de la gráfica 4.1 se puede apreciar que los valores de la función objetivo presentan un comportamiento bastante similar entre sí para cada escenario que contempla demanda pequeña, sin embargo a simple vista se observa que en el caso del grupo de instancias que maneja costo de inventario grande, los valores de la misma son mayores, lo cual indica que se debe prestar especial atención al inventario cuando de reducir costos se trata.

En la figura 4.2 se expone la gráfica para el caso de los grupos de instancias con demanda justa, tanto para costo de inventario pequeño, como para costo de inventario grande. En el eje horizontal aparecen los grupos de instancias, en el eje vertical se encuentran los valores de la función objetivo y en la parte inferior aparece una leyenda, donde cada instancia aparece representada por un color.

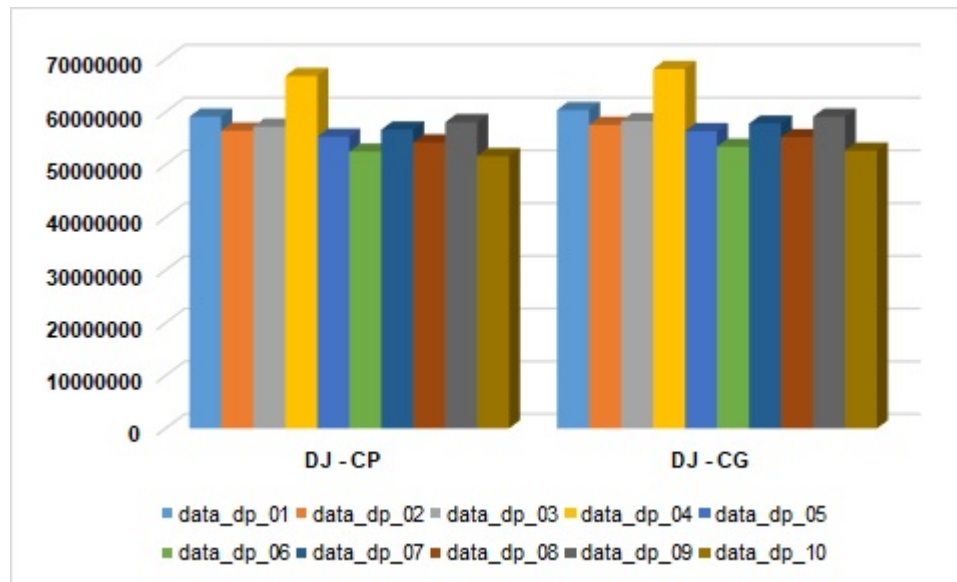


Figura 4.2: Comportamiento de la función objetivo para demanda justa.

Por medio de la gráfica 4.2, se puede concluir que los valores que toma la función objetivo para cada instancia, en cada grupo, son bastante cercanos entre sí, esta situación se produce debido a que la cantidad de producto que permanece en inventario para cada escenario de demanda justa es similar. Vale mencionar también, que los valores de la función objetivo para todas las instancias que se encuentran dentro de este escenario de demanda, son significativamente mayores que los que presenta el escenario que contempla demanda pequeña, debido a que se incurre en faltante.

En la figura 4.3 aparece la gráfica para el caso de los grupos de instancias que manejan demanda superior, tanto para costo de inventario pequeño, como para costo de inventario grande. En el eje horizontal aparecen los grupos de instancias, en el eje vertical se encuentran los valores de la función objetivo y en la parte inferior aparece

una leyenda, donde cada instancia está representada por un color.

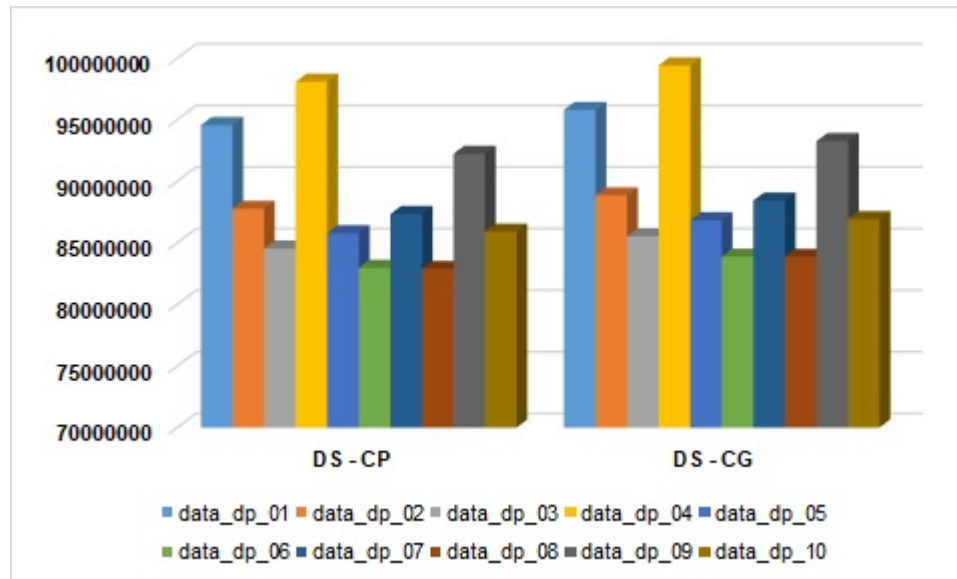


Figura 4.3: Comportamiento de la función objetivo para demanda superior.

A través de la gráfica 4.3 se puede apreciar que los valores de la función objetivo presentan una mayor variación en su comportamiento al analizar cada grupo de instancias por separado, sin embargo, al analizarlas a cada una, contemplando costo de inventario pequeño y grande, salta a la vista que sus valores son bien cercanos, situación que se produce debido a que la cantidad de producto que permanece en inventario es similar. Cabe notar que existe de igual manera gran diferencia entre los valores que toma la función objetivo para estos casos con respecto al escenario que maneja demanda justa, debido a que el volumen de producto faltante es aún mayor.

A modo general es válido mencionar que los valores de la función objetivo son significativamente mayores para los grupos de instancias que contemplan demanda justa y superior, situación provocada por la cantidad de producto demandado que no se pudo producir (**faltante**).

Vale destacar que el inventario juega un papel determinante en el caso de los grupos de instancias que manejan demanda pequeña, pues en esos casos no se incurre en faltante alguno, mientras que para el resto de los grupos el inventario también

es importante, solo que se debe prestar mayor atención a la cantidad de producto faltante, ya que éste eleva considerablemente los costos de la empresa.

En la figura 4.4 aparece el esquema de trabajo a seguir en el mes para los 33 productos, en el caso particular de la instancia que se analiza a continuación (**data_dp_01**), donde en el eje horizontal aparece:

- CPM: Cantidad de producto recibida en Memphis.
- CPC: Cantidad de producto recibida en Chihuahua.
- M-C: Cantidad de producto enviada de Memphis a Chihuahua.
- M-R: Cantidad de producto enviada de Memphis a Reynosa.
- C-R: Cantidad de producto enviada de Chihuahua a Reynosa.
- CTPC: Cantidad total de producto recibida en Chihuahua.
- CTPR: Cantidad total de producto recibida en Reynosa.
- IP: Inventario promedio.
- PF: Producto faltante.

En el eje vertical se encuentra el valor de la cantidad de producto concerniente a cada uno de los elementos mencionados anteriormente. Cada período (**semana**) está representado por un color y figura geométrica diferente.

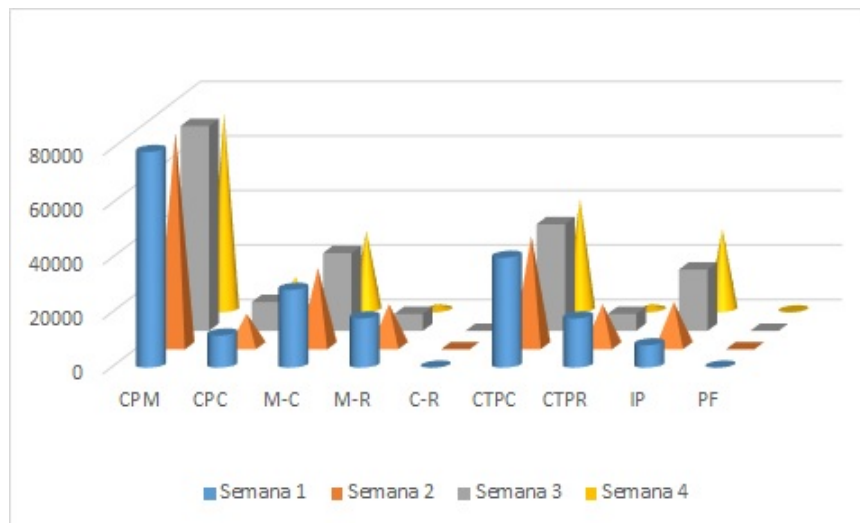


Figura 4.4: Esquema de trabajo para la instancia data_dp_01.

Según se puede apreciar en la gráfica 4.4, la mayor cantidad de producto por parte del cliente en el mes, la recibe la planta ubicada en Memphis, mientras que lo recibido por la planta de Chihuahua en su totalidad representa aproximadamente entre el 50 y 51 % de lo que arriba a Memphis en cada período. Por su parte la planta de Reynosa solamente recibe producto proveniente de la planta ubicada en Memphis, valores que oscilan entre el 2 y 23 % de la cantidad total recibida en esta planta cada semana, lo expuesto anteriormente permite afirmar que la mayor cantidad de producto se procesa en Chihuahua. Vale mencionar que el inventario promedio tiene un comportamiento ascendente y que no se incurre en faltante, lo cual económicamente implica que los costos asociados a inventario para la semana 4 van a ser mayores, sin embargo que no se incurra en faltante implica ahorro para la empresa en ese aspecto.

En la figura 4.5 aparece el esquema de trabajo a seguir en el mes para ciertos productos elegidos al azar, en el caso específico de la instancia **data_dp_01**. Cada producto está representado por un color.

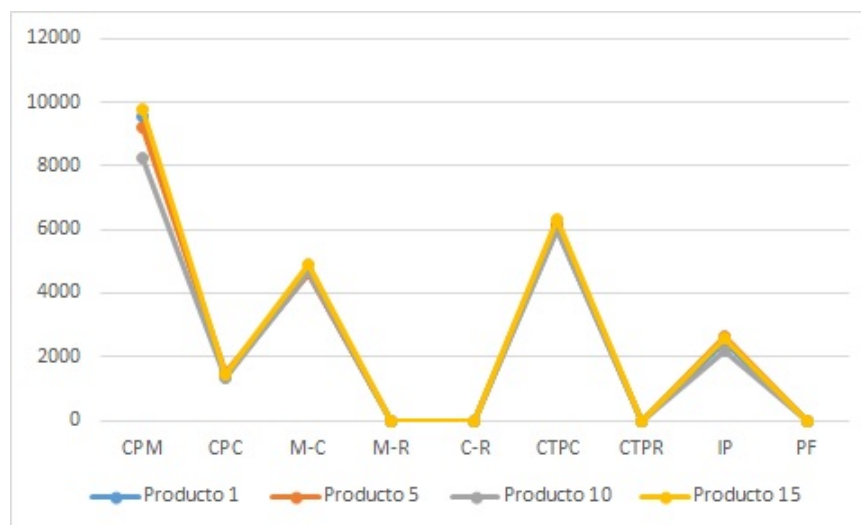


Figura 4.5: Esquema de trabajo para la instancia data_dp_01.

Por medio del gráfico 4.5 se puede concluir que las cantidades de producto recibidas tanto en la planta de Memphis como en la de Chihuahua, así como las cantidades de producto enviadas de Memphis a Chihuahua son bastante similares

entre sí para cada producto, en cada caso. Por su parte la planta de Reynosa no recibe cantidad alguna de estos productos, ni de Memphis, ni de Chihuahua, en el caso de esta última la totalidad de producto recibido oscila para cada semana entre el 63 y 72 % de las cantidades recibidas en Memphis, lo cual es indicativo de que la mayor cantidad de producto se remanufactura en dicha planta. En cuanto al inventario promedio las cifras son bastante cercanas entre sí, para los productos en cuestión, y tampoco se incurre en faltante.

En la figura 4.6 aparece el esquema de trabajo a seguir en el mes para los 33 productos, en el caso particular de la instancia **data_dj_01**.

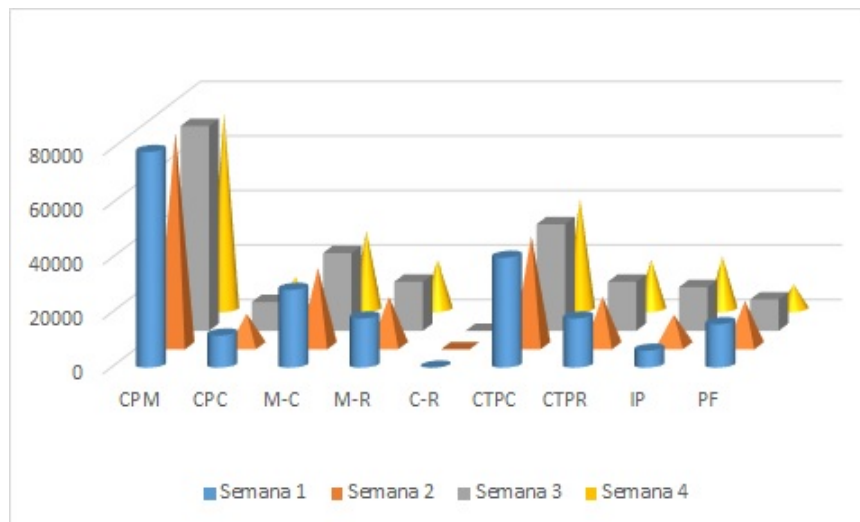


Figura 4.6: Esquema de trabajo para la instancia data_dj_01.

A través de la gráfica 4.6 se observa que la mayor cantidad de producto por parte del cliente en el mes, la recibe la planta de Memphis, mientras que lo recibido por la planta de Chihuahua en su totalidad representa aproximadamente entre el 50 y 51 % de lo que llega a Memphis en cada período. Por su parte la planta de Reynosa recibe producto proveniente de la planta ubicada en Memphis solamente, en igual cuantía cada semana, cifra que representa entre el 22 y 25 % de lo que percibe Memphis en cada período, lo cual permite afirmar que la mayor parte del producto se procesa en la planta de Chihuahua. En cuanto al inventario promedio se observa que presenta una tendencia creciente, sin embargo menor que en el escenario

anterior, mientras que la cantidad de producto faltante crece debido al incremento que se produce en la demanda.

En la figura 4.7 aparece el esquema de trabajo a seguir en el mes para ciertos productos elegidos al azar, en el caso específico de la instancia **data_dj_01**. Cada producto está representado por un color.

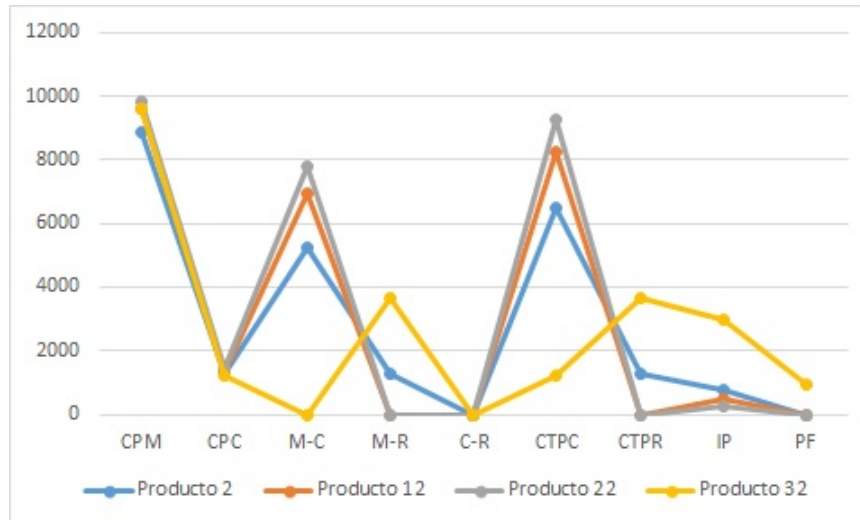


Figura 4.7: Esquema de trabajo para la instancia data_dj_01.

El gráfico 4.7 permite afirmar que las cantidades de producto recibidas tanto en la planta de Memphis como en la de Chihuahua, son bastante cercanas entre sí para cada producto, en cada caso. Por su parte la cantidad de cada tipo de producto que recibe Chihuahua desde Memphis presentan un comportamiento más disperso, de igual manera sucede con Reynosa, misma que no recibe cantidad alguna de los productos en cuestión por parte de Chihuahua. Vale mencionar que para el caso de los productos 2, 12 y 22 la mayor cantidad se procesa en Chihuahua, mientras que para el producto 32 en la planta de Reynosa se remanufactura la mayor parte. En cuanto al inventario promedio y la cantidad de producto faltante, salta a la vista, que presentan valores bien similares entre sí para cada caso, excepto para el producto 32.

En la figura 4.8 aparece el esquema de trabajo a seguir en el mes para los 33 productos, en el caso particular de la instancia **data_ds_01**.

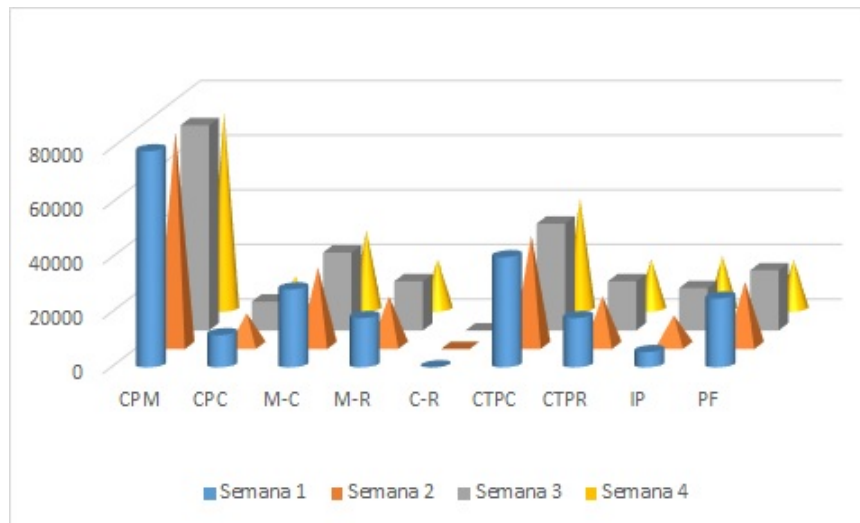


Figura 4.8: Esquema de trabajo para la instancia data_ds_01.

La gráfica 4.8 permite concluir que la mayor cantidad de producto por parte del cliente, la recibe la planta ubicada en Memphis a lo largo del mes, mientras que lo que receptiona la planta localizada en Chihuahua en su totalidad representa aproximadamente entre el 50 y 51 % de lo que arriba a Memphis en cada período. La planta ubicada en Reynosa solamente recibe producto por parte de Memphis, pero también es válido mencionar que el envío de mercancía entre las plantas de Memphis y Reynosa se comporta de igual manera que en el escenario que contempla demanda justa, por lo que la planta de Chihuahua remanufactura la mayor parte de la mercancía. Por su parte el inventario promedio disminuye con respecto a los escenarios anteriores, mientras que el faltante aumenta.

En la figura 4.9 aparece el esquema de trabajo a seguir en el mes para ciertos productos elegidos al azar, en el caso específico de la instancia **data_ds_01**. Cada producto se representa mediante un color.

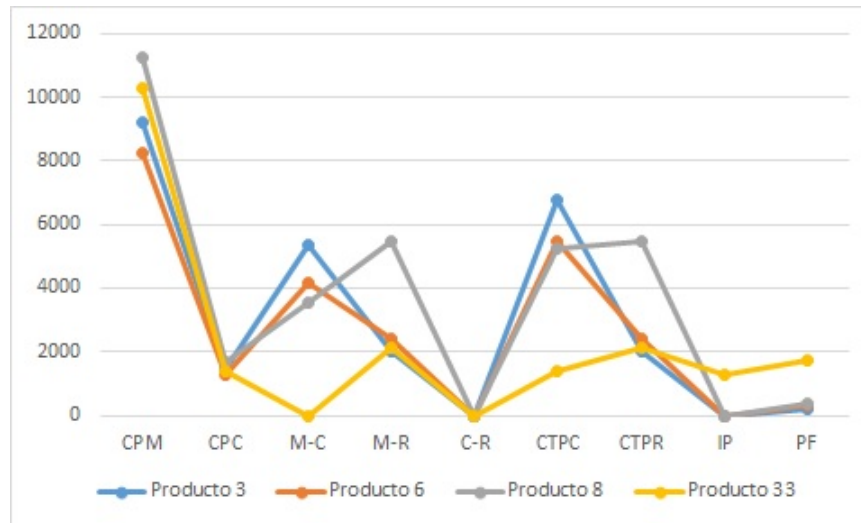


Figura 4.9: Esquema de trabajo para la instancia data_ds_01.

Por medio de la gráfica anterior se puede afirmar que las cantidades de cada producto recibidas por la planta ubicada en Memphis presentan un comportamiento más distante entre sí, sin embargo en el caso de la planta de Chihuahua los valores son bastante similares, esta planta recibe de Memphis aproximadamente el 57, 50 y 31 % de las cantidades de producto 3, 6 y 8 recibidas directo del cliente respectivamente, sin embargo del producto 33 no recibe nada, mientras que la planta localizada en Reynosa recibe cantidades muy similares entre sí de los productos 3, 6 y 33, mientras que el producto 8 lo recibe en mayor cuantía por parte de dicha planta, sin embargo de Chihuahua no recibe cantidad alguna de los productos analizados. También se evidencia a través de la gráfica que en la planta de Chihuahua se procesa mayor cantidad de los productos 3 y 6, mientras que para el caso de los productos 8 y 33 la mayor parte se remanufactura en Reynosa. Los valores del inventario promedio y la cantidad de producto faltante son bastante cercanos, salvo para el producto 33.

A modo general cabe notar que la cantidad de producto que recepciona la planta ubicada en Memphis, tanto en el análisis por período, como por producto, es la mayor. Por otro lado, vale recalcar que en todos los casos la mayor cantidad de los productos analizados se procesa en Chihuahua, aunque existe diferencia significativa en cuanto al volumen de producto que se procesa en Reynosa, para el escenario que

contempla demanda pequeña, con respecto a los restantes escenarios. También es válido acotar que las cifras relativas al inventario promedio mantuvieron un comportamiento decreciente, mientras que la cantidad de producto faltante incrementa a medida que aumenta la demanda (ver **Figuras 4.4, 4.6 y 4.8**).

Es válido mencionar que se selecciona una instancia de cada escenario, puesto que ello permite observar el patrón de comportamiento del resto de las instancias dentro del escenario correspondiente.

Por otro lado también es importante analizar, en qué medida se aprovechan las capacidades instaladas en cada una de las plantas que conforman la empresa objeto de estudio, teniendo en cuenta los distintos escenarios de demanda (**pequeña, justa y superior**) a través de los cuales se desarrolla la presente experimentación.

- Para el caso de la planta ubicada en Memphis, en los tres escenarios analizados el porcentaje de aprovechamiento de las capacidades instaladas se encuentra sobre el 20 %.
- Por su parte las capacidades instaladas de la planta localizada en Chihuahua se aprovechan aproximadamente en un 67 % en los tres escenarios en cuestión.

Sin embargo para el caso de la planta ubicada en Reynosa, el comportamiento es el siguiente:

- En el escenario que contempla demanda pequeña, el aprovechamiento de las capacidades instaladas se muestra sobre el 22 % aproximadamente, mientras que en los escenarios que contemplan demanda justa y superior se encuentra sobre el 40 %.

En todos los casos existe subaprovechamiento de las capacidades instaladas, por lo que se puede afirmar que existe área de oportunidad para trabajar en este sentido, ya que la capacidad de las plantas en sí, no constituye un factor limitante.

CAPÍTULO 5

CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

5.1 CONCLUSIONES

Tal cual se expuso en el capítulo 2, la industria remanufacturera ha venido adquiriendo relevancia en los últimos años hasta lograr posicionarse en el sector de los negocios, no solamente como una alternativa que puede resultar bastante lucrativa, sino también amigable con el medio ambiente, factor de suma importancia sobre todo en las condiciones en las que se encuentra nuestro planeta en la actualidad, debido al cambio climático. Es por ello que en este trabajo se ha propuesto un modelo matemático cuyo objetivo es reducir los costos operativos de la empresa objeto de estudio y causar un impacto positivo en el desempeño de la misma.

Este modelo fue sometido a una experimentación para la cual se utilizaron instancias de prueba que consideran la estructura y características de la línea de producción. La implementación de la formulación matemática resuelve a optimalidad las 60 instancias creadas en los diferentes escenarios de demanda, retornando el costo asociado a cada esquema de trabajo.

A modo general teniendo en cuenta las comparaciones realizadas para cada escenario de demanda, resaltan ciertos aspectos que inciden de manera negativa en los costos, como son el inventario y la cantidad de producto faltante, provocando este

último un incremento sustancial de los mismos. Por otra parte pudieran aprovecharse en mayor medida la capacidad de cada una de las plantas, sobre todo en los casos de Memphis y Reynosa.

5.2 TRABAJO A FUTURO

Se propone como trabajo a futuro:

- Realizar modificaciones a la formulación matemática propuesta de modo que se le puedan incorporar los costos asociados a la mano de obra.
- Realizar pruebas variando la capacidad de los vehículos disponibles para el traslado de producto interplanta, con el objetivo de percibir cómo influye esto, en el aprovechamiento de las capacidades instaladas.
- Realizar un procedimiento heurístico que dados los costos de mano de obra por producto, permita decidir a cuáles de ellos dar prioridad a la hora de satisfacer la demanda, con el fin de lograr un equilibrio entre maximizar utilidades y disminuir costos.

APÉNDICE A

APÉNDICE A

A.1 ELEMENTOS Y EXPRESIONES UTILIZADAS PARA GENERAR LAS INSTANCIAS DEL PROBLEMA

Se debe tener en cuenta que la empresa objeto de estudio maneja treinta y tres productos, por lo cual $i = \{1, \dots, 33\}$, el horizonte de planeación es de 4 semanas $t = \{1, \dots, 4\}$ y tiene tres plantas $j = \{1 = Chihuahua, 2 = Reynosa, 3 = Memphis\}$.

A.1.1 CANTIDAD DE PRODUCTO RECIBIDA DIRECTAMENTE DEL CLIENTE

- Pe_{it} : representa la cantidad de producto de cada tipo que recibe directamente del cliente la planta ubicada en Memphis en cada período, su valor está dado por un número aleatorio entre 1500 y 3000.
- Pc_{it} : representa la cantidad de producto de cada tipo que recibe directamente del cliente la planta ubicada en Chihuahua en cada período, su valor está dado por un número aleatorio entre 200 y 500.

Posteriormente se halla la suma de las cantidades anteriormente referidas y para cada período se determina su desviación estándar DE_t , valor que se utiliza más adelante para realizar la estimación de la demanda.

A.1.2 COSTOS ASOCIADOS AL TRANSPORTE INTERPLANTA

- Para el caso de los costos asociados al transporte interplanta (Memphis-Chihuahua (Ce_{i1t}), Memphis-Reynosa (Ce_{i2t}), Chihuahua-Reynosa (Cc_{it})) se asignaron valores fijos arbitrarios entre 21 y 49 unidades monetarias por pieza de producto trasladada.

A.1.3 COSTOS ASOCIADOS A INVENTARIO

Los costos de inventario (B_j) pequeños (CP) y grandes (CG) en cada planta se determinan mediante las siguientes expresiones:

- $CP = \textit{Promedio de los costos de transporte} * 0.05$
- $CG = \textit{Promedio de los costos de transporte} * 0.25$

A.1.4 ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA

Para efectuar la estimación de la demanda (D_{it}) en los diferentes escenarios (demanda pequeña (**DP**), demanda justa (**DJ**), demanda superior (**DS**)) se considerarán los elementos siguientes:

- Suma de las cantidades recibidas directamente del cliente, por tipo de producto en cada período en las plantas de Memphis y Chihuahua (SD_{it}).

- Desviación estándar de la suma por período (DE_t).
- Demanda de cada tipo de producto en cada período (D_{it}).

Las expresiones utilizadas son:

- $DP = 0.75 * SD_{it} - DE_t \leq D_{it} \leq 0.75 * SD_{it} + DE_t$
- $DJ = SD_{it} - DE_t \leq D_{it} \leq SD_{it} + DE_t$
- $DS = SD_{it} \leq D_{it} \leq SD_{it} + DE_t$

A.1.5 CAPACIDAD VEHICULAR

Con relación a la determinación de la capacidad de los vehículos (Ve_j, Vc) que transportan el producto, se manejan los elementos siguientes:

- Capacidad del vehículo que transporta la mercancía desde la planta ubicada en Memphis a la ubicada en Chihuahua (CVM-C).
- Capacidad del vehículo que transporta la mercancía desde la planta ubicada en Memphis a la ubicada en Reynosa (CVM-R).
- Capacidad del vehículo que transporta la mercancía desde la planta ubicada en Chihuahua a la ubicada en Reynosa (CVC-R).
- Capacidad de la planta ubicada en Memphis (CPM).
- Capacidad de la planta ubicada en Reynosa (CPR).
- Capacidad de la planta ubicada en Chihuahua (CPC).

Las expresiones son:

- $CVM-C = 0.38 * CPM$
- $CVM-R = 0.40 * CPR$
- $CVC-R = 0.38 * CPC$

A.1.6 CAPACIDAD DE PRODUCCIÓN/REPARACIÓN DE CADA PLANTA

Con respecto a la capacidad de producción/reparación (H_j) de cada una de las plantas, se determina lo siguiente:

Para el caso de la planta de Memphis, y por ser ésta la de mayor capacidad, se le asignó un valor arbitrario grande de modo que cumpla con los parámetros de factibilidad del problema.

Para el caso de los dos restantes, considerando sus características, sus valores están dados por:

- $CPC = CPM - (0.20 * CPM)$
- $CPR = CPM - (0.40 * CPM)$

BIBLIOGRAFÍA

- [1] «Contexto Histórico: Mutaciones en el esfera productiva global», *FIDE. Coyuntura y Desarrollo*, 2017.
- [2] AGUILAR, M. L. I. R., M. A. R. MEDINA, J. S. LEAL y M. I. R. BORBÓN, «Categorización de los productos regresados para la remanufactura utilizando Metodología Bayesiana», , 2015.
- [3] ALVAREZ, E., «Multi-plant production scheduling in SMEs», *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, **23**(6), págs. 608–613, 2007.
- [4] AMEZQUITA, T., R. HAMMOND, M. SALAZAR, B. BRAS *et al.*, «Characterizing the remanufacturability of engineering systems», en *ASME advances in design automation conference*, tomo 82, Citeseer, págs. 271–278, 1995.
- [5] ATASU, A., M. SARVARY y L. N. VAN WASSENHOVE, «Remanufacturing as a marketing strategy», *Management science*, **54**(10), págs. 1731–1746, 2008.
- [6] BAKAL, I. S. y E. AKCALI, «Effects of random yield in remanufacturing with price-sensitive supply and demand», *Production and operations management*, **15**(3), págs. 407–420, 2006.
- [7] BORSANI, M. S., «Materiales ecológicos: estrategias, alcance y aplicación de los materiales ecológicos como generadores de hábitats urbanos sostenibles», , 2011.
- [8] CARLOS A. GIUDICE, A. M. P., «El sistema de producción. Productividad y Estudio del Trabajo», , 2005.

-
- [9] CLOTTEY, T. y W. BENTON, «Core acquisitions planning in the automotive parts remanufacturing industry», *Ohio State University: Columbus, OH, USA*, 2010.
- [10] D'ADAMO, I. y P. ROSA, «Remanufacturing in industry: advices from the field», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **86**(9-12), págs. 2575–2584, 2016.
- [11] DANPING LING, C. C. T. Y. C. K. M. L., «Heuristics for integrated job assignment and scheduling in the multi-plant remanufacturing system», *International Journal of Production Research*, 2015.
- [12] DARVISH, M., H. LARRAIN y L. C. COELHO, «A dynamic multi-plant lot-sizing and distribution problem», *International Journal of Production Research*, **54**(22), págs. 6707–6717, 2016.
- [13] DE AUTORES, C., «Aspectos relevantes de la remanufactura», Last access in 04-29-2019 to <http://docplayer.es/6448210-Aspectos-relevantes-de-la-remanufactura.html>, 2014.
- [14] DEMIREL, N. Ö. y H. GÖKÇEN, «A mixed integer programming model for remanufacturing in reverse logistics environment», *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, **39**(11-12), págs. 1197–1206, 2008.
- [15] FLEISCHMANN, M., J. M. BLOEMHOF-RUWAARD, R. DEKKER, E. VAN DER LAAN, J. A. VAN NUNEN y L. N. VAN WASSENHOVE, «Quantitative models for reverse logistics: A review», *European journal of operational research*, **103**(1), págs. 1–17, 1997.
- [16] FLEISCHMANN, M., H. R. KRIKKE, R. DEKKER y S. D. P. FLAPPER, «A characterisation of logistics networks for product recovery», *Omega*, **28**(6), págs. 653–666, 2000.

-
- [17] GALBRETH, M. R. y J. D. BLACKBURN, «Optimal acquisition and sorting policies for remanufacturing», *Production and Operations Management*, **15**(3), págs. 384–392, 2006.
- [18] GOODALL, P., E. ROSAMOND y J. HARDING, «A review of the state of the art in tools and techniques used to evaluate remanufacturing feasibility», *Journal of Cleaner Production*, **81**, págs. 1–15, 2014.
- [19] GRUBBSTRÖM, R. W. y O. TANG, «Optimal production opportunities in a remanufacturing system», *International Journal of Production Research*, **44**(18-19), págs. 3953–3966, 2006.
- [20] GUTIÉRREZ, V. y C. J. VIDAL, «Modelos de gestión de inventarios en cadenas de abastecimiento: revisión de la literatura», *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, (43), págs. 134–149, 2008.
- [21] HENSTOCK, M. E., «Design for recyclability», en *Ecomaterials*, Elsevier, págs. 125–130, 1994.
- [22] JIN, X., J. NI y Y. KOREN, «Optimal control of reassembly with variable quality returns in a product remanufacturing system», *CIRP annals*, **60**(1), págs. 25–28, 2011.
- [23] JUNQUEIRA, R. A. y R. MORABITO, «Production and logistics planning considering circulation taxes in a multi-plant seed corn company», *Computers and electronics in agriculture*, **84**, págs. 100–110, 2012.
- [24] KIM, K., I. SONG, J. KIM y B. JEONG, «Supply planning model for remanufacturing system in reverse logistics environment», *Computers & Industrial Engineering*, **51**(2), págs. 279–287, 2006.
- [25] LUND, R., «Remanufacturing: United States Experience and Implications for Developing Nations. 1983: p», *The World Bank, Washington, DC*.

- [26] LUNDMARK, P., E. SUNDIN y M. BJÖRKMAN, «Industrial challenges within the remanufacturing system», en *3rd Swedish Production Symposium 2009, Göteborg*, págs. 132–138, 2009.
- [27] MAJUMDER, P. y H. GROENEVELT, «Competition in remanufacturing», *Production and operations management*, **10**(2), págs. 125–141, 2001.
- [28] MEZGHANI, M. y T. LOUKIL, «Remanufacturing planning with imprecise quality inputs through the Goal Programming and the satisfaction functions», en *2011 4th International Conference on Logistics*, IEEE, págs. 122–125, 2011.
- [29] MOHAMMADI, M., S. N. MUSA y M. B. OMAR, «Optimisation of multi-plant capacitated lot-sizing problems in an integrated supply chain network using calibrated metaheuristic algorithms», .
- [30] MUSSA, Y. M., «A system dynamics model for operations management improvement in multi-plant enterprise», *Delft University of Technology*, 2009.
- [31] MUTHA, A. y S. POKHAREL, «Strategic network design for reverse logistics and remanufacturing using new and old product modules», *Computers & Industrial Engineering*, **56**(1), págs. 334–346, 2009.
- [32] NASR, N. y M. THURSTON, «Remanufacturing: A key enabler to sustainable product systems», *Rochester Institute of Technology*, pág. 23, 2006.
- [33] OLHAGER, J. y A. FELDMANN, «Distribution of manufacturing strategy decision-making in multi-plant networks», *International Journal of Production Research*, **56**(1-2), págs. 692–708, 2018.
- [34] ÖSTLIN, J., E. SUNDIN y M. BJÖRKMAN, «Product life-cycle implications for remanufacturing strategies», *Journal of cleaner production*, **17**(11), págs. 999–1009, 2009.
- [35] OVERBY, C., «Product design for recyclability and life extension», en *ASEE Annual Conference*, págs. 181–196, 1979.

- [36] PARKINSON, H. y G. THOMPSON, «Analysis and taxonomy of remanufacturing industry practice», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, **217**(3), págs. 243–256, 2003.
- [37] PARKINSON, H. y G. THOMPSON, «Analysis and taxonomy of remanufacturing industry practice», *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering*, **217**(3), págs. 243–256, 2003.
- [38] ROBERTO CARRO PAZ, D. G. G., «El sistema de producción y operaciones», .
- [39] ROGERS, D. S. y R. TIBBEN-LEMBKE, «An examination of reverse logistics practices», *Journal of business logistics*, **22**(2), págs. 129–148, 2001.
- [40] SALAZAR RUIZ, E., K. ARREDONDO SOTO, S. F. CAPUZ-RIZO y B. PACHECO BLANCO, «LA GESTIÓN DE LA COMPLEJIDAD EN LOS PROCESOS DE REMANUFACTURA», , 2013.
- [41] SALAZAR RUIZ, E., S. F. CAPUZ-RIZO, K. C. ARREDONDO SOTO, S. DE REZA DE LA CRUZ y I. MIER LUNA, «CARACTERIZACIÓN DE LA REMANUFACTURA EN EL CONTEXTO DE LA FRONTERA NORTE DE MÉXICO», , 2015.
- [42] SHERVAIS, S., *Adaptive critic design of control policies for a multi-echelon inventory system*, Tesis Doctoral, Portland State University, 2000.
- [43] STEINHILPER, R., «Remanufacturing-The ultimate form of recycling», *Fraunhofer IRB Verlag*, 1998.
- [44] STEINHILPER, R., «Recent trends and benefits of remanufacturing: from closed loop businesses to synergetic networks», en *Proceedings Second International Symposium on Environmentally Conscious Design and Inverse Manufacturing*, IEEE, págs. 481–488, 2001.

- [45] SU, T.-S., «A fuzzy multi-objective linear programming for solving remanufacturing planning problems with multiple products and joint components», *Computers & Industrial Engineering*, 2017.
- [46] SUNDIN, E., «How can remanufacturing processes become leaner», en *CIRP Intl Conference on Life Cycle Engineering, Leuven*, tomo 31, pág. 2006, 2006.
- [47] TANG, J., D. WANG y R. Y. FUNG, «Fuzzy formulation for multi-product aggregate production planning», *Production Planning & Control*, **11**(7), págs. 670–676, 2000.
- [48] TAXAKIS, K. y C. PAPADOPOULOS, «A design model and a production–distribution and inventory planning model in multi-product supply chain networks», *International Journal of Production Research*, **54**(21), págs. 6436–6457, 2016.
- [49] VASQUEZ, J. P. R., D. C. CÁRDENAS, M. G. G. CARRILLO y C. H. S. ROSERO, «Modelo de programación lineal para planeación de requerimiento de materiales», *Revista Tecnológica-ESPOL*, **28**(2), 2015.
- [50] VILLALBA ESCOBAR, R. A., K. GRANADOS TRUJILLO *et al.*, *Creación de empresa remanufactura de partes para vehículos comerciales*, Tesis de Maestría, Universidad Ean, 2016.
- [51] WEBSTER, S. y S. MITRA, «Competitive strategy in remanufacturing and the impact of take-back laws», *Journal of Operations Management*, **25**(6), págs. 1123–1140, 2007.
- [52] Y D. CLAY WHYBARK, G. F., «Material Planning for a Remanufacturing Facility», *Production and Operations Management*, 2001.