

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

MAESTRÍA EN INGENIERÍA DE LA CADENA DE SUMINISTRO

**REDISEÑO DEL EMBALAJE Y REDUCCIÓN DE LOS COSTOS  
DE TRANSPORTE DE MUESTRAS AUTOMOTRICES:  
UN CASO DE ESTUDIO**

ALUMNA: ANA MARÍA DE LEÓN ALMARAZ

TUTOR ACADÉMICO: DR. JUAN GAYTÁN INIESTRA  
TUTOR ADJUNTO 1: M. EN I. SERGIO VÁZQUEZ ARANDA  
TUTOR ADJUNTO 2: DR. MANUEL GONZÁLEZ DE LA ROSA  
EVALUADOR 1: DRA. LOURDES LOZA HERNÁNDEZ  
EVALUADOR 2: DR. JAVIER GARCÍA GUTIERREZ

FECHA: 9.JUN.2017

# **REDISEÑO DEL EMBALAJE Y REDUCCIÓN DE LOS COSTOS DE TRANSPORTE DE MUESTRAS AUTOMOTRICES: UN CASO DE ESTUDIO**

## **RESUMEN**

El presente trabajo terminal de grado muestra un análisis de reducción de costos y mejora en la calidad del servicio del envío aéreo de muestras automotrices de la ciudad de Toluca, México a Farmington Hills, Michigan, EEUU. Para ese fin se proponen cuatro acciones: a) la reevaluación del proveedor de transporte, b) el rediseño del embalaje buscando la reducción de los volúmenes requeridos para enviar las muestras automotrices, c) evaluar la conveniencia de consolidar carga y d) la colocación óptima de productos en los embalajes. La selección de proveedores se realiza mediante el “proceso analítico jerárquico” (PAJ) y el elegido aunque es más caro, proporciona una mejora importante en la calidad del servicio. El rediseño del embalaje y la asignación óptima de los productos a las cajas reducen en un 22% los costos de transporte. La asignación se realiza mediante un modelo de optimización el cual se resuelve con GAMS que convierte el modelo algebraico en un archivo que es adecuado para ser leído por algún solucionador, para este caso es un solucionador CPLEX, una rutina numérica comercial para resolver modelos de programación lineal entera. Con el fin de simplificar y agilizar la actividad diaria de colocación de productos en los embalajes y para evitar ejecutar el modelo cada vez que se presente un nuevo pedido, se propone un método heurístico que proporciona una solución rápida e idéntica, cada vez que es ejecutado, a la proporcionada por el modelo de optimización. La evaluación del algoritmo se realizó utilizando una muestra de pedidos del año 2015. Los resultados obtenidos fueron presentados a la gerencia responsable del departamento de muestras automotrices y fueron aceptados e implementados a partir del año 2017.

## **Abstract**

The current graduate work shows an analysis costs reduction and improvement in service quality of the air freight of prototype auto parts from Toluca city, Mexico State to Farmington Hills, Michigan, USA. To reach the objectives four steps are proposed: a) the reevaluation of the carriers, b) the redesign of the packaging with the intention to reduce the volumes required to ship the samples, c) the feasibility of consolidating packages is evaluated and d) the optimal assignment of the products to the available package. The selection of carriers is done using the AHP technique and the carrier chosen even more expensive offers an important improvement in the service quality. The redesign of the packaging and the optimal assignation of the products to the boxes reduce 22% the transportation costs. The assignment is done through an optimization model which is solved with the algebraic language GAMS and solver CPLEX. With the purpose to simplify and speed up the daily activity of products allocation in the packages and to avoid to execute the model every time that is required an order, is proposed a heuristic method that provides a fast and identic solution to the obtained by the optimization model. The evaluation of the algorithm was made using a sample of orders in 2016. Obtained results were presented to the responsible management of the samples department and were accepted and implemented since 2017.

## Contenido

RESUMEN.....	i
PREFACIO .....	1
INTRODUCCIÓN .....	2
OBJETIVO GENERAL .....	2
OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	2
PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN .....	3
HIPÓTESIS .....	3
1. EL CASO DE ESTUDIO .....	4
1.1 ANTECEDENTES.....	4
1.1.1 Descripción de los productos.....	6
1.1.2 Embalaje actual y sus costos.....	6
1.1.2 Proveedores actuales.....	9
1.2 EL PROBLEMA EN ESTUDIO.....	10
2. REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	11
3. METODOLOGÍA .....	13
3.1 SELECCIÓN DEL PROVEEDOR .....	13
Definición de criterios y estructura jerárquica .....	13
3.2 REDISEÑO DE LAS CAJAS .....	22
3.3 ANÁLISIS DE CONSOLIDACIÓN DE CARGA.....	24
3.4 MODELADO DE LA ASIGNACIÓN DE LOS PRODUCTOS A LAS CAJAS.....	25
3.4.1 Construcción del modelo .....	25
3.4.2 Solución del modelo .....	27
3.4.3 Análisis de los resultados de la solución exacta.....	29
3.5 Algoritmo heurístico para la asignación de los productos a las cajas .....	32
3.5.1 Reglas de asignación, descripción del pseudocódigo .....	32
3.5.2 Pseudocódigo del algoritmo .....	33
3.5.3 Análisis de resultados del método heurístico .....	34

3.5.4 Versión ejecutable del método heurístico sugerido .....	34
4. CONCLUSIONES.....	37
ANEXOS.....	39
ANEXO 1. CÓDIGO EN MATLAB DEL MÉTODO HEURÍSTICO DE LA REGLA DE ASIGNACIÓN 1 PARA PRODUCTOS TIPO 1. ....	39
ANEXO 2. CÓDIGO EN MATLAB DEL MÉTODO HEURÍSTICO DE LA REGLA DE ASIGNACIÓN 2 PARA PRODUCTOS TIPO 1. ....	40
ANEXO 3. CÓDIGO EN MATLAB DEL MÉTODO HEURÍSTICO DE LA REGLA DE ASIGNACIÓN 3 PARA PRODUCTOS TIPO 1. ....	41
ANEXO 4. CÓDIGO EN MATLAB DEL MÉTODO HEURÍSTICO DE LA REGLA DE ASIGNACIÓN 1 PARA PRODUCTOS TIPO 2. ....	42
ANEXO 5. CÓDIGO EN MATLAB DEL MÉTODO HEURÍSTICO DE LA REGLA DE ASIGNACIÓN 2 PARA PRODUCTOS TIPO 2. ....	43
ANEXO 6. CÓDIGO EN MATLAB DEL MÉTODO HEURÍSTICO DE LA REGLA DE ASIGNACIÓN 3 PARA PRODUCTOS TIPO 2. ....	44
ANEXO 7. CÓDIGO EN MATLAB PARA CREAR ARCHIVO EJECUTABLE DEL MÉTODO HEURÍSTICO DE LA REGLA DE ASIGNACIÓN 3 PARA PRODUCTOS TIPO 1. ....	45
BIBLIOGRAFÍA .....	46

## **PREFACIO**

El contenido de este trabajo terminal de grado muestra el desarrollo de un caso de estudio de una problemática relacionada con los envíos aéreos de muestras automotrices a los clientes ubicados en el extranjero, detectada en una empresa del ramo automotriz ubicada en la ciudad de Toluca, México a la ciudad Farmington Hills, EEUU. Para dar solución a la problemática, se proporcionan los detalles de la misma y se establece un método el cual abarca varios aspectos, incluyéndose la selección de los proveedores de servicio de mensajería aérea, el diseño del embalaje, la consolidación de la carga y la estandarización en la asignación de los productos al embalaje. Se busca ofrecer a la empresa una reducción de los costos generados por los envíos de muestras automotrices.

Los resultados presentados se limitan al caso de estudio, pero pueden servir de apoyo en estudios de situaciones similares.

Se dirige este trabajo a todos aquellos interesados en el envío de muestras automotrices así como a estudiantes de programas de ingeniería con orientación a cadena de suministro.

## **INTRODUCCIÓN**

Para los proveedores automotrices que realizan abasto internacional, el transporte se erige como una actividad esencial ya que permite hacer llegar las partes diseñadas y manufacturadas en sus plantas a los mercados globales. Los tiempos de desarrollo de nuevos modelos de vehículos, obligan a los proveedores de muestras automotrices a contar con una gran variedad de tipos y tamaños de muestras automotrices y a entregarlas en tiempos muy cortos, días o semanas, por lo general haciendo uso del transporte aéreo y con un alto grado de variabilidad en las cantidades solicitadas.

El problema que se resuelve en este trabajo terminal de grado está motivado por una problemática que se presenta en los altos costos generados por envíos aéreos de muestras automotrices, desde una empresa de giro automotriz situada en Toluca, México, a un “Cliente” ubicado en Farmington Hills, Michigan, EEUU.

La problemática planteada amerita el análisis de los diferentes causantes de los altos costos, como es la selección de proveedores de transporte, el tipo de embalaje que se utiliza, el procedimiento de embalaje, etc.

Una manera de reducir los altos costos de envíos aéreos de muestras automotrices, largos tiempos de entrega y garantizar el envío justo de piezas, es a través de la reevaluación del mejor proveedor de transporte que atienda la demanda, la optimización del embalaje mediante el rediseño del mismo, la consolidación de los pedidos de muestras automotrices, y la colocación adecuada de las muestras automotrices dentro del embalaje.

Una vez planteada la problemática se establecen a continuación los objetivos del trabajo terminal de grado, las preguntas de investigación e hipótesis.

## **OBJETIVO GENERAL**

El objetivo principal de este trabajo terminal de grado es realizar una propuesta a la empresa para optimizar los costos por envíos aéreos de muestras automotrices de la ciudad de Toluca a Farmington Hills. También se pretende demostrar que con la optimización de los costos se logra conservar la calidad de los productos, la calidad del servicio de mensajería (tiempo de entrega y entregas en buen estado) y la calidad del embalaje utilizando técnicas de optimización.

## **OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Seleccionar al mejor proveedor disponible de transporte aéreo para la entrega de muestras automotrices con el cliente
- Seleccionar el embalaje adecuado para las muestras automotrices que se enviarán
- Determinar los beneficios por consolidar carga
- Estandarizar la asignación de las muestras automotrices al embalaje disponible

## **PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN**

- ¿Es posible reducir los costos generados por envíos aéreos de muestras automotrices mediante la aplicación de técnicas de selección de proveedores?
- ¿Se puede rediseñar el embalaje a fin de que se reduzcan los costos de los envíos?
- ¿La consolidación de carga representa una reducción de los costos de los envíos?
- ¿Estandarizar la asignación de las muestras automotrices al embalaje disponible implica una reducción en los costos de envíos?

## **HIPÓTESIS**

- El uso de una técnica para la evaluación y selección de proveedores permitirá la reducción de los costos generados por envíos aéreos de muestras automotrices
- El rediseño del embalaje reducirá los costos de los envíos
- Estandarizar la cantidad de las muestras automotrices asignadas al embalaje disponible permitirá una reducción en los costos de envíos

El contenido de este trabajo es el siguiente. En la sección 1.1 se describen los antecedentes relevantes del caso de estudio y la situación actual de los envíos de muestras automotrices, se describen los productos, se explica el embalaje actual y sus costos y se mencionan a los proveedores actuales así como las características principales de nivel de servicio. En la sección 1.2 Se describe el problema en estudio con la finalidad de otorgar un contexto claro al lector y hacer comprensible la definición del problema, así como mencionar cuáles serán los objetivos de este trabajo terminal de grado, las preguntas de investigación y establecer hipótesis. En la sección 2 se muestran las definiciones más relevantes del tema que se está abordando, también se mencionan trabajos de otros investigadores que resuelven problemáticas similares a la planteada en la sección 1 de este trabajo así como los métodos que utilizaron para resolver las problemáticas particulares de cada caso de estudio. Posteriormente, en la sección 3, se desarrolla el método para resolver el problema. Los pasos que se siguieron son: (1) se utiliza la técnica “Proceso Analítico Jerárquico” PAJ para la selección del proveedor más conveniente. (2) se propone un rediseño de las cajas que se utilizan actualmente para empacar los productos con el fin de optimizar volumen. (3) se realiza un análisis de consolidación de carga de distintos productos. (4) se construye un modelo matemático de asignación óptima de productos a las nuevas cajas propuestas, se resuelve y se analizan los resultados. (5) se construye un algoritmo heurístico para la solución del problema de asignación de productos al embalaje disponible y se comparan los resultados de este método heurístico con los resultados del modelo matemático. Finalmente en la sección 4 se proporcionan las conclusiones obtenidas.

# 1. EL CASO DE ESTUDIO

## 1.1 ANTECEDENTES

La empresa bajo estudio es de giro automotriz situada en una zona industrial de la ciudad de Toluca, México, su actividad principal es la fabricación y el ensamble masivo de refacciones automotrices así como equipo original. Ofrece más de 20 diferentes productos de los cuales destacan los motores eléctricos y alternadores. La producción de la empresa sirve para abastecer tanto el mercado nacional como mercados extranjeros, principalmente Estados Unidos, Canadá y Brasil. Por motivos de confidencialidad no se da a conocer el nombre de la empresa.

Existe otra actividad fundamental realizada por la empresa: la construcción y envío de muestras automotrices.

Una muestra automotriz es la etapa más temprana o el comienzo de un producto nuevo, o de un producto existente al cual se le requiere hacer un cambio de ingeniería de acuerdo a las especificaciones del cliente o regulaciones gubernamentales. La construcción de muestras automotrices se realiza después de la etapa de diseño o rediseño de un producto cuya finalidad es validar el diseño del producto, verificar su funcionalidad y diseñar y/o validar la capacidad de las líneas de producción.

El ensamble de muestras automotrices es uno de los procesos más delicados a los que se enfrenta la empresa ya que su aceptación por parte de los clientes potenciales determina la venta masiva de sus productos.

El ensamble de muestras automotrices se realiza mediante procedimientos distintos a los validados por la producción en serie, existen talleres de muestras automotrices donde se ejecutan los ensambles con máquinas y herramientas poco estandarizadas, en muchos casos se realizan ensambles manuales, ya que se debe mantener la flexibilidad para cambio de modelo con frecuencia diaria y por otro lado el ciclo de vida del ensamble de muestras automotrices de un mismo producto no excederá los ocho meses, por lo cual invertir en líneas de producción automatizadas para el ensamble de muestras automotrices implicaría la obsolescencia rápida de las mismas sin justificar el costo de inversión. Tampoco el embalaje de muestras automotrices es el mismo que de los productos en serie. En esta etapa no existe aún un embalaje definido ni validado por el cliente, por lo cual es elección del responsable del departamento de muestras automotrices elegir el embalaje adecuado.

Una vez ensambladas y embaladas las muestras automotrices son enviadas al cliente. El modo de transporte es el aéreo debido a que de los modos de transporte posibles para enviar paquetería de la ciudad de Toluca a FH resulta ser más rápido que el terrestre o el férreo. Es importante que lleguen los productos en el menor tiempo posible ya que las muestras automotrices, al ser proyectos nuevos y evaluados por los clientes, requieren de la mayor rapidez y disponibilidad una vez que son ensamblado en la empresa.



En este trabajo terminal de grado se aborda el tema de envíos aéreos de muestras automotrices de 2 tipos de productos que se ensamblan en la empresa en la ciudad de Toluca, México con destino a Farmington Hills (FH), Michigan (MI), EEUU, es decir, solamente se abastece a un cliente. En la figura 1-1 se muestra un mapa de la ubicación geográfica de Toluca y FH.

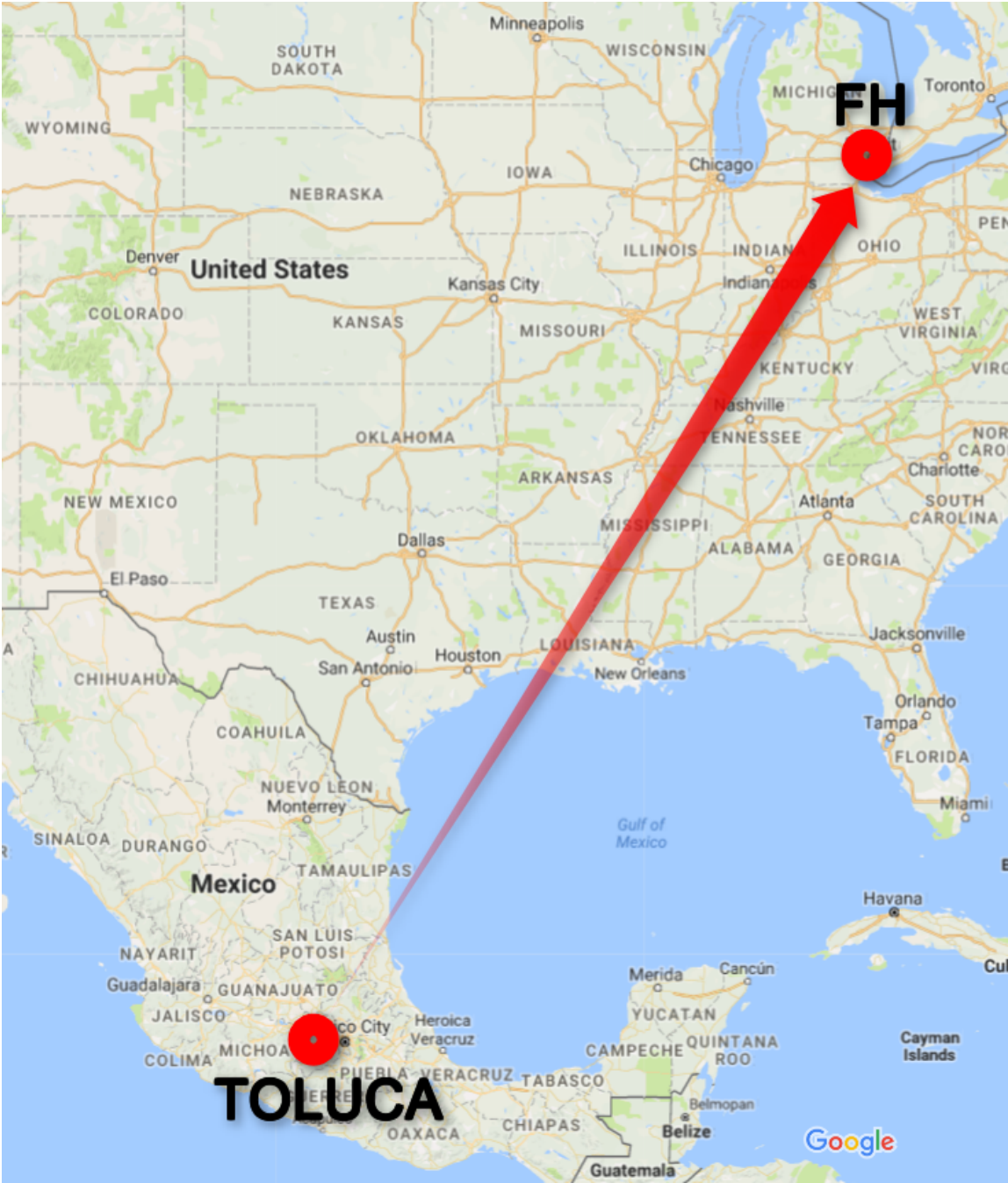


Fig. 1-1 Envío aéreo de la ciudad de Toluca a FH.

### 1.1.1 Descripción de los productos

Se consideran dos tipos de productos:

- Tipo 1: bajos
- Tipo 2: altos

Actualmente, los embarques son realizados embalando (en cajas de cartón) los dos tipos de productos, cuyas características se indican en la tabla 1-1. La diferencia entre estos dos productos son la altura y el peso. En la figura 1-2 se muestran los productos 1 y 2 en su representación geométrica y su empaque individual.

Tabla 1-1 Datos de los productos 1 y 2

Producto	Datos de los productos 1 y 2	
	Dimensiones. Diámetro x altura en cm.	Peso en kg.
1	20x35	1
2	20x50	1.5



Fig. 1-2 Tipos de productos 1 y 2

### 1.1.2 Embalaje actual y sus costos

Actualmente la empresa cuenta con un catálogo que contiene diversas cajas de cartón de distintos tamaños. Al tener cajas de cartón de catálogo disponibles en la planta se tiene un tiempo de resurtido de 2 días y el procedimiento para solicitar más cajas de cartón es muy sencillo. Por este motivo se tomó la decisión de utilizar como embalaje a las cajas de cartón de catálogo, cuyas dimensiones se ajustaron lo más posible a las dimensiones de los productos.

En la tabla 1-2 se señalan las dimensiones, peso y costo del embalaje actual. La figura 1-3 muestra el embalaje actual. La asignación de los productos al embalaje no sigue un procedimiento estandarizado y está sujeto al criterio y experiencia del personal que lo

realiza, lo que causa que los costos de transporte se incrementen al no realizarlo de manera óptima. Una vez embalados los productos se envían en modo mensajería vía aérea a FH.

Tabla 1-2 Datos del embalaje actual

Tipo de caja	Datos del embalaje actual				
	Dimensiones en cm.	Peso en kg.	Costo en MXN	Número máximo de piezas por caja	Tipo de producto contenido
1	90x70x60	6	70.00	13	1 y/o 2
2	60x60x35	4	50.00	9	1
3	60x40x30	3	35.00	6	-
4	50x40x40	3	35.00	4	1

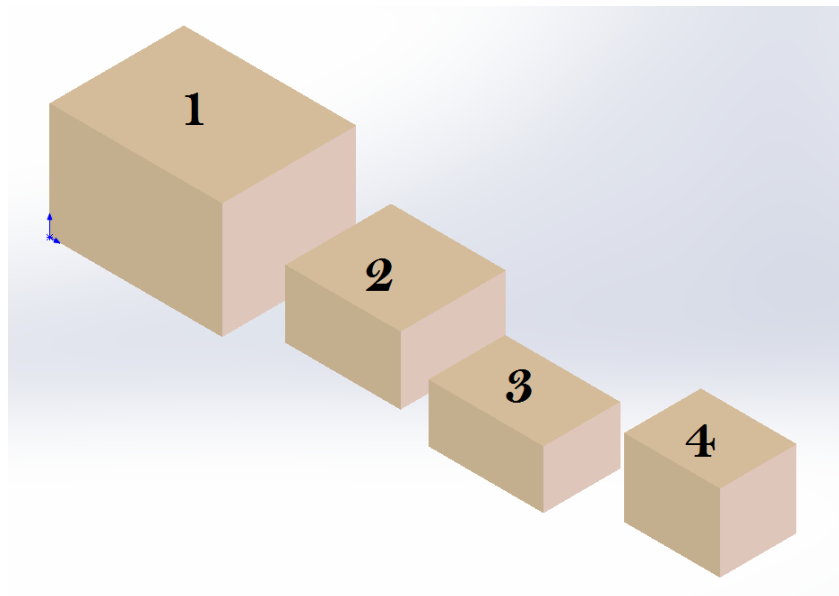


Fig. 1-3 Cajas actuales para embalaje

Dadas las dimensiones actuales de las cajas no es posible aprovecharlas eficientemente y el producto puede no estar embalado de forma adecuada. Por ejemplo consideremos un embarque de 13 productos tipo 1, note que puede ser embalado de 3 formas diferentes:

- Opción 1: en una caja tipo 1 colocar los 13 productos con un desperdicio de volumen y un costo del transporte y embalaje de \$2966.13 MXN.
- Opción 2: colocar 9 piezas en una caja tipo 2 y 4 piezas en una caja tipo 4 con costo de \$3662.41 MXN.
- Opción 3: colocar 9 piezas en una caja tipo 2 y 4 piezas en una caja tipo 3 generando el mismo costo que la opción 2.

Es posible apreciar en la tabla 1-2 que la caja tipo 3 tiene una altura de 30 cm y el producto tipo 1 mide 35 cm. Lo que hace actualmente el personal de embalaje es presionar los productos para que puedan ser contenidos en la caja incurriendo en la posibilidad de dañar los productos.

Como se observa, existe un número grande de posibilidades de armado del pedido, situación que se agrava al existir varias personas encargadas de realizar esta actividad.

Una complicación adicional ocurre cuando el cliente solicita el envío de menos de 4 unidades del producto 1 ó 2, cantidad para la cual no existe caja adecuada debiéndose utilizar las disponibles e incurrir en un desperdicio significativo de espacio libre dentro de las cajas; una alternativa es buscar una caja más pequeña en otro departamento de la empresa sujetos a disponibilidad.

La figura 1-4 muestra una representación gráfica del desperdicio en volumen de 13 productos tipo 2 embalados en una caja tipo 1. En el caso de un embarque de productos tipo 2, la única alternativa de embalaje son cajas tipo 1 teniendo desperdicios de volumen de acuerdo a las dimensiones requeridas, figura 1-5.

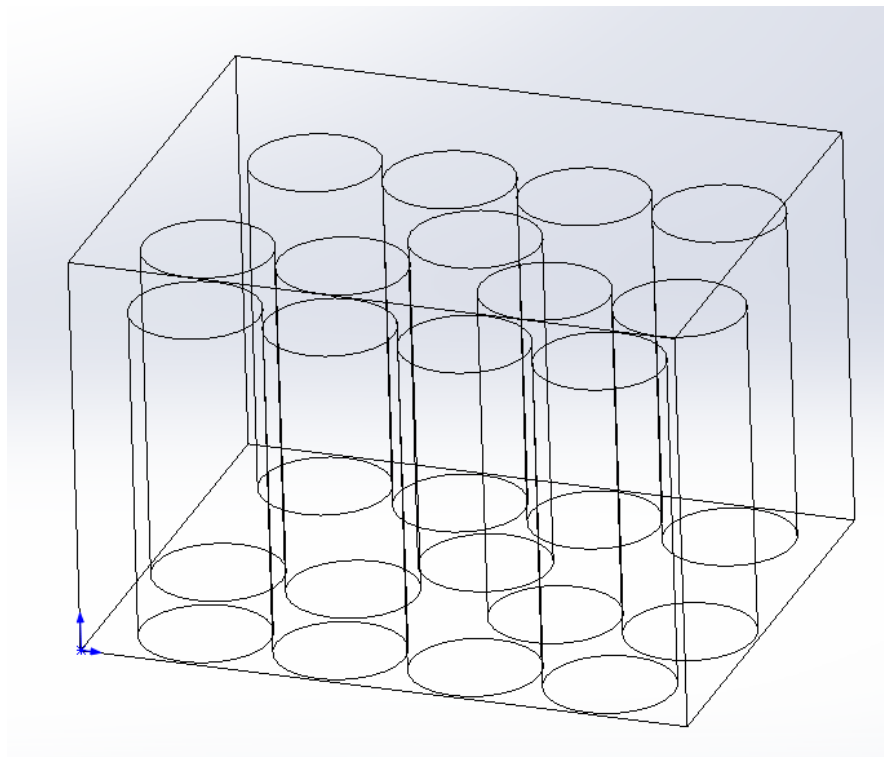


Fig. 1-4 Distribución de productos tipo 2 en caja tipo 1

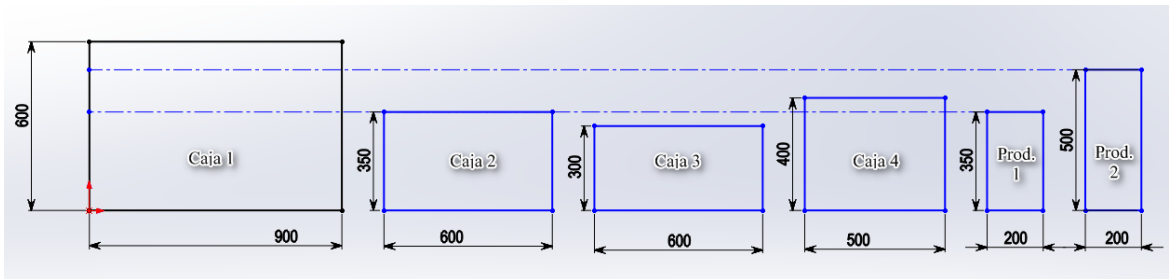


Fig. 1-5 Altura de las cajas vs. altura de los productos (dimensiones en mm.)

Después de analizar esta información es claro ver que existe una oportunidad de mejorar el embalaje de las muestras automotrices y determinar las dimensiones de las cajas de cartón.

### 1.1.2 Proveedores actuales

Para realizar los envíos, la empresa ha firmado un contrato de servicio con 2 empresas transportistas de mensajería. Para este trabajo sólo se consideran a las 2 empresas transportistas líderes en envíos aéreos de mensajería la cuales deben cumplir con las características de nivel de servicio indicadas en la tabla 1-3, en la sección 3.1 se explican con mayor detalle las características de nivel de servicio. Es decisión de la empresa enviar los embarques con la empresa transportista 1 ó 2; sin embargo, se observa en la tabla 1-4 que el transportista 2 que oferta menores costos ha presentado incidentes tales como pérdida del embarque o daños por mal manejo, haciendo que la empresa incurra en costos de penalización o incluso la pérdida del cliente. En la tabla 1-4 se muestran las tarifas de mayor frecuencia de uso de ambos transportistas.

Tabla 1-3 Características principales de nivel de servicio de los transportistas 1 y 2

Característica del nivel de servicio ofrecido	Transportistas	
	Transportista 1	Transportista 2
Disponibilidad del transportista	Todos los días (de lunes a viernes)	Sólo cuando se programa una recolección antes de las 10am
Hora de recolección en la planta	2:00 pm	11:00 am
Tiempo de Tránsito	1 día	4 días
Calidad del servicio	Excelente (nunca llegan piezas dañadas, jamás se ha extraviado un embarque)	Regular (Se perdieron 2 paquetes en un año, ocasionalmente llegan piezas dañadas)

Tabla 1-4 Tarifas de mayor frecuencia de transportistas 1 y 2

Descripción de acuerdo al tipo de embalaje	Costo de Transportistas	
	Costo Transportista 1 (MXN)	Costo Transportista 2 (MXN)
1 caja 90x70x60cm; 19kg.	6,650.00	3,624.00
1 caja 90x70x60cm; 25.5kg.	6,650.00	3,624.00
1 caja 60x60x35cm; 13kg.	3,660.00	2,450.00
1 caja 60x40x30cm; 9kg.	1,880.00	1,008.00
1 caja 50x40x40cm; 7kg.	2,004.00	1,052.00

De la tabla 1-4 es fácil notar que el transportista 2 ofrece un menor costo (casi el 50% en algunos casos) que el transportista 1. Este dato pone en duda la elección de enviar con el transportista 1 o con el transportista 2 al momento de hacer un envío, sin embargo, aunque el ahorro monetario sea prácticamente de 50% hay que tener presente que este costo únicamente es por el envío, hay otros costos que considerar como el costo por retraso de entrega de muestras, el costo por entregas no conformes (piezas rotas, dañadas, etc.), así como el costo por paquetes perdidos. Los últimos 3 costos mencionados no se detallan, sin embargo en la sección 3.1 serán tomados en cuenta bajo el criterio calidad del servicio del proveedor. Existiendo la posibilidad de entregar piezas fuera de tiempo, entregas con piezas dañadas o pérdida de paquetes no es posible elegir al proveedor transportista 2, ya que pone en riesgo los cierres de negocios con los clientes.

Con base en la problemática observada, la gerencia del departamento correspondiente definió como el objetivo principal, reducir los costos por envíos aéreos de muestras de la ciudad de Toluca a FH e hizo un rediseño del embalaje y la selección del mejor proveedor de transporte, mejorando la calidad del servicio ofrecido reduciendo el tiempo de entrega y minimizando los posibles daños al embarque.

En sección 1.2 se plantea el problema en estudio así como los objetivos y alcances que este trabajo terminal de grado pretende cubrir.

## **1.2 EL PROBLEMA EN ESTUDIO**

Tres son las causas identificadas en el proceso de los pedidos y sus embarques:

- No existe una homogeneización en los costos de transporte de los productos enviados,
- No se presenta una estandarización en la asignación de embalaje de los productos, y
- Existen embarques que llegan fuera del plazo solicitado por el cliente y/o el embarque llega dañado

Las situaciones indicadas arriba desean ser atendidas por el responsable realizando un análisis profundo en los costos actuales, nivel de servicio y proceso de embalaje.

## 2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

La literatura es muy rica en técnicas para la selección de proveedores. Dickson (1966) fue el primero en atender el aspecto multicriterio de la selección de proveedores e identificó 23 criterios diferentes a ser considerados. Al evaluar 74 artículos desde 1966, Weber et al. (1991) encontraron que la selección de proveedores ha sido estudiada como un problema multicriterios y clasifica los enfoques de evaluación de proveedores en tres grandes categorías: métodos de ponderaciones lineales, modelos de programación matemática multi-objetivos, enfoques estadístico/probabilísticos. De Boer et al. (2001) en su exhaustiva revisión discute la importancia y complejidad en la selección de proveedores y propone un marco de referencia para la toma de decisiones. Thanaraksakul y Phruksaphanrat (2009) analizan 76 artículos relacionados con la selección de proveedores y encuentran que el precio, calidad y garantía del tiempo de entrega son los criterios más comúnmente citados.

El proceso de selección de proveedores es en general muy complicado y requiere elegir al proveedor que se desempeñe mejor en los criterios considerados. Una de las técnicas que permite evaluar la importancia de cada criterio y jerarquizar a los proveedores es el Analytic Hierarchy Process (AHP), PAJ por sus siglas en español. Esta técnica ha sido utilizada rutinariamente en la práctica. Nydick y Hill (1992), Barbarosoglu y Yazgac (1997) y Narasimhan (1983) proponen el uso del AHP para poder atender la imprecisión intrínseca en la selección de proveedores, esto lo logra proporcionando estimaciones de los pesos de los criterios y la jerarquización de los proveedores candidatos utilizando una escala verbal para los criterios cualitativos y valores numéricos de los criterios cuantitativos. En cuanto a la selección de proveedores de transporte, los criterios tales como costos del transporte, tiempo de tránsito, ubicación geográfica, son considerados en forma implícita como parte de otros criterios (Aguzzoul, 2005) y (Aguzzoul y Ladet, 2007). Aguezzoul y Rezg (2011) consideran la selección de proveedores de transporte construyendo un modelo de optimización multi-objetivos que minimiza simultáneamente el costo total y el tiempo de entrega.

Para el diseño del empaque es importante considerar el peso volumétrico (Huang y Chi, 2007), quienes encuentran que es práctica común en la industria considerar el peso tarifado determinado como el mayor valor entre el peso bruto y el peso volumétrico.

La consolidación de los embarques en un solo punto de reunión de las diferentes áreas funcionales de una organización es una práctica frecuentemente utilizada; su manejo requiere enviar muestras o productos a un mismo cliente. Para la consolidación de cargas puede requerirse la evaluación de diferentes empaques y modos de transporte dentro de la cadena de abastecimiento (Gaytán et al. 2007).

Existen varios métodos propuestos para la consolidación de materiales. Por ejemplo, Tyan et al. (2003), han estudiado la manera de reducir los costos de todo un sistema mediante una política especial de consolidación, integrando sus operaciones de embalaje y transporte de sus productos a la cadena de suministro global de la empresa.

El transporte multi-producto o consolidado resulta preferible al mono-producto, (Mejía et al. 2015), porque reúne ventajas como:

- Menor costo de transporte,
- Disminución de inventarios y
- Manejo de mezclas de producto

Mediante la optimización de un tamaño de empaque se pueden proponer mezclas de producto (muestras) dando mayor flexibilidad para el manejo de carga. Un caso de estudio aplicado a una empresa colombiana para minimizar los costos relacionados con sus operaciones logísticas al utilizar diferentes tamaños de empaque.

El problema de la planeación de envíos aéreos es estudiado por Zichao et al. (2011), el cual consiste en un conjunto de fletes que tienen que ser enviados a distintos destinos utilizando una formulación de programación entera mixta considerando las tarifas de los transportistas y restricciones de volumen y peso, tiempos de salida y arribo de vuelos y el tiempo en que se encuentran listos los paquetes a enviar. El problema se resuelve mediante 2 enfoques, el primero consiste en construir la relajación lagrangiana, descomponiendo el problema en un conjunto de sub-problemas de la mochila y de flujo en redes. El segundo enfoque es aplicando un método heurístico de ramificación local que combina ideas de ramificar y búsqueda local. Ambos enfoques ofrecen resultados de buena calidad en un tiempo computacional razonable.

Con los elementos previamente descritos, consideramos que el problema a ser abordado en este trabajo se resolverá adecuadamente haciendo uso del PAJ para seleccionar al mejor proveedor y la programación matemática para asignar óptimamente los productos a las cajas, proponiendo como objetivos principales minimizar el costo y tiempo de entrega. Para lograr lo anterior, también se propone realizar un análisis detallado del tamaño del embalaje para tratar de mantener la flexibilidad del transporte multi-producto de la red a diseñar y se analiza la factibilidad de consolidar carga con otros departamentos para realizar los envíos.



### **3. METODOLOGÍA**

Para atender los objetivos señalados en la introducción, se propusieron cinco etapas. En la primera se desarrolla un análisis de los dos proveedores haciendo uso de la técnica PAJ. En la segunda etapa se propone el rediseño de las cajas de tal manera que se reduzca el volumen de los embarques. En la tercera se realiza un análisis de consolidación de la carga. En la cuarta se asignan los productos al tipo de caja mediante la formulación de un modelo de optimización buscando la estandarización del embalaje. En la quinta se desarrolla un algoritmo heurístico para la asignación de los productos a las cajas con la intención de simplificar la operación diaria. La calidad del método propuesto se compara con el modelo de optimización. Se analizan los resultados de cada una de las etapas para proporcionar conclusiones en la sección 4.

#### **3.1 SELECCIÓN DEL PROVEEDOR**

La empresa reconsideró al costo como el criterio más relevante y ahora considera crítica la entrega de muestras automotrices a tiempo, sin daños en el embarque y sin pérdidas. Por tal motivo realiza la selección del mejor proveedor utilizando varios juicios apoyándose con el PAJ (Saaty, 1980). El PAJ resulta adecuado para realizar la selección del proveedor porque permite integrar y definir los juicios que serán evaluados por un grupo de trabajo, los juicios pueden ser cualitativos y cuantitativos, es posible evaluar más de una alternativa, se mide la consistencia de los juicios evaluados y resulta fácil de entender para las partes involucradas.

Las dos empresas transportistas que actualmente están contratadas definen sus tarifas en un concepto llamado “peso dimensional”, el cual consiste en evaluar el valor más alto ya sea en peso o en volumen del paquete. Para ejemplificar esto se pueden plantear 2 casos. Caso 1, supongamos que se tiene un paquete pequeño en volumen pero con contenido muy pesado, en este caso el costo será determinado considerando el peso en primer lugar y el volumen en segundo. Caso 2, puede haber un paquete muy amplio en volumen pero muy ligero en contenido, aquí se considera el volumen en primer lugar y en segundo el peso para calcular el costo. El caso de los paquetes de las muestras automotrices de la empresa bajo estudio corresponde al caso 2.

##### **3.1.1 Definición de criterios y estructura jerárquica**

Con el fin de realizar la selección del mejor proveedor de transporte, se integró un equipo de trabajo interdisciplinario conformado por el jefe del departamento de muestras automotrices, el operador de empaque, dos ingenieros del departamento de logística, un ingeniero de calidad y un analista de finanzas. La evaluación se realizó en dos partes. En la primera se determinaron los criterios relevantes que debían cumplir las empresas transportistas y en la segunda se expresaron los juicios en forma grupal aplicando la escala de puntuaciones relativas sugerida por Saaty en el PAJ mostrada en la tabla 3-1.

Los criterios determinados para evaluar a los proveedores de transporte son:

- a) Disponibilidad del transportista; son los días de la semana que ofrece el transportista para recolectar muestras automotrices en la planta, por ejemplo lunes, martes, miércoles, etc.
- b) Hora de recolección en la planta Toluca; por ejemplo 11:00hr o 14:00hr, etc.
- c) Tiempo de tránsito; medido en días desde que se recoge el material en la empresa en Toluca hasta que se entrega en FH, por ejemplo si la empresa recolecta el embarque en el origen el día lunes y entrega en su destino el día martes el tiempo de tránsito será de 1 día.
- d) Calidad del servicio; es la confiabilidad de la entrega, por ejemplo paquetes entregados sin daños.
- e) Costo del transporte del embarque.

Los criterios c y e son cuantitativos y los 3 restantes cualitativos.

### 3.1.2 Construcción de la matriz de comparaciones pareadas entre criterios y entre alternativas respecto a cada criterio

La escala de puntuaciones relativas (Saaty, 1980), mostrada en la tabla 3-1, permite comparar la importancia que tiene un criterio sobre el otro. Al ser más de 2 personas quienes eligieron los criterios a ser evaluados se utiliza la media geométrica en cada comparación pareada.

Tabla 3-1 Escala de puntuaciones relativas

Valor de un criterio sobre otro	Escala de puntuaciones relativas
	Interpretación
1	Ambos criterios son de igual importancia
3	Un criterio es moderadamente más importante que otro
5	Un criterio es más importante que otro
7	Un criterio es fuertemente más importante que otro
9	Un criterio es absolutamente más importante que otro

La tabla 3-2 representa la matriz de comparaciones pareadas entre criterios.

Tabla 3-2 Juicios para evaluar la importancia de los criterios

Criterios relevantes de las empresas transportistas	Juicios para evaluar la importancia de los criterios				
	Disponibilidad del transportista	Hora de recolección en la planta	Tiempo de tránsito	Calidad del servicio	Costo de transporte
Disponibilidad del transportista	1	1/3	1/7	1/9	1/3
Hora de recolección en la planta	3	1	1/3	1/5	5
Tiempo de tránsito	7	3	1	1/3	5
Calidad del servicio	9	5	3	1	7
Costo de transporte	3	1/5	1/5	1/7	1

Interpretación de la tabla 3-2:

- Al comparar un criterio contra sí mismo recibe el valor de 1.
- La disponibilidad del transportista es moderadamente menos importante que la hora de recolección en la planta, con un valor de 1/3. O bien, la hora de recolección en planta es moderadamente más importante que la disponibilidad del transportista, con un valor de 3.
- La disponibilidad del transportista es fuertemente menos importante que el tiempo de tránsito, con un valor de 1/7.
- La disponibilidad del transportista es absolutamente menos importante que la calidad del servicio, con un valor de 1/9.
- La disponibilidad del transportista es moderadamente menos importante que el costo de transporte, con un valor de 1/3.
- La hora de recolección en la planta es moderadamente menos importante que el tiempo de tránsito, con un valor de 1/3.
- La hora de recolección en la planta es menos importante que la calidad del servicio, con un valor de 1/5.
- La hora de recolección en la planta es más importante que el costo del transporte, con un valor de 5.
- El tiempo de tránsito es moderadamente menos importante que la calidad del servicio, con un valor de 1/3.
- El tiempo de tránsito es más importante que el costo del transporte, con un valor de 5.
- La calidad del servicio es fuertemente más importante que el costo del transporte, con un valor de 7.

### 3.1.3 Evaluación de consistencia de la matriz de comparaciones pareadas de criterios

Es importante validar que los valores asignados por el equipo de trabajo a cada uno de las comparaciones son consistentes. La regla para aceptar si los juicios son consistentes es evaluando el llamado cociente de consistencia (CC), definido como sigue:

$$CC = \frac{IC}{IA}$$

donde IC es el índice de consistencia, dado por:

$$IC = \frac{\lambda_{max}}{n - 1}$$

y el IA es el índice aleatorio, obtenido de tablas según el número de criterios  $n$ . Para nuestro caso, tenemos  $n = 5$  criterios, por lo que el valor de IA es de 1.12 (Saaty... para la tabla completa para distintos valores de  $n$ ). El valor  $\lambda_{max}$  es el mayor valor característico de la matriz de comparaciones pareadas de los criterios.

Los juicios se consideran consistentes si  $CC \leq 0.1$ .

La matriz de comparaciones pareadas de los juicios asignados a los 5 criterios se muestra en la tabla 3-2, correspondiéndole un cociente de consistencia igual a 0.08, el cual es menor a 0.1, por lo que se consideran consistentes.

### 3.1.4 Cálculo de los pesos relativos de los criterios y de las alternativas respecto a cada criterio

Para calcular los pesos relativos se sigue el siguiente procedimiento, donde llamamos A a la matriz de comparaciones pareadas. Para ello utilizaremos la siguiente nomenclatura con la intención de simplificar la matriz A.

D: disponibilidad del transportista

H: hora de recolección en la planta

T: tiempo de tránsito

CS: calidad del servicio

CT: costo de transporte

$$A = \begin{matrix} D \\ H \\ T \\ CS \\ CT \end{matrix} \begin{bmatrix} 1 & 1/3 & 1/7 & 1/9 & 1/3 \\ 3 & 1 & 1/3 & 1/5 & 5 \\ 7 & 3 & 1 & 1/3 & 5 \\ 9 & 5 & 3 & 1 & 7 \\ 3 & 1/5 & 1/5 & 1/7 & 1 \end{bmatrix}$$

Posteriormente se crea la matriz  $A_{norm}$ , que representa la matriz obtenida de A, normalizando cada columna. Esto se logra obteniendo la suma de cada columna y dividiendo cada elemento por la suma de su columna. La matriz resultante se muestra en seguida.

$$A_{norm} = \begin{matrix} D \\ H \\ T \\ CS \\ CT \end{matrix} \begin{bmatrix} 1/23 & 5/143 & 15/491 & 35/563 & 1/55 \\ 3/23 & 15/143 & 35/491 & 63/563 & 3/11 \\ 7/23 & 45/143 & 105/491 & 105/563 & 3/11 \\ 9/23 & 75/143 & 315/491 & 315/563 & 21/55 \\ 3/23 & 3/143 & 21/491 & 45/563 & 3/55 \end{bmatrix}$$

Finalmente para determinar la importancia relativa de cada uno de los criterios se obtiene el promedio de cada una de los renglones, obteniendo el vector  $W$ . Por ejemplo, para determinar la importancia relativa del criterio D (disponibilidad del transportista), calculamos:

$$w_D = \frac{1/23 + 5/143 + 15/491 + 35/563 + 1/55}{5} = \frac{27}{713}$$

Similarmente para los demás criterios. El vector final  $W$  está dado por

$$W = \begin{bmatrix} 27/713 \\ 30/217 \\ 23/89 \\ 1/2 \\ 14/213 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.0378 \\ 0.1382 \\ 0.2584 \\ 0.4997 \\ 0.0657 \end{bmatrix}$$

El siguiente paso es generar las matrices de comparaciones pareadas de cada alternativa (transportista 1, T1 y transportista 2, T2) respecto a cada criterio cualitativo; para los cuantitativos usamos sus valores numéricos reportados por los proveedores. Para ello se utiliza nuevamente la escala mostrada en la tabla 3-1, pero esta vez se comparará la importancia del desempeño de un transportista sobre otro. También tomaremos información de la tabla 1-3, la cual nos muestra las características principales de nivel de servicio de ambos transportistas.

Se comienza por la disponibilidad del transportista, de la tabla 1-3 se puede observar que el transportista 1 ofrece su servicio a la empresa de lunes a viernes sin necesidad de programar la recolección previamente, a diferencia del transportista 2 que sólo ofrece servicio cuando se programa una recolección con anticipación. Este criterio cualitativo pone en ventaja al transportista número 1. La matriz que se presenta a continuación denominada DT (disponibilidad del transportista) muestra los valores asignados a T1 y T2.

$$DT = \begin{matrix} & T1 & T2 \\ T1 & \begin{bmatrix} 1 & 3 \end{bmatrix} \\ T2 & \begin{bmatrix} 1/3 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Los valores mostrados en la matriz DT determinan que el transportista 1 es moderadamente de mejor desempeño que el transportista 2 con respecto al criterio de disponibilidad del transportista, con un valor de 3. O bien, que el transportista número 2 es moderadamente de menor desempeño que el transportista 1, con un valor de 1/3.

$$DT_{norm} = \begin{matrix} & T1 & T2 \\ T1 & \begin{bmatrix} 3/4 & 3/4 \end{bmatrix} \\ T2 & \begin{bmatrix} 1/4 & 1/4 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

La matriz PDT muestra los pesos asignados a T1 y T2 con respecto al criterio disponibilidad del transportista. El resultado también se muestra en la tabla 3-3.

$$PDT = \begin{matrix} T1 \\ T2 \end{matrix} \begin{bmatrix} 3/4 \\ 1/4 \end{bmatrix}$$

Se continúa evaluando a ambos transportistas con respecto al criterio cualitativo hora de recolección en la planta. De la tabla 1-3 se observa que el transportista 1 recolecta los paquetes en planta a las 2:00 pm, el transportista 2 recolecta a las 11:00 am. De acuerdo al análisis hecho por el equipo de trabajo se determina que es más conveniente el horario de recolección de las 2:00pm ya que da más tiempo al personal para terminar actividades de inspección o de empaque de las muestras automotrices. La matriz HT muestra los valores asignados a ambos transportistas respecto al criterio hora de recolección en la planta.

$$HT = \begin{matrix} & T1 & T2 \\ T1 & \begin{bmatrix} 1 & 5 \end{bmatrix} \\ T2 & \begin{bmatrix} 1/5 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

La matriz HT muestra que el transportista 1 es de mejor desempeño que el transportista 2 respecto al horario de recolección en la planta, con un valor de 5. O bien, el transportista 2 es de menor desempeño que el transportista 1, con un valor de 1/5.

La matriz  $HT_{norm}$  se muestra a continuación:

$$HT_{norm} = \begin{matrix} & T1 & T2 \\ T1 & \begin{bmatrix} 5/6 & 5/6 \end{bmatrix} \\ T2 & \begin{bmatrix} 1/6 & 1/6 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

A continuación la matriz PHT (resultados en tabla 3-3) :

$$PHT = \begin{matrix} T1 \\ T2 \end{matrix} \begin{bmatrix} 5/6 \\ 1/6 \end{bmatrix}$$

El tiempo de tránsito es un criterio cuantitativo, de la tabla 1-3 se observa que el transportista 1 tarda un día en realizar la entrega en su destino, el transportista 2 tarda

cuatro días en realizar la entrega en el mismo destino. De este modo se le asigna un peso directo al transportista 1 un de 4/5 y de 1/5 al transportista 2 (tabla 3-3).

La calidad del servicio es un criterio cualitativo. De la tabla 1-3 se obtiene información para asignar los valores mostrados en la matriz CST.

$$CST = \begin{matrix} & T1 & T2 \\ T1 & \begin{bmatrix} 1 & 9 \end{bmatrix} \\ T2 & \begin{bmatrix} 1/9 & 1 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

Se puede observar en la matriz CST que la calidad del servicio ofrecida por el transportista 1 es absolutamente de mejor desempeño que la ofrecida por el transportista 2, con un valor de 9. O bien, la calidad del servicio ofrecida por el transportista 2 es absolutamente de menor desempeño que la ofrecida por el transportista 1.

A continuación se muestra la matriz  $CST_{norm}$ :

$$CST_{norm} = \begin{matrix} & T1 & T2 \\ T1 & \begin{bmatrix} 8/9 & 8/9 \end{bmatrix} \\ T2 & \begin{bmatrix} 1/9 & 1/9 \end{bmatrix} \end{matrix}$$

A continuación la matriz de los pesos asignados PCST (resultados en la tabla 3-3):

$$PCST = \begin{matrix} T1 \\ T2 \end{matrix} \begin{bmatrix} 8/9 \\ 1/9 \end{bmatrix}$$

Finalmente se da peso al criterio cuantitativo costo de transporte. De la tabla 1-4 de la sección 1.1.2 se observan las tarifas de mayor frecuencia de ambos transportistas. Los pesos para los transportistas 1 y 2 se muestran en la tabla 3-3.

Como se observa en la tabla 3-3, la característica más importante es la calidad del servicio.

### 3.1.5 Integración de los juicios

El peso final asignado, mostrado en la tabla 3-3, para cada transportista se obtuvo mediante la suma de los productos del peso de cada uno de los criterios por el peso de cada uno de los transportistas con respecto a ese mismo criterio.

Peso final asignado a transportista 1:

$$(0.037 * 0.75) + (0.138 * 0.83) + (0.258 * 0.8) + (0.5 * 0.9) + (0.065 * 0.33) = 0.821$$

Peso final asignado a transportista 2:

$$(0.037 * 0.25) + (0.138 * 0.17) + (0.258 * 0.2) + (0.5 * 0.1) + (0.065 * 0.67) = 0.821$$

Tabla 3-3 Resultados para selección de proveedor

Proveedor	Resultados finales del PAJ					
	Disponibilidad del transportista	Hora de recolección en la planta	Tiempo de tránsito	Calidad del servicio	Costo de transporte	Peso final asignado
		0.037	0.138	0.258	0.5	0.065
Transportista 1	0.75	0.83	0.8	0.9	0.33	0.821
Transportista 2	0.25	0.17	0.2	0.1	0.67	0.178

Continuando con el PAJ, los resultados finales al comparar cada proveedor de transporte respecto a cada criterio se indican en la tabla 3-3. Como se observa en esa tabla el transportista número 1 es el de mejor desempeño por lo que es elegido. A partir de este punto sólo trataremos información relacionada con la empresa transportista 1.

En la tabla 3-4 se presenta una muestra recolectada durante 1 año, la cual representa el 10% de los embarques de ese año y se indica demanda y costo de envío utilizando un servicio de mensajería del transportista 1. Esta información será utilizada en las siguientes secciones.



Tabla 3-4 Costo de envíos de muestras automotrices 2015 de Toluca a FH, Transportista 1

No.	Fecha	Demanda producto 1	Demanda producto 2	Costo por envío Transportista 1 (MXN)
1	09.01.2015	-	63	32,416.11
2	15.01.2015	-	101	53,772.00
3	16.01.2015	1	-	1,172.67
4	30.01.2015	12	57	38,780.83
5	05.02.2015	-	15	8,422.56
6	10.02.2015	89	2	27,884.26
7	23.02.2015	80	-	27,070.30
8	24.02.2015	46	-	8,465.88
9	25.02.2015	16	-	3,622.41
10	26.02.2015	21	-	4,631.29
11	05.03.2015	7	-	2,942.41
12	24.03.2015	85	-	31,031.71
13	27.03.2015	1	-	1,185.37
14	08.04.2015	8	-	2,532.00
15	09.04.2015	1	-	1,203.90
16	15.04.2015	-	1	2,038.85
17	30.04.2015	13	-	4,243.44
18	06.05.2015	30	-	8,583.40
19	08.05.2015	4	-	1,733.54
20	15.05.2015	24	-	7,790.87
21	27.05.2015	-	58	28,229.27
22	28.05.2015	24	-	11,126.20
23	01.06.2015	-	35	16,801.32
24	02.06.2015	68	-	19,029.80
25	03.06.2015	60	-	15,772.22
26	05.06.2015	62	-	30,301.68
27	09.06.2015	5	-	1,726.90
28	12.06.2015	2	-	1,665.36
29	26.06.2015	-	12	5,873.03
30	29.06.2015	16	-	2,328.22
31	01.07.2015	16	-	4,865.57
32	03.07.2015	28	-	9,204.33
33	24.07.2015	50	-	13,590.82
34	04.08.2015	8	-	2,460.00
35	11.08.2015	30	-	14,469.31
36	28.08.2015	-	27	16,317.63
37	01.09.2015	-	21	7,484.29
38	07.09.2015	2	-	1,801.99
39	15.09.2015	-	21	15,366.07
40	21.09.2015	-	17	8,691.94
41	30.09.2015	3	-	1,845.93
42	05.10.2015	-	6	3,464.43
43	12.10.2015	29	-	11,869.05
44	15.10.2015	5	-	1,771.03
45	16.10.2015	10	-	4,133.53
46	21.10.2015	40	-	17,104.47
47	05.11.2015	7	-	3,258.88
48	06.11.2015	28	-	15,295.30
49	06.11.2015	12	-	7,776.33
50	12.11.2015	4	-	1,835.71

### 3.2 REDISEÑO DE LAS CAJAS

Con la finalidad de reducir el volumen de los embarques en esta sección se propone el rediseño de las cajas. Como primera actividad se analizó la cantidad de productos que debían incluirse en cada caja, después de un análisis cuidadoso y considerando que las empresas transportistas se basan en el concepto de peso dimensional o volumen para determinar el costo de los envíos es posible notar que a menor espacio desperdiciado dentro de las cajas será mayor el ahorro en el servicio de transporte.

Por ejemplo, si es necesario enviar una pieza de un producto tipo 1, lo ideal sería tener una caja que ajuste a la medida de una pieza del producto 1. Sin embargo, bajo esta idea de ajustar el tamaño de las cajas a la gran combinación de posibilidades de envíos se tendrían que tener un gran número de cajas de diferentes tamaños, es decir, una caja para un producto tipo 1 y una caja para un producto tipo dos, una caja para dos productos tipo 1 y otra caja para dos productos tipo 2, etc. La limitante para tener una gran variedad de cajas diferentes es la capacidad del almacén, el cual tiene una capacidad máxima de 200 cajas, independientemente de su tamaño. Para tomar la decisión se realizaron 6 sesiones de trabajo con los operadores de empaque, un ingeniero industrial con enfoque en ergonomía, el supervisor de muestras automotrices y el jefe del área y se tomaron en cuenta las condiciones del área de trabajo:

- La capacidad máxima del almacén es de 200 cajas
- El peso de una caja con producto contenido no debe exceder los 26kg.
- La cantidad mínima en existencia debe ser de 10 cajas de cada tipo

Como decisión final se tomó colocar los productos en múltiplos de 3 por caja.

Las nuevas dimensiones de las cajas indicadas en la tabla 3-5 se obtuvieron de la medición directa de todos los productos. En esa tabla también se muestra el peso, el costo, el tipo de producto que puede contener, el número mínimo y máximo de productos que se pueden colocar, con lo que se evita enviar pocas piezas en cajas grandes, y el costo por cada caja enviada.

El material de las cajas propuestas corresponde a un doble corrugado de cartón de las mismas características que las cajas utilizadas actualmente. La finalidad es reducir el volumen de los paquetes y por consecuencia también reducir el costo de envío de muestras automotrices. La única excepción a la regla de embalar muestras automotrices en múltiplos de 3 es la caja tipo 6 la cual puede contener de 16 a 20 productos tipo 1.

Tabla 3-5 Propuesta de cajas nuevas

Tipo de caja	Propuesta de cajas nuevas					
	Dimensiones en cm. de la caja	Peso de la caja en kg.	Costo de la caja en (MXN)	Tipo de producto contenido	Capacidad mínima y máxima de los productos	Costo de envío por tipo de caja en (MXN)
1	20x60x35	1	20.00	1	1-3	1,283.90
2	40x60x35	2	30.00	1	4-6	1,951.11
3	60x60x35	3	40.00	1	7-9	2,821.33
4	80x60x35	3.5	50.00	1	10-12	3,491.00
5	100x60x35	4	60.00	1	13-15	4,154.90
6	100x80x35	6	70.00	1	16-20	4,729.80
7	20x60x50	2	40.00	2	1-3	1,563.00
8	40x60x50	4	50.00	2	4-6	2,599.00
9	60x60x50	6	60.00	2	7-9	3,888.33
10	80x60x50	8	70.00	2	10-12	4,730.67

### 3.3 ANÁLISIS DE CONSOLIDACIÓN DE CARGA

Por consolidar carga se considera la acumulación de varias cajas empacadas ya sea del producto 1 ó 2, únicamente. Actualmente no se realiza consolidación. El tiempo de consolidación es de 5 días hábiles.

En la tabla 3-6 se muestra un cuadro comparativo de costos con-consolidación vs. sin-consolidación lo cual permite observar que el beneficio a partir de dos cajas en adelante es prácticamente el mismo, es decir, no importa enviar 2 ó 9 cajas con la misma cantidad de productos, el costo por caja del envío será prácticamente el mismo. El único beneficio es la consolidación a partir de 2 cajas.

Según los datos históricos, la demanda máxima en un día no pasará de 130 unidades incluyendo los 2 tipos de productos; sin embargo la demanda más probable es menor a 100 piezas.

Con esto es suficiente para discriminar la posibilidad de consolidar varios paquetes al momento de hacer un envío ya que implicaría esperar 5 días de trabajo sin ofrecer un ahorro significativo para la empresa. No se permitiría la consolidación cuando ésta excediera el tiempo de entrega comprometido.

Tabla 3-6 Cuadro comparativo de costos con consolidación vs. sin consolidación

Volumen y capacidad del embalaje	Con consolidación vs. sin consolidación	
	Costo por caja con consolidación (MXN)	Costo por caja sin consolidación (MXN)
1 caja 100x60x35 (capacidad de 15 productos tipo 1)	NA	4,176.69
2 cajas 100x60x35 (capacidad de 30 productos tipo 1)	3,855.32	4,176.69
3 cajas 100x60x35 (capacidad de 45 productos tipo 1)	3,821.54	4,176.69
4 cajas 100x60x35 (capacidad de 60 productos tipo 1)	3,829.99	4,176.69
5 cajas 100x60x35 (capacidad de 75 productos tipo 1)	3,835.05	4,176.69
6 cajas 100x60x35 (capacidad de 90 productos tipo 1)	3,779.00	4,176.69
7 cajas 100x60x35 (capacidad de 105 productos tipo 1)	3,783.86	4,176.69
8 cajas 100x60x35 (capacidad de 120 productos tipo 1)	3,774.88	4,176.69
9 cajas 100x60x35 (capacidad de 135 productos tipo 1)	3,779.00	4,176.69

### 3.4 MODELADO DE LA ASIGNACIÓN DE LOS PRODUCTOS A LAS CAJAS.

El diseño del embalaje se realiza mediante un modelo de optimización que asigna los productos 1 y 2 (tabla 1-1) a las cajas con las dimensiones indicadas en la tabla 3-5.

Se consideran los siguientes supuestos:

- Todos los productos de un pedido deben ser enviados.
- No se pueden colocar menos ni más productos que los previamente establecidos en la tabla 3-5.
- Se considera una disponibilidad de cajas de 10 unidades cada vez que se va a realizar un envío.
- El peso permitido por caja no deberá exceder 26 kg.

#### 3.4.1 Construcción del modelo

Índices:

$I = \{1,2\}$  indica el tipo de producto

$J = \{1, \dots, 10\}$  indica el tipo de caja

$K = \{1, \dots, 10\}$  indica el número de cajas del tipo  $j$

Parámetros:

$D_i$ : Demanda observada del producto  $i, i \in I$

$QMin_{ij}$ : Número mínimo de productos  $i$  permitidos por caja  $j$

$QMax_{ij}$ : Número máximo de productos  $i$  permitidos por caja  $j$

$C_j$ : Costo por enviar la caja del tipo  $j$

$CC_j$ : Costo de la caja  $j$

$W_i$ : Peso del producto  $i$  en kg.

$P_j$ : Peso de la caja  $j$  en kg.

$CT$  : Costo Total

Variables de Decisión:

$X_{ij}$ : Número total de productos  $i$  en las cajas tipo  $j$

$XC_{ijk}$ : Número de productos  $i$  que se colocan en la  $k$ -ésima caja del tipo  $j$

$NC_{ij}$ : Número de cajas tipo  $j$  utilizadas para colocar el producto  $i$

$Y_{ijk} = \begin{cases} 1, & \text{si el producto } i \text{ se coloca en la } k - \text{ésima caja del tipo } j \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases}$

$TC_j$ : Total de cajas tipo  $j$

$TBoxes$ : Gran total de cajas

$$Min CT = \sum_{i=1}^2 \sum_{j=1}^{10} \sum_{k=1}^{10} Y_{ijk} \cdot (C_j + CC_j) \quad (1)$$

S.a

$$D_i = \sum_{j=1}^{10} X_{ij} \quad \forall i = 1,2 \quad (2)$$

$$QMin_{ij} \cdot Y_{ijk} \leq XC_{ijk} \leq QMax_{ij} \cdot Y_{ijk} \quad (3)$$

$$\forall i = 1,2 ; j = 1, \dots, 10 ; k = 1, \dots, 10$$

$$X_{ij} = \sum_{k=1}^{10} XC_{ijk} \quad \forall i = 1,2 ; j = 1, \dots, 10 \quad (4)$$

$$\sum_{k=1}^{10} Y_{ijk} = NC_{ij} \quad \forall i = 1,2 ; j = 1, \dots, 10 \quad (5)$$

$$TC_j = \sum_{i=1}^2 NC_{ij} \quad \forall j = 1, \dots, 10 \quad (6)$$

$$TC_{aj} = \sum_{j=1}^{10} TC_j \quad (7)$$

$$XC_{ijk} \cdot W_i + Y_{ijk} \cdot P_j \leq 26 \quad (8)$$

$$\forall i = 1,2 ; j = 1, \dots, 10 ; k = 1, \dots, 10$$

$$X_{ij}, XC_{ijk}, NC_{ij}, TC_j, TC_{aj} \geq 0 \text{ enteras} \quad (9)$$

$$Y_{ijk} \in \{0,1\}, \forall i = 1,2 ; j = 1, \dots, 10 ; k = 1, \dots, 5 \quad (10)$$

La función objetivo (1) consiste en minimizar el costo total (CT) generado por enviar cajas con productos considerando al transportista 1 e incluyendo el costo del embalaje. Existen 9 restricciones para este problema. La restricción (2) asegura que se cubra la demanda evitando enviar menos piezas de las que son solicitadas por el cliente. La restricción (3) limita la cantidad de piezas que están permitidas por cada caja  $j$  con esto se evita enviar pocas piezas en una caja muy grande o intentar colocar muchas piezas en una caja pequeña. La restricción (4) provoca que el número de piezas  $i$  sea igual a la suma de todos los productos  $i$  que se colocaron en  $k$  cajas. La restricción (5) indica que las cajas que han sido elegidas para el envío sean igual al número de cajas tipo  $j$ . La restricción (6) indica un resumen del total de cajas utilizadas del tipo  $j$  y la (7) indica el total de cajas, estas dos

últimas restricciones son de apoyo para el jefe de muestras automotrices. La restricción (8) restringe el peso por caja empacada el cual no debe superar los 26 kg. La restricción (9) indica que las variables  $X_{ij}$ ,  $XC_{ijk}$ ,  $NC_{ij}$ ,  $TC_{ij}$ ,  $TBoxes$ , son no negativas y enteras. La condición (10) indica que  $Y_{ijk}$  es variable binaria.

### 3.4.2 Solución del modelo

Para resolver el modelo se utilizó el software GAMS versión 23.5 el cual es un convertidor del modelo algebraico en un archivo que es adecuado para ser leído por algún solucionador, para este caso el solucionador es CPLEX. La demanda no presenta un patrón específico, por lo que el modelo se debe correr cada vez que se presenta un pedido.

En la figura 3-1 se muestra la codificación del modelo matemático para ser leído por GAMS que representa el modelo definido por las expresiones (1)-(10). La programación comienza por indicar los 3 conjuntos, posteriormente se colocan los parámetros relevantes para la solución del modelo. Cada vez que se corre el modelo deberá escribirse la demanda que se requiere enviar. Una vez colocados todos los datos se declaran las variables de decisión.

```
$TITLE Solución de asignación de productos tipo 1 y 2 a cajas disponibles.
```

```
sets
    i      producto           /1, 2/
    j      tamaño de caja    /1,2,3,4,5,6,7,8,9,10/
    k      cajas disponibles del tipo j /1*10/
;
```

```
parameters
```

```
w(i)      Peso del producto i en kg.
           /1      1
           2      1.5/
```

```
p(j)      Peso de la caja j en kg.
```

```
           /1      1
           2      2
           3      3
           4      3.5
           5      4
           6      6
           7      2
           8      4
           9      6
           10     8/
```

```
D(i)      Demanda del producto i en unidades
```

```
           /1      0
           2      101/
```

CC(j) Costo de la caja j

/1	20
2	30
3	40
4	50
5	60
6	70
7	40
8	50
9	60
10	70/

C(j) Costo por enviar la caja j llena

/1	1283.90
2	1951.11
3	2821.33
4	3491
5	4154.90
6	4729.80
7	1563
8	2599
9	3888.33
10	4730.67/ ;

Table QMin(i,j) Capacidad minima en unidades del producto i en la caja j

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	4	7	10	13	16	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	1	4	7	10 ;

Table QMax(i,j) Capacidad maxima en unidades del producto i en la caja j

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	3	6	9	12	15	20	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	3	6	9	12 ;

**Integer variables**

X(i,j) Numero total de productos i en las cajas tipo j  
 xc(i,j,k) Numero de productos i colocados en las k cajas del tipo j  
 NC(i,j) Numero de cajas tipo j utilizadas para colocar el producto i  
 ;

**Variables**

CT Costo Total  
 TP(i) Total de piezas i  
 TC(j) Total de cajas j  
 TCajas Gran total de total de cajas  
 ;

**Binary variables**

y(i,j,k) 1 si el producto i se coloca en las k cajas del tipo j  
 y 0 en otro caso



```

Equations
Demanda(i)                Satisfaccion de la demanda (piezas)
Capmin(i,j,k)            Capacidad minima de la caja i para guardar
                          las piezas i (piezas por caja)
Capmax(i,j,k)            Capacidad maxima de la caja i para guardar
                          las piezas i (piezas por caja)
Pzascaja(i,j)            Piezas por caja Garantizar que todos los productos i
                          se colocan en alguna caja tipo j
                          (sin importar en que caja van)
Totcaja(i,j)             Total de cajas
Totalcajas(j)            Total de cajas
TotalCaj                  Posible funcion objetivo a minimizar.
                          Total de cajas.. Puede ser F.O.
Pesocaja(i,j,k)          Restriccion de peso por caja considerando
                          el peso de las piezas y del corrugado
cost                       Costo por caja ($ por caja)
;

Demanda(i)..              D(i)=e=sum((j),x(i,j));
Capmin(i,j,k)..           QMin(i,j)*Y(i,j,k)=l=xc(i,j,k);
Capmax(i,j,k)..           QMax(i,j)*Y(i,j,k)=g=xc(i,j,k);
Pzascaja(i,j)..           x(i,j)=e=sum(k,xc(i,j,k));

Totcaja(i,j)..            sum(k,Y(i,j,k))=e=NC(i,j);
Totalcajas(j)..           TC(j)=e=sum(i,NC(i,j));
TotalCaj..                TCajas=e=sum(j,TC(j));

Pesocaja(i,j,k)..         xc(i,j,k)*w(i)+Y(i,j,k)*p(j)=l=26;

cost..                    CT=e=sum((i,j,k),(Y(i,j,k)*(C(j)+CC(j))));

Option optcr              = 0.0001 ;
Model Optimo /all/
Solve Optimo using mip minimizing CT;
display x.l, xc.l, nc.l, Y.l, TCajas.l, CT.l, TC.l;

```

Fig. 3-1 Programación de modelo en GAMS

La figura 3-1 muestra el código de programación del modelo matemático en la sección 3.4.1. Éste código permite representar y resolver el modelo de optimización. La declaración de variables y restricciones sigue el mismo orden del modelo matemático, por lo que es auto-explicable.

### 3.4.3 Análisis de los resultados de la solución exacta

Los resultados obtenidos al correr el modelo son mostrados en las tablas 3-6 y 3-7 y corresponden a los de una muestra aleatoria de 50 pedidos generados en el año 2015. La tabla 3-7 compara los costos incurridos al aplicar la práctica actual contra los costos obtenidos al utilizar la propuesta. Se observa que la nueva propuesta produce una reducción anual en costos del 22%, a pesar de que en el caso de enviar solamente un producto la

propuesta resulta ser más cara, esta demanda ocurre muy pocas veces. Los ahorros indican que el método propuesto de embalaje es una buena solución para la empresa.

Tabla 3-7 Comparación de costos del año 2015 con transportista 1. Método anterior vs. método propuesto.

No.	Fecha	Demanda producto 1	Demanda producto 2	Costo por envío Transportista 1 (MXN)	Nuevo costo con valor de cajas en GAMS (MXN)
1	09.01.2015	-	63	32,416.11	25,606.35
2	15.01.2015	-	101	53,772.00	41,054.36
3	16.01.2015	1	-	1,172.67	1,303.90
4	30.01.2015	12	57	38,780.83	26,692.01
5	05.02.2015	-	15	8,422.56	6,403.67
6	10.02.2015	89	2	27,884.26	23,663.53
7	23.02.2015	80	-	27,070.30	19,199.20
8	24.02.2015	46	-	8,465.88	11,580.71
9	25.02.2015	16	-	3,622.41	4,799.80
10	26.02.2015	21	-	4,631.29	6,103.70
11	05.03.2015	7	-	2,942.41	2,861.33
12	24.03.2015	85	-	31,031.71	21,180.31
13	27.03.2015	1	-	1,185.37	1,303.90
14	08.04.2015	8	-	2,532.00	2,861.336
15	09.04.2015	1	-	1,203.90	1,303.90
16	15.04.2015	-	1	2,038.85	1,603.00
17	30.04.2015	13	-	4,243.44	4,214.90
18	06.05.2015	30	-	8,583.40	8,340.80
19	08.05.2015	4	-	1,733.54	1,981.11
20	15.05.2015	24	-	7,790.87	6,780.91
21	27.05.2015	-	58	28,229.27	24,003.35
22	28.05.2015	24	-	11,126.20	6,780.91
23	01.06.2015	-	35	16,801.32	14,402.01
24	02.06.2015	68	-	19,029.80	17,260.73
25	03.06.2015	60	-	15,772.22	14,399.40
26	05.06.2015	62	-	30,301.68	15,703.30
27	09.06.2015	5	-	1,726.90	1,981.11
28	12.06.2015	2	-	1,665.36	1,303.90
29	26.06.2015	-	12	5,873.03	4,800.67
30	29.06.2015	16	-	2,328.22	4,799.80
31	01.07.2015	16	-	4,865.57	4,799.80
32	03.07.2015	28	-	9,204.33	7,661.13
33	24.07.2015	50	-	13,590.82	13,140.60
34	04.08.2015	8	-	2,460.00	2,861.33
35	11.08.2015	30	-	14,469.31	8,340.80
36	28.08.2015	-	27	16,317.63	11,204.34
37	01.09.2015	-	21	7,484.29	8,749.00
38	07.09.2015	2	-	1,801.99	1,303.90
39	15.09.2015	-	21	15,366.07	8,749.00
40	21.09.2015	-	17	8,691.94	7,449.67
41	30.09.2015	3	-	1,845.93	1,303.90
42	05.10.2015	-	6	3,464.43	2,649.00
43	12.10.2015	29	-	11,869.05	7,661.13
44	15.10.2015	5	-	1,771.03	1,981.11
45	16.10.2015	10	-	4,133.53	3,541.00
46	21.10.2015	40	-	17,104.47	9,599.60
47	05.11.2015	7	-	3,258.88	2,861.33
48	06.11.2015	28	-	15,295.30	7,661.13
49	06.11.2015	12	-	7,776.33	3,541.00
50	12.11.2015	4	-	1,835.71	1,981.11
<b>COSTO TOTAL</b>				<b>564,984.41</b>	<b>441,313.78</b>

Los resultados del modelo de optimización mostrados en la tabla 3-8, indican para cada pedido el total de cajas requeridas de cada tipo para la muestra de 50 pedidos. Esto nos permite estimar la cantidad de cajas que se ocuparán durante un año, pudiéndose de esta manera establecer una política de inventarios adecuada para el abastecimiento del embalaje.

Tabla 3-8. Consumo de cajas de una muestra aleatoria de tamaño 50

Datos de Demanda				Tipo de Caja / Tipo de producto									
No.	Fecha	Demanda producto 1	Demanda producto 2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
				1	1	1	1	1	1	2	2	2	2
				3	6	9	12	15	20	3	6	9	12
1	09.01.2015	-	63							1			5
2	15.01.2015	-	101								1		8
3	16.01.2015	1	-	1									
4	30.01.2015	12	57				1					1	4
5	05.02.2015	-	15							1			1
6	10.02.2015	89	2			1			4	1			
7	23.02.2015	80	-						4				
8	24.02.2015	46	-		1				2				
9	25.02.2015	16	-						1				
10	26.02.2015	21	-	1					1				
11	05.03.2015	7	-			1							
12	24.03.2015	85	-		1				4				
13	27.03.2015	1	-	1									
14	08.04.2015	8	-			1							
15	09.04.2015	1	-	1									
16	15.04.2015	-	1							1			
17	30.04.2015	13	-					1					
18	06.05.2015	30	-				1		1				
19	08.05.2015	4	-		1								
20	15.05.2015	24	-		1				1				
21	27.05.2015	-	58										5
22	28.05.2015	24	-		1				1				
23	01.06.2015	-	35										3
24	02.06.2015	68	-			1			3				
25	03.06.2015	60	-						3				
26	05.06.2015	62	-	1					3				
27	09.06.2015	5	-		1								
28	12.06.2015	2	-		1								
29	26.06.2015	-	12										1
30	29.06.2015	16	-						1				
31	01.07.2015	16	-						1				
32	03.07.2015	28	-			1			1				
33	24.07.2015	50	-				1		2				
34	04.08.2015	8	-			1							
35	11.08.2015	30	-				1		1				
36	28.08.2015	-	27							1			2
37	01.09.2015	-	21									1	1
38	07.09.2015	2	-	1									
39	15.09.2015	-	21									1	1
40	21.09.2015	-	17								1		1
41	30.09.2015	3	-	1									
42	05.10.2015	-	6								1		
43	12.10.2015	29	-			1			1				
44	15.10.2015	5	-		1								
45	16.10.2015	10	-				1						
46	21.10.2015	40	-						2				
47	05.11.2015	7	-			1							
48	06.11.2015	28	-			1			1				
49	06.11.2015	12	-				1						
50	12.11.2015	4	-		1								
<b>TOTAL DE CAJAS</b>				<b>7</b>	<b>9</b>	<b>9</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>38</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>32</b>

### **3.5 Algoritmo heurístico para la asignación de los productos a las cajas**

Con el fin de proporcionar a la empresa una solución eficiente e independiente del programa comercial GAMS, en esta sección se propone un algoritmo heurístico. El algoritmo propone tres reglas para obtener una solución: la primera es la asignación de productos a cajas del mismo tipo; la segunda es la asignación aleatoria de los productos a las cajas; la tercera es la asignación de productos a la caja de mayor capacidad. Para evaluar la calidad de cada regla del algoritmo se comparó la solución arrojada por éste y la solución exacta proporcionada por el modelo de optimización y se evaluó el desempeño del algoritmo resolviendo un conjunto de problemas elegidos de los pedidos ocurridos el año 2015.

#### **3.5.1 Reglas de asignación, descripción del pseudocódigo**

Se proponen 3 reglas para generar una solución a la asignación de productos a las cajas. Las 3 reglas están basadas en el número de piezas de cada pedido bajo las condiciones de asignación de productos a los tipos de cajas explicados en la tabla 3-5 de la sección 3.2. Las 3 reglas aplican cuando la demanda de productos sea mayor a 20 piezas, ya que de otro modo la solución es trivial de acuerdo a la tabla 3-5.

REGLA 1: Asignación de productos a cajas del mismo tipo. Dada una demanda conocida, es necesario empacar los productos en cajas del mismo tamaño. Por ejemplo, considerando un embarque de 30 productos tipo 1 el algoritmo elegirá en primera instancia la caja tipo 6 que es la de mayor capacidad para ese tipo de producto (ver tabla 3-5) y le asignará la mayor cantidad de productos posibles que para este caso son 20, aún estarán pendientes 10 productos por asignar los cuales bajo esta regla deberán ser contenidos también en una caja tipo 6, sin embargo la capacidad mínima de esta caja son 16 piezas y 10 es menor a 16, por lo tanto no sería posible elegir 2 cajas tipo 6 para el embarque de los 30 productos. Como siguiente paso el algoritmo elegirá la siguiente caja de mayor capacidad, es decir la caja tipo 5 con capacidad máxima de 15 piezas, las 15 piezas restantes deberán ser asignadas a otra caja igual (tipo 5), esto es posible, por lo tanto el resultado sería 2 cajas tipo 5 que contienen cada una 15 productos del tipo 1 y se calcula el costo de acuerdo a las tarifas del transportista 1 y costos de las cajas mostrados en la tabla 3-5.

REGLA 2: Asignación aleatoria de productos a las cajas. Se generan números aleatorios uniformes discretos entre 1 y 6 en caso de ser del producto tipo 1 y para los productos tipo 2 entre 1 y 4, estos números aleatorios uniformes discretos representan el tipo de caja que será elegida para contener los productos. El algoritmo asignará en primera instancia la máxima cantidad de productos posibles en una caja. Por ejemplo, para una demanda de 50 productos tipo 1, sería posible que el algoritmo eligiera 1 caja tipo 1 con capacidad de 3 productos, una caja tipo 5 de capacidad 15, otra tipo 3 de capacidad 9, otra tipo 6 de capacidad 20 y al final nuevamente una tipo 1 de capacidad 3. Entonces:  $3+15+9+20+3=50$ . El costo total se determina en base a los datos de la tabla 3-5.

REGLA 3: Asignación basada en la caja de mayor capacidad. En este caso el algoritmo llena primero la caja de mayor capacidad. Por ejemplo si la demanda es de 50. Entonces la

caja de mayor capacidad de productos 1 es la tipo 6 de 20 productos, entonces toma esa caja y la llena; quedan 30 productos pendientes por empacar, nuevamente llena otra caja tipo 6 de 20 productos y restan 10, los 10 restantes los asigna a la caja que cumpla en tamaño y peso y es la que se elige. El costo total se determina en base a los datos de la tabla 3-5.

### 3.5.2 Pseudocódigo del algoritmo

A continuación, en las figuras 3-2, 3-3 y 3-4, se muestran los 3 pseudocódigos que representan cada una de las 3 reglas del algoritmo.

Paso 0. Leer tipo de producto y demanda D1, D2.  
Paso 1. Para cada demanda se elige la caja de mayor capacidad y se llena de productos.  
Paso 2. Si al llenar la caja no quedan productos pendientes por empacar se finaliza la selección de cajas, en otro caso se repite el paso 1 con las piezas restantes.  
Paso 3. Si la siguiente caja seleccionada es del mismo tipo que la primera caja o que las cajas anteriores continuar con pasos 1 y 2, en otro caso continuar en paso 4.  
Paso 4. Se descarta la caja de mayor capacidad y se elige la caja siguiente con mayor capacidad y se continúa con pasos 2 y 3. Se repite el ciclo hasta asignar todos los productos a cajas de igual tamaño y se continúa al paso 5.  
Paso 5. Se calcula el costo total del envío.  
Paso 6. Se obtiene resultado de número total de cajas del mismo tipo y costo total del envío.

Fig. 3-2 Pseudocódigo de la Regla 1. Asignación de productos a cajas del mismo tipo.

Paso 0. Leer tipo de producto y demanda D1, D2.  
Paso 1. Mientras la demanda sea mayor o igual a 1 generar un número aleatorio entre el 1 y 6 para tipos de producto 1 y entre 1 y 4 para tipos de productos 2. Este número aleatorio determinará el tipo de caja.  
Paso 2. Llenar la caja elegida aleatoriamente a su máxima capacidad.  
Paso 3. Si después de llenar la caja en el paso 2 no queda residuo de productos se termina con la selección de cajas y se continúa con el paso 4. En otro caso repetir pasos 1 y 2 hasta acomodar todos los productos.  
Paso 4. Se calcula el costo total del envío.  
Paso 5. Se obtiene resultado de número total de cajas de distintos tipos y costo total del envío.

Fig. 3-3 Pseudocódigo de la Regla 2. Asignación aleatoria de productos a las cajas,

Paso 0. Leer tipo de producto y demanda D1, D2.  
Paso 1. Para cada demanda se elige la caja de mayor capacidad y se llena de productos.  
Paso 2. Si al llenar la caja no quedan productos pendientes por empacar se finaliza la selección de cajas y se continúa en el paso 3, en otro caso se repite el paso 1 con las piezas restantes hasta finalizar la asignación de todos los productos.  
Paso 3. Se calcula el costo total del envío.  
Paso 4. Se obtiene resultado de número total de cajas de distintos tipos y costo total del envío.

Fig. 3-4 Pseudocódigo de la Regla 3. Asignación basada en la caja de mayor capacidad.

Las tres variantes del algoritmo fueron programadas en Matlab versión R2014a (8.3.0.532). Instalado en una máquina con un procesador Intel® Core™ i7-4800MQ CPU @ 2.70 GHz. Memoria RAM de 16.0 GB y sistema operativo de 64-bit. Los códigos completos se describen en los anexos 1 a 6.

### 3.5.3 Análisis de resultados del método heurístico

Para realizar la evaluación del desempeño del método heurístico, se tomó la misma muestra de 50 envíos resueltos con el algoritmo propuesto. En la tabla 3-9 se hace la comparación de los costos reales del año 2015 contra los exactos resueltos mediante modelación matemática con software comercial y contra el método heurístico propuesto. Se puede observar en la columna titulada Costo Heurístico Regla 3 de la tabla 3-9, que las soluciones son las mismas que las obtenidas con el método exacto resuelto en GAMS, con la ventaja de que el código de Matlab se puede convertir a una versión ejecutable que resulta más sencilla de implementar y operar para el personal que realiza el embalaje de las muestras automotrices. Por lo tanto la gerencia ha optado por implementar el método heurístico con la construcción de la versión ejecutable (.exe) del código.

### 3.5.4 Versión ejecutable del método heurístico sugerido

Dada la calidad del heurístico propuesto de la regla 3 se crearon nuevos códigos en Matlab para obtener dos archivos ejecutables para que cada vez que sea necesaria la selección de las cajas el operador lo ejecute sin necesidad de tener instalado Matlab en todos los ordenadores disponibles, un código es para los productos tipo uno y otro código para los productos tipo dos. Se muestra el nuevo código relacionado a los productos tipo 1 para la creación del archivo ejecutable en el anexo 7. Los datos que el operador debe alimentar al programa es únicamente la cantidad de piezas a embalar.

El programa arroja las cajas a utilizar y cantidad de productos en cada caja. Las figuras 3-2, 3-3 y 3-4 muestran algunas pantallas de cómo los operadores de embalaje realizan la consulta al momento de seleccionar las cajas. El tiempo para realizar una consulta toma sólo unos segundos, por lo cual resulta conveniente y fácil para los operadores de embalaje utilizar esta herramienta.

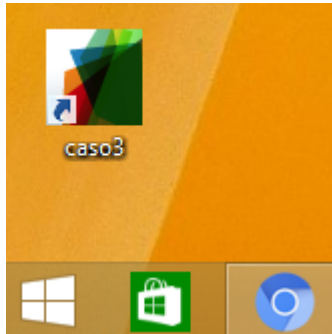


Fig. 3-2 Acceso rápido para abrir ejecutable para el caso 3 de los productos tipo 1.

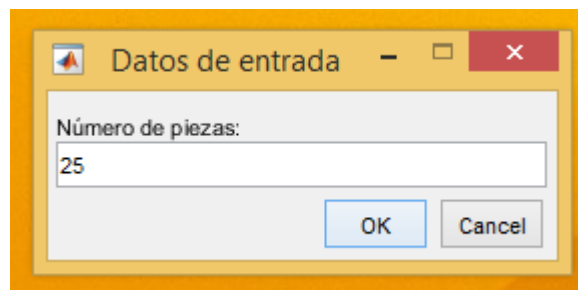


Fig. 3-3 Cuadro de diálogo para introducir cantidad de piezas a embalar del producto tipo 1.

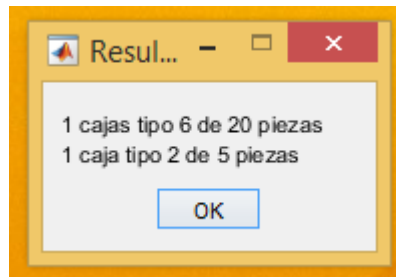


Fig. 3-5 Resultados. Cantidad de cajas a ser utilizadas para embalar los productos tipo 1.

Tabla 3-9. Comparación de costos. Real, exacto (GAMS) y heurístico (Matlab).

<b>Comparación de costos entre real, exacto (GAMS) y heurístico.</b>						
<b>Demanda Producto 1</b>	<b>Demanda Producto 2</b>	<b>Costo por envío Transportista 1</b>	<b>Nuevo costo con valor de cajas en GAMS</b>	<b>Costo Heurístico Regla 1</b>	<b>Costo Heurístico Regla 2</b>	<b>Costo Heurístico Regla 3</b>
-	63	32,416.11	25,606.35	27,638.31	27,908.67	25,606.35
-	101	53,772.00	41,054.36	45,033.00	44,604.67	41,054.36
1	-	1,172.67	1,303.90	1,303.10	1,303.10	1,303.90
12	57	38,780.83	26,692.01	33,998.00	28,386.99	26,692.01
-	15	8,422.56	6,403.67	8,015.00	6,403.67	6,403.67
89	2	27,884.26	23,663.53	26,892.40	28,782.40	23,663.53
80	-	27,070.30	19,199.20	19,199.20	23,878.31	19,199.20
46	-	8,465.88	11,580.71	14,164.00	11,580.71	11,580.71
16	-	3,622.41	4,799.80	4,799.80	5,518.80	4,799.80
21	-	4,631.29	6,103.70	9,127.03	7,873.92	6,103.70
7	-	2,942.41	2,861.33	2,861.33	2,861.33	2,861.33
85	-	31,031.71	21,180.31	37,813.10	27,124.81	21,180.31
1	-	1,185.37	1,303.90	1,303.10	1,303.10	1,303.90
8	-	2,532.00	2,861.34	2,861.33	3,285.01	2,861.34
1	-	1,203.90	1,303.90	1,303.10	1,303.10	1,303.90
-	1	2,038.85	1,603.00	1,603.00	1,603.00	1,603.00
13	-	4,243.44	4,214.90	4,214.90	5,266.12	4,214.90
30	-	8,583.40	8,340.80	8,429.80	9,059.80	8,340.80
4	-	1,733.54	1,981.11	1,981.11	2,607.80	1,981.11
24	-	7,790.87	6,780.91	7,082.00	8,754.14	6,780.91
-	58	28,229.27	24,003.35	24,003.35	26,002.00	24,003.35
24	-	11,126.20	6,780.91	7,082.00	6,780.91	6,780.91
-	35	16,801.32	14,402.01	14,402.01	15,650.00	14,402.01
68	-	19,029.80	17,260.73	29,989.70	20,632.63	17,260.73
60	-	15,772.22	14,399.40	14,399.40	17,394.83	14,399.40
62	-	30,301.68	15,703.30	20,029.31	17,819.36	15,703.30
5	-	1,726.90	1,981.11	1,981.11	2,607.80	1,981.11
2	-	1,665.36	1,303.90	1,303.90	1,303.90	1,303.90
-	12	5,873.03	4,800.67	4,800.67	5,855.00	4,800.67
16	-	2,328.22	4,799.80	4,799.80	4,799.80	4,799.80
16	-	4,865.57	4,799.80	4,799.80	6,148.80	4,799.80
28	-	9,204.33	7,661.13	8,429.80	10,735.25	7,661.13
50	-	13,590.82	13,140.60	22,166.30	14,188.51	13,140.60
8	-	2,460.00	2,861.33	2,861.33	2,861.33	2,861.33
30	-	14,469.31	8,340.80	8,429.80	10,107.71	8,340.80
-	27	16,317.63	11,204.34	11,844.99	11,895.33	11,204.34
-	21	7,484.29	8,749.00	11,221.00	9,246.33	8,749.00
2	-	1,801.99	1,303.90	1,303.90	1,303.90	1,303.90
-	21	15,366.07	8,749.00	11,221.00	9,803.33	8,749.00
-	17	8,691.94	7,449.67	7,896.66	8,504.00	7,449.67
3	-	1,845.93	1,303.90	1,303.90	1,303.90	1,303.90
-	6	3,464.43	2,649.00	2,649.00	2,649.00	2,649.00
29	-	11,869.05	7,661.13	8,429.80	10,108.56	7,661.13
5	-	1,771.03	1,981.11	1,981.11	2,607.80	1,981.11



10	-	4,133.53	3,541.00	3,541.00	4,588.91	3,541.00
40	-	17,104.47	9,599.60	9,599.60	13,225.03	9,599.60
7	-	3,258.88	2,861.33	2,861.33	2,861.33	2,861.33
28	-	15,295.30	7,661.13	8,429.80	8,084.81	7,661.13
12	-	7,776.33	3,541.00	3,541.00	4,165.23	3,541.00
4	-	1,835.71	1,981.11	1,981.11	2,607.80	1,981.11
<b>TOTAL</b>		<b>564,984.41</b>	<b>441,313.78</b>	<b>516,906.09</b>	<b>505,252.54</b>	<b>441,313.78</b>

#### 4. CONCLUSIONES

En este trabajo se analiza el problema de altos costos de transporte aéreo por envíos de muestras automotrices de la ciudad de Toluca, México a Farmington Hills, EEUU.

La solución propuesta se realizó en cinco etapas. La primera etapa consistió en la selección del mejor proveedor de transporte mediante PAJ para realizar los envíos aéreos reduciendo la probabilidad de daños en los productos o pérdida de los mismos, considerando como característica de nivel de servicio más importante la calidad en el servicio. El proveedor 1 demostró ser el más confiable y más rápido en las entregas, también es quien ofrece mayor flexibilidad en los días y horarios de recolección en planta, aunque también demostró ser el de mayor costo, sin embargo no pone en riesgo los productos. Aunque el proveedor 2 ofrece un menor costo, presenta una alta probabilidad de dañar los productos o pérdida de los mismos, lo cual presenta la posibilidad de pérdida de negocios con clientes potenciales, por lo que no es elegido.

En la segunda etapa se implementó la propuesta de rediseñar las cajas de cartón del embalaje y se logró un ahorro en los costos totales de flete del 22%. Adicionalmente, la propuesta permitió estandarizar el proceso de asignación de los productos al embalaje facilitando el trabajo del personal involucrado.

También se concluye que no existe un beneficio significativo por consolidar carga, etapa 3, lo cual es benéfico para el jefe del departamento de muestras automotrices ya que no tiene que esperar días para que se logren recolectar varias cajas de productos 1 y 2 para poder hacer el envío, sino que es posible enviar embarques con al menos 2 cajas.

En la etapa 4, con la formulación de modelo de optimización es posible conocer la asignación óptima de los productos a las cajas que hay disponibles, incluyendo la existencia de embalaje en inventario.

La etapa 5 consistió de la construcción de un método heurístico basado en la tercera regla de asignación de productos y se demuestra que es posible obtener la misma solución exacta que mediante software comercial, esto tiene la ventaja de no requerir gastos y capacitación adicional del operador del programa. Es de observar que el algoritmo sugerido aplicando cualquiera de las tres reglas propuestas, genera soluciones de menor costo con respecto a la práctica utilizada antes de realizar el presente estudio.

Con el desarrollo de la metodología planteada se logra el objetivo general de este trabajo terminal de grado, el cual consiste en optimizar los costos por envíos aéreos de muestras automotrices de la ciudad de Toluca a FH. Se logran también los objetivos específicos y se responde a las preguntas de investigación.

De las 3 hipótesis planteadas en la sección introductoria se acepta con mayor énfasis que el rediseño del embalaje representa la causa principal de la reducción de los costos. Se acepta que la técnica para la evaluación y selección de proveedores permitió una reducción en los costos generados por retrasos en las entregas, daños en material o pérdida de paquetes. Y se acepta que la estandarización de la asignación de los productos a las cajas de cartón disponibles permite un uso eficiente del volumen del embalaje, reduciendo costos por el mal aprovechamiento del mismo.

## ANEXOS

### ANEXO 1. CÓDIGO EN MATLAB DEL MÉTODO HEURÍSTICO DE LA REGLA DE ASIGNACIÓN 1 PARA PRODUCTOS TIPO 1.

```
demanda=input('Número de piezas: ')
mins=[1,4,7,10,13,16];
maxs=[3,6,9,12,15,20];
costo_caja=[20,30,40,50,60,70];
costo_envio=[1283.9,1951.11,2821.33,3491.0,4154.9,4729.8];
caja=[0,0,0,0,0,0];
caja_entera=[0,0,0,0,0,0];
costo_total=0;

for i=6:-1:1
    caja_entera(i)=floor(demanda./maxs(i));
    resto(i)=mod(demanda,maxs(i));
    if resto(i)==0
        caja(i)=caja_entera(i);
        disp([num2str(caja_entera(i)),' cajas tipo ', num2str(i), ' de
', num2str(maxs(i)), ' piezas'])
        break
    end
    if resto(i)>=mins(i)
        caja(i)=caja_entera(i)+1;
        disp([num2str(caja_entera(i)),' cajas tipo ', num2str(i), ' de
', num2str(maxs(i)), ' piezas y 1 caja de ', num2str(resto(i)), ' piezas'])
        break
    else
        continue
    end
end
costo_total=0;
for i=1:6
    costo_total=costo_total+(costo_caja(i)+costo_envio(i))*caja(i);
end
disp(['El costo total es ',num2str(costo_total)])
```

## ANEXO 2. CÓDIGO EN MATLAB DEL MÉTODO HEURÍSTICO DE LA REGLA DE ASIGNACIÓN 2 PARA PRODUCTOS TIPO 1.

```
demanda=input('Número de piezas: ')
mins=[1,4,7,10,13,16];
maxs=[3,6,9,12,15,20];
costo_caja=[20,30,40,50,60,70];
costo_envio=[1283.9,1951.11,2821.33,3491.0,4154.9,4729.8];
caja=[0,0,0,0,0,0];
costo_total=0;

demanda_actual=demanda;
while demanda_actual>=1
    i=random('unid',6);
    if demanda_actual>=mins(i)
        demanda_actual=demanda_actual-maxs(i);
        caja(i)=caja(i)+1;
        if demanda_actual>=0
            disp(['una caja tipo ',num2str(i),' de ',num2str(maxs(i)),'
piezas'])
        else
            disp(['una caja tipo ',num2str(i),' de ',
num2str(demanda_actual+maxs(i)),' piezas'])
        end
    end
end
for i=1:6
    costo_total=costo_total+(costo_caja(i)+costo_envio(i))*caja(i);
end
disp(['El costo total es ',num2str(costo_total)])
```

### ANEXO 3. CÓDIGO EN MATLAB DEL MÉTODO HEURÍSTICO DE LA REGLA DE ASIGNACIÓN 3 PARA PRODUCTOS TIPO 1.

```
demanda=input('Número de piezas: ');
mins=[1,4,7,10,13,16];
maxs=[3,6,9,12,15,20];
costo_caja=[20,30,40,50,60,70];
costo_envio=[1283.9,1951.11,2821.33,3491.0,4154.9,4729.8];
caja=[0,0,0,0,0,0];
costo_total=0;

caja_entera(6)=floor(demanda./maxs(6));
resto=mod(demanda,maxs(6));
if caja_entera(6)>0
    caja(6)=caja_entera(6);
    disp([num2str(caja_entera(6)),' cajas tipo 6 de 20 piezas'])
end
if resto>0
    for i=6:-1:1
        if resto>=mins(i) && resto<=maxs(i)
            caja(i)=caja(i)+1;
            disp(['1 caja tipo ', num2str(i), ' de ', num2str(resto), '
piezas'])
            break
        end
    end
end
for i=1:6
    costo_total=costo_total+(costo_caja(i)+costo_envio(i))*caja(i);
end
disp(['El costo total es ',num2str(costo_total)])
```

#### ANEXO 4. CÓDIGO EN MATLAB DEL MÉTODO HEURÍSTICO DE LA REGLA DE ASIGNACIÓN 1 PARA PRODUCTOS TIPO 2.

```
demanda=input('Número de piezas: ');
mins=[1,4,7,10];
maxs=[3,6,9,12];
costo_caja=[40,50,60,70];
costo_envio=[1563,2599,3888.33,4730.67];
caja=[0,0,0,0];
caja_entera=[0,0,0,0];
costo_total=0;

for i=4:-1:1
    caja_entera(i)=floor(demanda./maxs(i));
    resto(i)=mod(demanda,maxs(i));
    if resto(i)==0
        caja(i)=caja_entera(i);
        disp([num2str(caja_entera(i)), ' cajas tipo ', num2str(i), ' de
', num2str(maxs(i)), ' piezas'])
        break
    end
    if resto(i)>=mins(i)
        caja(i)=caja_entera(i)+1;
        disp([num2str(caja_entera(i)), ' cajas tipo ', num2str(i), ' de
', num2str(maxs(i)), ' piezas y 1 caja de ', num2str(resto(i)), ' piezas'])
        break
    else
        continue
    end
end
costo_total=0;
for i=1:4
    costo_total=costo_total+(costo_caja(i)+costo_envio(i))*caja(i);
end
disp(['El costo total es ', num2str(costo_total)])
```

## ANEXO 5. CÓDIGO EN MATLAB DEL MÉTODO HEURÍSTICO DE LA REGLA DE ASIGNACIÓN 2 PARA PRODUCTOS TIPO 2.

```
demanda=input('Número de piezas: ')
mins=[1,4,7,10];
maxs=[3,6,9,12];
costo_caja=[40,50,60,70];
costo_envio=[1563,2599,3888.33,4730.67];
caja=[0,0,0,0];
costo_total=0;

demanda_actual=demanda;
while demanda_actual>=1
    i=random('unid',4);
    if demanda_actual>=mins(i)
        demanda_actual=demanda_actual-maxs(i);
        caja(i)=caja(i)+1;
        if demanda_actual>=0
            disp(['una caja tipo ',num2str(i),' de ',num2str(maxs(i)),'
piezas'])
        else
            disp(['una caja tipo ',num2str(i),' de ',
num2str(demanda_actual+maxs(i)),' piezas'])
        end
    end
end
for i=1:4
    costo_total=costo_total+(costo_caja(i)+costo_envio(i))*caja(i);
end
disp(['El costo total es ',num2str(costo_total)])
```

## ANEXO 6. CÓDIGO EN MATLAB DEL MÉTODO HEURÍSTICO DE LA REGLA DE ASIGNACIÓN 3 PARA PRODUCTOS TIPO 2.

```
demanda=input('Número de piezas: ');
mins=[1,4,7,10];
maxs=[3,6,9,12];
costo_caja=[40,50,60,70];
costo_envio=[1563,2599,3888.33,4730.67];
caja=[0,0,0,0];
costo_total=0;

caja_entera(4)=floor(demanda./maxs(4));
resto=mod(demanda,maxs(4));
if caja_entera(4)>0
    caja(4)=caja_entera(4);
    disp([num2str(caja_entera(4)), ' cajas tipo 4 de 12 piezas'])
end
if resto>0
    for i=4:-1:1
        if resto>=mins(i) && resto<=maxs(i)
            caja(i)=caja(i)+1;
            disp(['1 caja tipo ', num2str(i), ' de ', num2str(resto), '
piezas'])
            break
        end
    end
end
for i=1:4
    costo_total=costo_total+(costo_caja(i)+costo_envio(i))*caja(i);
end
disp(['El costo total es ', num2str(costo_total)])
```



## ANEXO 7. CÓDIGO EN MATLAB PARA CREAR ARCHIVO EJECUTABLE DEL MÉTODO HEURÍSTICO DE LA REGLA DE ASIGNACIÓN 3 PARA PRODUCTOS TIPO 1.

```
respuesta=inputdlg('Número de piezas: ', 'Datos de entrada', [1 40]);
demanda=str2num(respuesta{:});
mins=[1,4,7,10,13,16];
maxs=[3,6,9,12,15,20];
mensaje='';

caja_entera(6)=floor(demanda./maxs(6));
resto=mod(demanda,maxs(6));
if caja_entera(6)>0
    mensaje=join([num2str(caja_entera(6)), ' cajas tipo 6 de 20 piezas']);
end
if resto>0
    for i=6:-1:1
        if resto>=mins(i)&& resto<=maxs(i)
            caja_entera(i)=1;
            mensaje=join([mensaje,newline,'1 caja tipo ', num2str(i),
                ' de ', num2str(resto), ' piezas']);
            break
        end
    end
end
h=msgbox(mensaje, 'Resultados');
```

## BIBLIOGRAFÍA

Aguezzoul, A. (2005). "Taking the transport policies into account in supplier selection," PhD thesis, Grenoble Institute of Technology, pp. 94-101.

Aguezzoul, A., and Ladet, P. (2007). "A nonlinear multiobjective approach for the supplier selection, integrating transportation policies," *Journal of Modelling in Management*, Vol. 2, No. 2, pp. 157-169.

Aguezzoul, A., and Rezg, N. (2011). "The Impact of transportation network on the supplier selection," *Proceedings of the 18th World Congress. The International Federation of Automatic Control Milano (Italy) August 28 - September 2*.

Barbarosoglu, G., and Yazgac, T. (1997). "An application of the analytic hierarchy process to the supplier selection problem," *Production and Inventory Management Journal* 1st quarter, pp. 14-21.

De Boer, L., Labro, E., and Morlacchi, P. (2001). "A review of methods supporting supplier selection," *European Journal of Purchasing and Supply Management*, Vol. 7, No. 2, pp. 75-89.

Dickson, G. (1966). "An analysis of vendor selection systems and decisions," *Journal of Purchasing*, Vol. 2, No. 1, pp. 5-17.

Gaytán, J., Pérez, J. y García, J. (2007). "Esquema de decisiones multicriterio para el rediseño de la cadena de transporte para una Empresa de autopartes bajo un enfoque evolutivo", *RED-M*, Culiacán, Sin. Méx., Noviembre.

Huang, K., and Chi, W. (2007). "A lagrangian relaxation based heuristic for the consolidation problem of airfreight forwarders," *Transportation Research Part C* 15, pp 235-245.

Mejía, C., Soto, O., Gámez, H. y Moreno, J. (2015). "Análisis del tamaño de empaque en la cadena de valor para minimizar costos logísticos: un caso de estudio en Colombia," *Revista Estudios Generales*. Vol. 31 Núm. 134 (enero-marzo). pp. 111-121.

Narasimhan, R. (1983). "An analytic approach to supplier selection," *Journal of Purchasing and Supply Management* 1, Vol. 1, pp. 27-32.

Nydick, R., and Hill, R. (1992). "Using the Analytic Hierarchy Process to structure the supplier selection procedure," *International Journal of Purchasing and Materials Management* 28 (2), pp. 31-36.

Saaty, T. (1980). *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill, New York.

Thanaraksakul, W., and Phruksaphanrat, B. (2009). "Supplier evaluation framework based on balanced scorecard with integrated corporate social responsibility perspective," in: Proceedings of the International Multi Conference of Engineers and Computer Scientists, Vol. 2, March 18–20, Hong Kong.

Tyan, J., Wang, F., and Du, T. (2003). "An evaluation of freight consolidation policies in global third party logistics," *Omega*, 31(1), pp. 55-62.

Weber, C., Current, J., and Benton, W. (1991). "Vendor selection criteria and methods," *European Journal of Operational Research*, Vol. 50, No. 1, pp. 2-18.

Zichao, L., Bookbinder, J., and Elhedhli, S. (2011). "Optimal shipment decisions for an airfreight forwarder: Formulation and solution methods," *Transportation Research Part C* 21, Vol. 21, pp17-30.

GAMS 23.5 <https://www.gams.com/>

MATLAB R2014a (8.3.0.532) <https://es.mathworks.com/>