

Caso de estudio - Maximizar el cumplimiento  
de las promesas de entrega en el problema de  
asignación y distribución de motocicletas a  
una red de distribuidores

Juan Carlos González C.

2019

## **Resumen**

El propósito de este caso de estudio es, en primera instancia, evidenciar las diferentes etapas y retos inmersos en cada una de ellas en la cadena de suministro de una ensambladora de motocicletas, posteriormente abordar el problema específico de la distribución de motocicletas ensambladas buscando la mejora en el cumplimiento en las promesas de entrega. La cantidad de variables y restricciones involucradas y la alta frecuencia de análisis requerida, hacen que los métodos simples basados en la experiencia no ofrezcan soluciones óptimas en tiempos que garanticen la fluidez de la operación, para lo cual se propone un modelo de programación que, probado con instancias reales, demuestra mejorar tanto el tiempo para la toma de decisiones como el cumplimiento en la promesa de entrega y que, en consecuencia, puede convertirse en una herramienta de gran ayuda para el equipo de distribución.

# 1. Introducción

Incolmotos YAMAHA S.A., es la ensambladora y distribuidora de motocicletas y repuestos marca YAMAHA para Colombia y es una de las cerca de 100 subsidiarias de YAMAHA MOTOR COMPANY en el mundo. Desde su planta de ensamble ubicada en Giradota - Antioquia, se distribuyen las motocicletas ensambladas a aproximadamente 300 tiendas que cubren el territorio colombiano. Durante sus 40 años de historia Incolmotos Yamaha ha sido protagonista del crecimiento del fenómeno de la motocicleta en Colombia, ya sea como vehículo recreativo, eje de crecimiento económico e industrial, fenómeno de inclusión social y laboral o solución de transporte; indudablemente la motocicleta se ha convertido en una realidad condicionante para una importante proporción de la población en el país, y en ese contexto, Incolmotos Yamaha ha tenido un crecimiento importante de su participación en el mercado y en consecuencia de sus operaciones.

El caso presentado muestra algunos de los problemas encontrados en la cadena de suministro de la compañía y la solución implementada, o bien, la metodología que se emplea actualmente para abordarlos. Se hace particular énfasis en las etapas que componen la fase de distribución, entre ellas la gestión de las órdenes de los clientes, la cual creció en complejidad a medida que su cantidad aumentaba de forma sostenida con los años. Por otro lado, se examina el análisis de las variables involucradas y la posterior toma de decisiones respecto a la distribución óptima de las motocicletas ensambladas, la cual se considera actualmente la etapa mas compleja y de mayor oportunidad de mejora; se propone para este problema específico un modelo de programación lineal que ayude al equipo de distribución a encontrar una solución que satisfaga todos los requerimientos. Por último se describe el proceso de cargue y envío de las ordenes, proceso susceptible de mejora pero que no representa actualmente el cuello de botella en la cadena de distribución.

El caso de Milburn, Kirac y Hadianniasar [1], enfrenta a los estudiantes a un problema de gran escala de ruteo de vehículos para una compañía logística, en el que deben considerar restricciones de recursos como conductores y tipos de vehículos en lugar de solo limitar su análisis a la minimización del costo, este estudio pretende en el contexto específico de la compañía objeto del estudio introducir otras variables como la promesa de entrega y restricciones comerciales como cupo de crédito. Por otro lado el caso de Balaraman y Ravichandran [2], si bien no exhibe similitudes relevantes con este estudio debido a su enfoque hacia el estudio probabilístico, si aporta conclusiones

relevantes en términos de lo que este tipo de casos de estudio pueden aportar en la formación de los estudiantes al enfrentarlos a situaciones de administración complejas y problemas reales con cantidades relevantes de variables y restricciones que tienen impactos considerables en múltiples áreas de las operaciones y en los resultados del negocio.

La estructura de este trabajo es la siguiente: en la Sección 2 se describe de forma general la cadena de suministro de la compañía, en la Sección 3 se ahonda en el proceso de distribución el cual es el foco principal de estudio de este trabajo. La Sección 4 cita la literatura relacionada con el problema en cuestión, posteriormente la Sección 5 explica las restricciones del problema de distribución estudiado para introducir el modelo matemático propuesto como solución, los resultados de los experimentos con el modelo propuesto son explicados en la Sección 6 y, finalmente en la Sección 7 se expresan las conclusiones.

## 2. Contexto del problema

Con el objetivo de dar mayor claridad en la descripción del problema, en esta sección se presenta el contexto general relacionado con la producción y comercialización de motos en Incolmotos Yamaha. Para ello, se describirán en términos generales las diferentes etapas del ciclo del producto.

Dado que el caso de estudio está referido a una parte del ciclo del producto, y que las variables del mercado y la demanda son gestionadas de forma independiente por otros procesos ajenos a la gestión de las operaciones, no serán consideradas relevantes en el desarrollo del presente proyecto.

Definiremos entonces la cadena de suministro de Incolmotos YAMAHA, para la cual, el ciclo del producto podría estar definido por las siguientes etapas:

1. Abastecimiento de materias primas, CKD<sup>1</sup> y complementos necesarios para la fabricación.
2. Almacenamiento de materias primas, CKD y complementos.
3. Programación de la producción.
4. Procesos de manufactura.
5. Almacenamiento de producto terminado.
6. Distribución de producto terminado.

### 2.1. Abastecimiento de materias primas, CKD y complementos necesarios para la fabricación

Para el ensamblaje de un modelo en una planta, es necesaria la sincronización precisa del abastecimiento de las diferentes partes que lo componen desde sus respectivos orígenes; veamos los diferentes tipos de componentes requeridos.

---

<sup>1</sup>CKD: “Completely Knock Down”, completamente desensamblado, se refiere a una serie de partes necesarias para completar un vehículo terminado, las cuales son enviadas como kits de montaje a las plantas de ensamble

### 2.1.1. Materias primas

En general las compañías de ensamble automotriz incorporan en sus procesos partes fabricadas localmente, es decir, manufacturadas dentro del territorio nacional en el que la ensambladora opera, sin embargo, en algunos casos, es posible que debido a especificaciones técnicas, precios, volúmenes de producción u otros factores, las materias primas para la elaboración de estas partes deban ser importadas.

En el caso de Incolmotos Yamaha, algunos tipos de tuberías y láminas de acero, así como ciertos tipos de “pellets”<sup>2</sup> plásticos deben ser importados. Esto se debe principalmente a que no existen en el país proveedores en capacidad de cumplir con los requisitos técnicos especificados por diseño. Los proveedores de estos materiales están ubicados actualmente en Japón y cada uno tiene tiempos diferentes para la preparación y entrega de las órdenes. Una vez son recibidas, estas materias primas son enviadas a los proveedores locales que realizan la transformación respectiva para obtener los componentes que regresarán y serán utilizados en los procesos de manufactura en Incolmotos Yamaha.

### 2.1.2. CKD

En términos de proporción del número total de partes, el CKD representa el mayor porcentaje de partes requeridas para el ensamble de un modelo en Incolmotos Yamaha, y desde el punto de vista logístico, representa también el mayor volumen de carga.

El CKD proviene de diferentes plantas de producción Yamaha en el mundo. India, China, Taiwan, Indonesia, Brasil, Tailandia, Francia y Japón son los principales países de origen de CKD para Incolmotos Yamaha. Cada una de estas plantas tiene sus propios tiempos de producción y transporte, lo que condiciona el nivel de inventarios en tránsito y a la mano para cada modelo. Los tiempo totales de suministro van desde los 4 hasta los 9 meses, siendo importante aclarar aquí, que cada origen puede depender también del suministro de componentes de otras factorías en el mundo, creando una compleja red de interdependencia entre las subsidiarias. En el Cuadro 1 se muestran los diferentes tiempos de suministro para cada país de origen, en donde N representa el mes en curso al momento de poner las respectivas órdenes en firme.

---

<sup>2</sup>Pequeñas porciones de material aglomerado o comprimido

SUPPLIER	COMPANY	PRODUCTION AT ORIGIN	ARRIVAL TO INCOL
CROSS TRADE YMC	YAMAHA MOTOR CO. - JAPÓN	N+3	N+6
	CHONGQING JIANSHE YAMAHA MOTOR CO - CHINA (COLECCIONES CKD)	N+3	N+6
	YAMAHA MOTOR TAIWAN	N+3	N+5
	INDIA YAMAHA MOTOR	N+3	N+6
YMAC	YAMAHA INDONESIA MOTOR MANUFACTURING	Prod. N+3 Shipping N+4	N+6
	YAMAHA MOTOR VIETNAM	Prod. N+3 Shipping N+4	N+6
	THAILAND YAMAHA MOTOR	Prod. N+3 Shipping N+4	N+6
	YAMAHA MOTOR ASIAN CENTER CO	Prod. N+3 Shipping N+4	N+6
	YAMAHA MOTOR PARTS MANUFACTURING INDONESIA	Prod. N+3 Shipping N+4	N+6
YMCN	YAMAHA MOTOR CHINA CO (COMPLEMENTOS)	N+3	N+6
YMDA	YAMAHA MOTOR DA AMAZONIA LTDA	N+7	N+9
YMTT	YAMAHA MOTOR TAIWAN TRADING (MP - COMPLEMENTOS)	N+3	N+5
YUASA	GS YUASA INTERNATIONAL LTD.	N+2	N+4
PIRELLI	PIRELLI PNEUS LTDA.	N+1	N+2
MAXXIS	CHENG SHIN RUBBER	N+1	N+3
SUNWARD	SUNWARD INTERNATIONAL (MP)	N+2	N+5

Cuadro 1: Tiempos de entrega de los proveedores de componentes

Teniendo en cuenta que el valor del CKD representa aproximadamente el 80 % del total de los costos del producto, es lógico concluir que el hecho de realizar una compra óptima de este componente es fundamental para el éxito del negocio. Esta tarea se ha convertido en uno de los retos más importantes para la compañía, ya que, dados los largos tiempos de entrega y la incertidumbre asociada a la demanda, la estimación de los tamaños de órdenes no ha sido siempre precisa ocasionando rupturas de inventario en algunos casos y excesos en otros, con el consecuente capital de trabajo atrapado, o pérdidas representadas en los costos de oportunidad de las ventas no realizadas. La compañía ha pensado en el desarrollo de un modelo de pronóstico que permita mejorar la toma de esta decisión y minimice los efectos de las situaciones mencionadas.

### 2.1.3. Complementos

Se denominan complementos a ciertos componentes necesarios para el ensamblaje de la motocicleta, los cuales, en su mayoría, no son producidos

por ninguna empresa del grupo Yamaha. Llantas, carburadores, tornillería, baterías, unidades de control, se encuentran entre ellos. Los complementos, en general son de fácil control, sin embargo, se requiere una rigurosa gestión de los inventarios para evitar faltantes o sobrantes a la hora del ensamble.

## **2.2. Almacenamiento de materias primas, CKD y complementos.**

La bodega de almacenamiento de insumos de Incolmotos YAMAHA cuenta con cerca de  $8,000m^2$ , el sistema de apilamiento es arrume negro <sup>3</sup>, cuenta con su propia flotilla de montacargas que reciben en promedio 15 contenedores al día. La bodega es cobijada por un régimen aduanero especial que permite que la mercancía permanezca allí sin ser nacionalizada hasta el momento de su ensamble, esta condición demanda el cumplimiento de requisitos de delimitación física y trazabilidad en los procesos que son auditados periódicamente con el fin de mantener dicho estatus aduanero.

## **2.3. Programación de la producción**

La programación de producción fue realizada por mucho tiempo bajo un método simple pero eficiente. Los promedios de demanda mensuales eran utilizados como parámetro principal para la secuenciación, la cual estaba sujeta a la disponibilidad de CKD y otros componentes y, a la capacidad de los diferentes procesos productivos. Con el crecimiento del mercado sobrevinieron los crecimientos de la oferta de modelos disponibles, también, el número de puntos de venta en el país, las rutas de distribución, capacidad de producción, etc. Todas estas variables incrementaron significativamente las dificultades para determinar las tendencias de consumo, multiplicando a través de la cadena de suministro las imprecisiones de inventarios y evidenciando la necesidad de una nueva forma de programar la producción que resolviera de mejor manera los nuevos retos de un mercado en pleno desarrollo.

---

<sup>3</sup>Arrume negro: Forma de almacenamiento en la que se coloca la mercancía en su unidad de embalaje de forma vertical una sobre otra



## **2.4. Procesos de manufactura**

Para hablar de los procesos de manufactura que se llevan a cabo en la compañía, es importante mencionar primero el marco legal en el cual se desarrolla la industria del ensamble de motocicletas en Colombia. El decreto 1074 de 2015 y la resolución 2436 de 2016, establecen que, para que una compañía pueda considerarse ensambladora nacional debe cumplir con el requisito mínimo de PIN<sup>4</sup>, el cual, en el caso de motocicletas, es del 17%. Dicho porcentaje se calcula sobre el costo total de producción de la motocicleta, este factor es determinante a la hora de diseñar e implementar los procesos de manufactura que se llevarán a cabo, los cuales son:

### **2.4.1. Desempaque**

El proceso que da comienzo al ensamble de las motocicletas es el desempaque, es un proceso intensivamente manual de revisión y clasificación de las diferentes partes requeridas para el ensamble. Las partes requeridas para los procesos de pintura y soldadura son desempaquetadas entre 3 y 4 días antes del ensamble final mientras que las partes para este último proceso son entregadas 8 horas antes a las áreas de sub-ensamble y ensamble.

### **2.4.2. Soldadura**

En la compañía se cuenta con tres líneas de soldadura tipo MIG y TIG, en las cuales se sueldan los chasis del 70% de las motocicletas ensambladas por la compañía, los restantes vienen previamente soldados desde su origen, el proceso se lleva a cabo de manera manual acorde a especificaciones, estándares y normas de inspección establecidas por Yamaha Motor Co. En el Cuadro 2 se muestran algunas especificaciones para las líneas de soldadura.

### **2.4.3. Pintura**

Se tienen dos líneas de pintura, una especializada en piezas plásticas y otra en piezas de acero, ambas utilizan pintura líquida y electrodeposición como principio para el recubrimiento de las partes. De manera muy simplificada cada línea de pintura consta de tres etapas: preparación de la superficie, recubrimiento y secado. A su vez cada una de estas etapas se divide en una

---

<sup>4</sup>PIN. Porcentaje de integración nacional, es la proporción de componentes fabricados en Colombia, que se incorporan en el ensamble de motocicletas y automóviles

Línea	Modelos	Estaciones	Tiempo de ciclo (min)
1	A,B	4	9
2	C,D	7	14
3	E,F	7	17

Cuadro 2: Especificaciones del proceso de soldadura

serie de pasos realizados en cabinas especializadas, a través de las cuales, las piezas viajan a una velocidad constante y colocadas en aditamentos especialmente diseñados llamados “ganchos” (estos se convierten en la unidad de producción para las plantas de pintura). La cantidad de piezas que cada uno de estos aditamentos puede albergar está determinada, entre otras variables, por la cantidad de descarga posible (aplicación de pintura) para los pintores, cumpliendo con los estándares de diseño de proceso. En las Cuadros 3 y 4 se muestran la cantidades de “ganchos” demandados por una unidad de cada modelo en cada planta de pintura.

Modelo	Aditamento/motocicleta (planta de pintura plásticos)	Aditamento/motocicleta (planta de pintura metal)
A	3.5	1.5
B	3.5	1.5
C	5	1
D	7	1
E	6	1
F	4	1.5
G	4	1
H	6	1
I	6	1
J	4	2

Cuadro 3: Cantidad de aditamentos necesarios por moto

Línea	Velocidad (m/min)	Distancia entre aditamentos (m)
Pintura de plásticos	5	1.5
Pintura metal	7	1.8

Cuadro 4: Especificaciones de las líneas de pintura

#### 2.4.4. Ensamble

Existen dos líneas de ensamble en la compañía con dos conceptos de fabricación bien diferenciados. En la primera se ensamblan la mayoría de modelos y para cada uno de ellos la línea adopta una velocidad constante, la cual depende de la complejidad y el número de operaciones de cada modelo. Los operarios se encuentran en posiciones fijas y realizan las operaciones asignadas a medida que la motocicleta pasa por sus respectivas estaciones. En la segunda los operarios avanzan con la motocicleta y deben realizar la totalidad de las operaciones requeridas hasta obtener la motocicleta terminada. El proceso de ensamble para cada modelo es diseñado por un equipo de técnicos que dividen las operaciones de forma que los operarios tengan una carga lo más balanceada posible entre sí; este proceso se conoce como balanceo de línea y se repite en numerosas oportunidades durante todo el tiempo de permanencia del producto en el portafolio de la empresa con el fin de mejorar constantemente el tiempo de ciclo, la tasa de producción y el balance de carga de los operarios. Los Cuadros 5 y 6 muestran los tiempos de ciclo de cada modelo y el porcentaje de conformidad en el ensamble del mismo.

## 2.5. Almacenamiento

La compañía dispone de  $4000m^2$  para el almacenamiento de motocicletas ensambladas, espacio en el cual es posible mantener cerca de 2900 unidades a un solo nivel. El espacio ocupado por cada uno de los modelos puede verse en el Cuadro 7.

Usualmente el almacenamiento no es un problema, aunque en ciertos momentos debido a circunstancias muy específicas de mercado o de la cadena de suministro (entiéndanse, por ejemplo, lanzamientos de nuevos productos, acumulaciones de algunos modelos por retrasos en las llegadas de componentes para otros, etc.) la cantidad de unidades ha sobrepasado el límite máximo,

Modelo	Tiempo de ciclo x Unidad (min)	% de Conformidad
A	48	96
B	52	98
C	40	92
D	50	95
E	57	90
F	60	96
G	75	92
H	63	96

Cuadro 5: Tiempo de ciclo y porcentaje de aceptación para cada modelo - Línea principal

Modelo	Tiempo de ciclo x Unidad (min)	% de Conformidad
I	82	98
J	78	98

Cuadro 6: Tiempo de ciclo y porcentaje de aceptación para cada modelo - Línea de bajo volumen

obligando a tomar medidas de emergencia por fuera de los estándares, tales como, almacenamientos en zonas no destinadas para ello, alquiler y montaje de estructuras auxiliares, mantener por periodos cortos de tiempo algunas unidades a la intemperie. La compañía ha analizado diferentes alternativas de solución para estos casos debido a que un aumento significativo en la demanda y, en consecuencia en la operación, podría requerir un incremento de esta capacidad. Algunas de ellas han sido la construcción de una nueva zona de almacenamiento, alquiler de bodegas por temporadas específicas, ó diseño y construcción de estanterías adecuadas para el manejo de motocicletas.

## 2.6. Distribución

La mejora en el cumplimiento de las promesas de entrega en el proceso de distribución es el objetivo del presente trabajo, por esta razón dicho proceso,

Modelo	Área ocupada x unidad ( $m^2$ )
A	1.4
B	1.4
C	1.6
D	1.7
E	1.5
F	1.8
G	1.4
H	1.8
I	2
J	2

Cuadro 7: Área ocupada por unidad de cada modelo

sus diferentes etapas y las variables más críticas que lo afectan, serán presentados de forma más detallada en el siguiente capítulo. De forma general es importante resaltar la importancia de la red de distribución de Incolmoto YAMAHA, la cual ha jugado un papel fundamental en el éxito de la compañía y el desarrollo de la marca en Colombia, la relación entre los distribuidores y la empresa, que en múltiples casos se remonta a la fecha misma de fundación de la compañía, ha contribuido a la estrategia valor agregado en los productos y servicios ofrecidos.

### 3. Proceso de distribución de producto terminado

Como se mencionó previamente la mejora del cumplimiento de las promesas de entrega es el objetivo principal de este trabajo, para ello es importante conocer en cierto detalle esta etapa del proceso, a lo cual se dedica esta sección del trabajo.

La distribución de motocicletas YAMAHA en Colombia está enmarcada en las siguientes premisas fundamentales:

- Los distribuidores son monomarca, es decir, el contrato de distribución no les permite dentro de un mismo almacén ofrecer ningún producto o servicio de otra marca de motocicletas.
- Un distribuidor puede tener varias tiendas.
- Por requerimientos de calidad las motocicletas no pueden ser transportadas con ningún otro tipo de mercancía.
- La entrega de las motocicletas se lleva a cabo en cada tienda y el servicio de transporte es contratado directamente por la compañía.

El proceso de distribución puede en términos generales, descomponerse en 4 etapas. En la primera de ellas los distribuidores ponen sus órdenes de compra para ser procesadas en el sistema de información de Incolmos YAMAHA. En la segunda, las órdenes son analizadas, recolectadas y preparadas para su envío. En la tercera, las motocicletas son cargadas en los camiones de acuerdo con una orden específica para su posterior descargue. Por último, los camiones realizan sus diferentes rutas de reparto hasta las diferentes tiendas en el país.

#### 3.1. Gestión de las órdenes

El sistema de información de Incolmos Yamaha es un ERP<sup>5</sup> que permite, entre sus funcionalidades, el almacenamiento, administración y facturación de las órdenes de los clientes.

---

<sup>5</sup>“Enterprise Resource Planning”, es el nombre genérico que reciben los programas que ayudan a las empresas a automatizar y hacer más eficientes diversos procesos internos como la fabricación, distribución, procesos contables y hasta de recursos humanos

Hasta el año 2012 el proceso de recepción de pedidos tenía una alta dependencia de funcionarios que servían como ventana de comunicación con los distribuidores. Las órdenes eran recibidas a través de correo electrónico, telefónicamente o incluso fax en una pequeña proporción.

Este proceso fue eficiente durante mucho tiempo, pero la cantidad de órdenes y su correspondiente tiempo de carga en el sistema creció notablemente con el volumen de ventas hasta alcanzar su máximo histórico en el año 2015, como puede observarse en el Cuadro 8.

Año/ Promedio órdenes mensuales			
2012	2013	2014	2015
2777	3055	3330	3750

Cuadro 8: Evolución del número promedio de órdenes mensuales para cada año

Debido a este crecimiento varios problemas empezaron a cobrar relevancia a la hora de recibir y cargar las órdenes de los distribuidores en el sistema de información de la compañía:

- Respuesta lenta: A medida que aumentaba el número de órdenes, los funcionarios tenían más dificultades para mantenerse al día cargándolas en el sistema de información. Como consecuencia, se aumentó el tiempo de preparación de las órdenes, en algunos casos hasta en 3 ó 4 días.
- Inexactitud de la información: Aunque no se cuenta con estadísticas al respecto, se presentaron múltiples casos en los que las órdenes de los distribuidores no fueron cargadas al sistema, o bien fueron cargadas con errores, ocasionando malestar y discrepancias entre la compañía y su red de distribución.
- Incertidumbre y desconfianza en el proceso de suministro: Los dos inconvenientes mencionadas anteriormente generaron un deterioro en la confianza de los distribuidores. Esto hacía que los esfuerzos de la compañía y de la red de distribución misma, no se enfocaran en aspectos más estratégicos para el desarrollo del negocio.
- Cuellos de botella en algunas temporadas.

- Dependencia entre la eficiencia del sistema de distribución y la habilidad de algunos funcionarios.
- Dificultades para el uso de datos en sistemas predictivos de la demanda.

Para resolver las restricciones mencionadas se elige una plataforma digital, en la cual los distribuidores pueden subir las órdenes por sí mismos y se sincroniza en intervalos de tiempo predefinidos con el ERP de la compañía. En la Figura 1 se puede observar la tasa de implementación de la plataforma por parte de los distribuidores.

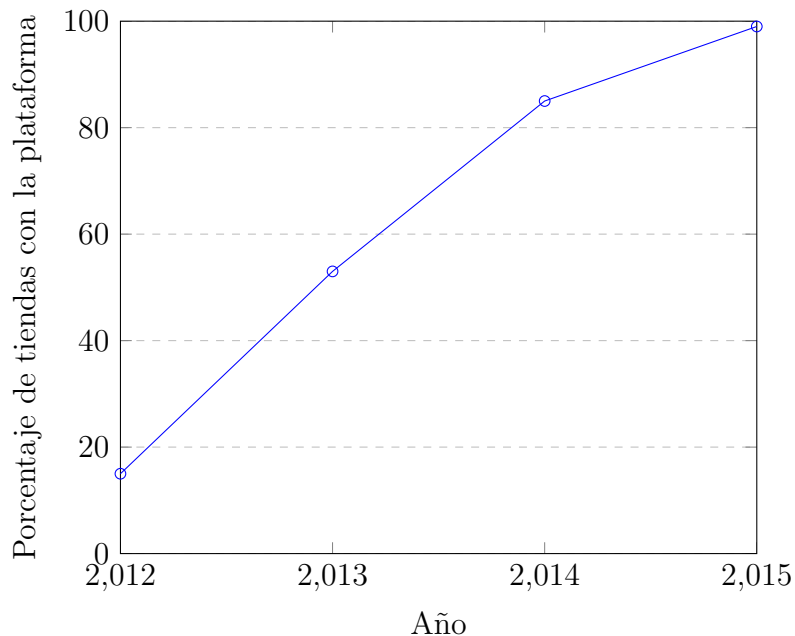


Figura 1: Penetración de la plataforma digital para pedidos en la red de distribución

Actualmente la totalidad de la red de distribución opera con el programa para gestión de órdenes, la frecuencia de sincronización entre la dicha plataforma y el sistema de información es de 4 veces al días ya que la cantidad de recursos computacionales requeridos para el proceso son importantes y se comparten con las otras unidades de negocio y procesos transversales de la compañía, se consideran una condición que podría llegar a ser mejorada.



## 3.2. Recolección y preparación de las órdenes

Partiendo de un conjunto de órdenes que se encuentran total o parcialmente pendientes por despachar, las cuales son consultadas en el ERP de la compañía, el programador comienza por revisar las motocicletas que están pendientes y se encuentran disponibles en inventario. Es de notar que el inventario también puede ser consultado en el ERP. Una vez confirmada la disponibilidad, se revisa el cupo disponible del cliente, para determinar la cantidad de motocicletas que pueden despacharse; la información del cupo se consulta en el módulo de cartera del ERP. Luego de confirmar la cantidad de motos a despachar para cada cliente y con una ruta específica asignada para cada tienda, empieza el proceso de agrupación para determinar la cantidad de motocicletas que pueden enviarse en cada ruta, teniendo en cuenta que esto debe satisfacer tanto el número mínimo de motocicletas pactado para la ruta, como el número máximo de unidades para el vehículo seleccionado. En caso de que se cumplan las condiciones mencionadas se informa a la transportadora del viaje completado y se inician los procesos de selección y cargue. En resumen, una solución factible debe cumplir con los requisitos mencionados a continuación:

- Existencia de órdenes de compra para las motocicletas a enviar.
- Existencia de motocicletas en inventario.
- La cantidad de motos en un vehículo debe satisfacer tanto el número mínimo definido para cada ruta como el número máximo de motocicletas estipulado para cada tipo de vehículo.
- Los clientes a quienes se les envíen motocicletas deben tener cupo de crédito suficiente y no estar en mora con la compañía.

Cualquier combinación de motocicletas a despachar que satisfaga las restricciones mencionadas es considerada adecuada y se procede a su cargue y posterior despacho, de manera que no se tiene en cuenta la antigüedad de los pedidos. De esta manera es muy posible que algunas tiendas permanezcan desatendidas por un número de días superior a la promesa de entrega establecida por la compañía para cada cliente, debido a que dicha condición no tiene una ponderación dentro del proceso de análisis que se realiza para programar la distribución. Dado que el proceso de programación del despacho es manual, una situación muy común es iniciar el proceso de revisión de

pedidos con los clientes que tienen mayores cupos asignados o con las rutas de mayor volumen sin importar la antigüedad de los pedidos; pues la probabilidad de éxito en la programación para estos casos es muy alta, además los pedidos pueden despacharse parcialmente ya que los distribuidores se agrupan en siete diferentes rutas que cubren el territorio nacional. Otro aspecto importante a considerar es que el tamaño de la flota de vehículos es finito y como es obvio, también lo es la cantidad de vehículos de cada tipo, esto limita la capacidad de la empresa transportadora a la cantidad de vehículos disponibles en el momento de la programación. Otro aspecto importante en el proceso de despacho es que las motocicletas son de diferentes tamaños y por tanto ocupan diferentes volúmenes en los vehículos, condición que se vuelve determinante al determinar las motocicletas asignables a cada camión.

El proceso de análisis de todas las variables involucradas, debe realizarse cada día y suele tomar varias horas hasta encontrar un escenario (asignación de motocicletas a camiones) viable de distribución. Es también importante mencionar que todo este procesamiento manual de variables acarrea con frecuencia errores humanos que generan retrasos, reprocesos y en algunos casos insatisfacción en los distribuidores, los cuales no son hasta el momento cuantificados por la compañía. En el Cuadro 9, se presentan datos del tiempo requerido para el análisis de las variables mencionadas en distintos días.

### **3.3. Proceso de cargue**

El proceso de cargue de las motocicletas en los camiones en las que serán transportadas es manual y es llevado a cabo por personal que recibe entrenamiento por varios meses sobre los puntos de sujeción para cada motocicleta, protecciones que se deben aplicar en diversos puntos de la misma, etc. Debido a que es posible recibir y gestionar diariamente órdenes de toda las tiendas en el territorio nacional, la variabilidad en cantidades por referencia despachadas y tiendas atendidas en un ruta es extremadamente alta, además, en un camión pueden cargarse motocicletas de diferentes referencias y en consecuencia diferentes tamaños; todos estos factores hacen que el proceso de cargue sea lento y delicado. Una mejora futura a considerar podría ser un sistema de sujeción que permita mayor velocidad en la operación de cargue sin que ello afecte la calidad del producto, la versatilidad y flexibilidad requeridas en la operación y la capacidad de los camiones.

El cuadro 10 muestra una serie de datos tomados para el tiempo requerido para el cargue de los camiones:

Día	Tiempo (h)
1	3.5
2	3.7
3	4.5
4	3.2
5	3.5
6	4.0
7	4.2
8	3.8
9	4.3
10	3.0
11	3.5
12	4.2
13	4.6
14	3.1
15	3.5
16	3.5
17	3.4
18	3.2
19	3.4
20	3.8
Promedio	3.68

Cuadro 9: Tiempo requerido para el análisis de variables

### 3.4. Envío de las órdenes

Incolmotos Yamaha S.A. cuenta con una red de más de 300 tiendas pertenecientes a unos 170 distribuidores en todo el territorio colombiano, la cual, debido a las condiciones específicas para el empaclado y cuidado, y a una larga y exitosa relación, es abastecida con una única compañía de transporte. Es importante también recordar que la compañía no posee otras bodegas ó centros de distribución en Colombia, razón por la cual todas las motocicletas son enviadas desde la planta de ensamble en Girardota-Antioquia hacia las 300 tiendas.

Con el crecimiento del negocio se buscó también mayor eficiencia y efica-

Capacidad del camión	Tiempo de cargue (h)
35	2.2
35	2.5
35	2.1
35	2.7
35	2
20	1.5
20	1.2
20	1.2
20	1.3
20	1.1

Cuadro 10: Tiempo requerido para completar el cargue de un camión

cia para toda la cadena de suministro, es entonces donde se incorporan los modelos de pronóstico de demanda en la planeación del sistema productivo, con el fin de manejar de manera apropiada la creciente cantidad de variables y su complejidad, entre ellas, mayor número de tiendas en zonas de menor accesibilidad, mayor cantidad de referencias, modelos con mayor grado de dificultad técnica para su ensamble, órdenes de menor cantidad de unidades, mayor frecuencia de las órdenes. A medida que los modelos de pronóstico se vuelven más precisos gracias a más y mejor información y sistemas de procesamiento de datos mejorados, se incrementa la velocidad de rotación de los inventarios al mismo tiempo que disminuyen las cantidades totales de unidades en las tiendas de los distribuidores tal como se muestra en el Cuadro 11

Año						
	2012	2013	2014	2015	2016	2017
MOS	2.7	2.5	2	1.8	1.5	1.1

Cuadro 11: Inventario promedio en meses de venta (MOS) en la red de distribución

De este evolución en el manejo de los inventarios por parte de los distribuidores se derivó otro cambio importante para el sistema de distribución.

Las capacidades de los vehículos de la flota de la compañía transportadora necesitaban ser ajustadas a las nuevas condiciones del negocio. Con el decrecimiento de los inventarios en la red de distribución, y los tamaños de las órdenes, y el incremento en la frecuencia de las mismas, era cada más complejo alcanzar las cantidades mínimas económicamente viables para los tipos de vehículos que poseía la compañía transportadora, convirtiéndose esta en una restricción para la distribución ya que no se contaba con la cantidad de vehículos suficiente que satisficiera las condiciones cada vez más frecuentes de las órdenes de los distribuidores. Esto representó un cambio de paradigma no solo para la compañía sino para la transportadora, ambas empresas se vieron en la necesidad de ajustar sus procesos y capacidades a la nueva dinámica que el negocio presentaba, de acuerdo con las condiciones tradicionales de la distribución, la flota de la transportadora estaba compuesta para el año 2012 por un 50 % de sus camiones con capacidad para 65 unidades, un 40 % camiones para 35 unidades y el restante 10 % camiones para 20 unidades.

En el cuadro 12 podemos observar la evolución en la composición de la flota de la transportadora de acuerdo con la capacidad de sus unidades.

Año						
Capacidad del vehículo	2012	2013	2014	2015	2016	2017
65	18	20	18	15	10	5
35	14	15	20	20	20	24
20	3	5	7	10	20	21

Cuadro 12: Cantidad de vehículos para cada categoría de capacidad

Otro aspecto importante para considerar es la distribución de las poblaciones en las diferentes rutas, las cuales se muestran en la Figura 2. Podría considerarse que a mayor número de poblaciones o ciudades en una ruta, mayor es la probabilidad de éxito en el cumplimiento de todos los requisitos necesarios para el despacho de las motocicletas en un camión determinado para una ruta determinada, esto conlleva a una inclinación implícita a realizar despachos a ciertas rutas con mayor frecuencia, dejando de lado en muchos casos la promesa de entrega.



## 4. Revisión de literatura

La distribución eficiente y eficaz de productos terminados desde uno o más depósitos definidos hacia una red de distribuidores ha sido ampliamente estudiada en el ámbito de la investigación de operaciones. Esto tiene que ver con su creciente importancia en el esquema de generación de valor de los distintos negocios ya que impacta los costos del producto, tal como lo explican J-U Kim y Y-D Kim [4], al afirmar que la interdependencia entre la economía regional y nacional hace de la distribución económica y eficaz de los productos no solo un factor muy importante en la competitividad de una compañía, sino un asunto de supervivencia para muchas firmas. También la promesa de entrega, la cual es cada vez más un factor decisivo en la relación con los clientes debido al impacto directo en su satisfacción, lo cual a su vez es definitivo para la reputación de la marca y la sostenibilidad del negocio.

En un estudio de Yüceer y Özaçka [6] se propone un método para resolver el problema de cargar diferentes compartimentos en un vehículo, con diversos productos de diferentes especificaciones, los cuales se enviarán a múltiples destinos con el objetivo de maximizar el tiempo de re-abastecimiento y, en consecuencia, disminuir el costo de transporte a largo plazo, en el trabajo, no se contemplan algunas características muy importantes para nuestro caso, como restricciones de inventario en el origen de los productos, alta tasa de variabilidad en la demanda diaria, diversos vehículos con sendas capacidades, etc. Otra diferencia importante radica en las restricciones planteadas para este trabajo en términos de la demanda, la cantidad despachada para cada producto para cada tienda debe ser como mínimo la cantidad promedio estimada de demanda hasta la próxima entrega. Su enfoque como problema de programación lineal entera mixta o MILP por sus siglas en inglés, es similar al modelo de solución propuesto en este estudio aunque su función objetivo es diferente, Yüceer y Özaçka proponen un método heurístico que se compone de un algoritmo principal y dos sub-algoritmos, que generaron soluciones en tiempos razonables para un alto porcentaje de problemas de este tipo.

La consolidación de carga en la distribución de productos suele estar en el dominio de los problemas de ruteo de vehículos, tal como lo expresan Brown y Ronen [3], sin embargo, tal como en nuestro caso y a pesar de la amplia variedad de alternativas de solución para estos problemas, ninguno de estas aproximaciones tradicionalmente utilizadas reúne las suficientes características específicas para aportar a la solución de su problema. El trabajo de

Brown y Ronen no obstante, comparte algunas de las condiciones particulares de nuestro problema, entre ellas:

- La disponibilidad de producto terminado es finita y cambia diariamente.
- La composición y cantidad en las órdenes pueden variar antes de ser despachadas, inclusive en el marco de un proceso de negociación con el vendedor para facilitar la consolidación de la carga.
- Una ruta puede tomar varios días.
- Con mucha frecuencia existen múltiples órdenes hacia el mismo destino.
- La construcción del plan de distribución es manual y puede tomar varias horas.

El resultado final del trabajo de Brown y Ronen se planteó como una ayuda a los programadores de la distribución, no como su reemplazo. El sistema arrojaba entonces un plan sugerido de distribución consolidada el cual aun podía ser ajustado manualmente debido a la alta variación que pueden sufrir las órdenes, condición mencionada previamente. La implementación de este sistema ahorró horas en el análisis del despacho de las órdenes, tiempo que fue utilizado para incrementar las ventas, adicionalmente se mejoraron los cumplimientos de las promesas de entrega y se ahorraron costos de transporte.

Otro caso con condiciones relativamente similares presenta el artículo de Milburn, Kirac y Hadianniasar [1], una compañía que distribuye mobiliario a más de 123 tiendas en los Estados Unidos utilizando una flota propia, sin embargo, en este caso las tiendas tienen asignados días fijos de la semana para recibir sus órdenes los cuales se repiten semana tras semana y esta condición es considerada indispensable por algunos miembros de la gerencia para mantener los estándares de servicio de la compañía. Entre otras consideraciones importantes de este caso, son relevantes el hecho de que los vehículos siempre deben ser despachados de manera que lleguen a la primera tienda de su ruta a las 8 am y, que solo pueden ser tenidas en cuenta en el ruteo de un determinado día las tiendas que tienen predefinido ser atendidas ese día de la semana.

Un enfoque aún más cercano a este trabajo podemos encontrar en el estudio de Liu, Smith y Qian [5], el cual está dirigido específicamente al caso de la



logística de cargue y distribución de automóviles (VLP-FVL por sus siglas en inglés), en él resaltan la importancia que tiene resolver este problema típico de la industria de una forma eficiente, para lo cual es frecuente recurrir a la experiencia de los líderes de los procesos de distribución de cada compañía quienes utilizan heurísticos simples, sin embargo, a medida que se incrementan el número de variables a analizar encontrar una solución eficaz, confiable y rápida se hace más difícil por estos métodos. Una de las variables que crece en complejidad rápidamente es la heterogeneidad de la flota, caso en el cual el modelo se denomina HVLP-FVL (Heterogeneous vehicle loading problem in finished vehicles logistics), otro aspecto determinante en este estudio es la diferencia volumétrica entre los vehículos. Los autores Liu, Smith y Qian declaran: <sup>21</sup> HVLP-FLV es escasamente estudiado en la literatura, a pesar de que es ampliamente utilizado en las cadenas de suministro de vehículos”, el estudio de estos autores presenta algunas diferencias importantes con el caso objeto de este trabajo:

- Existen depósitos satélites en donde son acopiados los vehículos. Cada uno de estos depósitos es ubicado, para un grupo de distribuidores, en una ciudad geográficamente central para dicho grupo.
- Este estudio busca maximizar la rentabilidad obtenida por la compañía logística que maneja la operación de distribución de vehículos, dicha rentabilidad depende de los tipos de vehículos seleccionados para ser cargados y transportados.
- Las restricciones asociadas a los clientes, como el cupo comercial no son relevantes para este estudio.

## 5. Descripción del problema de distribución y modelación matemática

En general para la distribución de producto terminado el equipo programador procura asignar, en vehículos de diferentes capacidades, el mayor número de motocicletas posibles para las diferentes rutas que cubren el territorio nacional.

Como se mencionó en la sección 3, partiendo de un conjunto de órdenes que se encuentran total o parcialmente pendientes por despachar, el equipo programador debe verificar unas condiciones necesarias para determinar si dichas órdenes son o no programables, ellas son:

- Deben existir órdenes de compra para las motocicletas a enviar.
- Las motocicletas deben estar en inventario.
- La cantidad de motos en un vehículo debe satisfacer tanto el número máximo definido para el tipo de vehículo como el número mínimo de motocicletas estipulado para la ruta.
- Los clientes a quienes se les envíen motocicletas deben tener cupo de crédito suficiente y no estar en mora con la compañía.

El problema propuesto en este caso consiste en el desarrollo de un modelo que permita la maximización del cumplimiento de las promesas de entrega a los distribuidores.

Se espera que el modelo desarrollado sugiera una programación óptima con frecuencia diaria, la cual solo sea modificada en casos específicos o por motivos de fuerza mayor tales como: Restricciones viales, condiciones políticas, averías en los vehículos, eficiencia de conductores, situaciones de orden público, etc. Todas ellas condiciones a las cuales el modelo no sería sensible y demandarían la creación de variables empíricas basadas en supuestos muy fuertes para su consideración

Para resolver el problema en cuestión se propone a continuación la formulación de un modelo de programación entera lineal mixta.

## Sets

$S$	SKU's
$R$	Rutas
$C$	Distribuidores
$V$	Vehículos
$E_{jc}$	Tiendas en la ruta $j \in R$ que pertenece al distribuidor $c \in C$

## Parametros

$q_v$	Capacidad del vehículo $v \in V$
$\rho_v$	Fracción de la capacidad del vehículo $v \in V$ que debe ser usado si es asignado a cualquier ruta
$I_i$	Inventario disponible del SKU $i \in S$
$p_i$	Precio del SKU $i \in S$
$f_i$	Tamaño del SKU $i \in S$
$\mu_c$	Cantidad máxima de dinero que puede ser asignada a un distribuidor $c \in C$
$d_{ijk}$	Unidades pedidas del SKU $i \in S$ por la $k$ -th tienda en la ruta $j \in R$
$e_{jk}$	Tiempo requerido por un vehículo para llegar a la $k$ -th tienda en la ruta $j \in R$
$r_{ijk}$	Tiempo restante para que la promesa de la demanda del SKU $i \in S$ en la $k$ -th tienda en la ruta $j \in R$ se venza

## Variables de decisión

$x_{ijv} :=$  Unidades del SKU  $i \in S$  a ser entregadas a lo largo de la ruta  $j \in R$  por el vehículo  $v \in V$

$z_{ijk} :=$  Unidades del SKU  $i \in S$  a ser entregadas  $k$ -th al distribuidora lo largo de la ruta  $j \in R$

$$y_{jv} := \begin{cases} 1 & \text{Si el vehículo } v \in V \text{ es asignado a la ruta } j \in R \\ 0 & \text{de otra manera} \end{cases}$$

## Función objetivo

$$\text{Maximize } \sum_{i \in S} \sum_{j \in J} \sum_{c \in C} \sum_{k \in E_{jc}} \alpha^{e_{jk} - r_{ijk}} \cdot z_{ijk} \quad (1)$$

## Restricciones

$$\sum_{i \in S} f_i \cdot x_{ijv} \leq q_v \cdot y_{jv} \quad \forall j \in R, v \in V \quad (2)$$

$$\sum_{i \in S} f_i \cdot x_{ijv} \geq \rho_v \cdot q_v \cdot y_{jv} \quad \forall j \in R, v \in V \quad (3)$$

$$\sum_{v \in V} x_{ijv} \leq \sum_{c \in C} \sum_{k \in E_{jc}} d_{ijk} \quad \forall i \in S, j \in R \quad (4)$$

$$z_{ijk} \leq d_{ijk} \quad \forall i \in S, j \in R, c \in C, k \in E_{jc} \quad (5)$$

$$\sum_{v \in V} x_{ijv} = \sum_{c \in C} \sum_{k \in E_{jc}} z_{ijk} \quad \forall i \in S, j \in R \quad (6)$$

$$\sum_{j \in R} \sum_{v \in V} x_{ijv} \leq I_i \quad \forall i \in S \quad (7)$$

$$\sum_{i \in S} \sum_{j \in R} \sum_{k \in E_{j,c}} p_i \cdot z_{ijk} \leq \mu_c \quad \forall c \in C \quad (8)$$

$$\sum_{j \in R} y_{jv} \leq 1 \quad \forall v \in V \quad (9)$$

$$y_{jv} \in \{0, 1\} \quad \forall j \in R, v \in V \quad (10)$$

$$x_{ijv} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in S, j \in R, v \in V \quad (11)$$

$$z_{ijk} \in \mathbb{Z}^+ \quad \forall i \in S, j \in R, c \in C, k \in E_{jc} \quad (12)$$

La función objetivo expresada 1 apunta a maximizar la suma ponderada del número de unidades despachadas a los distribuidores, con los ponderaciones siendo una función exponencial de la tardanza asociada a cada unidad, donde  $\alpha$  es una constante tal que  $\alpha > 1$ . La razón para utilizar una función exponencial es doble: Primero, asegura que las ponderaciones sean siempre positivas sin importar si la tardanza es positiva o negativa; y segunda, esta función asignará mayor peso a unidades con valores de tardanza más altos. Las restricciones en la expresión 2 limitan la cantidad de unidades a cargar en un vehículo a su capacidad, mientras que las restricciones en la expresión 3 aseguran que si un vehículo es asignado a una ruta, este será cargado a un cierto porcentaje de su capacidad. Estas restricciones evitan que el modelo envíe un vehículo a una ruta con una fracción muy pequeña de su capacidad ocupada. Las restricciones en la expresión 4 limitan el número de unidades de una referencia cargadas en un vehículo, al total de unidades demandadas de esa referencia para la ruta a la cual el vehículo fue asignado, mientras que la expresión 5 limita el número de unidades despachadas a una tienda específica al número de unidades demandadas por dicha tienda. La expresión 6 es un ecuación de balanceo necesaria para que todas las unidades cargadas en un vehículo sean entregadas en una o más tiendas en la ruta. La expresión 7 limita el número de unidades despachadas de una referencia en todos los vehículos a la cantidad total disponible de inventario de dicha referencia, mientras que las restricciones de la expresión 8 imponen un límite en la cantidad de dinero liberada en producto a un cliente determinado. Finalmente, las restricciones en la expresión 9 aseguran que un vehículo puede ser asignado a máximo una ruta, y las expresiones 10, 11 y 12 definen los dominios de las variables de decisión.

## 6. Resultados computacionales

Para poner a prueba el modelo propuesto fue necesario un profundo análisis de la forma en que el sistema de información de la compañía obtiene, almacena y procesa los datos con el fin de realizar el pre-procesamiento necesario para obtener el conjunto de datos requerido con la estructura adecuada (a lo cual llamaremos instancia) para alimentar el algoritmo computacional diseñado. En promedio una instancia comprende:

- 10 Rutas
- 300 Tiendas
- 170 clientes
- Entre 18 y 25 camiones disponibles cada día
- 100 SKUs
- En promedio 1200 líneas de pedidos por atender

Fueron creadas cinco instancias hipotéticas con el fin de que tanto el modelo computacional propuesto en el presente trabajo, como el equipo de despachos que siguió su tradicional método manual, propusiesen soluciones que pudieran ser comparadas posteriormente. Para este ejercicio se usó un valor de  $\alpha = 1,1$ . El modelo matemático se implementó en XPRESS – Mosel Versión 4.8.2 y las instancias se resolvieron usando el *solver* comercial Gurobi 8.0.1, en un computador con 64 GB de memoria, 12 procesadores Intel Xeon corriendo a 3.5 GHz bajo un sistema operativo Windows 7 Enterprise a 64 bits.

La salida del proceso de programación del despacho es un listado de asignación de unidades a vehículos, rutas y tiendas de acuerdo a las restricciones ya explicadas, dado que el objetivo principal del modelo propuesto es mejorar el cumplimiento de la promesa de servicio, se estableció que dicha mejora será evaluada a partir de la comparación de los resultados obtenidos por el modelo computacional y el método manual usado en el proceso actualmente, para la misma función objetivo. Es importante recalcar que dada la naturaleza de la función objetivo, esta buscará privilegiar el despacho de unidades que tengan periodos de tardanza mayores, asegurando así la búsqueda del máximo cumplimiento posible de las promesas de entrega. Las soluciones óptimas obtenidas en cada caso se muestran en el cuadro 13.

	Método manual	Modelo computacional	
Instancia	Valor F.O	Valor F.O	% de de mejora
1	54964.85	79335.24	31
2	3769.44	44529.55	91.53
3	3794.49	10574.88	64.15
4	3924.76	9890.99	60.32
5	41409.36	13627.78	-203.86

Cuadro 13: Valor obtenido para la función objetivo en las instancias de prueba.

Aunque evidentemente el modelo computacional presenta una mejora significativa con respecto al método manual, es llamativo el resultado de la instancia 5, razón por la cual se presentan a continuación los resultados en términos de vehículos, unidades asignadas y porcentaje de utilización, los cuales generaron hallazgos importantes.

Vehicle	Capacity	Load	% Load Modelo	Vehicle	Capacity	Load	% Load
1	35	34,6	98,90%	1	35	193,1	552%
2	35	35	100,00%	2	35	0	0%
3	35	35	100,00%	3	35	24,2	69%
4	35	35	100,00%	4	35	34,3	98%
5	35	34,8	99,40%	5	35	23,2	66%
6	35	26,3	75,10%	6	35	0	0%
7	20	18,6	93,00%	7	20	23,9	120%
8	35	34	97,10%	8	35	35,3	101%
9	35	31	88,60%	9	35	0	0%
10	35	30,1	86,00%	10	35	0	0%
11	65	51,6	79,40%	11	65	0	0%
12	35	34,9	99,70%	12	35	24,9	71%
13	20	19	95,00%	13	20	40,9	205%
14	35	26,3	75,10%	14	35	0	0%
15	20	20	100,00%	15	20	0	0%
16	35	34	97,10%	16	35	0	0%
17	20	19,1	95,50%	17	20	0	0%

(a) Modelo Computacional

(b) Método manual

Figura 3: Asignación de unidades a los vehículos para la instancia 1

Al comparar las soluciones propuestas por ambos métodos a la asignación de unidades a los vehículos, se evidenció una clara violación de las restricción

Vehicle	Capacity	Load	% Load Modelo
1	20	15	75.00%
2	65	52.3	80.46%
3	35	30	85.71%
4	35	33	94.29%
5	35	27	77.14%
6	20	17	85.00%
7	35	0	0.00%
8	20	20	100.00%
9	35	27	77.14%
10	35	32	91.43%
11	35	0	0.00%
12	20	19.6	98.00%
13	35	27	77.14%
14	35	27	77.14%
15	20	17	85.00%
16	65	63.6	97.85%
17	35	0	0.00%
18	35	0	0.00%
19	20	15	75.00%

(a) Modelo Computacional

Vehicle	Capacity	Load	% Load Modelo
1	20	45	225.0%
2	65	20.6	31.7%
3	35	0	0.0%
4	35	29	82.9%
5	35	16.3	46.6%
6	20	17	85.0%
7	35	25	71.4%
8	20	0	0.0%
9	35	0	0.0%
10	35	0	0.0%
11	35	0	0.0%
12	20	0	0.0%
13	35	0	0.0%
14	35	0	0.0%
15	20	0	0.0%
16	65	0	0.0%
17	35	0	0.0%
18	35	0	0.0%
19	20	0	0.0%

(b) Método manual

Figura 4: Asignación de unidades a los vehículos para la instancia 2

de capacidad en el caso del método manual, los casos en los que se presentó esta situación se encuentran resaltados en las figuras 3b,4b,5b,6b y 7b.

Al indagar por las causas de esta situación se encontró que el equipo de programación suele ignorar la disponibilidad de la flota de la empresa de transporte y realiza una programación que desconoce la misma, trasladando la responsabilidad de ajustarse a dicho programa al personal de la transportadora, esta situación conlleva retrabajos en la programación, retrasos en el cargue e incumplimiento en las entregas.

Por otro lado pudo constatarse la violación de otra de las restricciones, la asignación de un número de unidades superior a las pedidas por parte del distribuidor, en algunos casos debido a un error humano y en otros debido a un ajuste manual intencional con el fin de completar el número mínimo de unidades para un vehículo o para una ruta.



Vehicle	Capacity	Load	% Load Modelo
1	35	29	82.9%
2	35	30	85.7%
3	20	16	80.0%
4	35	29	82.9%
5	20	0	0.0%
6	35	0	0.0%
7	35	0	0.0%
8	35	0	0.0%
9	20	0	0.0%
10	20	0	0.0%
11	35	27.1	77.4%
12	35	26.9	76.9%
13	65	51	78.5%
14	35	0	0.0%
15	20	0	0.0%

(a) Modelo Computacional

Vehicle	Capacity	Load	% Load Modelo
1	35	32	91.4%
2	35	10.9	31.1%
3	20	34	170.0%
4	35	0	0.0%
5	20	16.3	81.5%
6	35	28	80.0%
7	35	27	77.1%
8	35	31.3	89.4%
9	20	0	0.0%
10	20	0	0.0%
11	35	0	0.0%
12	35	0	0.0%
13	65	0	0.0%
14	35	0	0.0%
15	20	0	0.0%

(b) Método manual

Figura 5: Asignación de unidades a los vehículos para la instancia 3

Otra de las mejoras buscadas con la implementación de esta solución tiene que ver con el tiempo utilizado por el equipo programador para obtener el programa de distribución, una de las variables más importantes para determinar el impacto del modelo fue el tiempo de cómputo requerido por el algoritmo para hallar la solución, para tal fin el tiempo de solución requerido por el modelo fue medido en relación al crecimiento de las variables críticas con los resultados mostrados en las figuras 8,9 y 10.

Vehicle	Capacity	Load	% Load Modelo
1	35	27	77.1%
2	35	29	82.9%
3	35	27	77.1%
4	35	26.3	75.1%
5	20	0	0.0%
6	35	0	0.0%
7	20	20	100.0%
8	20	15	75.0%
9	20	15	75.0%
10	35	0	0.0%
11	35	0	0.0%
12	20	0	0.0%
13	35	28	80.0%
14	35	0	0.0%
15	35	0	0.0%
16	65	0	0.0%
17	35	0	0.0%
18	35	0	0.0%
19	65	49	75.4%
20	35	0	0.0%

(a) Modelo Computacional

Vehicle	Capacity	Load	% Load Modelo
1	35	11.9	34.0%
2	35	17.6	50.3%
3	35	33	94.3%
4	35	28	80.0%
5	20	29.3	146.5%
6	35	30	85.7%
7	20	33	165.0%
8	20	31	155.0%
9	20	0	0.0%
10	35	0	0.0%
11	35	0	0.0%
12	20	0	0.0%
13	35	0	0.0%
14	35	0	0.0%
15	35	0	0.0%
16	65	0	0.0%
17	35	0	0.0%
18	35	0	0.0%
19	65	0	0.0%
20	35	0	0.0%

(b) Método manual

Figura 6: Asignación de unidades a los vehículos para la instancia 4

Vehicle	Capacity	Load	% Load Modelo
1	20	19	95.0%
2	20	20	100.0%
3	35	34	97.1%
4	35	27	77.1%
5	35	28	80.0%
6	65	54.3	83.5%
7	20	15	75.0%
8	65	49.5	76.2%
9	35	28	80.0%
10	65	61	93.8%
11	35	30	85.7%
12	35	0	0.0%
13	65	0	0.0%
14	20	15	75.0%
15	20	18	90.0%
16	35	0	0.0%
17	35	0	0.0%

(a) Modelo Computacional

Vehicle	Capacity	Load	% Load Modelo
1	20	31	155.0%
2	20	4	20.0%
3	35	20.3	58.0%
4	35	36	102.9%
5	35	30	85.7%
6	65	0	0.0%
7	20	32	160.0%
8	65	32.3	49.7%
9	35	0	0.0%
10	65	0	0.0%
11	35	0	0.0%
12	35	43	122.9%
13	65	17	26.2%
14	20	28	140.0%
15	20	30	150.0%
16	35	25	71.4%
17	35	0	0.0%

(b) Método manual

Figura 7: Asignación de unidades a los vehículos para la instancia 5

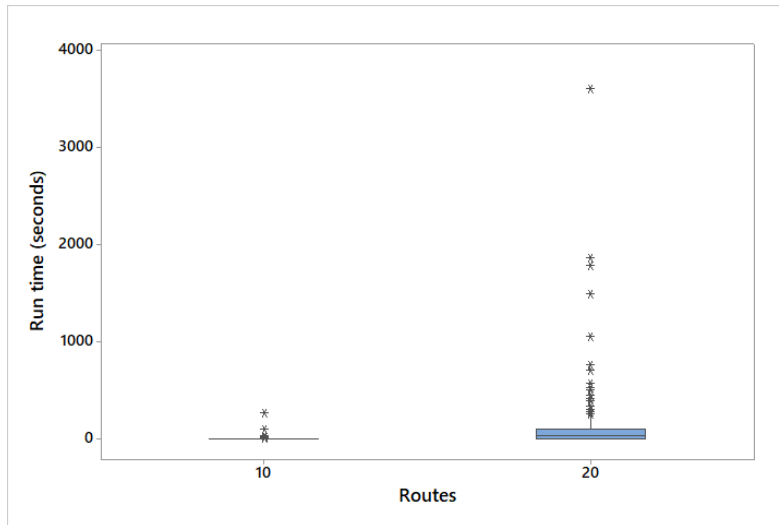


Figura 8: Tiempo de cómputo en relación al cambio en la cantidad de rutas

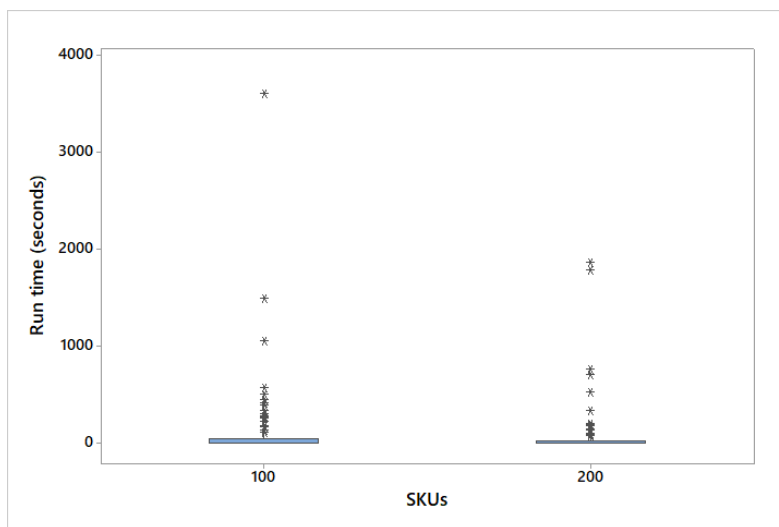


Figura 9: Tiempo de cómputo en relación al cambio en la cantidad de SKUs

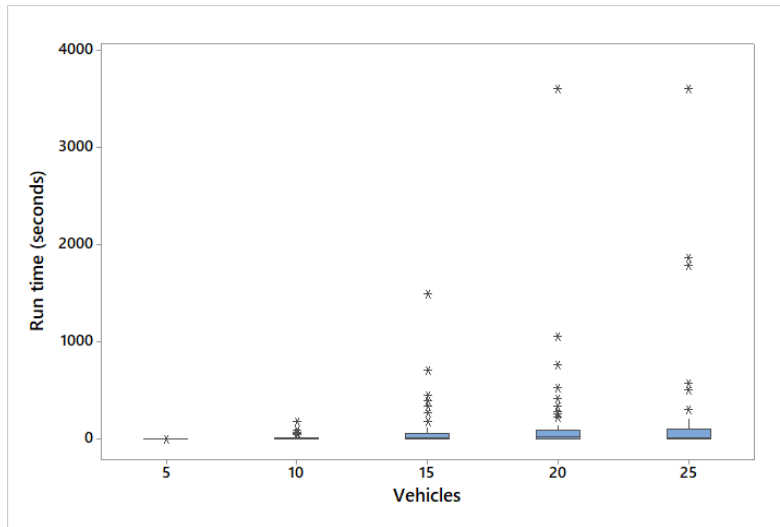


Figura 10: Tiempo de cómputo en relación al cambio en la cantidad de camiones disponibles

## 7. Conclusiones

- Este caso de estudio describe de forma general las etapas en la cadena de suministro de una ensambladora de motocicletas así como algunas de las dificultades que surgen en ellas, para las cuales, métodos empíricos aparecen habitualmente como la alternativa más práctica de solución. Estos métodos no ofrecen normalmente una solución óptima al problema, además de involucrar errores humanos considerables en mayor o menor medida, sin embargo, tienden a perdurar en el tiempo dada la cantidad esfuerzo y recursos requeridos para llevar a cabo una investigación detallada del problema y diseñar, probar e implementar una solución de mayor alcance.
- El modelo propuesto para la distribución de motocicletas ha demostrado mejorar tanto el cumplimiento de la promesa de entrega, como el tiempo de procesamiento requerido para obtener una solución por parte del equipo de programación de los despachos en la ensambladora de motocicletas objeto de este caso de estudio.
- La cantidad de rutas, considerada una variable crítica en el modelo empírico convencional, no afecta significativamente el desempeño del modelo propuesto como puede observarse en la Figura 8. Para el caso típico de 10 rutas el tiempo de procesamiento no alcanza los 500 segundos, es decir, 8.3 minutos que, comparados con los 220.8 minutos que en promedio se demora este proceso en la actualidad representan una mejora significativa de la utilización del algoritmo.
- Otra de las variables críticas para el proceso de programación de los despachos es la cantidad de SKUs, en este caso el modelo evidenció tampoco ser afectado de forma importante por su incremento, ya que en la totalidad de experimentos los resultados de procesamiento fueron inferiores a los 4000 segundos (66.66 minutos) como puede observarse en la Figura 9
- El incremento en la cantidad de vehículos disponibles muestra un efecto moderado en la dispersión de los tiempos totales de procesamiento como puede observarse en la Figura 10, sin embargo, muy inferior al tiempo actual que toma el equipo de programación de los despachos para hallar una solución viable.

- Una dificultad importante que se encontró en el desarrollo de este caso de estudio fue la consecución de la información necesaria y posterior estructuración de la misma, de esta manera un reto que se vislumbra en el corto plazo es el trabajo interdisciplinario de las áreas de logística, tecnología, contables y empresa de transporte, para la consolidación y puesta en marcha de la metodología que requeriría la utilización del modelo propuesto.
- Al comparar las soluciones generadas por el modelo con aquellas propuestas por el equipo de despachos, se encontró que las últimas contenían errores humanos importantes, que generarían reprocesos con los respectivos sobrecostos y/o impacto negativo en la satisfacción de los clientes. Lo anterior supone una mejora adicional al proceso derivada de la eventual implementación de un modelo de programación como el propuesto en este trabajo.

## Referencias

- [1] Milburn Ashlea Bennett, Kirac Emre, and Hadianniasar Mina. Case article—growing pains: A case study for large-scale vehicle routing. *INFORMS Transactions on Education*, 17(2):75–80, 2017.
- [2] Rajan Balaraman and Ravichandran N. Case article—tactical decisions at vastrapur car rental services. *INFORMS Transactions on Education*, 18(1):48–51, 2017.
- [3] GG Brown and D Ronen. Consolidation of customer orders into truckloads at a large manufacturer. *Journal of the Operational Research Society*, 48:779–785, 1997.
- [4] J-U Kim and Y-D Kim. A lagrangian relaxation approach to multi-period inventory/distribution planning. *Journal of the Operational Research Society*, 51(3):364–370, 2000.
- [5] Jiansheng Liu, Alice E. Smith, and Dan Qian. The vehicle loading problem with a heterogeneous transport fleet. *Computers & Industrial Engineering*, 97:137–145, 2016.
- [6] Ümİte Yüceer and Arif Özakça. A truck loading problem. *Computers and Industrial Engineering*, 58:766–773, 2010.