

Pontificia Universidad Católica del Perú

Facultad de Ciencias e Ingeniería



**PROPUESTA DE MEJORA EN EL PROCESO DE DESPACHO
DE PRODUCTOS TERMINADOS EN UNA EMPRESA
DEDICADA A LA PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE
PRODUCTOS QUÍMICOS Y SALES MEDIANTE EL USO DE
HERRAMIENTAS DE LEAN LOGISTICS E INVESTIGACIÓN DE
OPERACIONES**

Tesis para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Industrial**

AUTOR:

Edgardo Javier Llanos Watanabe

ASESOR:

Jonatán Edward Rojas Polo


Lima, abril de 2024

Informe de Similitud

Yo, **Jonatan Edward Rojas Polo**, Escuela de Posgrado de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor de la tesis titulado **PROPUESTA DE MEJORA EN EL PROCESO DE DESPACHO DE PRODUCTOS TERMINADOS EN UNA EMPRESA DEDICADA A LA PRODUCCIÓN Y COMERCIALIZACIÓN DE PRODUCTOS QUÍMICOS Y SALES MEDIANTE EL USO DE HERRAMIENTAS DE LEAN LOGISTICS E INVESTIGACIÓN DE OPERACIONES**, del autor **Edgardo Javier Llanos Watanabe** dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 13%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 25/03/2022.
- He revisado con detalle dicho reporte y en la Tesis no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 06 de noviembre de 2023

Apellidos y nombres del asesor: <u>Rojas Polo, Jonatan Edward</u>	
DNI: 42529429	Firma: 
ORCID: https://orcid.org/0000-0001-5498-4090	

RESUMEN

El presente trabajo tiene como finalidad la formulación de una propuesta de mejora en el proceso de despacho de productos terminados en una empresa dedicada a la producción y comercialización de productos químicos y sales. Para ello se establecen dos estrategias, basadas en herramientas de *Lean Logistics* e Investigación de Operaciones, a través de las cuales se busca obtener un plan para la programación de despachos más eficiente.

Actualmente el procedimiento para programar los despachos se realiza de manera manual, contrastando el listado de vehículos disponibles con la lista de pedidos de ventas. La asignación de las unidades de carga se realiza en función a varios factores como el orden de llegada de los vehículos, el tipo de producto a transportar, las características del camión, entre otros.

Por medio de una de las estrategias se propone la elaboración de un modelo de optimización, el cual incluye elementos del problema de programación de máquinas paralelas (PMSP – *Parallel Machine Scheduling Problem*) y el problema de programación de proyectos con recursos limitados (RCPSP - *Resource Constrained Project Scheduling Problem*). De esta manera, se denomina al modelo desarrollado en esta tesis como el problema de programación de despachos, el cual tiene como objetivo la asignación de recursos y la secuenciación de tareas.

El modelo matemático ha sido construido luego de elaborar un mapa con los puntos de entrega y tras analizar la información histórica de los despachos para conocer los detalles del proceso. De este modo, se plantearon las restricciones existentes y se ejecutó el modelo en un software de optimización. Al comparar la información de prueba de una semana con los resultados propuestos por el modelo matemático, se obtiene una variación general de 37.35% en la asignación de vehículos. Asimismo, se comprobó que el modelo es capaz de elaborar un programa de despacho, el cual respeta los aforos establecidos, reduce la congestión de camiones, aumenta la disponibilidad de despacho y adelanta el inicio de las actividades de carga.

En términos económicos la propuesta de mejora tiene un periodo de recuperación de siete meses. Además, la tasa interna de retorno de 14.10% mensual y el valor actual neto es positivo, considerando un costo de capital de 1.17% al mes. De esta manera, la propuesta de mejora resulta factible y beneficiosa para la empresa.

DEDICATORIA

A mis padres Víctor y Mercedes por su apoyo durante todos estos años. Por educarme, inculcarme valores y brindarme todo su amor y cariño para que pueda desarrollarme personal y profesionalmente. A mi hermano Álvaro por su apoyo, compañía y afecto a lo largo de estos años.

A mis abuelitos Víctor y María por preocuparse por mí, apoyarme y contribuir con mi crecimiento académico y personal. A mi abuelita Angélica por cuidarme cuando era niño y a mi abuelito Shigenari por ser una fuente de inspiración, valentía y superación.



AGRADECIMIENTOS

Quisiera agradecer a mi asesor Jonatán Rojas por sus enseñanzas, paciencia, comprensión y orientación en la elaboración de esta tesis.

A mi tía María Angélica por ayudarme a insertarme en el mundo laboral a través de las prácticas pre profesionales, que me permitieron adquirir conocimientos y experiencias, sin las cuales no hubiera sido posible comenzar este proyecto.

Un agradecimiento especial a Danitza Palomino Arana por tenerme paciencia, hacerme recordar mis fortalezas, no permitir que me rinda e impulsarme a sacar adelante esta tesis.



INDICE GENERAL

INDICE DE GRÁFICOS	vii
INDICE DE TABLAS	viii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO	2
1.1. Lean Logistics.....	2
1.1.1. Logística	2
1.1.2. Lean Manufacturing.....	4
1.1.3. Metodología Lean Logistics	9
1.2. Modelos matemáticos de Investigación de Operaciones	14
1.2.1. Modelos de programación de vehículos	14
1.2.2. Modelos de ruteo de vehículos	15
1.2.3. Modelos de programación de horarios de trabajo	19
1.2.4. El problema de entrega de concreto	22
1.3. El Proceso de Jerarquía Analítica.....	25
1.3.1. Etapa I: Construcción de una jerarquía de decisión.....	25
1.3.2. Etapa II: Determinación de la importancia relativa entre atributos y sub- atributos.....	26
1.3.3. Etapa III: Determinación de la posición relativa de las alternativas con respecto a los atributos.....	27
1.3.4. Etapa IV: Determinación de indicadores de consistencia.....	27
1.3.5. Etapa V: Determinación de la ponderación de prioridad general de las alternativas.....	28
1.4. Enfoque de costos de productos conjuntos y subproductos	29
1.4.1. Definición de productos conjuntos y subproductos	29
1.4.2. Asignación de costos a productos conjuntos	30
1.5. Marco legal en las actividades de transporte de mercancías	30
1.5.1. Normativa legal aplicable al transporte general de mercancías	30
1.5.2. Normativa legal aplicable al transporte de materiales y residuos peligrosos	31

1.5.3. Normativa legal aplicable al transporte de insumos químicos y bienes fiscalizados	32
CAPÍTULO 2. CASOS DE ESTUDIO	34
2.1. A Heuristic Approach for Vehicle Scheduling Problem with Time and Capacity Constraints	34
2.2. A MILP Model for Truck-Shovel Scheduling to Minimize Fuel Consumption	35
2.3. The Improvement of Logistic Management Using Lean and RFID Technology	37
CAPÍTULO 3. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL.....	40
3.1. Descripción general de la empresa.....	40
3.1.1. Antecedentes	40
3.1.2. Perfil empresarial y principios organizacionales.....	41
3.1.3. Estructura organizacional	42
3.1.4. Unidades de negocio y productos comercializados	44
3.1.5. Plantas productivas	45
3.2. Análisis de la situación actual	45
3.2.1. Proceso de ventas, despacho y cobranza	45
3.2.2. Modalidades de despacho	51
3.2.3. Clientes locales y puntos de entrega	51
3.2.4. Configuración de la flota de unidades de transporte	53
3.2.5. Asignación de las unidades de transporte a los pedidos de ventas ...	54
3.2.6. Consolidación de carga y compatibilidad de productos.....	55
3.2.7. Diseño de rutas de transporte.....	55
3.3. Indicadores del proceso.....	55
3.4. Medición de indicadores del proceso	57
3.5. Análisis de causa raíz.....	61
CAPÍTULO 4. PROPUESTA DE MEJORA	63
4.1. Alcance de la propuesta de mejora y data utilizada	63
4.2. Aplicación de Lean Logistics.....	65

4.2.1.	Análisis del proceso e identificación de desperdicios.....	65
4.2.2.	Reestructuración del proceso de despacho	68
4.2.3.	Implementación de herramientas Lean	69
4.3.	Aplicación de herramientas de Investigación de Operaciones	69
4.3.1.	Descripción general del Problema de Programación de Despachos..	70
4.3.2.	Definición de los supuestos en la modelación del problema	70
4.3.3.	Formulación del Problema de Programación de Despachos.....	71
4.3.4.	Estandarización de los coeficientes de beneficio en la función objetivo 76	
4.3.5.	Desarrollo del modelo de optimización en computadora.....	78
CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS		82
5.1.	Asignación de unidades de carga y secuenciación de pedidos de ventas	82
5.2.	Programación de actividades de carga de los pedidos de ventas	84
CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA PROPUESTA		88
6.1.	Identificación de ingresos y egresos relevantes.....	88
6.1.1.	Ingresos relevantes generados por la propuesta	88
6.1.2.	Egresos relevantes generados por la propuesta.....	89
6.2.	Flujo de caja	90
6.3.	Cálculo de WACC y COK	92
6.4.	Evaluación de indicadores económicos	93
6.5.	Análisis de sensibilidad.....	93
CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		98
7.1.	Conclusiones	98
7.2.	Recomendaciones	99
Bibliografía.....		101

INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Cadena logística.....	3
Gráfico 2: Ciclo de los principios Lean.....	8
Gráfico 3: Representación de los principios de Logistics Bridge Model.....	11
Gráfico 4: Forma estándar de jerarquías.....	26
Gráfico 5: Representación gráfica de productos conjuntos y subproductos.....	29
Gráfico 6: Resultados obtenidos para el primer escenario.....	35
Gráfico 7: Esquema del problema de asignación de camiones y excavadoras.....	36
Gráfico 8: Mapa de flujo de valor – Estado actual.....	38
Gráfico 9: Mapa de flujo de valor – Estado futuro.....	38
Gráfico 10: Organigrama general.....	42
Gráfico 11: Organigrama del Área de Planeamiento y Logística.....	43
Gráfico 12: Ingreso por ventas por familia de productos en el 2018.....	44
Gráfico 13: Proceso de ventas, despacho y facturación – Parte I.....	47
Gráfico 14: Proceso de ventas, despacho y facturación – Parte II.....	48
Gráfico 15: Proceso de ventas, despacho y facturación – Parte III.....	49
Gráfico 16: Proceso de ventas, despacho y facturación – Parte IV.....	50
Gráfico 17: Mapa de puntos de entrega – Lima Metropolitana.....	52
Gráfico 18: Número de despachos promedio por día.....	57
Gráfico 19: Despachos por canal de distribución y modalidad por semana.....	58
Gráfico 20: Porcentaje de entregas a tiempo.....	59
Gráfico 21: Porcentaje de entregas demoradas por semana.....	60
Gráfico 22: Análisis de los cinco porqués.....	62
Gráfico 23: Cantidad de despachos por centro.....	63
Gráfico 24: Cantidad de despachos por modalidad.....	64
Gráfico 25: Número de despachos por grupo de artículo.....	64
Gráfico 26: Representación del Problema de Programación de Despachos.....	72
Gráfico 27: Jerarquía de decisión para la propuesta de un plan de eficiente para la programación de despachos.....	77
Gráfico 28: Programación de despacho real del tercer día de prueba.....	85
Gráfico 29: Comparación de la programación real contra la solución del modelo para el segundo día de prueba en Puente Químico.....	86
Gráfico 30: Comparación de la programación real contra la solución del modelo para el primer día de prueba en Puente Químico.....	86

INDICE DE TABLAS

<i>Tabla 1: Escala fundamental de valores para comparación de elementos.</i>	26
<i>Tabla 2: Matriz de comparaciones pareadas y cálculo del vector de prioridades.</i>	27
<i>Tabla 3: Valores de índice aleatorio (RI) por tamaño de matriz n.</i>	28
<i>Tabla 4: Parámetros de entrada para cada escenario.</i>	35
<i>Tabla 5: Comparación de actividades en proceso actual vs. propuesto.</i>	39
<i>Tabla 6: Plantas productivas de la empresa.</i>	45
<i>Tabla 7: Asignación de colores por anillo de entrega.</i>	52
<i>Tabla 8: Clasificación de los productos por peligrosidad.</i>	53
<i>Tabla 9: Flota de vehículos y capacidades.</i>	54
<i>Tabla 10: Tasa de utilización del transportista en el trimestre.</i>	60
<i>Tabla 11: Criterios para definir si la actividad agrega valor o no.</i>	65
<i>Tabla 12: Tipos de actividades según el valor agregado.</i>	65
<i>Tabla 13: Identificación de desperdicios por actividad en el proceso.</i>	67
<i>Tabla 14: Desperdicios de menor incidencia o impacto en el proceso.</i>	68
<i>Tabla 15: Variación en la asignación de vehículos.</i>	82
<i>Tabla 16: Resultados de la asignación y secuenciación del primer día de prueba.</i>	83
<i>Tabla 17: Variación en la secuenciación de pedidos de venta.</i>	84
<i>Tabla 18: Cantidad de toneladas adicionales vendidas por producto.</i>	89
<i>Tabla 19: Flujo de caja de la propuesta de mejora – Parte I.</i>	91
<i>Tabla 20: Flujo de caja de la propuesta de mejora – Parte II.</i>	91
<i>Tabla 21: Valores de las variables de entrada y cálculo de COK.</i>	93
<i>Tabla 22: Indicadores económicos de la propuesta de mejora.</i>	93
<i>Tabla 23: Cantidad de toneladas adicionales vendidas – Escenario pesimista.</i>	94
<i>Tabla 24: Flujo de caja de la propuesta de mejora en escenario pesimista – Parte I.</i>	94
<i>Tabla 25: Flujo de caja de la propuesta de mejora en escenario pesimista – Parte II.</i>	95
<i>Tabla 26: Indicadores económicos de la propuesta de mejora – Escenario pesimista.</i>	95
<i>Tabla 27: Cantidad de toneladas adicionales vendidas – Escenario optimista.</i>	96
<i>Tabla 28: Flujo de caja de la propuesta de mejora en escenario optimista – Parte I.</i>	96
<i>Tabla 29: Flujo de caja de la propuesta de mejora en escenario optimista – Parte II.</i>	97
<i>Tabla 30: Indicadores económicos de la propuesta de mejora – Escenario optimista.</i>	97

INTRODUCCIÓN

Los sectores manufactura y minería e hidrocarburos representan el 25.25% del producto bruto interno del Perú y son dos de las principales actividades productivas a nivel nacional. Adicionalmente, la producción de productos químicos básicos y las actividades de extracción de sal han presentado un comportamiento estable durante los últimos periodos. Bajo este escenario, en el cual no se espera un crecimiento considerable en dichos sectores en el corto plazo, se encuentra la empresa en la cual se desarrolla la presente investigación.

El presente proyecto de tesis busca formular una propuesta que permita mejorar las operaciones en el proceso de despacho de productos terminados. A través del uso conjunto de estrategias, basadas en la filosofía *Lean Manufacturing* y un modelo de optimización, se procura mejorar las condiciones del proceso y establecer un punto de partida para planificar y controlar adecuadamente las actividades diarias.

En el primer capítulo se describirá el marco teórico, el cual incluye los conceptos básicos sobre logística, los fundamentos de la metodología a emplear y el marco legal vigente sobre las actividades de transporte terrestre de mercaderías en el país.

Seguidamente, en el segundo capítulo se presentará tres casos de estudio en donde se mejoraron los índices de eficiencia de los procesos logísticos a través de la utilización de los conocimientos teóricos abarcados en el capítulo previo.

En la tercera parte del presente trabajo se realizará la descripción general de la empresa y se detallará la situación actual del proceso de despacho de productos terminados. Asimismo, se llevará a cabo el diagnóstico para identificar los principales problemas que acontecen en el proceso.

A continuación, en el cuarto capítulo se desarrollará la propuesta de mejora. La cual pretende modificar los procedimientos, mejorar el flujo de materiales e información, y optimizar la asignación de las unidades de transporte al programar los despachos.

En la quinta parte se mostrarán los resultados obtenidos por medio de la propuesta de mejora y se comparará la solución brindada por el modelo de optimización con los datos de prueba de una semana. Adicionalmente, en la sexta parte se evaluará la propuesta desde el punto de vista económico para determinar su viabilidad.

Finalmente, en el último capítulo se presentará las conclusiones y recomendaciones del presente estudio. Y se planteará los siguientes pasos para futuros proyectos.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se presenta el marco teórico concerniente a la programación de despachos de productos terminados, el cual abarca los conceptos básicos y los fundamentos para comprender la metodología de mejora empleada. Adicionalmente, se explican algunos modelos de programación lineal relacionados a las actividades de producción y transporte, así como otras definiciones y herramientas útiles para la toma de decisiones. Por último, se detalla el marco legal vigente que establece las condiciones operacionales necesarias para el transporte terrestre de mercaderías.

1.1. Lean Logistics

El éxito en la mejora de procesos se debe principalmente al uso de métodos y herramientas que permiten comprender y analizar la situación actual de los procesos con el objetivo de proponer cambios que impulsen su rendimiento. En esta primera parte se presenta la metodología *Lean Logistics*, la cual será aplicada para desarrollar el presente trabajo.

1.1.1. Logística

El primer componente que forma parte de la metodología a utilizar es la logística. Una actividad de gran importancia en la actualidad por medio de la cual se manejan y administran los recursos disponibles.

Definiciones: Logística y cadena de suministro

La logística ha sido realizada por el ser humano desde tiempos muy antiguos, en los cuales existían ciertas limitaciones respecto al transporte y el almacenamiento de bienes. Con el transcurso de los años, esta actividad sigue formando parte de las tareas efectuadas por el hombre; sin embargo, el término no fue definido hasta hace algunas décadas atrás. Según (Anaya, J., 2007), el origen de la palabra proviene de la actividad militar, cuando se empleó a inicios del siglo XX como una función de apoyo para el abastecimiento y control de recursos. Posteriormente, la logística comenzó a ser aplicada en las empresas y ha evolucionado notablemente hasta convertirse en la actividad que se conoce en la actualidad.

Una definición más apropiada para el término logística, bajo el contexto empresarial reciente, sería el concepto proporcionado por el Consejo de Profesionales de la Administración de la Cadena de Suministro (CSCMP – *Council of Supply Chain Management Professionals*), el cual establece lo siguiente:

“El proceso de planificación, implementación y control de procedimientos para el eficiente y efectivo transporte y almacenamiento de bienes y servicios, así como la información relacionada desde el punto de origen al punto de consumo con el fin de satisfacer los requerimientos de los clientes”. (CSCMP, 2013).

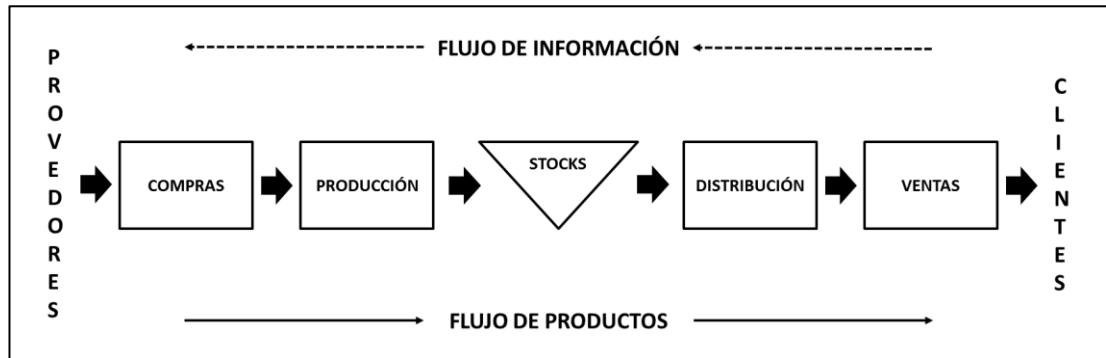


Gráfico 1: Cadena logística.

Fuente: Anaya, J. (2007)

Otro concepto relevante que ha tomado gran importancia en los últimos tiempos es la cadena de suministro (SC - *Supply Chain*), que se define como:

“Los intercambios de materiales e información en el proceso logístico, que abarca desde la adquisición de materias primas hasta la entrega de los productos terminados al usuario final”. (CSCMP, 2013).

Generalmente, una empresa no puede controlar todas las actividades que conforman la cadena de suministro; por ello, es importante establecer buenas relaciones con los demás integrantes de la cadena para que el flujo sea efectivo a través de ella. Por otro lado, también es necesario gestionar el flujo inverso de los bienes hasta su reparación o eliminación como es el caso de los productos defectuosos y obsoletos.

Objetivo de la logística

En concordancia con las definiciones expuestas previamente, el objetivo de la logística reside en proporcionar bienes y servicios en el lugar adecuado, en el momento oportuno, con la calidad apropiada y en las cantidades requeridas, satisfaciendo la demanda de los clientes e incurriendo en los menores costos.

Importancia de la logística y la cadena de suministro

Tal como señala (Ballou, R., 2004), la logística gira entorno a la creación de valor, el cual se manifiesta en términos de tiempo y lugar, debido a que los bienes y servicios

tienen una baja valoración si no están a disposición de los clientes cuando deseen consumirlos. Es por ello que es conveniente que cada actividad dentro de la cadena de suministro esté orientada a contribuir al proceso de agregar valor.

Por otra parte, desde otro punto de vista, no contar con los productos en el punto de ventas representa un costo de oportunidad significativo relacionado a las ventas perdidas; asimismo, en algunos modelos de negocio existen penalidades por el no cumplimiento de pedidos, lo cual es contraproducente para los objetivos establecidos por la empresa en términos comerciales y financieros.

El área de logística en la organización de las empresas

Generalmente las empresas cuentan con un área de logística que se encarga del aprovisionamiento, almacenamiento y distribución de bienes y servicios. En donde la mayor parte de las actividades que realiza esta área involucra la relación con otras áreas funcionales de la empresa como producción, ventas, marketing y finanzas.

Resulta frecuente observar que los objetivos trazados para cada una de estas áreas son diferentes y contrapuestos, lo cual es una de las causas de ineficiencias y sobrecostos en los procesos. Por esta razón es fundamental establecer vínculos efectivos, que faciliten la comunicación y negociación entre las áreas, para alcanzar el punto de equilibrio en el cual se prioricen los resultados de la compañía por encima de los objetivos individuales.

1.1.2. Lean Manufacturing

El segundo componente de la metodología corresponde a una estrategia de trabajo, que se enfoca en la mejora de procesos a través de un mejor uso de los recursos.

Definición y origen de Lean Manufacturing

Lean Manufacturing es una filosofía de gestión que deriva del Sistema de Producción de Toyota (TPS – *Toyota Production System*) y consiste en un conjunto de técnicas que tienen como objetivo eliminar los desperdicios en los procesos. Por medio de estas herramientas se pretende obtener mayores beneficios utilizando la menor cantidad de recursos, lo cual supone un aumento en la eficiencia.

El Sistema de Producción de Toyota fue desarrollado en Japón por Toyota Motor Company, empresa fundada en 1937 por la familia Toyoda, quienes habían tenido éxito al desarrollar mejoras en la maquinaria textil. Algunos años después, tras el fin de la Segunda Guerra Mundial, la compañía optó por producir automóviles de forma

masiva; sin embargo, las condiciones del mercado y la situación económica del país eran desfavorables. De este modo, Eiji Toyoda y Taiichi Ohno determinaron que sería necesario emplear un enfoque de trabajo distinto que permitiera aumentar la productividad y disminuir los costos.

A pesar de que el Sistema de Producción de Toyota tuvo sus orígenes a mediados del siglo XX, no fue hasta la década de los años noventa en la que el término *Lean Manufacturing* fue documentado, explicado y difundido por medio de los libros: *The Machine that Changed the World* (1990) y *Lean Thinking* (1996).

Los 7 + 1 desperdicios

También conocido como *muda* por su traducción del japonés, se define como desperdicio a todo aquello que no agrega valor desde la perspectiva del cliente y por lo cual no estaría dispuesto a pagar. Asimismo, estos están relacionados a la mal utilización de recursos y al aumento de los costos de producción. Inicialmente, Taiichi Ohno identificó siete tipos de desperdicios; no obstante, en la bibliografía más reciente se incluye una octava categoría: el personal mal utilizado.

Sobreproducción

Consiste en suministrar más de lo necesario, producir artículos antes de tiempo o proveer un servicio superior a lo solicitado. Este tipo de desperdicio se origina por el afán de estar un paso adelante y suele ser el origen de otros desperdicios.

Espera

Esta categoría de desperdicio corresponde a la interrupción del flujo de materiales, información o servicios debido a la falta de algún tipo de recurso. Comúnmente, estas demoras son la consecuencia de una mala planificación o secuenciación de tareas.

Transporte innecesario

Un desperdicio es asignado a esta categoría cuando existe un excesivo movimiento de materiales o información, el cual es generado por una mala distribución de las instalaciones o por el desconocimiento del flujo de estos elementos. Asimismo, estos traslados dan lugar al deterioro de bienes y la pérdida de información.

Sobrepesamiento

También denominado como procesamiento que no agrega valor, consiste en realizar un esfuerzo mayor al requerido por el cliente. Usualmente, se originan cuando no se ha identificado correctamente las necesidades del cliente, lo cual conlleva a efectuar procesos innecesarios que solo incrementan los costos.

Exceso de inventarios

Los inventarios se convierten en un desperdicio cuando superan la cantidad mínima necesaria para mantener el flujo ininterrumpido de materiales e información tal como señala (Locher, D., 2008). Además, estos representan una fuente de obsolescencia y deterioro de productos, e implican costos adicionales de almacenamiento.

Movimiento innecesario

Dentro de esta categoría de desperdicio se encuentran todos los movimientos que no contribuyen a la generación de valor, los cuales son realizados por una persona o máquina. Por lo general, este tipo de desperdicio es una consecuencia del deficiente diseño de los puestos y estaciones de trabajo.

Productos defectuosos o reprocesos

Comprende todas las actividades y recursos asignados a la localización y corrección de elementos mal procesados como materiales, información y servicios. Estos errores pueden tener un fuerte impacto debido a que las actividades de rectificación están asociadas a efectuar mayores esfuerzos e incurrir en costos adicionales.

Personal mal utilizado

Esta clase de desperdicio se origina cuando existe una brecha entre los requisitos del puesto de trabajo y las cualidades de la persona. Evidenciándose cuando un colaborador no emplea todas sus habilidades y competencias, o cuando este no dispone de los conocimientos y capacitación adecuada para ejercer sus funciones.

Principios de Lean Thinking

El término *Lean Thinking* hace referencia a una metodología que propone un enfoque basado en la definición y creación de valor a través de la organización de actividades correctamente secuenciadas con el fin de alcanzar mayores beneficios y combatir toda clase de desperdicios. Para ello esta metodología se centra en cinco principios que proporcionan la base para generar valor de manera continua.

Definir el valor específico

Es el más importante de los principios y representa un paso crítico para dar inicio con la metodología. Definir el valor implica que el cliente debe establecer los atributos requeridos en términos de un producto o servicio específico, el cual es ofrecido a un precio y momento determinado.

En este sentido, es fundamental que los procedimientos, la tecnología y los equipos no sean tomados en cuenta para definir el valor porque pueden generar distorsiones que adecuen el cliente al producto. Posteriormente, este grave error propiciará la aparición de otros desperdicios.

Identificar el flujo de valor

Se comprende como flujo de valor al conjunto de actividades específicas, que son requeridas para proporcionar un producto o servicio determinado (Womack, J., & Jones, D.,2003). Con relación a ello, este principio se basa en reconocer y elaborar el mapa de procedimientos que forman parte del proceso, el cual puede corresponder a un producto o una familia de productos.

Para efectuar un correcto análisis del flujo de valor, se debe tener en consideración que existen tres tipos de actividades. En primer lugar, las actividades que agregan valor, las cuales se deben mantener; en segundo lugar, las actividades que no agregan valor, pero que son inevitables en el proceso, las cuales deben reducirse; finalmente, las actividades que no agregan valor y que sí pueden ser eliminadas.

Crear el flujo continuo

El tercer principio requiere que los desperdicios hayan sido eliminados del proceso para poder determinar una secuenciación adecuada de las actividades que generan valor. De este modo, se instaura el flujo continuo de materiales, información y servicios a través de actividades que son realizadas de manera eficiente y precisa hasta que el producto o servicio llegue al cliente.

Jalar el valor

En este paso se exige desarrollar un modelo *Pull* en el cual los productos y servicios sean realizados a partir de las necesidades del cliente. Para ello es esencial contar con un grado de flexibilidad adecuado que permita modificar los parámetros de trabajo para suministrar únicamente lo que se pide y que es valorado por el cliente.

Perfección

Finalmente, el último principio dentro de la metodología consiste en alcanzar la perfección mediante la repetición de los pasos anteriores. Es decir, se debe seguir trabajando en la eliminación de desperdicios mientras se ofrece un mejor producto o servicio, el cual es cada vez más cercano a lo que el cliente requiere, considerando que sus necesidades pueden variar con el transcurso del tiempo.

La interacción de los cinco principios de *Lean Thinking* forman un círculo virtuoso que permite detectar y eliminar los desperdicios que no fueron identificados en fases previas u otros que se evidencian como consecuencia de alguna variación en los requisitos del cliente o cambio en los procesos.

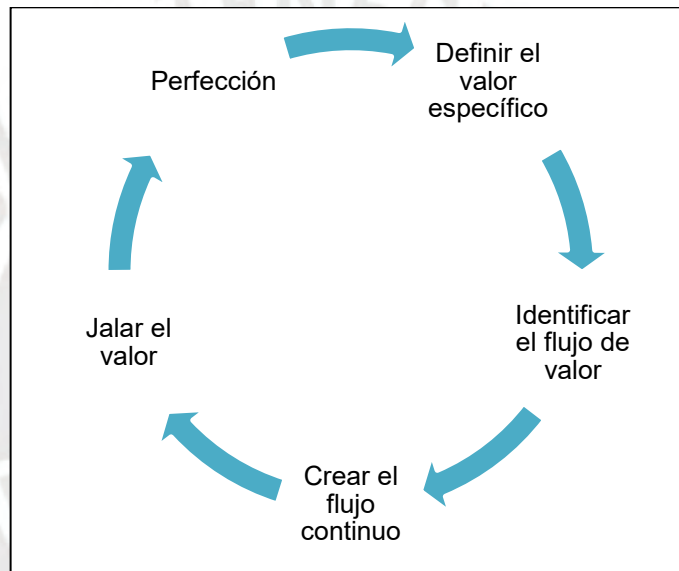


Gráfico 2: Ciclo de los principios Lean.

Fuente: Lean Enterprise Institute

Herramientas de Lean Manufacturing

Las técnicas que forman parte de la filosofía *Lean Manufacturing* son la esencia para eliminar los desperdicios. Por ello es importante que para su correcta aplicación se consideren las necesidades y condiciones actuales de los procesos. A continuación, se presentan algunas herramientas útiles para llevar a cabo el presente estudio.

Kaizen

Kaizen es una palabra de origen japonés que significa mejoramiento y cuando este término es aplicado en los negocios se define como un proceso de mejora continua a través de técnicas sencillas y convencionales, que involucra a todos en la empresa.

Esta herramienta está orientada a las personas y requiere de la participación de los colaboradores para estudiar, documentar y analizar un proceso para desarrollar, proponer e implementar ideas que permitan mejorarlo a lo largo del tiempo.

Trabajo estandarizado

Este concepto hace referencia a la estandarización de las mejores prácticas de trabajo, que corresponden al mejor método y secuencia para efectuar un proceso; además, representa la mejor combinación de los recursos. El objetivo es desarrollar procedimientos con altos niveles de productividad, calidad y seguridad, y que por medio de la repetición se reduzca la variabilidad, la cual puede resultar en la aparición de desperdicios en el proceso.

Poka-Yoke

El nombre de esta herramienta proviene de dos palabras japonesas: *Yokeru* y *Poka*, que en conjunto quiere decir “a prueba de errores”. Los dispositivos *Poka-Yoke* son mecanismos que permiten predecir la aparición de errores y defectos, o los detecta para tomar las medidas correctivas en caso de que hayan ocurrido. Esta herramienta está orientada a desarrollar un sistema de control de calidad de cero defectos.

Gestión visual

Consiste en transmitir información de manera rápida, sencilla y oportuna mediante elementos gráficos que se encuentren disponibles en el lugar y momento adecuado, y que al mismo tiempo contengan la suficiente cantidad de información. Es así que, se puede comunicar procedimientos, instrucciones, especificaciones de productos, disposiciones de seguridad, estado de las operaciones, entre otros.

1.1.3. Metodología Lean Logistics

Habiéndose explicado los dos componentes de la metodología a emplear. En las siguientes líneas se explicará cómo la acción conjunta de ambos elementos puede emplearse como una herramienta para la mejora de procesos.

Definición y alineamiento de conceptos

El término *Lean Logistics* consiste en la integración de los conceptos y principios de la Logística con la filosofía *Lean Manufacturing*, de tal manera que se puede definir como la aplicación de un conjunto de técnicas que buscan eliminar los desperdicios en las actividades de transporte y almacenamiento de bienes y servicios, así como

la información relacionada desde el punto de origen al punto de consumo, incrementando la velocidad y el flujo de los recursos en la cadena de suministro.

En este sentido, tal como señala (Plenert, G., 2006), los principios y las metas de *Lean Manufacturing* y *Supply Chain Management* se encuentran alineados, lo cual da lugar a una sinergia que permite la mutua optimización de ambos modelos, obteniendo así un mejor desempeño. En relación a lo expuesto por el autor:

“*Supply Chain Management* es un gran contexto que requiere de integración y optimización, mientras que *Lean* es el optimizador que ofrece las herramientas que lograrán dicha optimización”. (Plenert, G., 2006)

Características de Lean Logistics

Los sistemas logísticos basados en *Lean Thinking* deben reunir un conjunto de características que impulsen la generación de valor a través de la cadena de suministro. Según (Zhao, X. & Ning, L., 2009), los sistemas *Lean Logistics* deben orientarse a la atención de las demandas de los clientes, cuyos requerimientos representan el inicio de la generación de valor. Asimismo, deben contar con un rápido tiempo de respuesta para atender dichas necesidades, asegurando la disponibilidad de los materiales en cada una de las etapas de la cadena de suministro y logrando que el flujo de bienes e información se ejecute de manera precisa.

Por otra parte, este tipo de sistemas deben garantizar la reducción de costos y el aumento de la eficiencia mediante la adecuada asignación de los recursos, lo cual implica la integración sistemática de las partes involucradas. Por último, la aplicación de medios informáticos es fundamental para lograr el funcionamiento de los sistemas *Lean Logistics* dado que estos mecanismos permiten registrar, almacenar y transmitir información relevante de manera rápida y efectiva.

Principios de Logistics Bridge Model

Se denomina como *Logistics Bridge Model* al modelo propuesto por (Goldsby, T. & Martichenko, R., 2005), el cual relaciona los conceptos de *Lean Manufacturing* y *Six Sigma* con las actividades logísticas con la finalidad de eliminar los desperdicios y reducir las variaciones dentro de la cadena de suministro. Los autores establecen esta alternativa como una guía para diseñar y desarrollar una estrategia basada en los principios y las herramientas que proporcionan estas metodologías de manera individual. Este modelo se centra en tres principios claves con los cuales se podrá alcanzar un sistema logístico sobresaliente, tal como se muestra en el Gráfico 3.

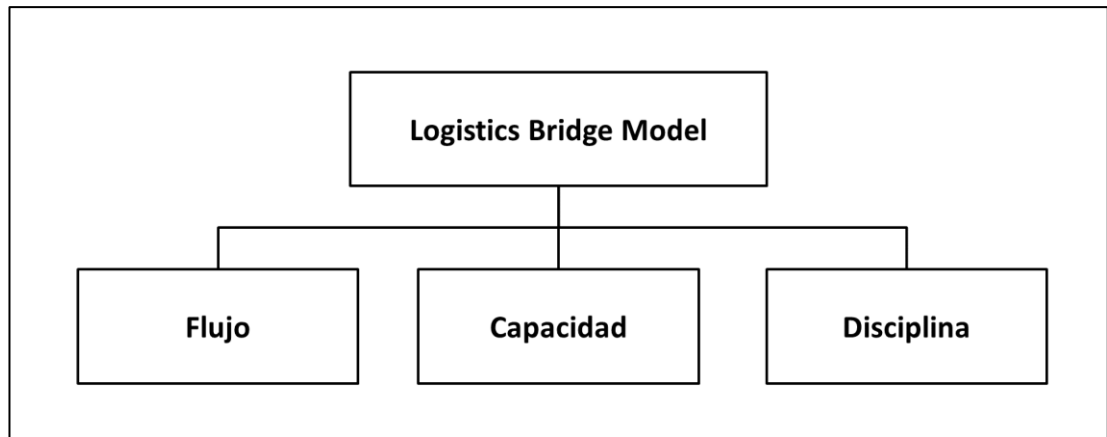


Gráfico 3: Representación de los principios de Logistics Bridge Model

Fuente: Goldsby, T. & Martichenko, R. (2005)

Flujo logístico

Para poder desarrollar una estrategia logística adecuada es importante conocer el flujo de los elementos dentro de la organización porque permiten comprender cuáles son sus fortalezas, debilidades, oportunidades y restricciones. De este modo, existen tres clases de flujos que deben ser analizados. En primer lugar, el flujo de activos permite conocer cómo se administran los recursos de la compañía. En segundo lugar, el flujo de información determina cómo la data es utilizada para generar conocimiento y planificar el futuro. Finalmente, el flujo financiero es importante para comprender cómo las tareas logísticas impactan en los estados financieros de la organización.

Capacidad logística

El segundo principio consiste en establecer un sistema logístico que se encuentre en condiciones de cumplir con las expectativas del cliente, para lo cual se requiere de predictibilidad, estabilidad y visibilidad. El primer término hace referencia a procesos organizados, con roles bien definidos y en los cuales el grado de complejidad ha sido reducido. Luego, la estabilidad se basa en procesos estandarizados con la flexibilidad necesaria para adaptarse a los cambios en la demanda, en donde el comportamiento del sistema guarda relación con lo esperado. Por último, con visibilidad el sistema puede ser entendido con facilidad y medido correctamente para tomar acciones que permitan mejorar su rendimiento.

Disciplina logística

La disciplina es un factor importante dentro de la estrategia logística para planificar, implementar y sostener las iniciativas de mejora, por ello este principio se centra en

la colaboración, la optimización de sistemas y la eliminación de desperdicios. Dentro de la organización debe existir colaboración interna con otros departamentos por medio del trabajo en equipo, y colaboración externa con clientes y proveedores mediante relaciones que beneficien a los asociados. Por otra parte, la optimización de procesos posibilita la reducción del costo total de las operaciones logísticas, siendo la integración horizontal y vertical importantes para que cada miembro de la cadena de suministro pueda planificar y desarrollar operaciones eficientes. Para concluir, la eliminación de desperdicios debe ser el objetivo en este tipo de sistemas, evitando que los errores se conviertan en defectos y estableciendo una cultura organizacional basada en la mejora continua.

Puntos claves en la implementación de Lean Logistics

En el artículo “*Lean Logistics: Maximizing Efficiency and Reducing Waste*” publicado por *Logistics Manager* en enero del 2016, Nittaya Rattanawongwirul sostiene que la mayor dificultad al implementar *Lean Logistics* es la falta de capacidad de las personas para afrontar los cambios debido a la costumbre de trabajar de manera rutinaria. Además, ella manifiesta que el éxito de la metodología debe medirse a través del cambio cultural que sostenga el desempeño de la compañía a largo plazo.

Por otra parte, Kevin Burrell menciona que se deben establecer planes a partir de los pronósticos de la demanda para optimizar el uso de los recursos en las actividades de almacenamiento y transporte. En este sentido, él argumenta que la meta debe ser la reducción de la variabilidad en estas predicciones debido a que representa un factor que afecta directamente a la eficiencia de las operaciones logísticas y a la capacidad de satisfacer los requerimientos de los clientes.

Finalmente, los investigadores coinciden en que *Lean Logistics* no solo implica conocer las operaciones de manera general, sino también prestar atención a los pequeños detalles que pueden convertirse en grandes problemas por medio de la repetición de tareas. Asimismo, ambos predicen que la popularidad de la metodología se extenderá en el futuro, en particular cuando el contexto económico sea adverso o exista una fuerte competencia, donde la habilidad para ahorrar en costos representa una ventaja competitiva.

Lean Logistics en las actividades de transporte

Mediante la aplicación de *Lean Thinking* la gestión de las operaciones de transporte puede resultar beneficiada dada la criticidad del flujo y la velocidad de los materiales en estas actividades. Además, las tareas que conforman estas operaciones suelen

ser rutinarias y cuentan con cierto grado de variabilidad, lo cual representa una fuente de desperdicios.

En base a lo expuesto por (Arango, M., Gil, H. & Zapata, J., 2009), quienes desarrollaron un estudio sobre la aplicación de *Lean Logistics* al transporte en el sector minero, existen cuatro elementos necesarios para adoptar esta metodología en dichas actividades.

Flexibilidad

Este elemento está directamente relacionado con el grado de incertidumbre en la demanda de los clientes. Estas fluctuaciones ocasionalmente son complejas de contrarrestar, por este motivo se requiere establecer una estrategia que permita adaptar los recursos de la empresa a los nuevos requerimientos en la demanda para satisfacer al cliente, reduciendo los costos totales.

Comunicación

La comunicación en las actividades de transporte es muy importante porque permite el manejo de información relevante respecto a mercaderías, vehículos y condiciones de las vías de transporte, entre otros. Por lo tanto, es necesario que se empleen medios de comunicación efectivos que permitan transmitir información de manera rápida y oportuna, y que sirvan para coordinar la ejecución de las tareas diarias.

Relación con transportistas

Los transportistas cumplen un rol fundamental en el transporte de mercaderías, por este motivo deben ser considerados como un aliado estratégico con quienes se desarrollen relaciones duraderas y de confianza. En consecuencia, las condiciones del servicio deben ser negociadas y definidas para asegurar que las entregas sean económicas y seguras. De este modo, por medio de la colaboración y la unión de esfuerzos se podrán alcanzar los objetivos planteados.

Optimización de rutas y operaciones

El último elemento está estrechamente vinculado con la eficiencia de las actividades de transporte, las cuales se desarrollan bajo ciertas restricciones asociadas con las dimensiones y capacidad de carga de los vehículos, las vías de transporte y las ventanas horarias. En este aspecto, la implementación de métodos que faciliten la asignación de recursos permite incrementar el grado de utilización de los activos y con ello el desempeño de estas operaciones.

La tecnología en las actividades de transporte

Al desarrollar un sistema de transporte basado en los conceptos de *Lean Thinking* la tecnología se convierte en un factor trascendental debido a que proporciona diversas herramientas que contribuyen a mejorar las operaciones de transporte. Entre los beneficios más resaltantes estos permiten mejorar la planificación de los recursos, el control de las operaciones, la evaluación de costos y fletes de transporte, y la medición y control de indicadores (KPI – *Key Performance Indicator*) a través de reportes y estadísticas.

1.2. Modelos matemáticos de Investigación de Operaciones

En la presente sección se muestran algunos modelos matemáticos, los cuales son representaciones matemáticas de situaciones reales que pueden ser utilizados en la toma de decisiones (Winston, 2005). Estos modelos son aplicables en diversos campos de estudio en donde el objetivo principal consiste en mejorar la eficiencia y la productividad en las operaciones, considerando las limitaciones que existen en el uso de los recursos disponibles.

Teniendo en cuenta que la Investigación de Operaciones abarca una gran cantidad de técnicas y diversos tipos de modelos, se presenta a continuación algunas formulaciones matemáticas de programación lineal que se desarrollan en actividades de producción y transporte, en donde predomina el uso de variables binarias.

1.2.1. Modelos de programación de vehículos

El problema de programación de buses (BSP)

El Problema de Programación de Buses (BSP – *Bus Scheduling Problem*) consiste en asignar la menor cantidad de buses a un conjunto de viajes programados de tal manera que cada una de las unidades de transporte realice una secuencia de viajes factible, garantizando la atención de todos los trayectos al menor costo. Este problema consta de n viajes programados, los cuales se encuentran definidos por una estación de partida s_i , una estación de llegada e_i , un tiempo de partida d_i y un tiempo de llegada a_i . Asimismo, existe el tiempo de recorrido $t_{u,v}$ que representa la duración del traslado del bus desde la estación u hacia la estación v . Finalmente, se define la relación de compatibilidad $i \alpha j$ que indica la posibilidad de continuar con el viaje j inmediatamente después del viaje i si se cumple $a_i + t_{e_i, s_j} \leq d_j$. En otras palabras, permite saber si una unidad de transporte se encuentra disponible en una determinada estación y en un momento determinado. La modelación que se presenta

a continuación corresponde a la formulación de (Saha, 1970), ligera variación de la formulación del problema de descomposición mínima de Dantzig y Hoffman.

De esta manera, se logra formular el siguiente modelo matemático.

$$\max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n c_{ij} x_{ij} \quad (\text{A.1})$$

$$\text{s. a. } \sum_{j=1}^n x_{ij} + \lambda_{i0} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{A.2})$$

$$\sum_{i=1}^n x_{ij} + \lambda_{0j} = 1 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{A.3})$$

$$x_{ij} \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n)$$

$$\lambda_{i0} \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

$$\lambda_{0j} \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

$$\text{con } c_{ij} = 1 \quad \text{si } i \neq j, \quad \text{caso contrario } c_{ij} = -\infty$$

La función objetivo planteada en (A.1) permite maximizar la utilización de las unidades de transporte, de tal manera que cada bus pueda cubrir la mayor cantidad de viajes, respetando el coeficiente de compatibilidad c_{ij} . Seguidamente, las restricciones (A.2) y (A.3) permiten generar la secuencia de viajes para cada unidad de transporte. Además, dado que estas restricciones presentan cotas superiores iguales a 1, se puede definir que las variables de decisión x_{ij} son binarias y representan la opción de que un bus realice el viaje j luego del viaje i . Por otra parte, existen las variables auxiliares λ_{i0} y λ_{0j} , también binarias, que indican si el i -ésimo viaje será el último de un trayecto y si el j -ésimo será el primero de otro trayecto. Finalmente, el mínimo número de buses necesarios para poder atender a los n viajes queda determinado por $\sum_{i=1}^n \lambda_{i0}$ o $\sum_{j=1}^n \lambda_{0j}$.

1.2.2. Modelos de ruteo de vehículos

El problema de los m agentes viajeros (m-TSP)

Este problema se define como la versión general del Problema del Agente Viajero (TSP - *Travelling Salesman Problem*). El propósito planteado en este modelo consiste en determinar la ruta que debe efectuar cada uno de los m vehículos, de tal manera que cada uno de los n clientes sea visitado una vez por alguna de las unidades. Para ello cada una de las m rutas puede abarcar como máximo a p clientes y debe iniciar y culminar su recorrido en un único depósito.

Por lo tanto, el problema puede ser formulado de la siguiente manera.

$$\min \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, i \neq j}^n c_{ij} x_{ij} \quad (\text{B.1})$$

$$\text{s. a. } \sum_{j=1}^n x_{ij} = m \quad (i = 0; j = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{B.2})$$

$$\sum_{i=1, i \neq j}^n x_{ij} = 1 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{B.3})$$

$$\sum_{j=1, i \neq j}^n x_{ij} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{B.4})$$

$$u_i - u_j + p x_{ij} \leq p - 1 \quad (i \neq j; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{B.5})$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (i \neq j; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n)$$

$$u_i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

Este modelo matemático cuenta con las variables de decisión binarias x_{ij} que determinan los arcos activos en la solución del problema, estableciendo la función objetivo (B.1) para minimizar los costos de los arcos a seleccionar. Asimismo, la restricción (B.2) permite que se formen cada una de las m rutas, mientras que las restricciones (B.3) y (B.4) aseguran que cada nodo sea visitado una vez. Por último, la restricción (B.5), propuesta por (Miller, Tucker & Zemlin, 1960), evita que se formen los sub-tours o bucles mediante las variables u_i y u_j , que representan el orden en el que serán visitados los puntos que determinan un arco.

El problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea (FSMVRP)

El problema de ruteo de vehículos con flota heterogénea (FSMVRP – *Fleet Size and Mix Vehicle Routing Problem*) es una extensión del problema base en el cual se dispone de t tipos de vehículos, que cuentan con capacidades, costos y tiempos de recorrido distintos. De este modo, el objetivo consiste en componer la flota de unidades de transporte requeridas para elaborar rutas que permitan atender a cada uno de los n puntos de interés.

Es así que este problema puede ser formulado de esta manera.

$$\min \sum_{k=1}^t \sum_{i=0}^0 \sum_{j=0, i \neq j}^n f^k x_{ij}^k + \sum_{k=1}^t \sum_{i=0}^n \sum_{j=0, i \neq j}^n c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (\text{C.1})$$

$$\text{s. a. } \sum_{i=0, i \neq j}^n x_{ij}^k = 1 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{C.2})$$

$$\sum_{j=1, i \neq j}^n x_{ij}^k - \sum_{j=1, i \neq j}^n x_{ji}^k = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, t) \quad (\text{C.3})$$

$$r_0 = 0 \quad (C.4)$$

$$r_j - r_i \geq (d_j + q^t) \sum_{k=1}^t x_{ij}^k - q^t \quad (i \neq j; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n) \quad (C.5)$$

$$r_j \leq \sum_{k=1}^t \sum_{i=1, i \neq j}^n q^k x_{ij}^k \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (C.6)$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad (i \neq j; i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, t)$$

$$r_j \geq 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

Este problema plantea variables de decisión binarias de tres índices x_{ij}^k , las cuales representan la decisión de cubrir el arco que va desde i hacia j con un vehículo del tipo k . Para lograr esto se define la función objetivo (C.1) con la intención de minimizar los costos fijos f^k de utilizar un vehículo y los costos variables c_{ij} de tomar un determinado arco. En cuanto a las restricciones de este modelo, (C.2) permite que los puntos de interés sean atendidos una vez, en tanto (C.3) asegura la continuidad de los recorridos de cada tipo de vehículo a través de los distintos nodos. Luego, la restricción (C.4) asigna el valor 0 a la variable r_0 y (C.5) condiciona el modelo para evitar que se generen bucles en la solución. Finalmente, la restricción (C.6) permite que las capacidades de los vehículos q^k no sean superadas, para lo cual se requiere tener los tipos de vehículos ordenados de manera ascendente¹. Para complementar el modelo puede definirse la restricción (C.7) cuando exista la disponibilidad de unidades v_k para cada tipo de vehículo.

$$\sum_{j=1}^n x_{0j}^k \leq v_k \quad (k = 1, 2, \dots, t) \quad (C.7)$$

El problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW)

Al momento de considerar la variable tiempo en esta familia de problemas se obtiene el denominado problema de ruteo de vehículos con ventanas de tiempo (VRPTW – *Vehicle Routing Problem with Time Window*). En esta variante del problema existe un rango de tiempo $[a_i, b_i]$ en el cual cada cliente i debe ser visitado y un tiempo de servicio s_i . De este modo, el objetivo se basa en determinar las rutas a emplear para atender a cada cliente, cumpliendo con sus horarios de atención y mediante el uso

¹ Esto quiere decir que para el conjunto de tipos de vehículos $K = \{1, \dots, k_m, k_{m+1}, \dots, t\}$ debe cumplirse que $q^{k_m} \leq q^{k_{m+1}}$ para cada elemento perteneciente a este conjunto.

de la flota compuesta por m unidades. Además, se define el nodo 0 como el depósito central y $n + 1$ como una copia del mismo para asegurar el retorno del vehículo.

Entonces, el problema se representa de la siguiente manera.

$$\min \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^{n+1} \sum_{j=0, i \neq j}^{n+1} c_{ij}^k x_{ij}^k \quad (\text{D.1})$$

$$s. a. \sum_{k=1}^m \sum_{i=0, i \neq j}^n x_{ij}^k = 1 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{D.2})$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0j}^k = 1 \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{D.3})$$

$$\sum_{j=1, i \neq j}^{n+1} x_{ij}^k - \sum_{j=1, i \neq j}^{n+1} x_{ji}^k = 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{D.4})$$

$$\sum_{i=1}^n d_i \sum_{j=0, i \neq j}^{n+1} x_{ij}^k \leq q^k \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{D.5})$$

$$y_j^k - y_i^k \geq s_i + t_{ij}^k - M(1 - x_{ij}^k) \quad (i \neq j; i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (\text{D.6})$$

$$a_i \leq y_i^k \leq b_i \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{D.7})$$

$$x_{ij}^k \in \{0,1\} \quad (i \neq j; i = 0, 1, \dots, n+1; j = 0, 1, \dots, n+1; k = 1, 2, \dots, m)$$

$$y_i^k \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m)$$

En esta representación del problema se tiene las variables de decisión binarias x_{ij}^k , que indican si el camino que conecta el punto i con el punto j será cubierto por el vehículo k . Asimismo, la función objetivo (D.1) busca minimizar los costos de operación. Por su parte, la restricción (D.2) establece la atención de cada uno de los clientes; mientras que, las restricciones (D.3) y (D.4) posibilitan que cada vehículo sea capaz de recorrer una trayectoria continua desde 0 hasta $n + 1$; y, la restricción (D.5) permite que se respete la capacidad de carga de los vehículos.

Por otra parte, el modelo contiene restricciones de tiempo para lo cual se define y_i^k como el tiempo de llegada del vehículo k al cliente i y t_{ij}^k como el tiempo que tarde el vehículo k en trasladarse desde i a j . De este modo, la restricción (D.6) establece el orden temporal de llegada, de manera que el tiempo de arribo al nodo j sea posterior al tiempo de llegada al nodo i , lo cual es equivalente a la expresión $y_j \geq y_i + s_i + t_{ij}^k$. Además, esta restricción evita la generación de sub-tours y considera una variable auxiliar M lo suficientemente grande en su formulación. Por último, la restricción (D.7)

define que el tiempo de llegada a cada uno de los clientes se encuentre dentro de la ventana horaria correspondiente.

1.2.3. Modelos de programación de horarios de trabajo

El problema de programación de horarios de trabajo fijo (FJSP)

Este problema es conocido como (FJSP – *Fixed Job Schedule Problem*) y es un caso particular del problema de programación de intervalos (ISP - *Interval Scheduling Problem*) en donde el tiempo de inicio de los trabajos no puede ser postergado. Tal como explica (Eliyi, D. & Azizoglu, M., 2004), el problema consiste en programar el procesamiento de los n trabajos independientes en alguna de las m máquinas disponibles, considerando que para cada trabajo j existe un tiempo de inicio r_j , un tiempo de fin d_j y un tiempo de procesamiento p_j definido como $p_j = d_j - r_j$. Para ello se asume que los trabajos no pueden ser realizados por partes; asimismo, estos pueden ser ejecutados en cualquiera de las máquinas, las cuales son idénticas y están disponibles en todo momento del día.

Existen dos maneras de formular el presente problema según el objetivo que se quiera lograr. La primera variante se denomina como el problema de programación operacional de horarios de trabajo fijo (OFJSP – *Operational Fixed Job Scheduling Problem*) el cual busca maximizar la cantidad de trabajos concluidos por medio de la variable w_{ij} , que representa el peso de realizar el trabajo i en la máquina j . Luego se establece la secuencia $\{t_1, t_2, \dots\}$ con los tiempos r_j y d_j ordenados cronológicamente, quitando los valores duplicados. Finalmente, se divide el tiempo en varios periodos, que pueden ser de distinta duración, y se define P_k como el conjunto de trabajos que pueden efectuarse en el intervalo de tiempo $[t_k, t_{k+1}]$ con $k = 1, 2, \dots$

De este modo la formulación propuesta es la siguiente.

$$\max \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m w_{ij} x_{ij} \quad (\text{E.1})$$

$$s. a. \sum_{j=1}^m x_{ij} \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{E.2})$$

$$\sum_{i=1, i \in P_k}^n x_{ij} \leq 1 \quad (j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots) \quad (\text{E.3})$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$$

Esta modelación matemática incorpora las variables de decisión binarias x_{ij} , que indica si el trabajo j será realizado en la máquina i . De tal modo que la función

objetivo (E.1) queda definida como la maximización del beneficio obtenido. En cuanto a las restricciones, (E.2) permite que cada trabajo sea procesado únicamente por una máquina, mientras que la restricción (E.3) evita que un equipo procese más de una tarea en un intervalo de tiempo.

Por otra parte, la segunda variante representa el caso opuesto y se conoce como el problema de programación táctica de horarios de trabajo fijo (TFJSP – *Tactical Fixed Job Scheduling Problem*) en donde la meta es minimizar el costo operativo requerido en la ejecución de todos los trabajos. Para lograr esto se define el costo fijo c_j para cada una de los equipos que pueden ser utilizados en la solución.

Se detalla el problema de la siguiente manera.

$$\min \sum_{j=1}^m c_j y_j \quad (F.1)$$

$$s. a. \sum_{j=1}^m x_{ij} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (F.2)$$

$$\sum_{i=1, i \in P_k}^n x_{ij} \leq 1 \quad (j = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots) \quad (F.3)$$

$$x_{ij} \leq y_j \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m) \quad (F.4)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\} \quad (i = 1, 2, \dots, n; j = 1, 2, \dots, m)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

Esta segunda variante del problema incluye ligeros cambios en la modelación con relación a la primera. En ella se necesita variables de decisión binarias y_j , para conocer si la máquina j será parte de la solución, se establece la función objetivo (F.1) para minimizar los costos operativos y se agrega la restricción (F.4) para prevenir que un trabajo sea asignado a una máquina que no conforme la solución.

Las dos variantes del problema que se han presentado muestran el caso general; no obstante, existen otras modificaciones que pueden ser incluidas como la asignación de un tiempo máximo de operación a cada máquina, imponer el rango de tiempo en el cual un equipo esté en funcionamiento, entre otros.

El problema de programación de máquinas paralelas con tiempos de preparación (PMSPS)

El problema de programación de máquinas paralelas con tiempos de preparación (PMSPS – *Parallel Machine Scheduling Problem with Setups*) tiene como finalidad la asignación y secuenciación de n trabajos mediante la utilización de m máquinas, de

tal manera que el tiempo total de procesamiento sea el mínimo necesario. Para lograr esto, se definen p_{ij} como el tiempo que tarda la máquina i en procesar el trabajo j , y s_{ijk} como el tiempo de preparación del equipo i para procesar el trabajo k luego de concluir el trabajo j . Adicionalmente, los tiempos de preparación deben cumplir con el triángulo de desigualdad $s_{ijk} \leq s_{ijl} + s_{ilk}$, el cual establece que los ajustes de los equipos sean realizados de manera directa sin pasar por arreglos intermedios.

De esta manera se define la siguiente modelación matemática:

$$\min C_{max} \quad (G.1)$$

$$s. a. \sum_{j=0, j \neq k}^n \sum_{i=1}^m x_{ijk} = 1 \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (G.2)$$

$$\sum_{k=0, k \neq j}^n \sum_{i=1}^m x_{ijk} = 1 \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (G.3)$$

$$\sum_{k=0, k \neq j}^n x_{ijk} - \sum_{h=0, h \neq j}^n x_{ihj} = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m) \quad (G.4)$$

$$\sum_{j=1}^n x_{i0j} \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (G.5)$$

$$C_k - C_j + V(1 - x_{ijk}) \geq s_{ijk} + p_{ik} \quad (j \neq k; j = 0, \dots, n; k = 1, \dots, n; i = 1, \dots, m) \quad (G.6)$$

$$C_0 = 0 \quad (G.7)$$

$$\sum_{j=0, j \neq k}^n \sum_{k=1}^n (s_{ijk} + p_{ik}) x_{ijk} = O_i \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (G.8)$$

$$O_i \leq C_{max} \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (G.9)$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad (i \neq j; i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, n)$$

La presente formulación matemática emplea variables de decisión binarias x_{ijk} que indican si la máquina i debe ejecutar el trabajo j antes que el trabajo k . De este modo, las restricciones (G.2) y (G.3) establecen que para cada trabajo exista una única actividad predecesora y una sucesora, mientras que la restricción (G.4) asegura que la secuenciación de tareas se realice en la misma máquina. Por su parte, la expresión (G.5) garantiza que solo un trabajo pueda ser asignado al inicio en cada equipo.

Adicionalmente, se deben definir las variables auxiliares C_j , que representa el tiempo en el cual el trabajo j es completado, y O_i , que toma el valor en el cual la máquina i culmina su última tarea. En relación a ello, la restricción (G.6) asegura que la secuencia de trabajos en una máquina sea factible, evitando la sobreposición

temporal de tareas por medio de un valor lo suficientemente grande para la variable auxiliar V . Por último, la restricción (G.7) asigna el tiempo cero al trabajo ficticio inicial 0, mientras (G.8) determina el momento en el cual cada máquina culmina su último trabajo asignado, lo cual le permite a (G.9) obtener el tiempo total de procesamiento designado como C_{max} , el cual se busca minimizar en la función objetivo (G.1).

1.2.4. El problema de entrega de concreto

El problema de entrega de concreto (CDP – *Concrete Delivery Problem*) combina los problemas de programación y ruteo de vehículos para aplicarlos en las actividades de distribución del concreto premezclado desde los puntos de abastecimiento hacia las diversas obras de construcción que solicitan este producto.

Para ello se dispone de una flota de m camiones mezcladores, en donde cada vehículo k cuenta con una capacidad de carga q_k y un tiempo de descarga del producto p_k . Estas unidades de transporte inician el día en un depósito inicial 0 desde donde parten con dirección hacia una de las p plantas de producción de cemento con capacidad infinita en donde se realiza la carga del producto. Luego, los camiones se dirigen hacia el cliente c , el cual cuenta con una demanda q_c y una ventana horaria $[a_c, b_c]$ dentro de la cual se deberá atender su respectivo requerimiento. Una vez culminada la entrega del producto, cada camión deberá repetir el procedimiento de carga y distribución para aprovisionar al siguiente cliente. De esta manera, se define t_{ij} como el tiempo que demora un vehículo en cargar y trasladar el producto desde la locación i hacia j . Finalmente, al término de la jornada, todos los camiones mezcladores son guardados en el depósito central final $n + 1$.

Por otra parte, considerando que el cemento premezclado es un producto perecible, se debe contemplar algunas particularidades en la formulación del problema. En primer lugar, el material debe ser entregado antes de que se endurezca y pierda sus propiedades. En segundo lugar, los camiones deben ser cargados a su máxima capacidad para prolongar el tiempo de endurecimiento del concreto dentro del barril, lo cual origina pérdidas en el punto de entrega cuando la demanda del cliente sea menor a la capacidad del vehículo. Finalmente, en la mayoría de los casos se debe realizar más de una entrega por cliente para satisfacer sus requerimientos, en estos casos los despachos no pueden efectuarse al mismo tiempo ni tampoco pueden exceder el tiempo máximo de retraso entre entregas y para garantizar una correcta unión entre las capas de concreto.

A continuación, se muestra la formulación presentada por (Kinable, J., Wauters, T. & Vander Berghe, G., 2013), quienes consideran una versión básica del problema bajo el enfoque de maximización de clientes atendidos, para lo cual debe cumplirse que al menos q_c toneladas hayan sido entregadas al cliente c . Asimismo, es necesario mencionar que esta modelación omite las visitas a las plantas de producción y en su lugar adiciona el tiempo de traslado y carga del camión a t_{ij} . Por otra parte, esta representación no abarca la posibilidad que un vehículo realice más de una entrega a un mismo cliente. Es así que los autores presentan esta formulación como CDP1, la cual consiste de dos partes denominadas como: CDP-Route y CDP-Schedule.

CDP-Route

$$\max \sum_{i=1}^n q_i y_i \quad (\text{H.1})$$

$$s. a. \sum_{k=1}^m \sum_{j=1, i \neq j}^n q_k x_{ijk} \geq q_i y_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{H.2})$$

$$\sum_{j=1}^n x_{0jk} = \sum_{i=1}^n x_{i(n+1)k} = 1 \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{H.3})$$

$$\sum_{j=1, i \neq j}^n x_{ijk} = \sum_{j=1, i \neq j}^n x_{jik} \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{H.4})$$

$$C_k^i + t_{ij} - M(1 - x_{ijk}) \leq C_k^j - p_k \quad (i \neq j; i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m) \quad (\text{H.5})$$

$$a_i + p_k \leq C_k^i \leq b_i \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{H.6})$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad (i \neq j; i = 1, \dots, n; j = 1, \dots, n; k = 1, \dots, m)$$

$$C_k^i \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m)$$

$$y_i \in \{0,1\} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

Esta modelación corresponde a un problema de programación entera mixta, el cual emplea la variable binaria x_{ijk} para indicar el desplazamiento del camión k desde el punto i hacia el punto j , mientras que la variable y_i determina si el cliente i es abastecido o no. Por otra parte, la variable entera C_k^i permite almacenar el tiempo en el que el vehículo k culmina su entrega en el punto i .

De este modo, la función objetivo (H.1) maximiza la demanda atendida. Por otro lado, la restricción (H.2) asegura el cumplimiento de las cantidades requeridas por cada cliente, en tanto las restricciones (H.3) y (H.4) garantizan la continuidad de los despachos para cada vehículo, permitiendo que estos inicien su recorrido en el

depósito de inicio, atiendan a sus clientes asignados y culminen su trayecto en el depósito final. Por último, las restricciones (H.5) y (H.6) corresponden a las restricciones temporales que evitan la sobreposición de entregas y el cumplimiento de las ventanas horarias, respectivamente.

CDP-Schedule

$$\max \sum_{i=1}^n q_i y_i \quad (1.1)$$

$$s. a. \sum_{k=1}^m \sum_{l=0, k \neq l}^m q_k z_{kl}^i \geq q_i y_i \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.2)$$

$$\sum_{l=0}^m z_{k_0 l}^i = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.3)$$

$$\sum_{l=0, k \neq l}^m z_{kl}^i - \sum_{l=0, k \neq l}^m z_{lk}^i = 0 \quad (k \neq l; k = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n) \quad (1.4)$$

$$C_k^i - M(1 - z_{kl}^i) \leq C_l^i - p_l \quad (k \neq l; k = 1, \dots, m; l = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n) \quad (1.5)$$

$$C_l^i - p_l \leq C_k^i + \gamma + M(1 - z_{kl}^i) \quad (k \neq l; k = 1, \dots, m; l = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n) \quad (1.6)$$

$$a_i + p_k \leq C_k^i \leq b_i \quad (k = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n) \quad (1.7)$$

$$z_{kl}^i \in \{0, 1\} \quad (k \neq l; k = 1, \dots, m; l = 1, \dots, m; i = 1, \dots, n)$$

$$C_k^i \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \quad (k = 1, 2, \dots, m; i = 1, 2, \dots, n)$$

$$y_i \in \{0, 1\} \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

En esta segunda parte se emplea la variable binaria z_{kl}^i para denotar si el cliente i es provisionado por el vehículo k inmediatamente antes que el vehículo l ; asimismo, se incluye un vehículo ficticio k_0 . De esta forma, la función objetivo (1.1) permite maximizar el concreto entregado, mientras que la restricción (1.2) asegura que suficiente concreto sea despachado a cada cliente. Por otra parte, las restricciones (1.3) y (1.4) permiten secuenciar los camiones de tal manera que cada unidad sea asignada como máximo a un cliente y que cada despacho cuente con una entrega predecesora y una sucesora, para lo cual k_0 será empleado. Finalmente, la restricción (1.5) evita la sobreposición temporal de las entregas, en tanto (1.6) imposibilita que el tiempo máximo de retraso entre entregas γ sea superado y la restricción (1.7) establece que la ventana horaria sea respetada.

Los autores establecen el CDP1 al eliminar las restricciones repetidas y al enlazar algunas restricciones mediante la restricción de enlace (1.8), la cual permite relacionar los politopos obtenidos en ambas partes de la formulación.

$$\sum_{l=0, k \neq l}^m z_{kl}^i = \sum_{j=1, i \neq j}^n x_{ijk} \quad (i = 1, 2, \dots, n; k = 1, 2, \dots, m) \quad (1.8)$$

1.3. El Proceso de Jerarquía Analítica

Esta parte del trabajo comprende la explicación del Proceso de Jerarquía Analítica (AHP – *Analytic Hierarchy Process*), el cual se define como una metodología que emplea múltiples criterios para la toma de decisiones. Esta herramienta fue diseñada y presentada por Thomas Saaty en 1980 y desde la fecha ha sido aplicada en diversas áreas de interés gracias a su capacidad para estructurar problemas de gran complejidad de manera jerárquica.

El Proceso de Jerarquía Analítica se basa en la comparación de los diversos elementos en estudio para determinar su importancia respecto a otros elementos que se encuentran en un nivel superior, tomando en cuenta factores cualitativos y cuantitativos en la evaluación. Para lograr desarrollar este procedimiento con éxito (Canada, J., Sullivan, W. & White, J., 1997) explican el proceso en cinco etapas, las cuales serán detalladas en las siguientes líneas.

1.3.1. Etapa I: Construcción de una jerarquía de decisión.

El primer paso consiste en descomponer el problema de decisión en una estructura jerárquica, que permita definir adecuadamente el problema por medio de los elementos que conforman cada uno de los distintos niveles establecidos. De esta manera, el nivel I comprende el objetivo general del problema, el nivel II agrupa los atributos relevantes en la consecución de la meta, el nivel III incluye los sub-atributos importantes para un atributo en el nivel superior y, así sucesivamente hasta alcanzar el nivel k en el cual se presentan las posibles alternativas de solución. Es importante destacar que cada nivel de la jerarquía debe guardar una relación lógica respecto a sus niveles adyacentes y que sus elementos deben ser independientes entre sí.

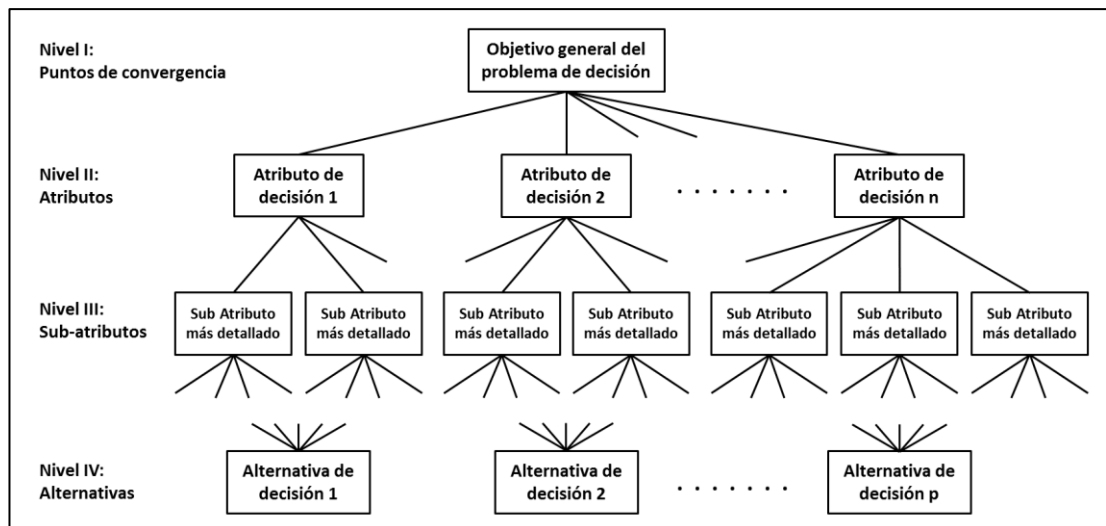


Gráfico 4: Forma estándar de jerarquías

Fuente: Canada, J., Sullivan, W. & White, J. (1997)

1.3.2. Etapa II: Determinación de la importancia relativa entre atributos y sub-atributos.

El siguiente paso es determinar las prioridades entre atributos y sub-atributos en cada uno de los niveles, mediante la comparación pareada de un grupo de elementos respecto a otro elemento, que pertenece al nivel inmediato superior. Para definir estos valores se emplea la opinión de expertos, quienes se encargan de evaluar qué tan importante es un elemento respecto a otro según la Tabla 1, con la opción de considerar los números pares cuando el juicio lo amerite. Por este motivo, es de gran importancia que la persona encargada de asignar los valores conozca el proceso adecuadamente y que tenga un buen sentido común.

Tabla 1: Escala fundamental de valores para comparación de elementos.

Si x es ... que y,	el número de preferencia a asignar es
Igualmente importante	1
Apenas más importante	3
Bastante más importante	5
Mucho más importante	7
Absolutamente más importante	9

Fuente: Canada, J., Sullivan, W. & White, J. (1997)

Seguidamente, se debe construir la matriz de comparaciones pareadas $[A]$ con los valores obtenidos en la evaluación de los expertos, en donde se cumple que para cada elemento a_{ij} que pertenece a $[A]$ le corresponde su valor inverso en la posición a_{ji} como consecuencia de la importancia relativa asignada. De este modo, el

siguiente paso es determinar el vector de prioridades, lo cual equivale a calcular el vector principal de la matriz. Este cálculo puede ser aproximado al normalizar cada columna y promediar los valores obtenidos en cada una de sus filas, tal como se puede apreciar en la Tabla 2.

Tabla 2: Matriz de comparaciones pareadas y cálculo del vector de prioridades.

	A	B	C	A	B	C	A	B	C	Σ Fila	Promedio
A	1	1/3	5	1	0.333	5	0.238	0.226	0.385	0.849	0.283
B	3	1	7	3	1	7	0.714	0.677	0.538	1.930	0.643
C	1/5	1/7	1	0.2	0.143	1	0.048	0.097	0.077	0.221	0.074
			Σ	4.2	1.476	13	1	1	1		1

Fuente: Canada, J., Sullivan, W. & White, J. (1997)

Elaboración propia

1.3.3. Etapa III: Determinación de la posición relativa de las alternativas con respecto a los atributos.

En esta etapa se realiza la comparación de las alternativas de solución respecto a cada atributo o sub-atributo con el cual exista una conexión hacia un nivel inmediato superior. Este proceso se realiza de manera similar al de la etapa II, con la opción adicional de poder utilizar resultados reales obtenidos en periodos anteriores para asignar la importancia relativa a cada una de las alternativas de solución propuestas.

1.3.4. Etapa IV: Determinación de indicadores de consistencia.

La cuarta etapa del Proceso de Jerarquía Analítica consiste en validar la consistencia en los juicios emitidos por los expertos, de tal manera que reflejen transitividad en las preferencias asignadas. Es decir, si el atributo *A* fue catalogado como dos veces más importante que *B*, y a su vez *B* como dos veces más importante que *C*; entonces podría inferirse que *A* es cuatro veces más importante que *C*. Sin embargo, es posible que esto no sea cierto dado que *A* y *C* fueron comparados sin tomar como referencia a *B*. Por este motivo la metodología incluye la medición del error de inconsistencia para cada matriz de la siguiente manera.

$$[A] \times [B] = [C] \quad (J.1)$$

$$[D] = \begin{bmatrix} \frac{c_1}{b_1} & \frac{c_2}{b_2} & \dots & \dots & \frac{c_n}{b_n} \end{bmatrix} \quad (J.2)$$

$$\lambda_{max} = \frac{d_1 + d_2 + \dots + d_n}{n} \quad (J.3)$$

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (J.4)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (J.5)$$

En la relación (J.1) se define al vector $[C]$ como el producto matricial de la matriz de comparaciones pareadas $[A]$ y el vector principal $[B]$. las cuales fueron calculadas en etapas previas. Por su parte, en (J.2) se define el vector $[D]$ como el resultado de la división escalar de los elementos contenidos en los vectores $[C]$ y $[B]$, mientras que el valor propio máximo λ_{max} es establecido en la línea (J.3) mediante el promedio aritmético de los valores pertenecientes a $[D]$. Finalmente, en (J.4) se define la varianza del error o índice de consistencia (CI) para una matriz de tamaño n y en la línea (J.5) se calcula la razón de consistencia (CR) al dividir el índice de consistencia entre el índice aleatorio (RI), el cual es definido por Saaty según el tamaño de la matriz, tal como se muestra en la Tabla 3.

Tabla 3: Valores de índice aleatorio (RI) por tamaño de matriz n .

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
RI	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45	1.49	1.51

Fuente: Canada, J., Sullivan, W. & White, J. (1997)

El valor obtenido para la razón de consistencia determina si las comparaciones que se han realizado son coherentes o no. Si dicho valor es mayor a 0.10 se deberá evaluar el problema, revisar los juicios realizados y calcular la nueva razón de consistencia. Para evitar que se genere este problema se puede establecer mediante una escala el orden de los elementos de la matriz antes de asignar los valores en las etapas II y III.

1.3.5. Etapa V: Determinación de la ponderación de prioridad general de las alternativas.

En esta última etapa se calcula el resultado global de cada una de las alternativas de solución de acuerdo con las ponderaciones obtenidas en las etapas II y III. Para hallar estos valores ponderados se realiza el siguiente cálculo.

$$Evaluación\ Ponderada_k = \sum_{i=1}^n p_i \times q_{ik} \quad (k = 1, 2, \dots, m) \quad (K.1)$$

En donde p_i es el valor correspondiente al atributo i en el vector principal de ponderación de prioridades, mientras que q_{ik} representa la clasificación de la alternativa de solución k respecto al atributo i . Gráficamente esto equivale a colocar las ponderaciones en la estructura del problema y sumar los productos de las

ponderaciones en cada uno de los caminos que conduzcan a cada alternativa de solución. Por último, cabe resaltar que en aquellos casos en los cuales existen varios niveles de evaluación, será necesario incluir las ponderaciones de los sub-atributos intermedios para obtener el resultado final.

1.4. Enfoque de costos de productos conjuntos y subproductos

La correcta administración de los costos de producción es un factor importante en la toma de decisiones porque proporciona información relevante sobre el rendimiento de los recursos en las actividades de producción. Por este motivo, es fundamental conocer las características de los procesos productivos, de tal modo que estas se vean reflejadas al momento de determinar el costo de cada producto.

En algunas ocasiones los procesos productivos presentan algunos detalles que agregan cierto grado de complejidad para entender el proceso y; por consiguiente, se dificulta la manera en la cual se establecen los costos. En las siguientes líneas se detallará el tratamiento de costos para productos conjuntos y subproductos.

1.4.1. Definición de productos conjuntos y subproductos

Se denomina productos conjuntos y subproductos a aquellos productos que se obtienen simultáneamente de un mismo proceso al utilizar un conjunto de materias primas en su elaboración. Los productos conjuntos se caracterizan por tener un valor de venta elevado en comparación con los subproductos, que representan el caso contrario y que no serán profundizados en el presente trabajo. Además, existe un punto de separación en el proceso en donde cada uno de los productos conjuntos puede ser identificado individualmente para ser vendido o pasar al siguiente proceso.

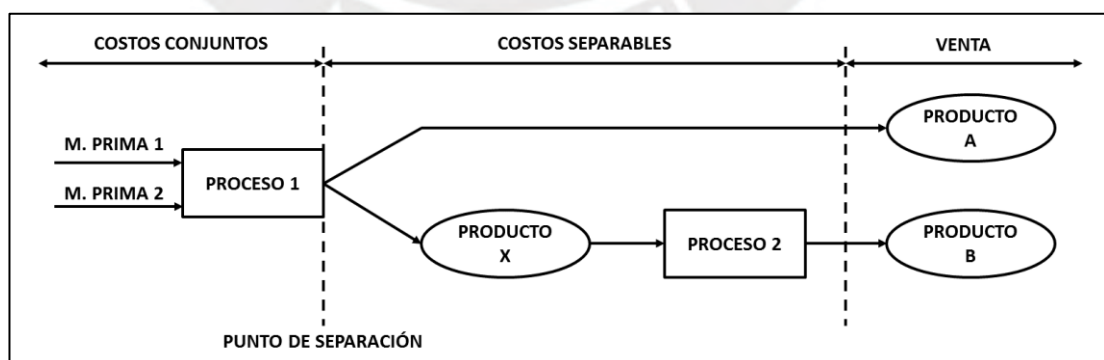


Gráfico 5: Representación gráfica de productos conjuntos y subproductos

Fuente: Horngren, C. (2012)

Elaboración propia

1.4.2. Asignación de costos a productos conjuntos

La mayor dificultad que surge al momento de determinar el costo de los productos conjuntos se debe a que el proceso que los genera incurre en costos indivisibles; es decir, no se puede identificar la porción de costos en cada uno de los productos individuales. Por este motivo, se debe aplicar un método de asignación de costos que permita distribuir los costos conjuntos a los productos individuales. Para estos fines se puede emplear una base de asignación en unidades físicas o monetarias, según las características de los productos y obtener una asignación apropiada.

La asignación de costos conjuntos ayuda a entender mejor el proceso productivo y posibilita el análisis de la utilidad de cada uno de los productos obtenidos. Al efectuar este análisis puede ocurrir que el ingreso sea menor o igual que el costo, lo cual implica que la utilidad sea negativa. Esto puede ser un indicio de que la base de asignación no ha sido la correcta; no obstante, puede haber otros factores como la fluctuación en los precios de los *commodities* o la presencia de otros costos en los procesos siguientes que reduzcan la utilidad. En estos casos es conveniente analizar los resultados considerando la producción total de manera conjunta.

1.5. Marco legal en las actividades de transporte de mercancías

En este apartado se explica la normativa legal vigente bajo la cual se desarrollan las actividades de transporte terrestre de mercancías en el Perú. Estas disposiciones legales se encuentran detalladas según el elemento transportado y las características físicas que posea; las cuales pueden requerir de un mayor cuidado, dando lugar así a reglamentos específicos con el fin de asegurar el correcto traslado de bienes.

1.5.1. Normativa legal aplicable al transporte general de mercancías

Todas las actividades de transporte terrestre dentro del territorio nacional se encuentran reguladas por medio de la Ley N°27181 y el Reglamento Nacional de Administración de Transporte, aprobado por medio del D.S.017-2009-MTC con la finalidad de establecer las condiciones técnicas, legales y operativas que deben cumplirse para realizar el servicio de transporte terrestre de manera segura.

En el presente reglamento se estipula, entre otras medidas, lo siguiente:

- El cumplimiento de los requisitos técnicos vehiculares según el Reglamento Nacional de Vehículos, aprobado mediante el D.S.058-2003-MTC.

- La obligatoriedad de contar con el Certificado de Inspección Técnica Vehicular de acuerdo al Reglamento Nacional de Inspecciones Técnicas Vehiculares, aprobado mediante el D.S.025-2008-MTC.
- La obligatoriedad de contar con el SOAT conforme a lo establecido en el Reglamento Nacional de Responsabilidad Civil y Seguros Obligatorios por Accidentes de Tránsito, aprobado mediante el D.S.024-2002-MTC.
- Las condiciones generales y específicas que debe respetar y mantener el transportista para ofrecer el servicio de transporte de mercaderías en cuanto a los requisitos del servicio, los conductores y los vehículos.
- Los términos de autorización del transportista para efectuar el servicio de transporte terrestre; y las habilitaciones vehiculares y de conductores que requiere para desarrollar el transporte acorde a la autorización otorgada.

Asimismo, en cumplimiento con la Ley N°29380 se creó la Superintendencia de Transporte Terrestre de Personas, Carga y Mercancías – SUTRAN con el objetivo de normar, fiscalizar y sancionar las actividades de transporte terrestre correspondiente al medio nacional e internacional; así como supervisar y fiscalizar el cumplimiento de la normativa de tránsito en las redes viales, el cumplimiento de las disposiciones del Reglamento Nacional de Vehículos, con énfasis en los pesos y medidas vehiculares; y las actividades complementarias vinculadas al transporte y tránsito terrestre dentro de su competencia. (D.S.033-2009-MTC; 2009)

1.5.2. Normativa legal aplicable al transporte de materiales y residuos peligrosos

En cuanto a la regulación del transporte de productos peligrosos, se ha dispuesto la Ley N°28256 y el Reglamento Nacional de Transporte de Materiales y Residuos Peligrosos, aprobado mediante el D.S.021-2008-MTC, con el objetivo de establecer las normas y procedimientos que permitan regular las actividades, procesos y operaciones del transporte terrestre de estos productos para salvaguardar la seguridad de las personas, el medio ambiente y la propiedad. En este reglamento se establecen las siguientes disposiciones:

- La clasificación de los materiales peligrosos incluidos en el reglamento.
- Los requisitos para transportar productos peligrosos, las características de los rótulos y etiquetas, y las condiciones generales de los envases y embalajes según lo dispuesto en el Libro Naranja de las Naciones Unidas.

- La obligatoriedad de contar con una póliza de seguros que permita cubrir los gastos incurridos por los daños personales, materiales y ambientales que pudiera causar la carga peligrosa como consecuencia de accidente durante el traslado de dicha mercancía.
- La elaboración de un plan de contingencia de acuerdo a la Ley N°28551 para el transporte de materiales y/o residuos peligrosos.
- La obligatoriedad del personal, que intervenga en la operación de transporte de productos peligrosos, de contar con una capacitación básica acerca del manejo de estos materiales y la aplicación del plan de contingencia.
- Las autorizaciones e inscripción obligatoria para habilitar al transportista para brindar el servicio de transporte de materiales y/o residuos peligrosos, y la disposición de los requisitos y la documentación pertinente al caso.
- La acreditación del vehículo para el transporte de productos peligrosos mediante el certificado de habilitación vehicular especial y la descripción de los requerimientos necesarios para obtenerla.
- La exigencia a los conductores de contar con la licencia de conducir de categoría especial y la definición de los requisitos para obtenerla.
- La documentación requerida durante la conducción de los vehículos que transporten productos peligrosos.
- La obligatoriedad de contar con dispositivos que permitan el monitoreo y comunicación del vehículo en ruta con la base del transportista.
- La facultad del Ministerio de Transportes y Comunicaciones para establecer las vías autorizadas y los horarios permitidos para el transporte de materiales y residuos peligrosos.

1.5.3. Normativa legal aplicable al transporte de insumos químicos y bienes fiscalizados

Como parte de las estrategias de seguridad y defensa nacional para combatir la elaboración y tráfico de drogas ilícitas, se promulgó el D.L.1126 y su reglamento, aprobado mediante el D.S.044-2013-EF, en los cuales se establece medidas para el registro, control y fiscalización de los bienes fiscalizados que pueden ser empleados en la elaboración de sustancias ilegales. Estas normas comprenden a todas las actividades realizadas con estos insumos desde su fabricación o ingreso al territorio nacional, hasta su destino final, incluido el transporte de estos productos.

La principal medida publicada en estas normas consiste en la creación del Registro para el Control de Bienes Fiscalizados, en donde se detalla toda la información

vinculada a estos productos, los usuarios y las actividades que estos realizan. De la misma manera, se establecen otras medidas, las cuales se enuncian a continuación:

- La especificación de los insumos químicos y productos fiscalizados que son controlados por esta norma, según el listado aprobado mediante el D.S.268-2019-EF.
- La obligatoriedad de los usuarios de registrar las operaciones realizadas en el día, lo cual incluye ingresos, egresos, producción, consumos, transporte y almacenamiento de estos bienes; asimismo, la obligatoriedad de informar sobre pérdidas, robos, derrames, excedentes y desmedros.
- La facultad otorgada a la SUNAT para inspeccionar el uso de productos fiscalizados con la posible intervención de Policía Nacional del Perú y el Ministerio Público.
- Los requisitos que deben cumplir los transportistas para realizar el servicio de transporte de estos productos, así como la relación de documentos asociados a su razón social y, los vehículos y conductores que realizarán el servicio para su inscripción en el Registro para el Control de Bienes Fiscalizados.
- La obligación de sustentar el traslado del producto fiscalizado por medio de una guía de remisión, la cual debe ser portada por el transportista durante el desplazamiento de la mercadería.
- El establecimiento de rutas fiscales y puestos de control para supervisar el transporte de estos productos.
- La obligatoriedad del uso del Sistema de Posicionamiento Global – GPS en los vehículos que transporten bienes fiscalizados.

Por otra parte, a través de la Resolución de Superintendencia 271-2013/SUNAT, se aprobó el Sistema de Emisión Electrónica de la Guía de Remisión Electrónica para Bienes Fiscalizados como un mecanismo que permite la emisión de dicho documento y; además, permite a la SUNAT almacenar, archivar y conservar esta documentación para sus actividades de control y fiscalización. Adicionalmente, en esta resolución se especifica la responsabilidad de consignar una guía de remisión del remitente y otra del transportista para sustentar el traslado de estos productos cuando el movimiento se realice por medio de un servicio de transporte. Por último, se aprobó mediante la Resolución de Superintendencia 028-2017/SUNAT que los usuarios, que trasladen bienes fiscalizados hacia, desde o dentro del Departamento de Lima y la Provincia Constitucional del Callao, sean designados como emisores de la guía de remisión electrónica para bienes fiscalizados a partir del 1 de marzo del 2017.

CAPÍTULO 2. CASOS DE ESTUDIO

En este capítulo se detallan tres casos de estudio en los cuales se aplican algunas herramientas de Investigación de Operaciones y la filosofía *Lean Manufacturing* para mejorar los procesos logísticos en diversos sectores productivos. A través de estas propuestas se busca obtener un impacto positivo en los índices de eficiencia, estableciendo métodos que permitan mejorar la asignación de recursos, reducir los costos totales y disminuir los tiempos de operación.

2.1. A Heuristic Approach for Vehicle Scheduling Problem with Time and Capacity Constraints

Fuente: Masoud, M., Lee, S. & Belkasim S. (2016)

El concreto premezclado es uno de los productos más importantes para el desarrollo del sector construcción. En un estudio realizado en el año 2014 se estimó que los ingresos generados por esta mercancía en los Estados Unidos alcanzaron los 30 mil millones de dólares. Además, se calculó que existen aproximadamente 5,500 plantas de concreto premezclado y 65,292 camiones mezcladores para la distribución de este material (NRMCA – *National Ready Mixed Concrete Association*, 2014; citado por Masoud, M., Lee, S. & Belkasim S., 2016).

La dificultad que se busca resolver en este caso de estudio consiste en determinar la mejor asignación de unidades para distribuir el concreto premezclado desde un único depósito, en donde se elabora la mezcla, hacia los puntos de entrega de los clientes, cumpliendo con las restricciones de tiempo y capacidad. Para ello se dispone de una flota homogénea de camiones que realizan el ciclo de entrega, que consiste en la carga, transporte y descarga del producto, y el viaje de regreso al depósito central.

Para lograr este objetivo los autores proponen un algoritmo denominado *Priority Algorithm*, el cual busca maximizar el número de localidades atendidas, minimizando el número de camiones asignados y el tiempo de espera en el depósito. De este modo se intenta conseguir una buena aproximación de la solución óptima del problema en un menor tiempo de respuesta.

La información que se utiliza para ejecutar el algoritmo está basada en datos reales que corresponden a estudios anteriores. Con ello se establecen tres instancias con diferentes parámetros de entrada, los cuales se muestran en la Tabla 4. Cada escenario representa un nivel de complejidad distinto del problema, lo cual es útil para el análisis de resultados y la evaluación del desempeño de esta propuesta.

Tabla 4: Parámetros de entrada para cada escenario.

Parámetro	Instancia 1	Instancia 2	Instancia 3	Unidad
Número de sitios	3	5	9	-
Demanda del sitio	30,40,10	50*	50	m ³
Tiempo de fraguado del concreto	90	90	90	min
Capacidad del camión	10	10	10	m ³
Productividad del depósito	60	60	90	m ³ /h
Velocidad del camión	60	60	60	Km/h
Distancia del sitio	40,10,5	25,20,15,10,5	25,25,20,20,15,15,10,5,5	Km

* Para las instancias 2 y 3 la cantidad representa la demanda en cada sitio.

Fuente: Masoud, M., Lee, S. & Belkasim S. (2016)

La solución óptima que plantea el algoritmo indica que el número de camiones requeridos para satisfacer a los clientes en cada escenario son cuatro, cinco y nueve, respectivamente. Asimismo, el tiempo total de espera en el depósito es de diez minutos en el primer caso y cuarenta en el segundo. En el Gráfico 6 se muestra la programación de entregas para el primer escenario.

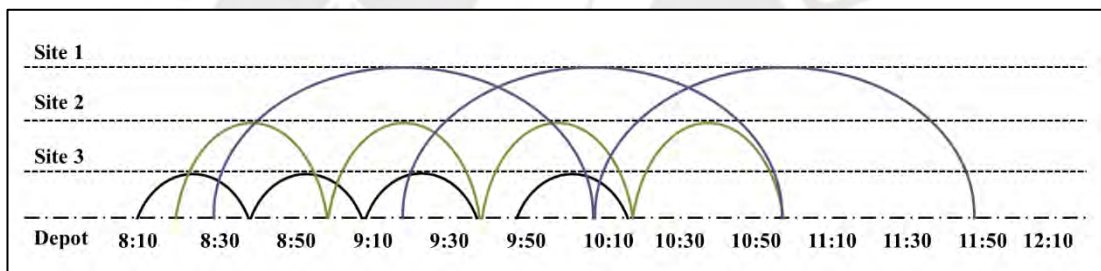


Gráfico 6: Resultados obtenidos para el primer escenario.

Fuente: Masoud, M., Lee, S. & Belkasim S. (2016)

A partir de los resultados obtenidos se demuestra que el algoritmo propuesto tiene la capacidad de crear soluciones factibles en cada uno de los escenarios. Además, el tiempo promedio de ejecución para el caso más complejo es de 2.036 segundos, lo cual comprueba la rapidez que posee para obtener las soluciones. Finalmente, los autores mencionan que este algoritmo puede ser aplicado en otros problemas que correspondan al ruteo y programación de vehículos.

2.2. A MILP Model for Truck-Shovel Scheduling to Minimize Fuel Consumption

Fuente: Bajany, D.M., Xia, X. & Zhang, L. (2017)

En este caso de estudio se presenta un modelo de optimización para reducir el consumo de combustible en una mina a cielo abierto. En estudios preliminares se ha

estimado que las actividades relacionadas al transporte de material representan aproximadamente el 60% del costo total en este tipo de minas; además, el 32% de la energía utilizada corresponde a las operaciones de acarreo de material.

En este sentido, los autores plantean un modelo de programación lineal entera mixta (MILP – *Mix Integer Linear Problem*) a través del cual se satisface la demanda en cada uno de los puntos de descarga, optimizando la selección de rutas y minimizando el consumo de combustible de camiones y palas excavadoras. Adicionalmente, este modelo contempla las especificaciones técnicas de las máquinas utilizadas, con ello la formulación puede ser aplicada para flotas homogéneas y heterogéneas.

Las operaciones de acarreo de material en una mina a cielo abierto tienen como finalidad el abastecimiento de los puntos de volcado o descarga con el material obtenido en los puntos de extracción o carga. Para ello se dispone de un conjunto de palas excavadoras, las cuales realizan la carga de los camiones en cada zona de extracción. De este modo, los camiones de acarreo pueden trasladar el material hacia las zonas de volcado y así cumplir con los requerimientos de producción.

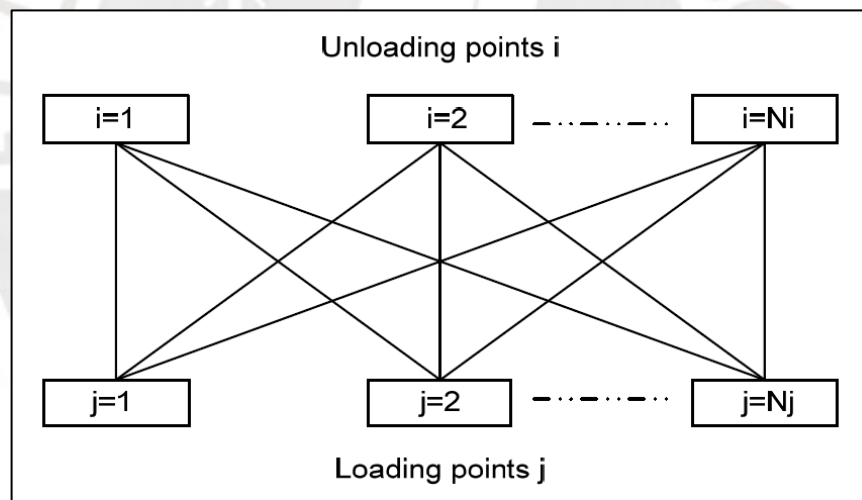


Gráfico 7: Esquema del problema de asignación de camiones y excavadoras.

Fuente: Bajany, D.M., Xia, X. & Zhang, L. (2017)

El modelo de optimización que se propone es ejecutado bajo un caso hipotético, el cual consta de dos puntos de descarga y tres puntos de carga. Asimismo, se dispone de una flota heterogénea conformada por diez camiones que pueden ser de tres capacidades distintas: 56, 65 y 96 toneladas. Los resultados proporcionados por el modelo son comparados con aquellos que se obtienen al utilizar la estrategia de despacho fijo, la cual aún es empleada en algunas minas y que consiste en asignar cada camión a una pala excavadora durante un turno de trabajo.

Para la evaluación de resultados los autores emplean como indicador de desempeño la cantidad de litros de combustible por tonelada trasladada. Es así que al utilizar la estrategia de despacho fijo se registra un consumo de 0.1370 litros por tonelada, lo cual indica que los camiones y las palas excavadoras requieren de 5,154.15 litros de combustible para llevar a cabo un turno de trabajo de ocho horas. Por otra parte, mediante el modelo de optimización se obtiene que el consumo de combustible es de 0.1307 litros por tonelada, lo cual equivale a utilizar un total de 4,915.6 litros de combustible en las operaciones de acarreo de material.

En síntesis, la propuesta de los autores permite ahorrar 238.55 litros de combustible durante cada turno de trabajo, que representa una reducción de 4.64% en el consumo de combustible y 4.60% en el indicador de desempeño. Aparte de disminuir los costos de operación, la propuesta posibilita reducir la emisión de gases de combustión con lo cual se mejora la calidad del aire en la mina.

2.3. The Improvement of Logistic Management Using Lean and RFID Technology

Fuente: Kravenkit, S. & Arch-int, S. (2013)

Establecer una gestión logística eficiente es una ventaja competitiva dentro del sector agrícola porque permite garantizar la frescura de aquellos productos que cuentan con un corto tiempo de vida. El presente caso de estudio corresponde a la aplicación de técnicas *Lean* y la tecnología RFID (*Radio Frequency Identification*) para reducir el tiempo de las operaciones logísticas, que no agregan valor en la producción de arroz integral en un molino ubicado en Tailandia, país cuyo desarrollo económico depende de los ingresos provenientes de esta industria.

El estado actual de las operaciones logísticas en la planta es documentado a través del Mapa de Flujo de Valor (*VSM – Value Stream Mapping*), el cual se muestra en el Gráfico 8. En esta representación se observa que el tiempo total de operación es de 3,731.5 minutos y se detalla que el proceso logístico está conformado por ocho operaciones, las cuales son clasificadas en diecinueve actividades.

Luego los conceptos de *Lean Thinking* son aplicados para identificar la clase a la que corresponde cada una de las actividades. De esta manera se obtiene que cuatro de ellas agregan valor, ocho no agregan valor, pero son necesarias en el proceso y siete no agregan valor, pero pueden ser eliminadas. Además, durante el análisis se detectó que el sobreprocesamiento es la categoría de desperdicio más frecuente.

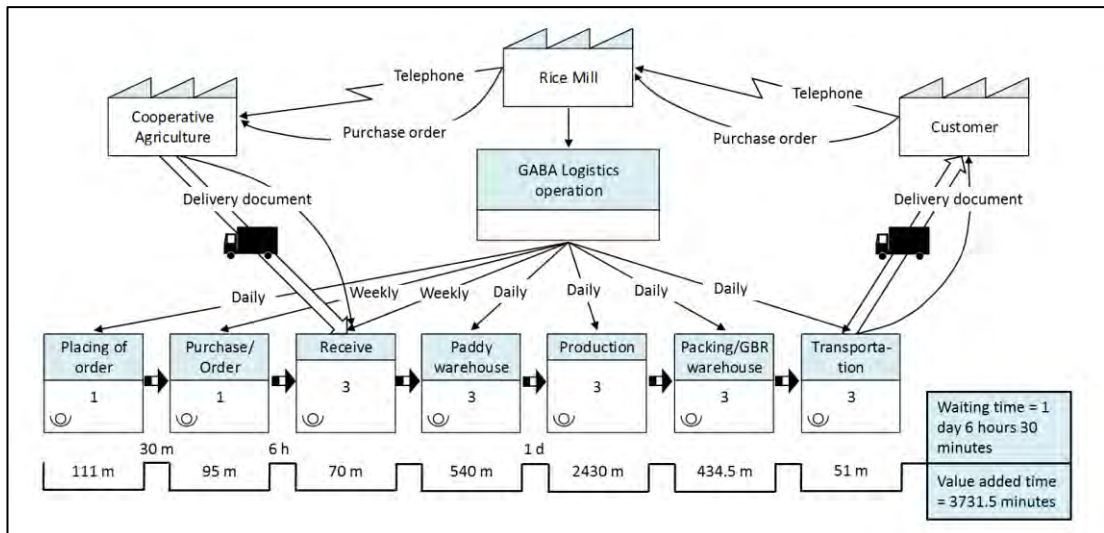


Gráfico 8: Mapa de flujo de valor – Estado actual.

Fuente: Kravenkit, S. & Arch-int, S. (2013)

Los autores proponen dos políticas con el fin de mejorar la gestión logística en la producción del arroz integral. La primera de ellas consiste en reemplazar el actual sistema de códigos de barra por un sistema RFID, el cual se basa en un conjunto de etiquetas y lectoras que posibilitan la transmisión inmediata de información. Por otra parte, la segunda política establece las condiciones que debe cumplir la materia prima que es adquirida de los proveedores para reducir el tiempo de recepción en el almacén. De este modo, se realiza el Mapa de Flujo de Valor del estado futuro.

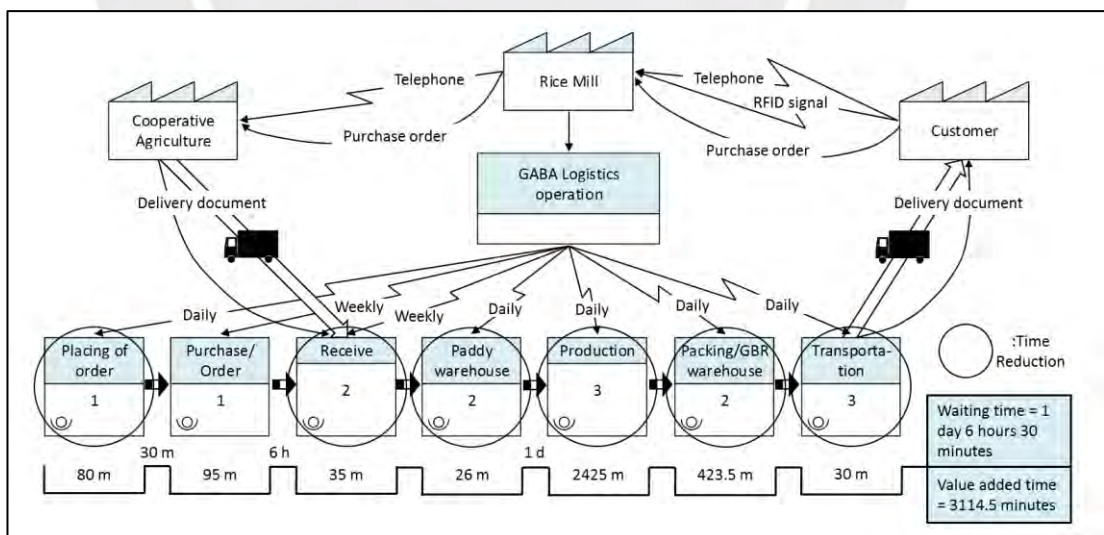


Gráfico 9: Mapa de flujo de valor – Estado futuro.

Fuente: Kravenkit, S. & Arch-int, S. (2013)

Como consecuencia de estas mejoras las actividades que conforman las operaciones sufrirían algunas modificaciones que permitirían reducir el tiempo total a 3,114.5 minutos. De esta manera, cinco de las siete actividades que no agregan valor serían eliminadas, reduciendo notoriamente el tiempo en esta categoría; no obstante, se tendrían que adicionar tres actividades necesarias que no agregan valor, tal como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5: Comparación de actividades en proceso actual vs. propuesto.

Operación de Rutina	Actual	Tiempo	Futuro	Tiempo
Agrega Valor	4	2,813.5	4	2,799.5
No Agrega Valor, pero es necesario	8	258.0	11	270.0
No Agrega Valor	7	660.0	2	45.0
Total	19	3,731.5	17	3,114.5

Fuente: Kravenkit, S. & Arch-int, S. (2013)

En conclusión, los resultados operativos de implementar estos cambios en el molino de arroz permitirían reducir el tiempo total en 16.54%. Por otro lado, el análisis económico-financiero determina que el punto de equilibrio (BEP – *Break Even Point*) de esta propuesta es alcanzado durante el tercer año, consiguiendo un retorno de inversión (ROI – *Return of Investment*) del 28.77%.

CAPÍTULO 3. DIAGNÓSTICO DE LA SITUACIÓN ACTUAL

En el presente capítulo se realiza la descripción general de la empresa desde el punto de vista institucional, operativo y comercial; seguidamente, se desarrolla el análisis de la situación actual de las operaciones de despacho de producto terminado. Por último, se detallan y cuantifican los indicadores del proceso para poder identificar los principales problemas y proponer medidas que permitan mejorar su desempeño.

3.1. Descripción general de la empresa

La empresa en la cual se desarrolla el presente estudio es una compañía de capitales peruanos que tiene como actividad principal la producción y comercialización de productos químicos básicos y sales. Actualmente, la empresa es el único productor integrado de productos químicos y sales en el país, registrando un ingreso por ventas de US\$ 234.048 millones al cierre del 2018, valor por encima en 6.91% al obtenido durante el año previo.

En el transcurso del tiempo la compañía ha mantenido relaciones comerciales con diversas empresas en Perú, Sudamérica, Centroamérica y Estados Unidos, las cuales corresponden a diversos sectores industriales como alimentos, bebidas, detergentes, minería, textil, agropecuario, tratamiento de agua, entre otros. En cuanto a los clientes locales, la empresa se desenvuelve como proveedor de las principales compañías del país. Por otro lado, en relación a los clientes en el exterior, los destinos más importantes de los productos de la compañía han sido Estados Unidos, Brasil, Chile, Colombia y Ecuador.

En el año 2016 la empresa alcanzó su máximo nivel de producción de soda cáustica y productos fosfatados, superando en 7.97% el récord registrado durante el año anterior. De esta manera, el grupo conformado por la empresa y subsidiarias ha logrado establecerse como uno de los principales productores de soda cáustica en el mundo y el principal exportador en Sudamérica.

3.1.1. Antecedentes

Los orígenes de la empresa se remontan a 1964, cuando esta fue creada como una subsidiaria de una compañía estadounidense con una capacidad de producción de 4,200 toneladas anuales de soda cáustica. Luego de once años de operaciones en el país se amplía la capacidad de producción a 32,000 toneladas de soda cáustica y entra en funcionamiento la refinería de sal con una capacidad de 66,000 toneladas

métricas. Ese mismo año la empresa es nacionalizada por el Gobierno con lo cual las acciones de la compañía pasaron a manos del Estado Peruano.

Dos décadas después, luego de superar tiempos difíciles en el país, la empresa es adquirida por los actuales accionistas como parte del proceso de privatización en 1992 y cuatro años más tarde se constituye la empresa con su razón social actual.

Con el pasar de los años la empresa incrementó su cartera de productos químicos y adquirió otras plantas productivas pertenecientes al mismo rubro, lo cual permitió incrementar la capacidad de producción. De este modo, la compañía se consolidó como el máximo productor de productos químicos y sales a nivel nacional.

Con la llegada del nuevo milenio la compañía, en busca de extender sus fronteras e incursionar en otros mercados, adquiere el control de las subsidiarias localizadas en Colombia y Ecuador en los años 2005 y 2011, respectivamente; además, en el año 2012 se establece una subsidiaria en Chile como oficina comercial. Por otra parte, se comienza a desarrollar el mayor proyecto de expansión en la historia de la compañía, el cual permitiría aumentar en 54% la capacidad de producción.

Es así que, en el año 2014, la nueva Planta de Cloro-Soda inicia sus operaciones, incrementando la capacidad de producción anual de soda cáustica en 70,000 toneladas. Posteriormente, a mediados del 2015 la nueva Planta de Productos Fosfatados comienza sus actividades de producción con una capacidad de 60,000 toneladas anuales. Como consecuencia de ello, la compañía alcanzó su máximo nivel de producción en su historia, hecho que volvió a repetirse en el año 2016.

3.1.2. Perfil empresarial y principios organizacionales

Durante los últimos años la empresa ha centralizado sus esfuerzos en mejorar los procesos productivos y administrativos. Es así que, por medio del Sistema Integrado de Gestión – SIG se ha logrado aprobar satisfactoriamente las auditorías realizadas por importantes empresas certificadoras y entidades gubernamentales. Asimismo, se han alcanzado importantes avances en cuanto a Seguridad y Salud en el Trabajo gracias a la promoción y difusión de las buenas prácticas mediante inducciones, capacitaciones, charlas y el análisis de los diversos puestos de trabajo.

Por otra parte, la compañía viene experimentando un cambio generacional en su personal, el cual se realiza de manera progresiva. Bajo este contexto, la empresa impulsa el desarrollo de los nuevos colaboradores a través de la implementación del programa *trainee* y la participación del personal en diversas capacitaciones.

Misión

“Desarrollar excelentes relaciones con nuestros clientes en los mercados locales y regionales, basados en nuestro liderazgo en costos en la costa pacífica sudamericana y apoyados por las redes de distribución que desarrollamos para nuestros productos químicos y sales.”

Visión

“Ser una empresa líder en la industria química en Sudamérica con la consolidación de nuestras operaciones, la potenciación de sinergias y el desarrollo de nuevos mercados.”

3.1.3. Estructura organizacional

El inicio de las operaciones en las nuevas plantas de producción y los diversos esfuerzos por lograr la mejora continua y la optimización de los procesos han propiciado que la empresa experimente varios cambios organizacionales en los últimos años. En consecuencia, se han generado nuevos puestos de trabajo y se han establecido nuevos roles y funciones dentro de toda la organización.

Organigrama general

La estructura organizacional de la empresa presenta varios niveles jerárquicos que benefician la toma de decisiones con relación al giro del negocio. En el Gráfico 10 se detalla el organigrama general de la empresa, el cual está conformado por la Junta General de Accionistas, el Comité de Directorio y la Plana Ejecutiva.

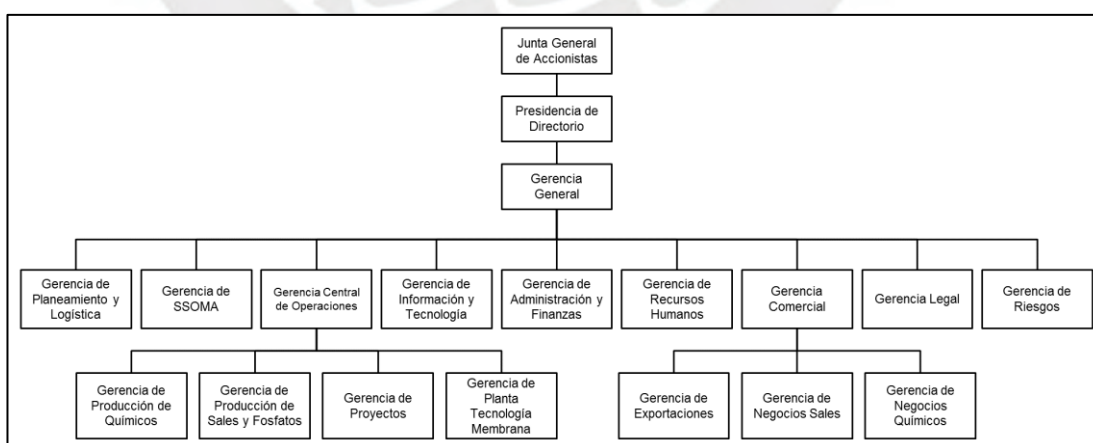


Gráfico 10: Organigrama general.

Fuente: La empresa

Elaboración propia

Organigrama del Área de Planeamiento y Logística

El presente estudio se desarrolla en el Área de Planeamiento y Logística, el cual está conformado por la Sección de Planeamiento y tres jefaturas, tal como se muestra en el Gráfico 11. Esta área es liderada por el Gerente de Planeamiento y Logística, quien tiene como función principal la dirección, supervisión y evaluación de las operaciones logísticas. Además, se encarga de coordinar los trabajos con otras áreas funcionales de la empresa para alcanzar los objetivos trazados por la Gerencia General.

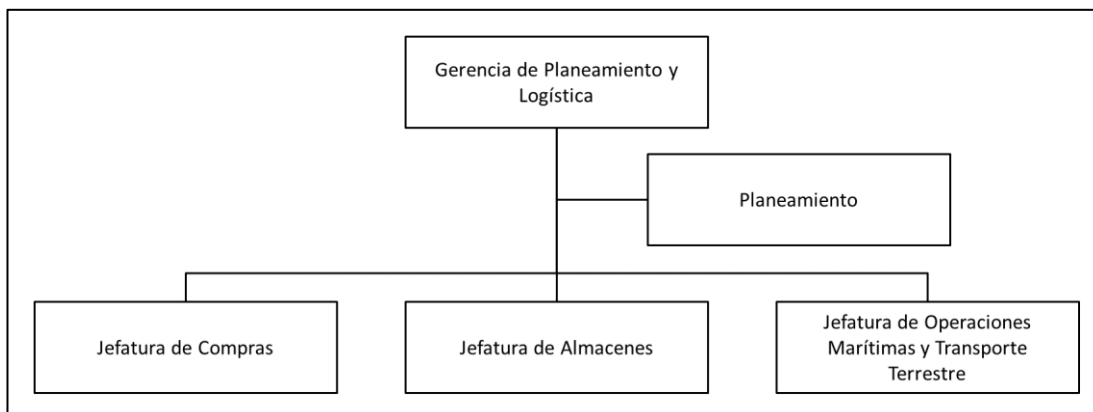


Gráfico 11: Organigrama del Área de Planeamiento y Logística

Fuente: La empresa

Elaboración propia

La Sección de Planeamiento brinda soporte a las jefaturas del área por medio de la planificación de algunas de sus actividades. En este sentido, se encarga de revisar el reabastecimiento de materiales por medio del MRP, validar los requerimientos de producción y actualizar los parámetros de planificación en el sistema. Además, elabora y proporciona reportes de gestión sobre la situación de los materiales en los almacenes, medición de indicadores y utilización del presupuesto de compras.

La Jefatura de Compras está constituida por la Jefa de Compras y su equipo de compradores, quienes tienen como principal responsabilidad el abastecimiento de materia prima, insumos, materiales consumibles, repuestos de máquinas y equipos, y la contratación de servicios. Adicionalmente, se encargan de evaluar y seleccionar a los proveedores, y de negociar las condiciones de compra.

Por su parte, la Jefatura de Almacenes se encarga de gestionar los inventarios de la empresa, haciéndose cargo de la recepción, almacenamiento y entrega de materiales consumibles y envases para la producción. Asimismo, se encarga de la distribución de materiales entre las sedes de la empresa.

Finalmente, la Jefatura de Operaciones Marítimas y Transporte Terrestre se ocupa de administrar los despachos de producto terminado y los traslados internos de materiales entre sedes. Por una parte, recibe los buques y supervisa las operaciones de carga para la exportación de soda cáustica a granel. Por otra parte, en cuanto al transporte terrestre, se encarga de coordinar y asignar las unidades de carga a los pedidos de venta, autorizar el ingreso de camiones, pesar los vehículos y emitir las guías de remisión.

3.1.4. Unidades de negocio y productos comercializados

La empresa cuenta con dos unidades de negocio. En primer lugar, la Unidad de Negocios Químicos tiene como productos principales la soda cáustica, los productos fosfatados y una variedad de productos clorados. Estos bienes son elaborados en cinco plantas de producción y se comercializan en el mercado local y en el exterior, representando así el 83.34% de los ingresos por venta de la compañía.

Por otro lado, la Unidad de Negocios Sales está conformada por dos salinas y dos refinerías de sal, en donde se fabrican tres familias de productos: Sal de Consumo Humano, Sal de Consumo Industrial y Sal de Deshielo. La mayoría de los productos están destinados al mercado local, a excepción de la sal de deshielo, que se exporta para el tratamiento de pistas y carreteras. De este modo, el 16.66% de los ingresos por ventas provienen del negocio de sales. Adicionalmente, las salinas abastecen de materia prima a las plantas químicas en Perú y la subsidiaria en Colombia.

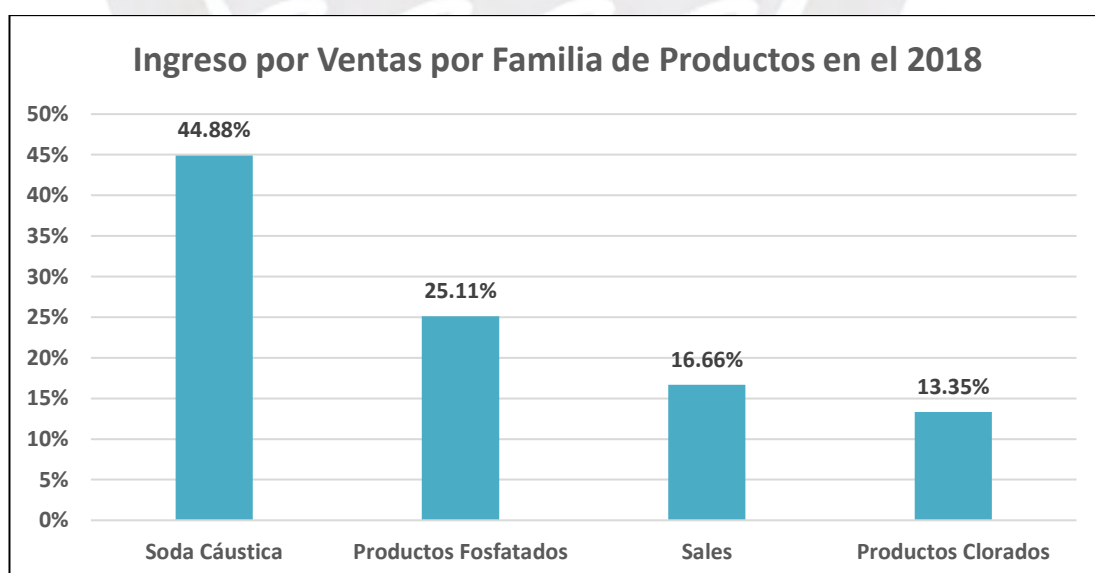


Gráfico 12: Ingreso por ventas por familia de productos en el 2018.

Fuente: La empresa

Elaboración propia

3.1.5. Plantas productivas

La compañía dispone de varias plantas de producción, que están ubicadas en la costa del país. Estas instalaciones han sido adquiridas y mejoradas con el paso del tiempo, lo cual ha permitido incrementar la capacidad de producción. En la Tabla 6 se detalla la distribución geográfica de cada una de las plantas, así como la unidad de negocio a la que pertenecen.

Tabla 6: Plantas productivas de la empresa.

Locación	Instalaciones	Unidad de Negocio
Oquendo, Callao	Planta de Cloro-Soda Oquendo I	Químicos
	Planta de Cloro-Soda Oquendo II	Químicos
	Planta de Fosfato Bicálcico	Químicos
	Planta de Productos Fosfatados	Químicos
	Refinería de Sal	Sales
Paramonga, Lima	Planta de Cloro-Soda Paramonga	Químicos
Huacho, Lima	Salinas de Huacho	Sales
	Refinería de Sal	Sales
Otuma, Ica	Salinas de Otuma	Sales

Fuente: La empresa

Elaboración propia

3.2. Análisis de la situación actual

En esta sección se presenta el análisis del contexto actual bajo el cual se desarrollan las actividades de despacho de producto terminado. Para ello se describe el proceso y se detallan las condiciones de operación relacionadas con las modalidades de despacho, las características de los productos y los recursos disponibles.

3.2.1. Proceso de ventas, despacho y cobranza

El proceso de ventas, despacho y cobranza requiere del trabajo conjunto de varias áreas de la empresa para lograr que el cliente reciba la mercadería dentro del plazo establecido y en las condiciones adecuadas. En este sentido, la descripción del proceso que se muestra a continuación se divide en tres etapas y se basa en la modalidad de despacho estándar.

Proceso de ventas

El proceso inicia cuando el cliente se contacta con el Área de Ventas para solicitar la adquisición del producto. Luego de ello, se elabora la cotización y se comunica la disponibilidad de la mercadería. De este modo, el cliente envía su orden de compra

y se ingresa el pedido de ventas en SAP, el cual debe ser liberado por Créditos y Cobranzas. Si el cliente cuenta con línea de crédito se verifica automáticamente en el sistema que este cumpla con dos requisitos: disponibilidad de crédito y que no tenga morosidad excesiva. En caso que no se cumplan ambos requisitos, se efectúa la revisión manual y se le pide al cliente que regularice su situación. Por otra parte, si el cliente no tiene línea de crédito, este tendrá que realizar el pago por adelantado, el cual se registra en el sistema por medio de un anticipo. Una vez que el pedido de ventas se encuentre liberado, este podrá ser incluido en el listado para despachos.

Proceso de despacho

La segunda etapa del proceso comienza en el Área de Transporte con la elaboración del listado de vehículos disponibles para despacho. Esta lista es contrastada con la relación de pedidos de venta para efectuar la asignación de las unidades de transporte. Posteriormente, se verifica que el pedido se encuentre liberado y se genera e imprime el albarán, documento que autoriza el ingreso del vehículo a la planta y cuya entrega al transportista está sujeta al aforo establecido.

De esta manera, el vehículo ingresa a las instalaciones y se dirige a la balanza, donde se obtiene la tara de la unidad y se valida que, sumando el peso de la carga indicada en el albarán, no exceda el peso máximo permitido. Después, la unidad de transporte es cargada en el punto de despacho y retorna a la balanza para validar que la carga no supere la tolerancia establecida por producto. Si esta condición se cumple, entonces se emite el ticket de balanza; caso contrario, el vehículo regresa al punto de despacho para rectificar la cantidad cargada.

A continuación, el transportista se apersona en el Área de Transporte para poder generar la guía de remisión, lo cual requiere que la cantidad que figura en el albarán y el ticket de balanza sean iguales. Asimismo, se adjuntan los siguientes documentos: certificado de calidad, documento de pesos y medidas, MSDS y hoja resumen de seguridad. Seguidamente, la Sección de Facturación valida la emisión de la guía de remisión en el sistema y genera la factura electrónica, la cual luego es enviada digitalmente al cliente; mientras que, el transportista lleva el producto al punto de entrega acordado junto con la documentación respectiva.

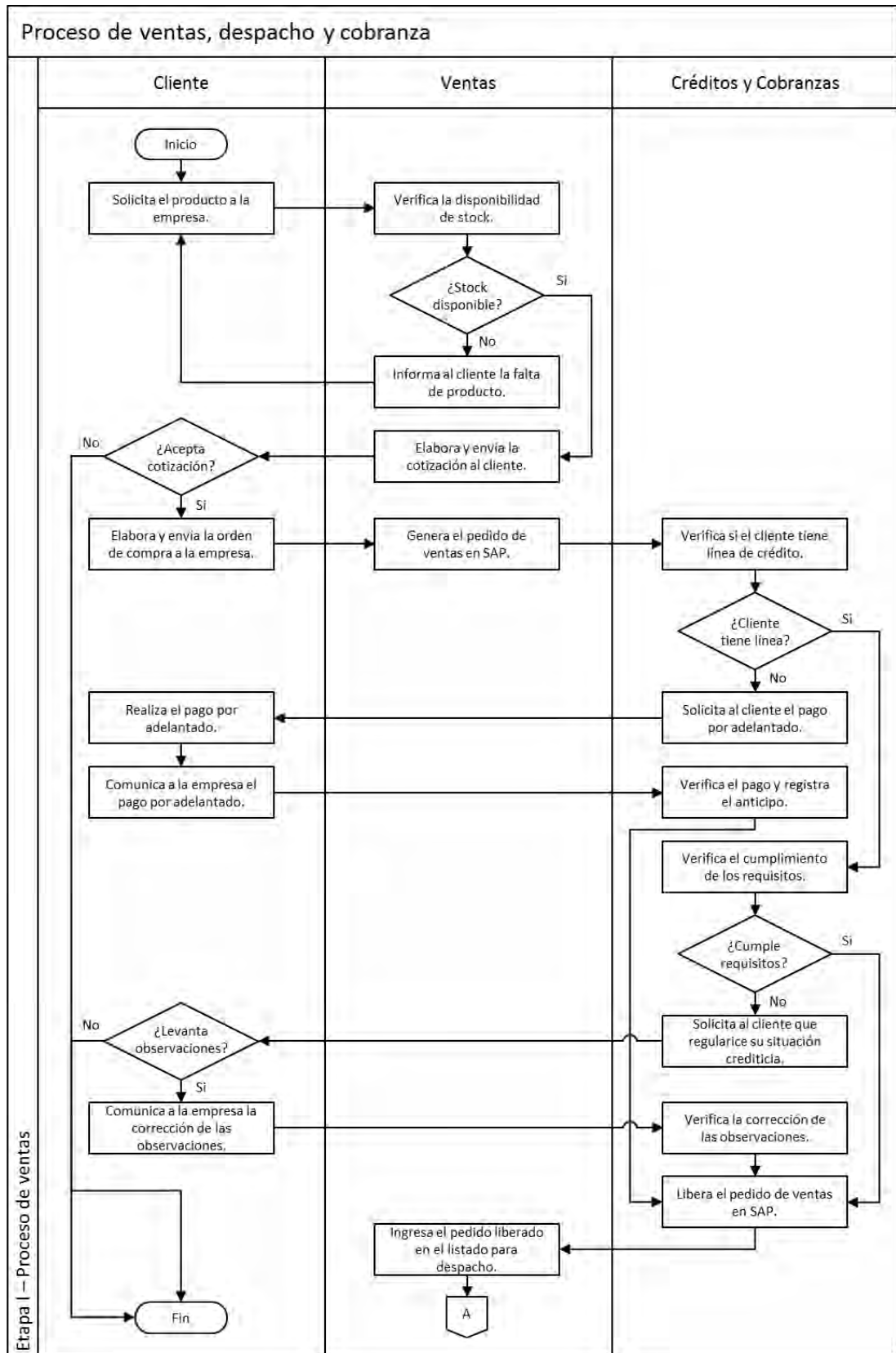


Gráfico 13: Proceso de ventas, despacho y facturación – Parte I

Fuente: La empresa

Elaboración propia

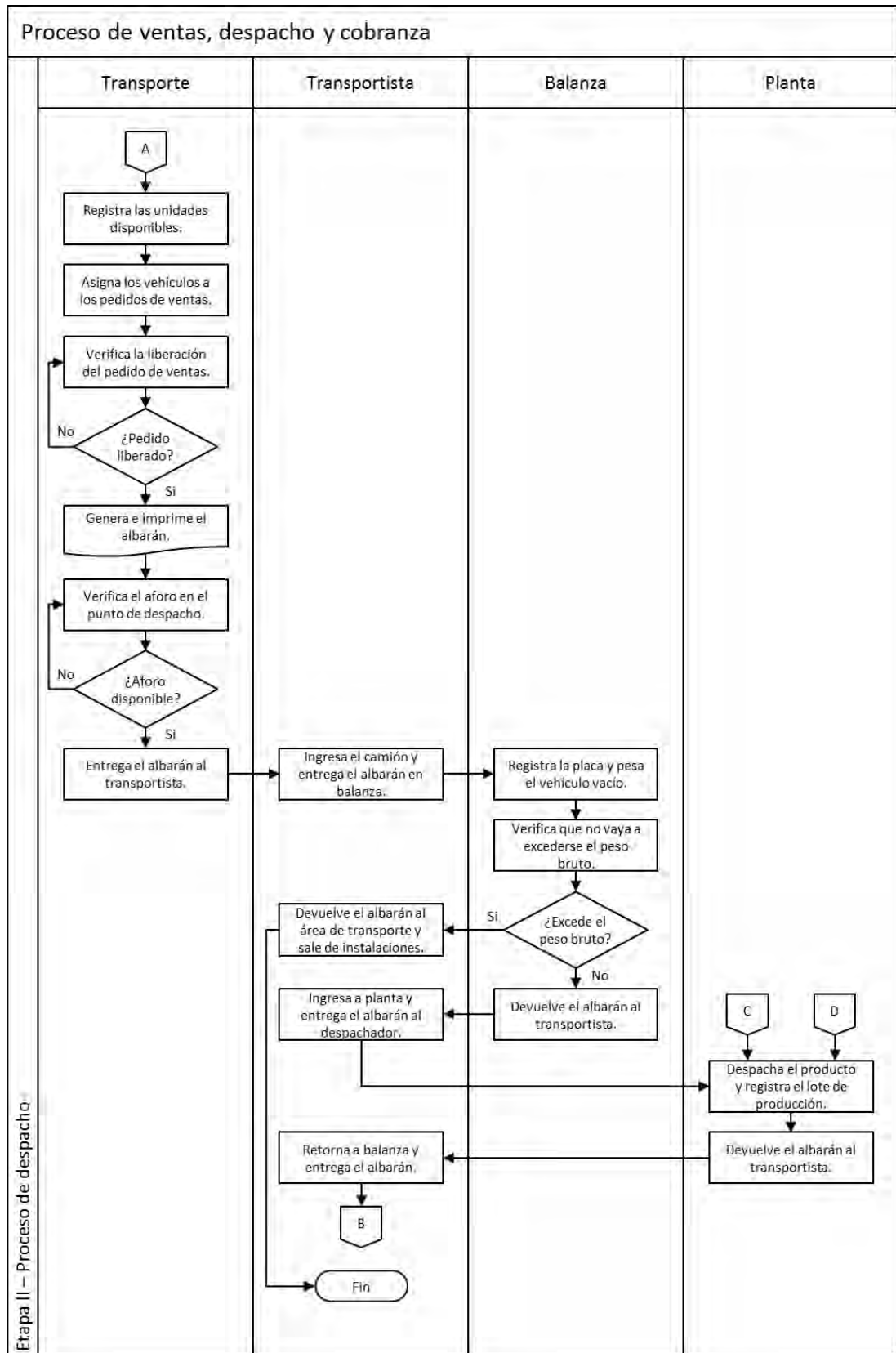


Gráfico 14: Proceso de ventas, despacho y facturación – Parte II

Fuente: La empresa

Elaboración propia

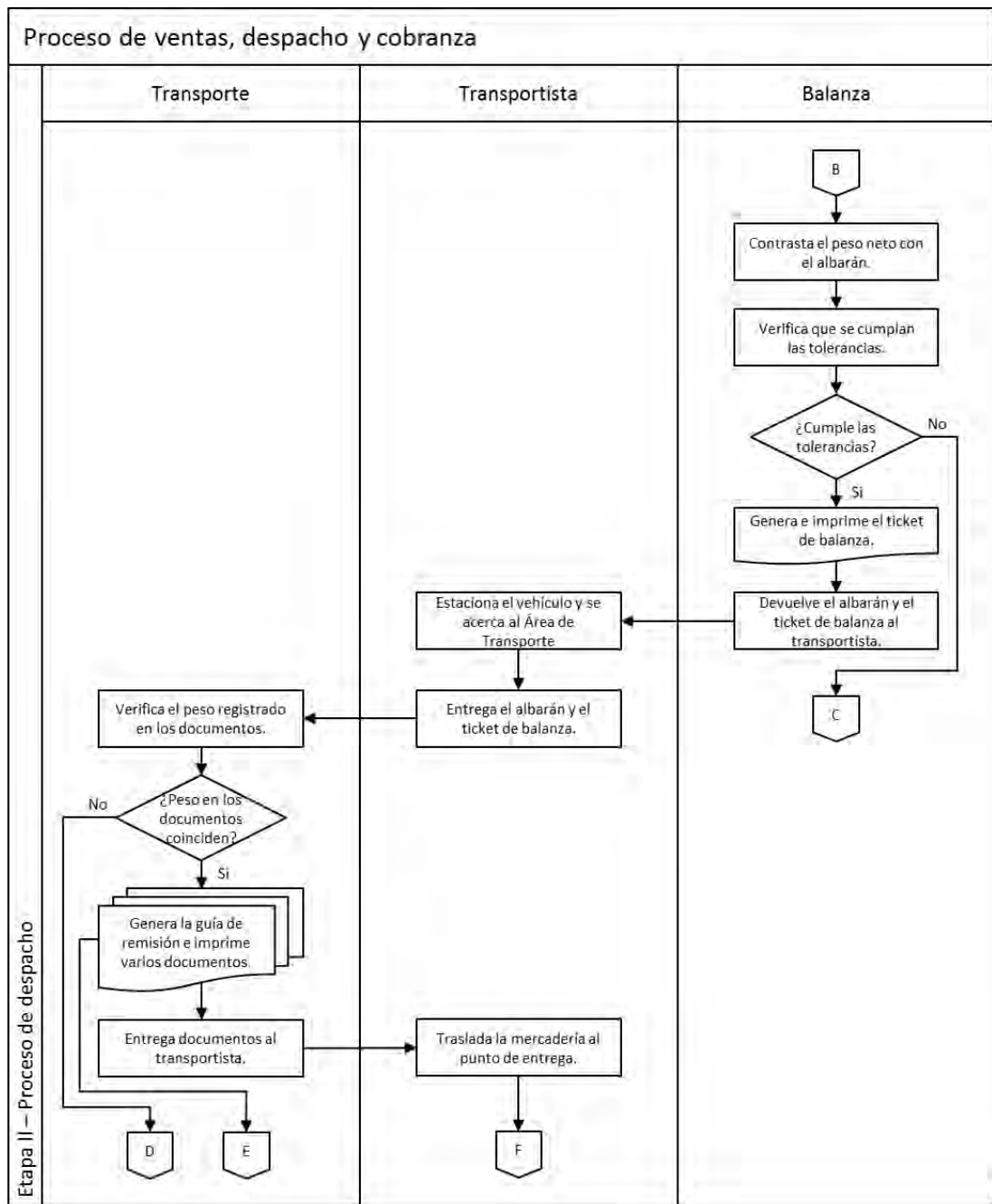


Gráfico 15: Proceso de ventas, despacho y facturación – Parte III

Fuente: La empresa

Elaboración propia

Proceso de cobranza

Después de recibir la mercadería, el cliente sella la guía de remisión y esta es traída a la empresa por el transportista. Luego, la Sección de Facturación verifica la guía de remisión y la adjunta a la factura física; adicionalmente, según sea el caso, se anexan distintos documentos como el soporte de pre registro, el pacto de conformidad, entre

otros. Finalmente, Créditos y Cobranzas envía el legajo de documentos al cliente, actualiza la fecha de entrega y vencimiento de la factura en el sistema e inicia la gestión de cobranza en el caso de los clientes que tengan línea de crédito.

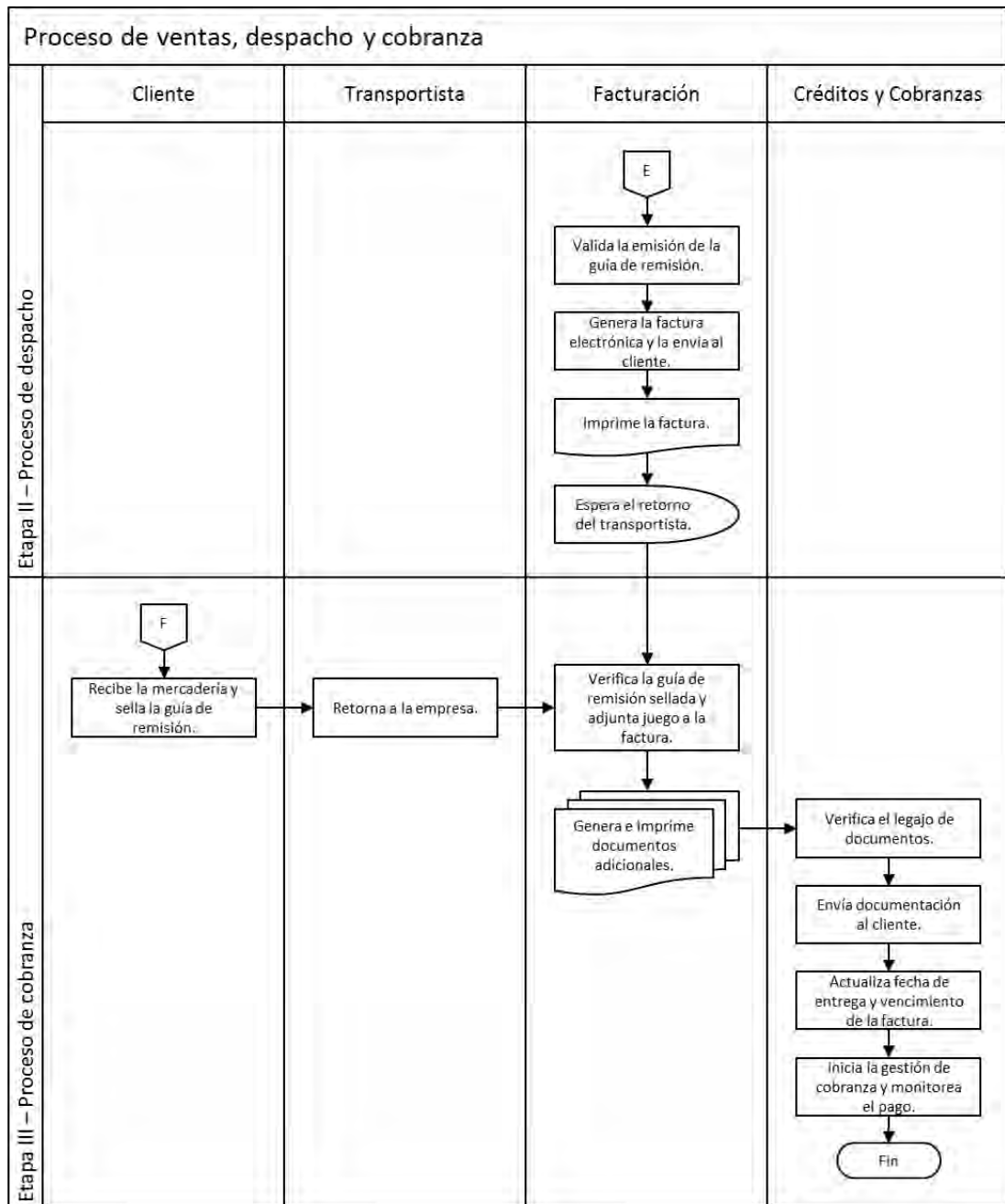


Gráfico 16: Proceso de ventas, despacho y facturación – Parte IV

Fuente: La empresa

Elaboración propia

3.2.2. Modalidades de despacho

Cada entrega de producto terminado se realiza bajo una modalidad de despacho, que depende del destino de la mercadería. En el caso de las ventas nacionales esta puede ser de dos tipos: ex planta o estándar. La primera modalidad consiste en que el cliente envía un vehículo para recoger el producto, mientras que, en la segunda, la empresa se encarga del traslado de la mercadería al punto de entrega acordado.

Por otro lado, las exportaciones pueden ser de dos maneras. Con relación a la carga a granel, los despachos de soda cáustica se realizan mediante tuberías que se conectan al buque en el terminal marítimo, mientras que la sal de deshielo se lleva al puerto y se acarrea en las bodegas del barco. Por su parte, los despachos de los productos sólidos y líquidos envasados se efectúan en contenedores, en tanto los artículos clorados líquidos a granel, en isotanques. En estos casos la empresa contrata un servicio integral, que proporciona los vehículos y contenedores para cargar y trasladar los productos a un almacén aduanero hasta que sean embarcados.

3.2.3. Clientes locales y puntos de entrega

Con la finalidad de tener una mejor perspectiva de las operaciones de transporte terrestre de producto terminado que lleva a cabo la empresa, se ha elaborado un mapa de puntos de entrega, el cual se muestra en el Gráfico 17. Para ello se ha considerado todas aquellas entregas locales bajo la modalidad de despacho estándar realizadas desde las instalaciones en Oquendo, Callao durante los últimos tres meses del año 2018.

La mayoría de los puntos de entrega visitados en este periodo se encuentran dentro de Lima Metropolitana, siendo casos muy particulares aquellas entregas con destino en otros departamentos del país. Los puntos contemplados en el mapa están catalogados por colores, según la distancia que debe recorrer la unidad de transporte para acceder a ellos y completar la entrega de los productos terminados.

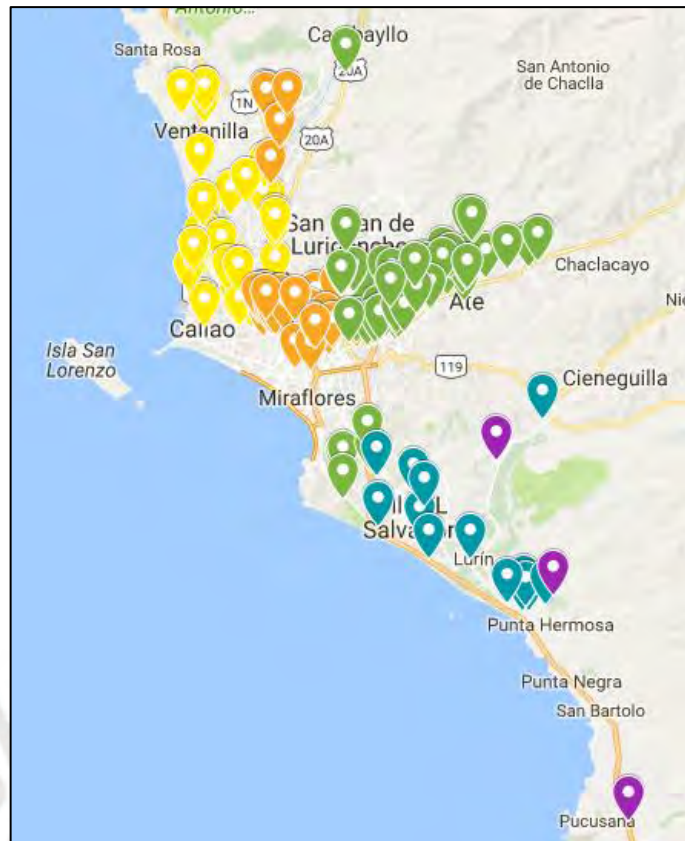


Gráfico 17: Mapa de puntos de entrega – Lima Metropolitana

Fuente: La empresa

Elaboración propia

En la Tabla 7 se detalla la relación de los colores asignados a cada uno de los anillos de entrega, que se utilizan para determinar las tarifas por flete. Además, se muestra para cada uno de ellos el rango de distancia comprendido, el cual ha sido establecido por la empresa. Para simplificar esta asignación se han agrupado los puntos de entrega fuera de Lima Metropolitana en la categoría Oquendo – Provincia.

Tabla 7: Asignación de colores por anillo de entrega.

Color	Anillo de Entrega
Amarillo	Hasta 15 km.
Naranja	Entre 15 Km a 30 Km.
Verde	Entre 30 Km a 45 Km.
Celeste	Entre 45 Km a 65 Km.
Morado	Entre 65 Km a 120 Km.
Plomo	Oquendo - Provincia

Fuente: La empresa

Elaboración propia

Al analizar la distribución de los clientes en el mapa se observan agrupaciones en la zona industrial del Callao en los alrededores de las avenidas Elmer Faucett y Néstor Gambetta; mientras que, otros clientes se encuentran entre las avenidas Argentina, Óscar R. Benavides y Venezuela. Por otro lado, otro grupo está ubicado en la zona industrial de Santa Anita, entre la Carretera Central y la Autopista Ramiro Prialé.

3.2.4. Configuración de la flota de unidades de transporte

Las operaciones de despacho terrestre que lleva a cabo la empresa requieren la disponibilidad de una flota de unidades de transporte que cumpla con los requisitos técnicos, administrativos y legales. En este sentido, el grado de especialización de la flota es alto debido a la fuerte inversión en activos fijos que representa mantener operativa una flota heterogénea de vehículos. Por otra parte, la variedad de productos que comercializa la empresa requiere de tratamientos distintos dependiendo de las características físicas que estos poseen.

En consecuencia, la compañía ha optado por contratar los servicios de empresas especializadas en el transporte terrestre de mercaderías. De este modo, la flota de vehículos está conformada por un conjunto de transportistas, quienes también proporcionan a los conductores de las unidades de carga.

Clasificación de los productos por peligrosidad

Los productos fabricados y comercializados por la empresa se clasifican en tres categorías, según su naturaleza. Estas categorías son denominadas de la siguiente manera: carga general, producto peligroso y producto fiscalizado. En la Tabla 8 se muestra la relación de productos por cada una de las categorías.

Tabla 8: Clasificación de los productos por peligrosidad.

Categoría	Carga General	Producto Peligroso	Producto Fiscalizado
Productos	Sales Consumo Humano Sales Consumo Industrial Fosfato Bicálcico	Cloro Líquido Cloruro Férrico Sulfato Férrico	Soda Cáustica Líquida Soda Cáustica Sólida Ácido Clorhídrico Hipoclorito de Sodio Ácido Sulfúrico Cloruro de Calcio

*Fuente: La empresa
Elaboración propia*

Los productos catalogados como carga general no representan peligro alguno y pueden ser trasladados sin mayores inconvenientes. Por otra parte, los productos peligrosos son materiales que poseen características fisicoquímicas capaces de generar reacciones que pongan en riesgo la salud y el medio ambiente. Finalmente, los productos fiscalizados son materiales químicos peligrosos, que además son controlados por la SUNAT para prevenir la elaboración de drogas ilícitas.

Tipos de unidades de transporte

La flota actual de vehículos está compuesta por camiones rígidos, tractocamiones y semirremolques. En primer lugar, los camiones rígidos son unidades de transporte cuya unidad de tracción y de carga conforman un único componente, y que pueden ser del tipo plataforma, furgón, o cisterna. Por otro lado, los tractocamiones o remolcadores son vehículos que halan los semirremolques, que son unidades no motorizadas que se clasifican en carretas y cisternas.

Los vehículos tipo plataforma, furgón y carreta permiten el traslado de los productos envasados en sacos, *big bags*, cajas, bidones y contenedores de granel. Mientras que los vehículos tipo cisterna son utilizados para los despachos de productos líquidos a granel. En la Tabla 9 se detalla la relación de los tipos de vehículo y las capacidades de carga disponibles para el despacho de las mercaderías.

Tabla 9: Flota de vehículos y capacidades.

Tipo de Camión	Tipo de Unidad de Carga	Capacidad
Camión Rígido	Plataforma	15 toneladas
	Furgón	15 toneladas
	Cisterna	13 y 15 toneladas
Camión Articulado	Carreta	30 toneladas
	Cisterna	30 toneladas
	Cisterna (IQBF)	15 y 30 toneladas

Fuente: La empresa

Elaboración propia

3.2.5. Asignación de las unidades de transporte a los pedidos de ventas

El procedimiento de asignación de las unidades de carga inicia a primeras horas de la mañana, momento en el cual los vehículos vacíos arriban a la empresa, se revisan aleatoriamente y se registran como disponibles para el despacho de mercadería. Con esta información se elabora el listado de camiones, el cual se contrasta contra la lista de pedidos de venta. De esta manera, las unidades de transporte son asignadas de

manera manual en función al orden de llegada, el tipo de producto a transportar, las características del vehículo y los permisos vigentes con los que cuenta.

Durante el transcurso del día los camiones, cuyas entregas hayan sido completadas, retornan a la empresa para ser asignados a otros pedidos. En algunas ocasiones, los vehículos son cargados al finalizar la tarde, pasan la noche dentro de la compañía y comienzan el siguiente despacho a las siete de la mañana del día siguiente.

3.2.6. Consolidación de carga y compatibilidad de productos

En las operaciones de despacho se admite la consolidación de pedidos de venta cuando los clientes solicitan menos de cinco toneladas de producto. Estos casos son poco frecuentes y cuando ocurren se procura la consolidación en función de la zona de entrega, la capacidad del camión y la compatibilidad de productos. En este sentido, únicamente está permitido agrupar Sales de Consumo Humano y Sales de Consumo Industrial por separado.

3.2.7. Diseño de rutas de transporte

Actualmente el tránsito de vehículos de transporte de mercancías está restringido al uso de carreteras y vías principales que pueden acoger la circulación de unidades pesadas. De este modo, estos caminos sirven como trayectos de acercamiento a los clientes que se ubican en calles y avenidas pequeñas.

Bajo estas condiciones, es responsabilidad de los transportistas seleccionar las rutas de transporte adecuadas, las cuales permitan optimizar el consumo de combustible y realizar la entrega en el menor tiempo posible.

3.3. Indicadores del proceso

En los últimos años el Área de Planeamiento y Logística ha venido experimentando una serie de cambios organizacionales y operacionales con el fin de mejorar sus procesos. Como parte de estos esfuerzos se han establecido indicadores formales para medir y monitorear el desempeño de las operaciones de despacho de producto terminado. A continuación, se presentan estos indicadores y se proponen algunos que también son relevantes en las operaciones de transporte de mercaderías.

Número de despachos realizados

Este indicador está estrechamente relacionado con el nivel de ventas y mide operativamente el desempeño y la capacidad de las operaciones de despacho de

producto terminado. Además, se define como un indicador básico para el cálculo de otros más complejos. Por otra parte, posibilita el análisis estadístico del proceso para describir registros, determinar la variabilidad en las entregas e identificar tendencias y comportamientos en distintos momentos de tiempo.

$$\text{Numero de despachos} = \text{Cantidad de despachos realizados}$$

Porcentaje de cumplimiento de entregas

El porcentaje de cumplimiento de entregas tiene como objetivo la medición del *Lean Time* para controlar que las entregas se realicen dentro del tiempo programado. Para su cálculo se compara la fecha y hora, que fue registrada en la guía de remisión al momento de la recepción de la mercadería, contra el tiempo esperado en el cual debió completarse cada entrega según la distancia al punto de destino.

$$\% \text{ de cumplimiento de entregas} = \frac{\text{Número de entregas a tiempo}}{\text{Número de despachos realizados}}$$

Porcentaje de entregas demoradas

Se estima que una unidad de transporte que ingresa a cargar producto terminado no debe permanecer más de dos horas dentro de las instalaciones de la compañía. Es así que, este indicador permite conocer el porcentaje de camiones que exceden el tiempo de estadía esperado. Además, es importante revisar estos casos para determinar si el motivo de la demora se debe a un factor interno o externo.

$$\% \text{ de entregas demoradas} = \frac{\text{Cantidad de entregas con sobrestadía}}{\text{Cantidad total de entregas}}$$

Tasa de utilización del transportista

La tasa de utilización es un índice que refleja el grado de aprovechamiento que tiene cada transportista con relación al número total de vehículos motorizados con los que dispone. Con esta información el Área de Transporte puede estar al tanto sobre el estado de la flota y saber si es posible aumentar la cantidad de despachos.

$$\text{Tasa de utilización del transportista} = \frac{\text{Cantidad de entregas realizadas}}{\text{Total de vehículos motorizados}}$$

3.4. Medición de indicadores del proceso

A continuación, se presentan los resultados obtenidos en las operaciones de despacho de mercadería con punto de origen en la locación de Oquendo, Callao durante el último trimestre del año 2018.

Número de despachos realizados

Con relación al número de despachos realizados, se observa que en promedio los días de semana se realizan 79 entregas; asimismo, los días viernes se inicia con la programación de despachos para el día sábado, el cual se labora hasta el mediodía y se completan en promedio 39 envíos, tal como se muestra en el Gráfico 18.

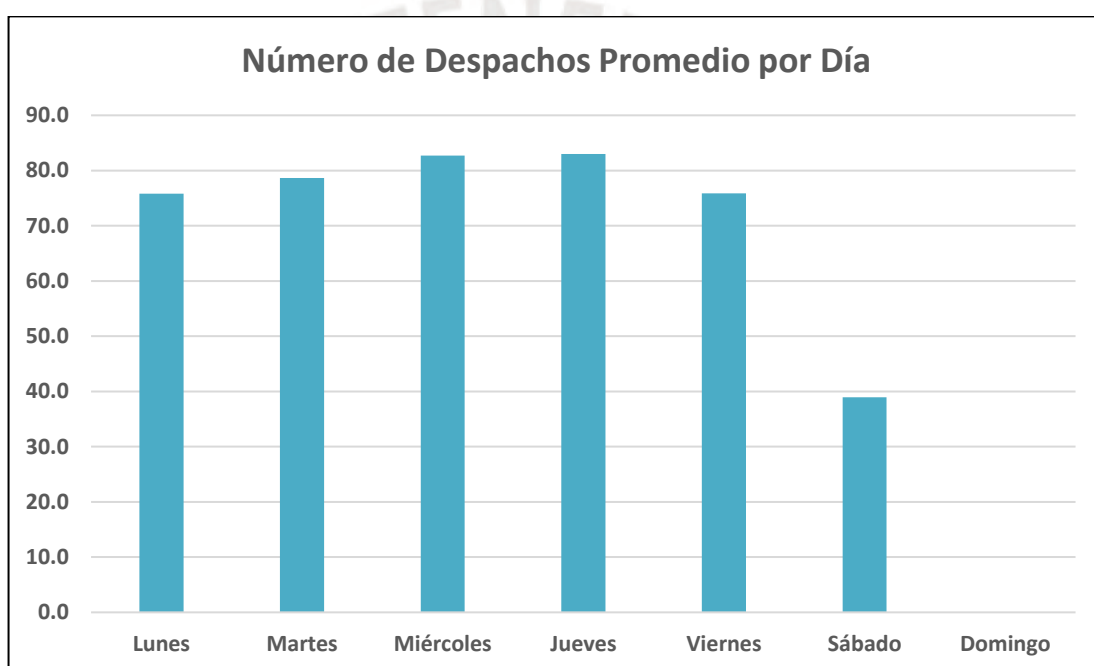


Gráfico 18: Número de despachos promedio por día.

Fuente: La empresa

Elaboración propia

Por otra parte, durante el trimestre se contabilizaron 5,331 despachos con punto de origen en Oquendo, Callao. De esta manera, se observa que en promedio se ejecutan 408 envíos por semana, destinándose la mayor parte de estos al mercado local bajo la modalidad estándar, según se detalla en el Gráfico 19. Adicionalmente, en el mes de octubre se realizaron 1,930 entregas, lo cual significó la mayor cantidad de envíos dentro del periodo analizado.

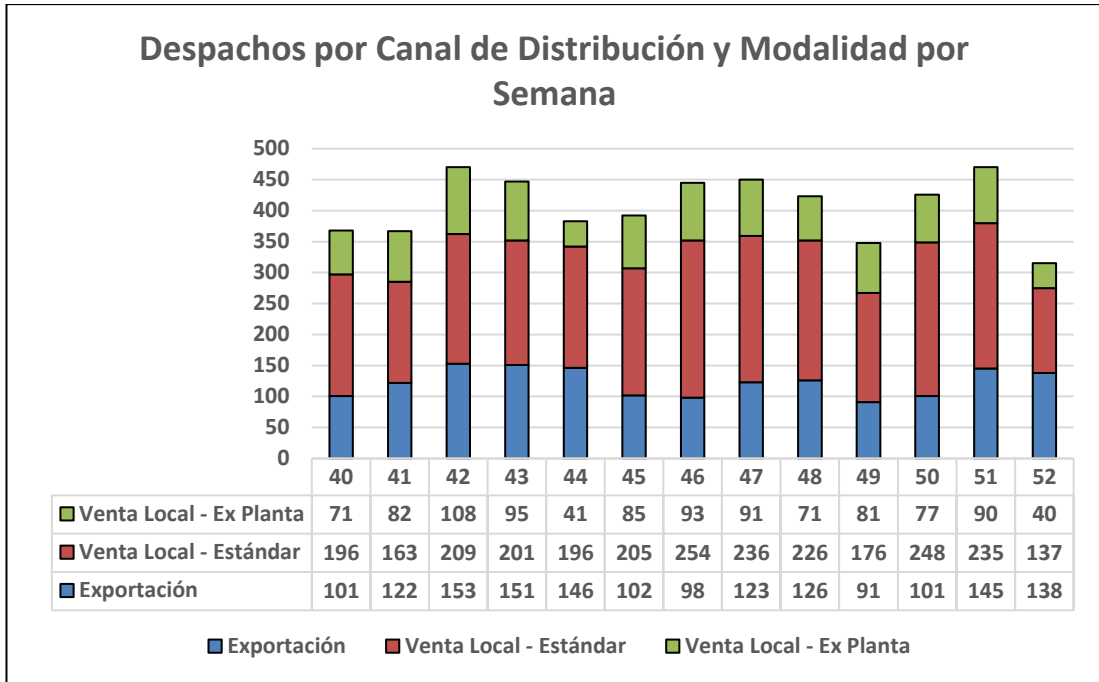


Gráfico 19: Despachos por canal de distribución y modalidad por semana.

Fuente: La empresa

Elaboración propia

Porcentaje de cumplimiento de entrega

Actualmente se viene empleando este indicador para medir las entregas a tiempo en los despachos que corresponden a la Sal de Consumo Humano. En este sentido, los resultados registrados muestran una consecución del 94.46% como promedio en los últimos tres meses del año y 96.25% como promedio anual. Por otra parte, se espera que con el paso del tiempo se comience a aplicar este indicador en las entregas de los demás productos.

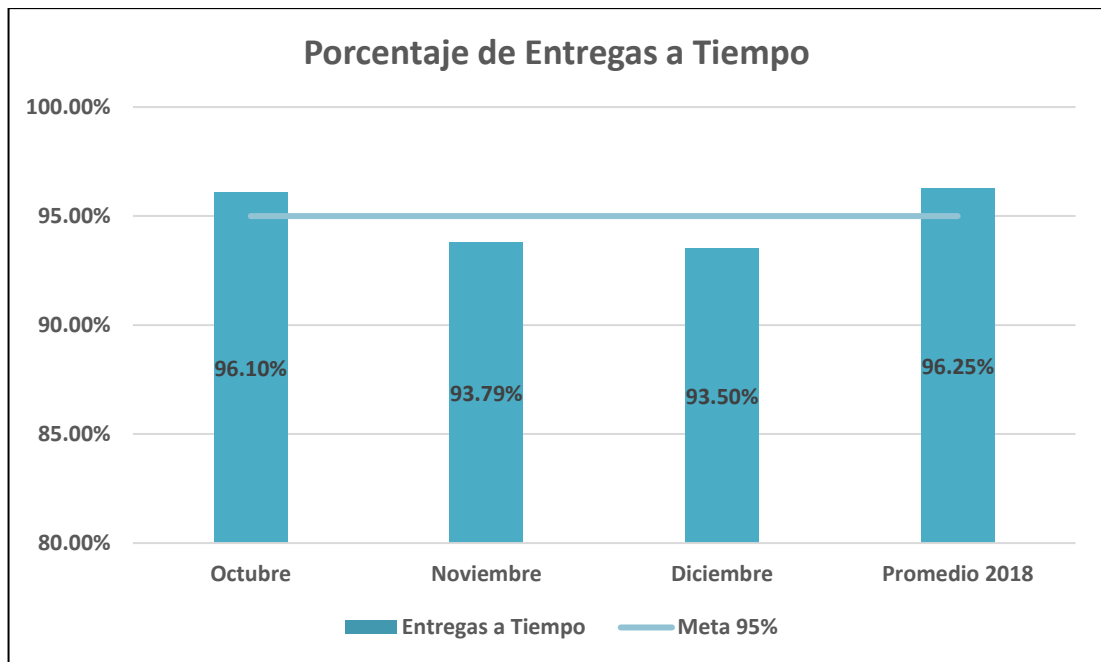


Gráfico 20: Porcentaje de entregas a tiempo.

Fuente: La empresa

Porcentaje de entregas demoradas

Para efectuar el cálculo de este indicador se debe considerar únicamente aquellas entregas válidas; es decir, no se toma en cuenta los registros con fechas y horas mal ingresadas en el sistema. Además, no se incluyen los registros que corresponden a los camiones que se dejan cargados con producto terminado para el despacho del día siguiente, ni tampoco los registros con una estadía menor a 15 minutos debido a que es un indicio de error al momento de digitar la información.

De este modo, solo el 29.45% de las entregas realizadas son catalogadas como válidas, lo cual demuestra que la información en el sistema no está siendo registrada correctamente. A pesar de ello, al analizar los datos válidos se obtiene que en promedio el 27.71% de los envíos sobrepasaron el tiempo esperado dentro de la empresa. En el Gráfico 21 se presenta el comportamiento semanal de este indicador, en donde se observa que en tres de las últimas cinco semanas del año el nivel de sobrestadía superó el 40%.

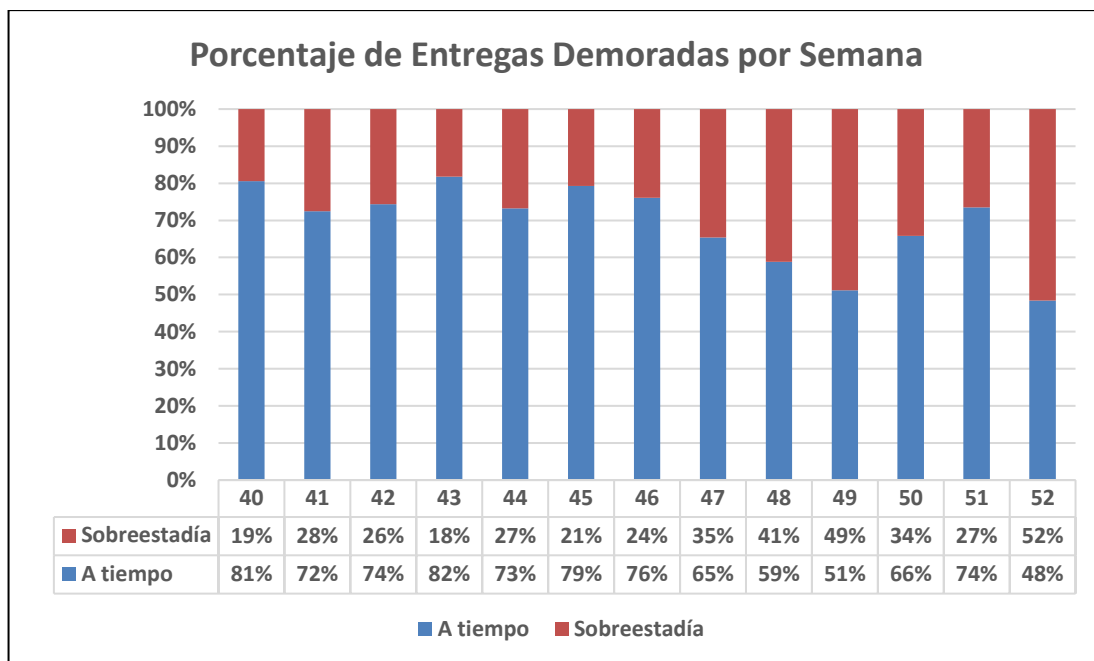


Gráfico 21: Porcentaje de entregas demoradas por semana.

Fuente: La empresa

Elaboración propia

Tasa de utilización del transportista

Para determinar la tasa de utilización del transportista se toma en cuenta los envíos efectuados dentro de Lima Metropolitana por aquellos agentes de transporte que hayan completado más de doce despachos en el trimestre. A continuación, se presentan los resultados registrados durante el periodo en estudio.

Tabla 10: Tasa de utilización del transportista en el trimestre.

Transportista	Envíos	Tasa U.	Transportista	Envíos	Utilización
Transportista 1	33	1.05	Transportista 13	161	1.26
Transportista 2	77	1.01	Transportista 14	47	1.02
Transportista 3	21	1.05	Transportista 15	44	1.12
Transportista 4	54	1.09	Transportista 16	150	1.25
Transportista 5	19	1.00	Transportista 17	19	1.00
Transportista 6	139	1.19	Transportista 18	82	1.48
Transportista 7	10	1.11	Transportista 19	25	1.00
Transportista 8	658	1.20	Transportista 20	152	1.09
Transportista 9	93	1.06	Transportista 21	80	1.08
Transportista 10	30	1.03	Transportista 22	48	1.23
Transportista 11	113	1.28	Transportista 23	33	1.00
Transportista 12	21	1.06	Total Transportistas	2109	1.12

Fuente: La empresa

Elaboración propia

En la Tabla 10 se detalla el número de envíos y la tasa de utilización promedio que obtuvo cada uno de los veintitrés transportistas catalogados como significativos para el presente análisis. En total se realizaron 2,109 despachos y se promedió una tasa de utilización de 1.12 durante el trimestre. En este sentido, se observa que el transportista 8 realizó el 31.2% de los envíos debido a que dispone de la mayor flota de vehículos, mientras que el transportista 18 logró una tasa de utilización de 1.48 como resultado de los despachos efectuados por su única unidad de carga.

3.5. Análisis de causa raíz

En esta sección se aplica la técnica de los cinco porqués para desarrollar el análisis de causa raíz. De esta manera, se busca identificar el origen de los problemas que suscitan en el proceso de despacho de productos terminados y especificar si existe alguna relación entre las posibles causas. Para ello se plantea como problemática principal las demoras que ocurren durante el proceso de despacho.

A partir de este análisis se identifica que la raíz principal de los problemas se centra en la falta de procedimientos bien estructurados. Esta dificultad se extiende a lo largo del proceso en estudio y genera la aparición de otros problemas, que afectan la disponibilidad de unidades de transporte, la calidad de los datos en el sistema, el flujo de materiales e información a través del proceso, entre otros.

Del mismo modo, se evidencia la falta de organización y comunicación que existe entre las distintas áreas de la empresa para llevar a cabo tareas que implican un trabajo conjunto. Asimismo, la ausencia de lineamientos, al ejecutar cada una de las actividades dentro del proceso, propician que este se desarrolle de manera ineficiente, lenta y desordenada.

En el Gráfico 22 se presenta el análisis de los cinco porqués para el proceso de despacho y se detallan las relaciones de causa raíz encontradas en cada uno de los niveles que forman parte del análisis.

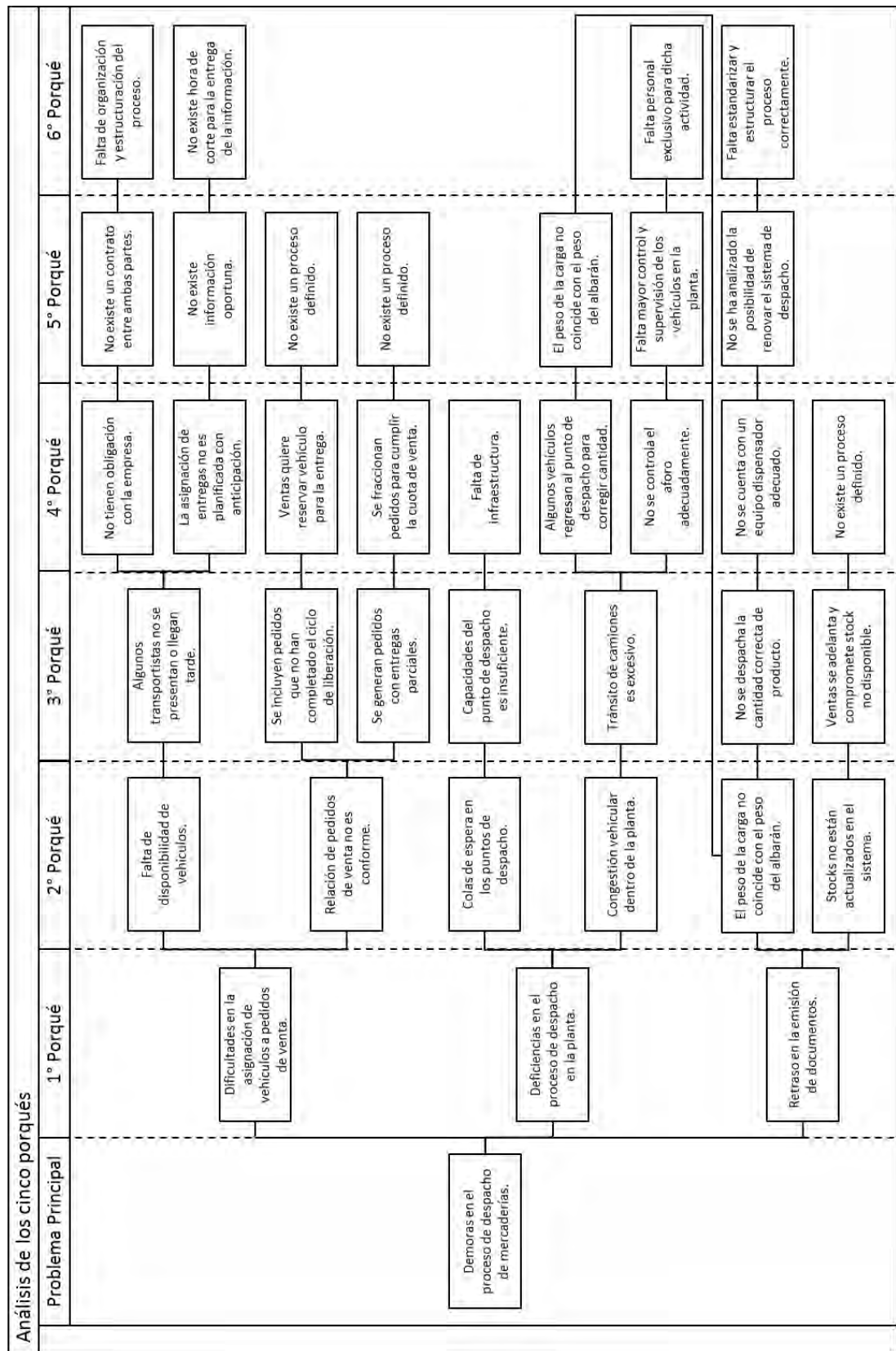


Gráfico 22: Análisis de los cinco porqués.

CAPÍTULO 4. PROPUESTA DE MEJORA

En este capítulo se presenta la aplicación de los conceptos teóricos, que fueron expuestos en los capítulos anteriores, en el proceso de despacho de productos terminados bajo el contexto actual de la empresa. Como propuesta de mejora se utilizan de manera conjunta la filosofía *Lean Manufacturing* y herramientas de Investigación de Operaciones para conseguir la mejora del proceso.

4.1. Alcance de la propuesta de mejora y data utilizada

El alcance de este estudio abarca únicamente a los despachos con origen en las plantas localizadas en Oquendo, Callao debido a que esta locación representa el 83.18% de las ventas de la compañía en términos de movimientos de mercaderías, tal como se muestra en el Gráfico 23. Además, para desarrollar la presente propuesta de mejora se emplea la información correspondiente a las entregas realizadas durante el último trimestre del año 2018.

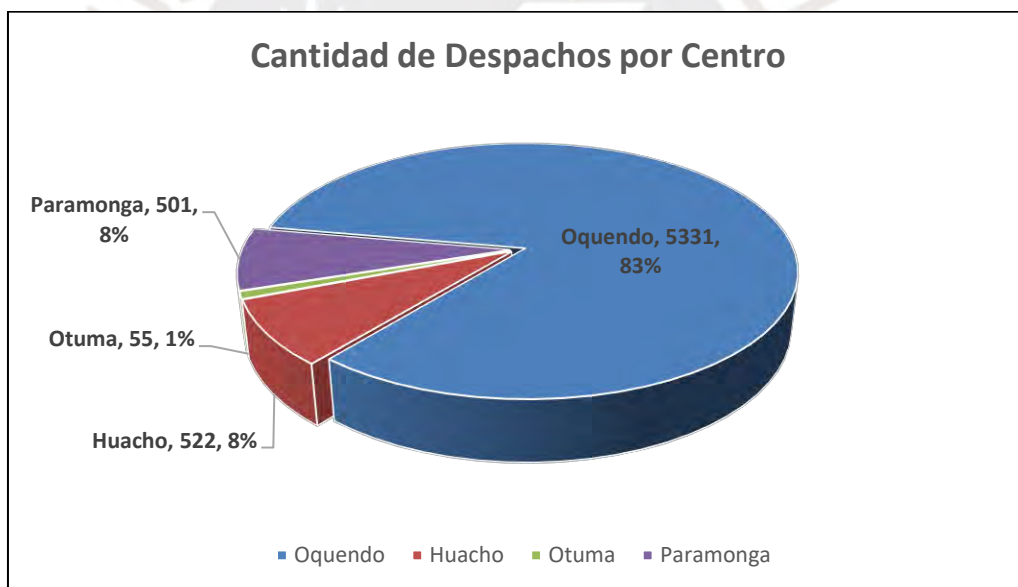


Gráfico 23: Cantidad de despachos por centro

Fuente: La empresa

Elaboración propia

Por otra parte, este estudio se enfoca en aquellas entregas que se efectúan bajo la modalidad de despacho estándar porque la empresa asume el traslado de las mercaderías. En el Gráfico 24 se demuestra que la mitad de los envíos realizados en el periodo en análisis corresponden a este tipo de modalidad.

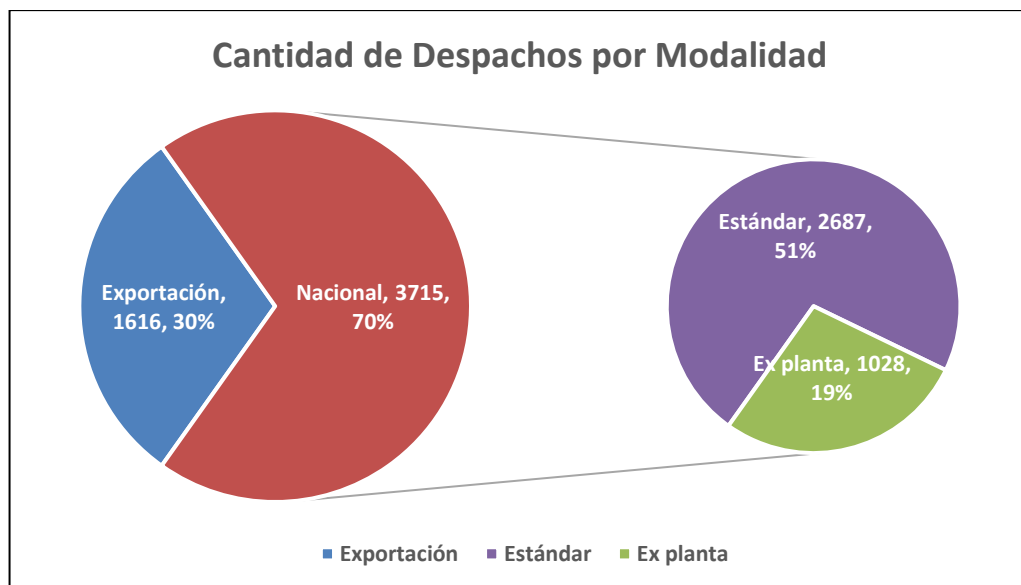


Gráfico 24: Cantidad de despachos por modalidad

Fuente: La empresa

Elaboración propia

En cuanto al número de despachos por grupo de artículo, se detalla por medio del Gráfico 25 la distribución de entregas por familia de producto que se destinaron al mercado nacional bajo la modalidad estándar. En este aspecto, los despachos de sales superan ligeramente a los productos químicos; asimismo, se observa que los envíos de los artículos envasados destacaron por encima de los líquidos a granel.

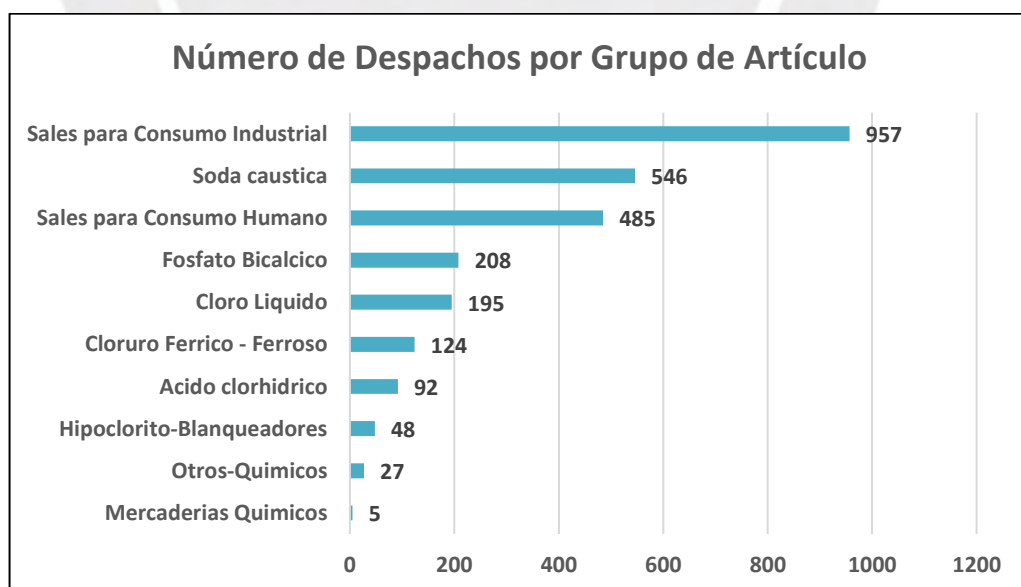


Gráfico 25: Número de despachos por grupo de artículo

Fuente: La empresa

Elaboración propia

4.2. Aplicación de Lean Logistics

En esta sección se presenta la propuesta de mejora en las operaciones de despacho por medio de la metodología *Lean Logistics*. Para ello se debe realizar un análisis del proceso con el fin de identificar los desperdicios que existen en él. Posteriormente, se plantea reestructurar los procedimientos e implementar las herramientas *Lean*.

4.2.1. Análisis del proceso e identificación de desperdicios

Dado que el proceso de ventas, despacho y cobranza es extenso y que cuenta con la participación de varias áreas de la empresa, resulta conveniente que este sea dividido para realizar un mejor análisis del mismo. De este modo, el proceso en estudio es fraccionado en seis operaciones principales, las cuales están compuestas por varias actividades.

Análogamente a lo desarrollado por (Kravenkit, S. & Arch-int, S., 2013), se efectúa el estudio de cada una de las actividades en el proceso para definir si estas agregan valor o no, según los criterios establecidos en la Tabla 11, los cuales están basados en lo expuesto en (Villaseñor, A. & Galindo, E., 2007).

Tabla 11: Criterios para definir si la actividad agrega valor o no.

Criterios	Definición
Criterio 1	¿La actividad involucra tratamiento físico o de información?
Criterio 2	Desde el punto de vista del cliente ¿La actividad genera valor?

Fuente: Villaseñor, A. & Galindo, E. (2007)

Elaboración propia

Adicionalmente, se especifica el tipo de actividad al que corresponde cada una de ellas de acuerdo con las definiciones brindadas en la Tabla 12, teniendo como referencia el segundo principio de *Lean Thinking*: Identificar el flujo de valor.

Tabla 12: Tipos de actividades según el valor agregado.

Tipo de actividad	Significado
AV	Actividad Agrega Valor.
NAV	Actividad No Agrega Valor.
NAVN	Actividad No Agrega Valor, pero es Necesaria.

Fuente: Womack, J. & Jones, D. (2003)

Elaboración propia

De este modo, se resume mediante la Tabla 13 la lista de operaciones y actividades que conforman el proceso de ventas, despacho y cobranza. En este cuadro se muestra el cumplimiento de los criterios antes expuestos y la clasificación brindada a cada actividad; además, se menciona para cada una de ellas el área responsable de su realización y los tipos de desperdicios encontrados.

Como resultado de este análisis se establece que en la actividad 1.5 se produce el principal desperdicio, el cual corresponde a una sobreproducción que resulta de la creación de una lista de pedidos para despacho en Excel, la cual incluye pedidos de venta pendientes de liberación. La información registrada en este archivo genera inconvenientes en las siguientes etapas del proceso dado que los pedidos de venta no liberados no pueden ser asignados a ninguna unidad de transporte. Asimismo, el archivo no aporta información relevante para la asignación de vehículos debido a que el listado de pedidos también puede ser visualizado en SAP, diferenciando aquellos que son asignables de los que no.

Por otra parte, se determina que existe un movimiento innecesario durante la actividad 3.1, el cual es efectuado por un colaborador del Área de Transporte, quien se acerca a las afueras de la puerta principal para anotar los vehículos disponibles para el despacho de mercaderías y su orden de llegada a la empresa. Seguidamente, se identifica que en la actividad 3.3 acontecen dos clases de desperdicios como consecuencia del listado de pedidos en Excel. En primer lugar, en algunas ocasiones se reservan vehículos para pedidos que aún no están liberados, lo cual implica que estas unidades de transporte deban esperar afuera de las instalaciones hasta que el albarán sea emitido. En segundo lugar, se produce un sobreprocesamiento cuando los colaboradores del área contrastan que la información contenida en el archivo en Excel esté reflejada en SAP para poder generar el albarán.

Posteriormente, durante la actividad 4.3 se observa que en algunas oportunidades los camiones experimentan esperas dentro de la planta debido a que no existe stock disponible para descontar en el sistema. Del mismo modo, otro factor que influye en la aparición de esta clase de desperdicio es la congestión vehicular que se observa eventualmente en el punto de despacho. Asimismo, en esta ubicación tienen lugar los reprocesos de la actividad 4.6, cuando se debe corregir la cantidad cargada si esta supera la tolerancia permitida. Finalmente, suele generarse una cola de espera afuera de la oficina de despacho durante la actividad 5.2, que es causada por la alta confluencia de transportistas en determinados momentos del día y el retraso en la generación de algunos documentos complementarios para la entrega.

Tabla 13: Identificación de desperdicios por actividad en el proceso.

Operaciones y actividades	Área responsable	Criterio 1	Criterio 2	Tipo de actividad	Tipo de desperdicio
1.- Generación del pedido de ventas.					
1.1.- Verificación de stocks.	Ventas	No	No	NAVN	-
1.2.- Se informa al cliente el estado del stock.	Ventas	No	No	NAVN	-
1.3.- Elaboración y envío de la cotización al cliente.	Ventas	Sí	Sí	AV	-
1.4.- Creación del pedido de ventas en SAP.	Ventas	Sí	Sí	AV	-
1.5.- Registro del pedido en el listado para despacho.	Ventas	Sí	No	NAVN	Sobreproducción
2.- Revisión de línea de crédito y anticipos.					
2.1.- Verificación de línea de crédito y sus requisitos.	Créditos y Cobranzas	No	No	NAVN	-
2.2.- Se comunica al cliente su situación de créditos.	Créditos y Cobranzas	No	No	NAVN	-
2.3.1.- Se verifica la corrección y cumplimiento de requisitos.	Créditos y Cobranzas	No	No	NAVN	-
2.3.2.- Revisión de pago por adelantado y registro del anticipo.	Créditos y Cobranzas	No	No	NAVN	-
2.4.- Liberación del pedido de ventas.	Créditos y Cobranzas	Sí	Sí	AV	-
3.- Planificación de despachos y autorización de ingreso.					
3.1.- Registro de vehículos disponibles.	Transporte	Sí	No	NAVN	Movimiento Innecesario
3.2.- Asignación de unidades de transporte a pedidos de venta.	Transporte	Sí	Sí	AV	-
3.3.- Verificación de pedido de ventas liberado.	Transporte	No	No	NAV	Sobreprocesamiento Espera
3.4.- Generación e impresión del albarán.	Transporte	Sí	Sí	AV	-
3.5.- Validación de aforo en punto de despacho.	Transporte	No	No	NAVN	-
4.- Pesaje de la unidad de transporte y carga de producto.					
4.1.- Registro de placas y pesaje de vehículo vacío.	Balanza	Sí	Sí	AV	-
4.2.- Verificación de exceso de peso bruto.	Balanza	No	No	NAVN	-
4.3.- Carga de producto y registro del lote.	Planta	Sí	Sí	AV	Espera
4.4.- Verificación de peso neto y cumplimiento de tolerancias.	Balanza	No	No	NAVN	-
4.5.- Generación e impresión del ticket de balanza.	Balanza	Sí	Sí	AV	-
4.6.- Se rectifica la cantidad de producto despachada.	Planta	No	No	NAV	Reproceso
5.- Generación y emisión de documentos de salida.					
5.1.- Verificación de los pesos en todos los documentos.	Transporte	No	No	NAVN	-
5.2.- Emisión de guía de remisión y otros documentos.	Transporte	Sí	Sí	AV	Espera
5.3.- Validación de la guía de remisión.	Facturación	No	No	NAVN	-
5.4.- Generación y envío de la factura electrónica.	Facturación	Sí	Sí	AV	-
6.- Gestión de cobranza de pedidos de venta.					
6.1.- Verificación de conformidad de recepción del cliente.	Facturación	No	No	NAVN	-
6.2.- Generación e impresión de documentación adicional.	Facturación	Sí	Sí	AV	-
6.3.- Verificación y envío de documentación al cliente.	Créditos y Cobranzas	Sí	Sí	AV	-
6.4.- Seguimiento de cobranza y monitoreo de pago.	Créditos y Cobranzas	No	No	NAVN	-

Adicionalmente, se han detectado otras clases de desperdicios en el proceso; sin embargo, la frecuencia en la que estos ocurren es menor o su impacto no resulta significativo durante el desarrollo de las actividades. A continuación, se detalla en la Tabla 14 los demás desperdicios encontrados.

Tabla 14: Desperdicios de menor incidencia o impacto en el proceso.

Tipos de desperdicios	
Sobreproducción	Espera
-	Cola de camiones en la puerta de la empresa.
Transporte innecesario	Sobreprocesamiento
Devolución de camiones con producto no conforme.	-
Exceso de inventarios	Movimiento innecesario
-	Exceso de maniobras por congestión vehicular.
Reproceso	Personal mal utilizado
Modificaciones y reajustes en la asignación de vehículos.	Errores en el registro de horas de ingreso y salida de camiones en el sistema.

4.2.2. Reestructuración del proceso de despacho

Para mejorar el proceso de despacho se plantea reestructurar el mismo a través de dos estrategias que permitan fomentar una mejor gestión en las operaciones de despacho, ordenar y facilitar el desarrollo de las actividades en el proceso, optimizar la utilización de la flota de vehículos y aumentar el nivel de servicio ofrecido al cliente.

La primera estrategia consiste en implementar una política de programación de despachos mediante la cual se definan tres consideraciones básicas para efectuar la asignación de vehículos. En primer lugar, se fija que la hora de corte para la programación de entregas es a las tres de la tarde del día anterior. En segundo lugar, solo estará permitido incluir pedidos de venta que se encuentren completamente liberados. Por último, debe existir stock disponible para atender estos requerimientos y así asegurar que los documentos, que corresponden a estos lotes, se encuentren listos cuando se efectúe el despacho. Caso contrario, cualquier pedido de ventas que sea asignable fuera de hora podrá ser programado como una entrega adicional.

Por otro lado, la segunda estrategia establece el uso de un modelo de optimización, que facilite la asignación de unidades de transporte a los pedidos de venta. De este modo, se genera un plan base de entregas para el día siguiente, el cual podrá ser modificado ante alguna eventualidad y complementado con los pedidos generados fuera de hora. Además, la solución que proporciona el modelo representa la mejor

manera de asignar los recursos, lo cual conlleva a planificar y coordinar con los transportistas las horas de ingreso estimadas de cada camión con el fin de disminuir las esperas y el congestionamiento de vehículos dentro y fuera de la planta.

4.2.3. Implementación de herramientas Lean

Las herramientas que proporciona la filosofía *Lean Manufacturing* contribuyen en el desarrollo e implementación de las dos estrategias propuestas. En este sentido, dado que el problema principal se centra en la falta de procedimientos bien estructurados, el trabajo estandarizado representa la base de ambas estrategias.

Por medio de la política de programación de despachos se espera eliminar la sobreproducción en la actividad 1.5, el sobreprocesamiento en la actividad 3.3 y las diversas esperas que se han detectado en el proceso de despacho. Del mismo modo, esta estrategia se apoya en el *Poka-Yoke* que proporciona el sistema al momento de gestionar la asignación de vehículos y generar el albarán.

Adicionalmente, la aplicación de un modelo de optimización refuerza la propuesta de trabajo estandarizado debido a que elabora el plan de entregas para el día siguiente, asignando los recursos disponibles adecuadamente. De igual manera, se prevé que esta estrategia ayude a eliminar el movimiento innecesario en la actividad 3.1, contribuya con la reducción de esperas y facilite las actividades que se realicen durante el transcurso del día.

Finalmente, se propone agendar reuniones *kaizen* con las áreas involucradas para reportar y documentar las principales incidencias de la semana, con el objetivo de tomar las medidas correctivas necesarias. De la misma manera, la revisión diaria o semanal de indicadores de desempeño permitirán monitorear el proceso de despacho y mantenerlo bajo control.

4.3. Aplicación de herramientas de Investigación de Operaciones

En las siguientes líneas se detalla la aplicación de herramientas de Investigación de Operaciones para desarrollar un modelo de optimización que permita elaborar una propuesta eficiente para la programación de despachos de mercaderías. En este sentido, la construcción de esta propuesta contempla la definición de los supuestos en el modelado y la estandarización de los coeficientes en la función objetivo.

4.3.1. Descripción general del Problema de Programación de Despachos

El problema en estudio consiste en programar los pedidos de venta a las unidades de transporte con el fin de elaborar un plan de entregas eficiente para las actividades del día siguiente. De este modo, no solo se espera cumplir con los tiempos de entrega de los productos, sino también acelerar las operaciones de despacho a través de la reducción de las esperas en el proceso y la acumulación de vehículos.

El presente caso se desarrolla en una localidad que cuenta con tres puestos de expedición en los cuales se realizan las actividades de carga, pesaje y documentación del producto terminado. Cada puesto de expedición dispone de varios puntos de despacho, los cuales están distribuidos según a la ubicación de los almacenes de producto terminado. Adicionalmente, existe una limitante de espacio en cada punto de despacho denominada capacidad de despacho, la cual está estrictamente relacionada con el aforo en cada puesto de expedición.

Además, los productos terminados y la flota de unidades de carga tienen ciertas características a tener en cuenta. Por una parte, las mercaderías se clasifican en tres categorías en base a su peligrosidad y se distribuyen a granel o envasadas. Por otra parte, los vehículos que conforman la flota son camiones rígidos, tractocamiones o semirremolques, los cuales son propiedad de los transportistas. Asimismo, las normas vigentes estipulan que cada vehículo debe contar con los permisos necesarios para trasladar determinado producto.

4.3.2. Definición de los supuestos en la modelación del problema

Considerando que el modelo de optimización busca representar de la mejor manera posible la situación real del problema, se entiende que existen ligeras diferencias y asunciones en su formulación. A continuación, se presentan los supuestos que son tomados en cuenta en el Problema de Programación de Despachos.

- Todos los despachos con punto de entrega fuera de Lima Metropolitana serán atendidos de manera específica, lo cual implica que no formarán parte de la solución del modelo. Esto se debe a que los tiempos de entrega hacia estos destinos superan las veinticuatro horas, incluido el viaje de regreso. Además, estas entregas por lo general son preparadas por la tarde para que la unidad inicie el recorrido en la mañana del día siguiente.
- Los traslados de materiales entre las sedes de la compañía no están incluidos en la modelación del problema y su programación se efectúa por separado.

- Las ventas de exportación no son consideradas en el modelo de optimización dado que no se cuenta con la información suficiente. En su lugar se asume que existe una capacidad de despacho exclusiva para las exportaciones en los puntos de despacho de aquellos productos que están destinados principalmente al mercado internacional.
- Los despachos tipo ex planta representan un *input* en el modelo de optimización debido a que el cliente anuncia la fecha y hora estimada en la que se acercará su unidad a recoger el pedido. Esta información es brindada por medio del formato obligatorio para atención de vehículos.
- Se asume que siempre hay stock disponible para la venta dado que esta verificación debe efectuarse con anterioridad. Además, los datos de prueba no reflejan el stock en determinado momento del día.
- La consolidación de los pedidos de venta se realiza manualmente antes de la ejecución del modelo de optimización. Por lo tanto, serán representados en el modelo como si fuesen un único pedido.
- La configuración de los camiones articulados es fija durante el día; es decir, no se puede intercambiar el semirremolque del tractocamión. Además, las cisternas solo pueden transportar un determinado tipo de producto líquido en el transcurso del día.
- Según las normas de transporte de mercaderías, tanto los conductores como los vehículos deben contar con los permisos correspondientes, según el producto que se transporte. Por ello, se asume que los permisos del conductor coinciden con los del vehículo.
- Se considera que existe un único camino para llegar desde el punto de origen al punto de destino, debido a que existen determinadas vías por las cuales se permite el tránsito de camiones pesados.
- Se contempla que no existen imprevistos o inconvenientes que retrasen el momento en el cual los vehículos se encuentran disponibles nuevamente durante el mismo día.

4.3.3. Formulación del Problema de Programación de Despachos

El Problema de Programación de Despachos ha sido desarrollado con el objetivo de proporcionar una programación eficiente, que incluya la asignación de los recursos a los trabajos y la secuenciación en la que estas tareas se llevarán a cabo. De esta manera, se busca que las operaciones de despacho se desarrollen con mayor fluidez, reduciendo los desperdicios identificados en el proceso.

Esta formulación combina aspectos del problema de programación de máquinas paralelas (PMSP – *Parallel Machine Scheduling Problem*) y el problema de programación de proyectos con recursos limitados (RCPSP - *Resource Constrained Project Scheduling Problem*). Para realizar esta formulación se dispone de un conjunto de m vehículos que conforman la flota de unidades de transporte, los cuales serán asignados al conjunto de n pedidos de venta en uno de los s intervalos de tiempo. En este caso se considera que la frecuencia f entre el inicio de dos intervalos consecutivos es de veinte minutos.

Este modelo emplea el coeficiente de factibilidad F_{ij} para asegurar que el vehículo i cumpla con los permisos y requisitos necesarios para atender el pedido j . Asimismo, el coeficiente de factibilidad W_{jg} deriva cada pedido j al punto de despacho g correspondiente, según el almacén del producto terminado, y cumple una función importante para asegurar que la capacidad de despacho w_g no sea excedida.

Finalmente, el modelo propuesto busca la maximización de la ganancia mediante el coeficiente de beneficio B_j , el cual es el resultado de aplicar el Proceso de Jerarquía Analítica para incluir varios atributos del pedido de ventas. También se incluye en el cálculo la holgura H_j^i para que las entregas inicien sus actividades de carga lo más temprano posible. En el Gráfico 26 se muestra una representación de la asignación de vehículos y la secuenciación de las actividades de carga en un punto de despacho.

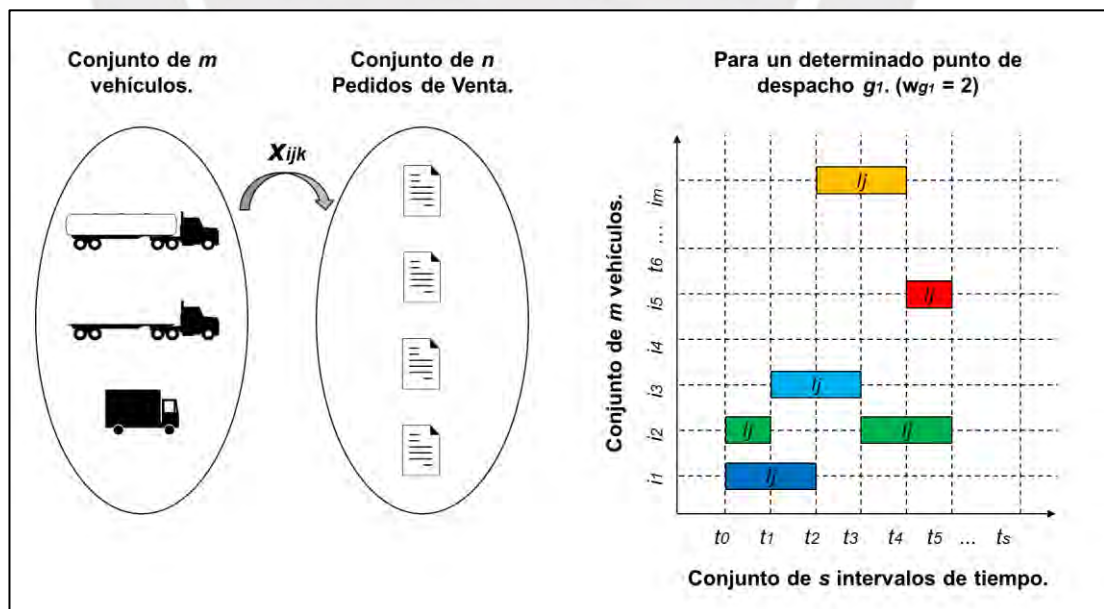


Gráfico 26: Representación del Problema de Programación de Despachos.

A continuación, se detalla la notación que se emplea en el modelo de optimización para representar los atributos relevantes en el problema.

x_{ijk} : Variable de decisión que determina si el vehículo i es asignado al pedido j e inmediatamente después al pedido k .

y_j : Variable de decisión que indica si el pedido de venta j es atendido.

C_j^i : Variable de decisión que establece el tiempo en el que el camión i inicia la carga del pedido j .

α_{ijt} : Variable de decisión que detalla si el camión i inicia la carga del pedido j en el intervalo t .

z_{ijt} : Variable de decisión que define si el camión i se encuentra cargando el pedido j en el intervalo t .

H_j^i : Variable de decisión que cuantifica la holgura de tiempo que tiene el camión i al completar la entrega del pedido j respecto al tiempo máximo de llegada T_{at} .

B_j : Coeficiente de beneficio que se obtiene al atender el pedido j .

F_{ij} : Coeficiente de factibilidad o compatibilidad de asignar el camión i al pedido j .

p_j : Tiempo de carga en minutos del pedido de venta j .

e_j : Tiempo de entrega en minutos del pedido de venta j .

M : Valor lo suficientemente grande para el funcionamiento del modelo.

q_k : Cantidad de toneladas requeridas para satisfacer el pedido de venta k .

Q_i : Capacidad de carga en toneladas del camión i .

μ_t : Tiempo de inicio del intervalo t .

l_j : Cantidad de intervalos requeridos para cargar el pedido de venta j .

W_{jg} : Coeficiente de factibilidad o compatibilidad de cargar el pedido de venta j en el punto de despacho g .

w_g : Capacidad de despacho en simultáneo del punto de despacho g .

T_{at} : Tiempo máximo de llegada al punto de entrega.

Por lo tanto, el modelo desarrollado como parte del plan de mejora del proceso en estudio es formulado de la siguiente manera.

$$\max \sum_{j=1}^n B_j y_j + \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m \frac{1}{M} H_j^i \quad (\text{L.1})$$

$$s. a. \sum_{j=0; j \neq k}^n \sum_{i=1}^m F_{ik} x_{ijk} = y_k \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{L.2})$$

$$\sum_{k=1; j \neq k}^{n+1} \sum_{i=1}^m F_{ij} x_{ijk} = y_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{L.3})$$

$$\sum_{k=1; j \neq k}^{n+1} x_{ijk} - \sum_{k=0; j \neq k}^n x_{ikj} = 0 \quad (j = 1, 2, \dots, n; i = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{L.4})$$

$$\sum_{k=0; j \neq k}^{n+1} x_{i0k} \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{L.5})$$

$$\sum_{j=0; j \neq k}^{n+1} x_{ij(n+1)} \leq 1 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{L.6})$$

$$C_j^i + 2 p_j + 2 e_j - M(1 - x_{ijk}) \leq C_k^i \quad (j \neq k; i = 1, \dots, m; j = 0, \dots, n; k = 1, \dots, n + 1) \quad (\text{L.7})$$

$$\sum_{j=0; j \neq k}^n q_k x_{ijk} \leq Q_i \quad (i = 1, 2, \dots, m; k = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{L.8})$$

$$\alpha_{i00} = 1 \quad (i = 1, 2, \dots, m) \quad (\text{L.9})$$

$$C_j^i = \sum_{t=0}^s \mu_t \alpha_{ijt} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n) \quad (\text{L.10})$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{t=0}^s \alpha_{ijt} = y_j \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{L.11})$$

$$\sum_{h=t-l_{j+1}}^t \alpha_{ijh} = z_{ijt} \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n; t = 0, \dots, s) \quad (\text{L.12})$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n W_{jg} z_{ijt} \leq w_g \quad (t = 0, 1, \dots, s; g = 1, 2, \dots, r) \quad (\text{L.13})$$

$$\sum_{k=1; j \neq k}^{n+1} x_{ijk} = \sum_{t=0}^s \alpha_{ijt} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n) \quad (\text{L.14})$$

$$C_j^i + \sum_{k=1; j \neq k}^n (p_j + e_j - T_{at}) x_{ijk} + H_j^i = 0 \quad (i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n) \quad (\text{L.15})$$

$$x_{ijk} \in \{0,1\} \quad (j \neq k; i = 1, \dots, m; j = 0, \dots, n + 1; k = 0, \dots, n + 1)$$

$$y_j \in \{0,1\} \quad (j = 1, 2, \dots, n)$$

$$\alpha_{ijt} \in \{0,1\} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; t = 0, 1, \dots, s)$$

$$z_{ijt} \in \{0,1\} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n; t = 0, 1, \dots, s)$$

$$C_j^i \in \mathbb{Z}_{\geq 0} \quad (i = 1, 2, \dots, m; j = 0, 1, \dots, n)$$

$$H_j^i \geq 0 \quad (i = 1, 2, \dots, m ; j = 1, 2, \dots, n)$$

El modelo matemático propuesto utiliza seis conjuntos de variables de decisión. En primer lugar, las variables x_{ijk} , y_j y C_j^i están relacionadas con la asignación y secuenciación de los recursos a los trabajos. En segundo lugar, las variables α_{ijt} y z_{ijt} permiten incorporar el factor tiempo y espacio para asegurar el cumplimiento de las capacidades de despacho. Por último, la variable H_j^i cuantifica la holgura en la entrega de cada pedido.

La función objetivo que se presenta en (L.1) busca maximizar el beneficio que se obtiene por la atención de los pedidos de venta y considera una bonificación por las holguras conseguidas. Para tener la certeza de que dicha bonificación sea bastante menor que el beneficio del pedido, se incorpora un coeficiente lo suficientemente pequeño en el cálculo, el cual se define como el valor inverso de M .

En cuanto al grupo de restricciones, se plantean (L.2) y (L.3) para asegurar que exista una entrega precedente y una sucesora para cada pedido que forma parte de la solución. Mientras que la restricción (L.4) garantiza que la secuenciación se efectúe por medio del mismo vehículo. Por otra parte, este problema requiere el uso de los pedidos ficticios 0 y $n + 1$ con el fin de darle un inicio y un fin a la secuencia de entregas. Esto se logra mediante las restricciones (L.5) y (L.6), que aseguran que cada vehículo inicie y termine con dichos pedidos ficticios, respectivamente.

Asimismo, la restricción (L.7) impide la superposición temporal de pedidos y mantiene la factibilidad en la secuencia de entregas de cada vehículo por medio de un valor auxiliar M lo suficientemente grande. Por su parte, la restricción (L.8) asegura que la capacidad de carga de cada camión no sea excedida.

Hasta este punto se han presentado las restricciones relacionadas con la asignación y secuenciación de vehículos. Las restricciones que se muestran en las siguientes líneas incluyen las limitantes de espacio y tiempo que deben cumplirse dentro de las instalaciones de la empresa. La restricción (L.9) determina que el tiempo de inicio del pedido ficticio inicial sea en el minuto cero, mientras que la restricción (L.10) permite relacionar las variables de decisión C_j^i y α_{ijt} para que el tiempo de inicio de carga de cada pedido de venta j coincida con alguno de los s intervalos de tiempo. Además, la restricción (L.11) establece el intervalo de tiempo en el cual se inicia la carga de un pedido, si y solo si, este es atendido.

En consecuencia, para conocer si un pedido está siendo cargado en un determinado intervalo de tiempo se utiliza la restricción (L.12), la cual asigna un valor a la variable z_{ijt} a través del número de intervalos $h \in [t - l_j; t]$ en el cual dicho pedido podría estar siendo cargado. Adicionalmente, se plantea la restricción (L.13) que garantiza que la capacidad de despacho en cada punto no sea excedida en ninguno de los intervalos de tiempo.

Finalmente, la modelación del problema requiere dos condiciones complementarias para su correcto funcionamiento. Por una parte, la restricción (L.14) permite vincular las variables x_{ijk} y α_{ijt} para que cada asignación tenga una única secuencia y un único tiempo de inicio. Es decir, esta es una restricción de enlace que establece la conexión entre asignación, secuenciación y programación. Por otra parte, el modelo requiere variables de holgura H_j^i para lograr que las actividades de carga se realicen lo más temprano posible. Esto se logra por medio de la restricción (L.15), la cual plantea que cada pedido sea entregado antes del tiempo máximo de llegada T_{at} .

4.3.4. Estandarización de los coeficientes de beneficio en la función objetivo

Dado que el modelo de optimización posee una función objetivo de maximización, es razonable plantear la búsqueda del mayor ingreso económico; sin embargo, existen otros factores que deben ser considerados. Para ello se utiliza el Proceso de Jerarquía Analítica con el fin de estandarizar los atributos de interés en un único coeficiente, el cual se interpreta como el beneficio obtenido al programar y atender un determinado despacho.

En el Gráfico 27 se muestra la estructura jerárquica desarrollada para el presente caso de estudio, la cual busca proponer un plan eficiente para la programación de despachos. Seguidamente, el segundo nivel de la jerarquía contiene los tres atributos principales que son tomados en cuenta al priorizar los pedidos de ventas. Asimismo, el tercer nivel incluye las alternativas que distinguen a cada entrega. En los siguientes párrafos se exponen los detalles de cada uno de los atributos principales.

Margen de contribución unitario

Es el atributo principal en la modelación del problema y presenta ciertas desviaciones por la presencia de costos conjuntos en el caso de los productos químicos. Por este motivo, si se calculan los márgenes de contribución para cada producto de manera tradicional, entonces se obtendrían algunos valores negativos que no serían tomados en cuenta al resolver el modelo porque representarían una pérdida. Para solucionar

dicho inconveniente se propone realizar una conversión que proporcione un margen de contribución ajustado de acuerdo con la teoría de costos conjuntos.

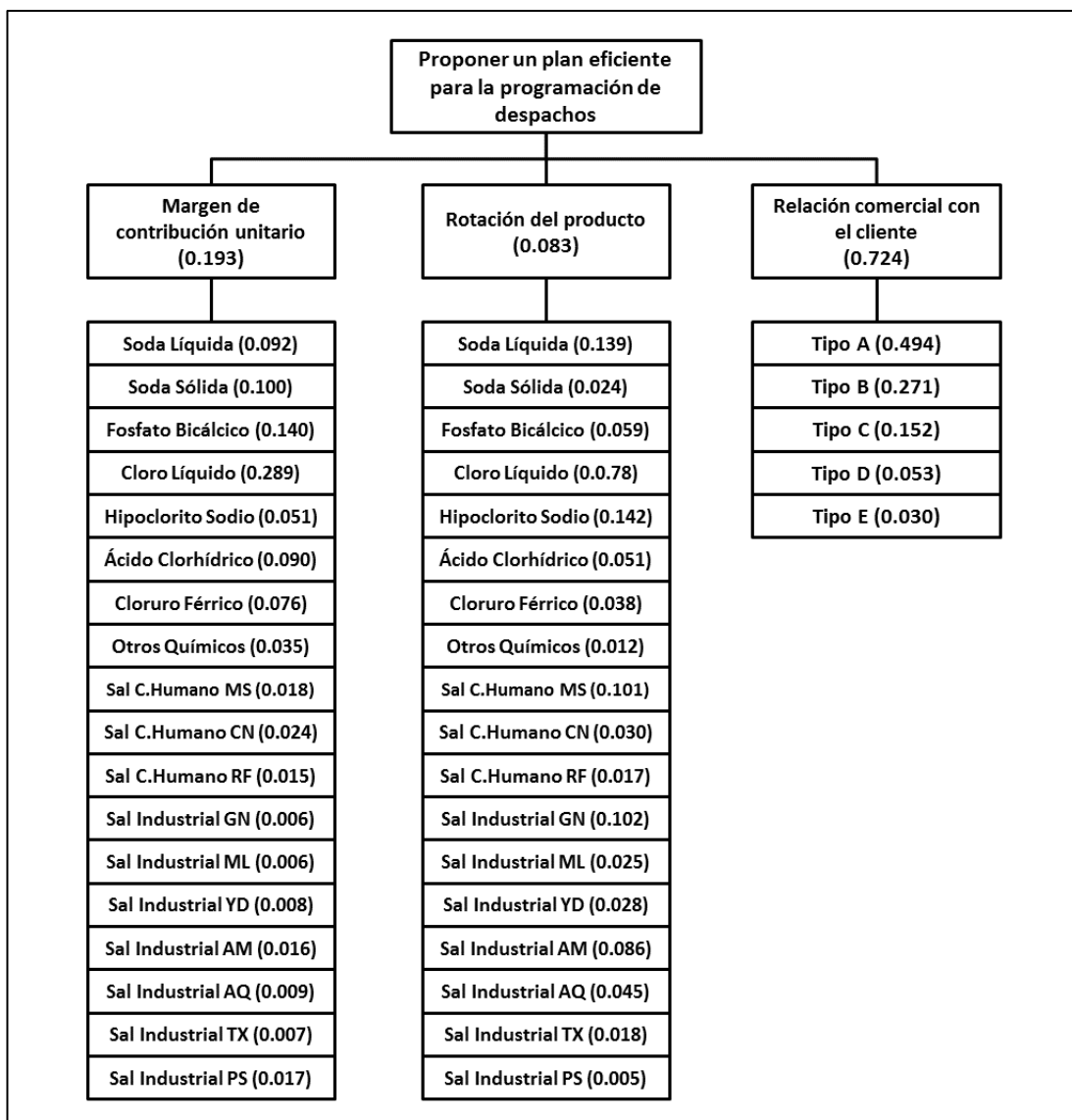


Gráfico 27: Jerarquía de decisión para la propuesta de un plan de eficiente para la programación de despachos.

Rotación del producto

Dado que existen productos que se despachan con mayor frecuencia que otros, es necesario establecer el grado de importancia en cuanto al número de movimientos que experimenta cada producto. Es decir, aquellas mercaderías que tengan alta rotación deben tener prioridad en la asignación del vehículo para garantizar que no se acumulen los pedidos de venta por programar.

Relación comercial con el cliente

El tercer atributo está basado en las relaciones comerciales que tiene la empresa con sus diversos clientes. En este sentido, las obligaciones comerciales, la cantidad de toneladas vendidas y el nivel de ingresos que estos proporcionan a la compañía son un factor importante a tener en cuenta. Por lo tanto, se espera que los principales clientes sean atendidos con mayor prioridad ante un posible empate.

Cálculo de importancia relativa entre atributos y sub-atributos

Para determinar la importancia relativa entre los tres atributos principales incluidos en el nivel II, se elaboró una matriz de comparaciones pareadas con el apoyo de colaboradores de la empresa. De este modo se obtuvo los valores mostrados entre paréntesis en el Gráfico 27 con una razón de consistencia aceptable, según la teoría de Thomas Saaty.

Con relación a los dos primeros atributos, se utilizó el tipo de producto para definir a los sub-atributos dentro del nivel III. De este modo, se pudo emplear datos reales para establecer las prioridades, según los márgenes de contribución ajustados y la cantidad de entregas realizadas en un trimestre. Por otra parte, en cuanto al tercer atributo, se estableció cinco tipos de clientes para fijar los sub-atributos dentro de este bloque. Adicionalmente, se construyó una segunda matriz de comparaciones pareadas a través de la cual se determinó la importancia relativa respecto a la relación comercial con el cliente.

Dado que a cada pedido de venta solo le corresponde uno de los sub-atributos dentro de cada bloque en el nivel III. Se deduce que las puntuaciones, que derivan de otras ramas que conforman la estructura jerarquía, serán cero al momento de calcular el resultado absoluto. Algo similar es presentado por (Saaty, T., Peniwati, K. & Shang, J., 2007) en donde se evalúa a los participantes en el proceso de reclutamiento de una pequeña *start-up* de biotecnología. En este estudio cada postulante es evaluado únicamente para un puesto, según los criterios que demanda el cargo. Por lo tanto, la calificación del candidato para los criterios de otros puestos será igual a cero.

4.3.5. Desarrollo del modelo de optimización en computadora

Hasta este punto se ha planteado el Problema de Programación de Despachos, se ha explicado la formulación algebraica del modelo de optimización y se ha descrito el método para calcular los coeficientes de beneficio en la función objetivo. Por ende, para construir, ejecutar y resolver el modelo propuesto se utiliza el software LINGO

junto con la información de prueba. A continuación, se presenta la modelación en computadora para el quinto día de información.

MODEL:

SETS:

```

!SETS PRIMITIVOS;
VEHICULOS:CAPACIDAD;
PEDIDOS:Y,BENEFICIO,TCARGA,TENTREGA,CANTIDAD,TSLOTS;
INTERVALOS:TINICIO;
PUNTOSDESPACHO:AFORO;
!SETS DERIVADOS;
SECUENCIA(VEHICULOS,PEDIDOS,PEDIDOS):X;
ASIGNACION(VEHICULOS,PEDIDOS):C,F,HOLGURA;
PTIEMPO(VEHICULOS,PEDIDOS,INTERVALOS):A,Z;
PLUGAR(PEDIDOS,PUNTOSDESPACHO):W;
END SETS

```

DATA:

```

!MIEMBROS DE LOS SETS;
VEHICULOS= VEH1 VEH2 VEH3 VEH4 VEH5 VEH6 VEH7 VEH8 VEH9
            VEH10 VEH11 VEH12 VEH13 VEH14 VEH15 VEH16;
PEDIDOS= PEDIDO1 PEDIDO2 PEDIDO3 PEDIDO4 PEDIDO5
          PEDIDO6 PEDIDO7 PEDIDO8 PEDIDO9 PEDIDO10
          PEDIDO11 PEDIDO12 PEDIDO13 PEDIDO14 PEDIDO15
          PEDIDO16 PEDIDO17 PEDIDO18 PEDIDO19 PEDIDO20;
INTERVALOS= INT1 INT2 INT3 INT4 INT5 INT6 INT7 INT8 INT9
            INT10 INT11 INT12 INT13 INT14 INT15 INT16 INT17 INT18 INT19
            INT20;
PUNTOSDESPACHO = PDESP1 PDESP2 PDESP3 PDESP4
                 PDESP5 PDESP6;
!PARÁMETROS DEL MODELO;
CAPACIDAD = 10 15 15 15 15 22 10 30 30 30
            30 50 50 50 50 50;
BENEFICIO = 0.00 38.72 38.72 22.52 37.56 42.00 42.00 42.00 42.00
            2.64 4.79 2.75 4.79 21.75 21.75 37.93 21.75 21.75 4.84
            0.00;
TCARGA = 0 37 39 45 54 97 117 81 48 46 77
          62 78 47 40 115 52 48 169 0;
TENTREGA = 0 42 48 117 86 86 36 86 86 56
            95 119 51 0 0 0 0 0 0;
CANTIDAD = 0.00 30.00 29.90 19.61 30.00 9.21 6.14 5.52 21.87
            4.00 15.00 10.00 15.00 30.68 30.20 13.55 10.18 28.66 31.45
            0.00;
TSLOTS = 0 2 2 3 3 5 6 5 3 3 4
          4 4 3 2 6 3 3 9 0;
TINICIO = 0 20 40 60 80 100 120 140 160 180 200
            220 240 260 280 300 320 340 360 0;
AFORO = 2 3 2 2 1 1;
!MATRIZ DE COEFICIENTES DE FACTIBILIDAD O COMPATIBILIDAD;
F =
1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 0 1
  0 0 0 0 0 0 0 0 1
1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1
  1 0 0 0 0 0 0 0 1
1 0 0 0 0 0 1 1 0 1 1 1
  1 0 0 0 0 0 0 0 1
1 0 0 0 0 0 0 0 0 1 1 1
  1 0 0 0 0 0 0 0 1

```



```

@FOR(VEHICULOS(I):@FOR(PEDIDOS(J)|J#NE#1#AND#J#NE#@SIZE(PEDIDOS):@SUM
M(SECUENCIA(I,J,K)|J#NE#K#AND#K#NE#1:X(I,J,K))-
@SUM(SECUENCIA(I,K,J)|J#NE#K#AND#K#NE#@SIZE(PEDIDOS):X(I,K,J)=0));
!(L.5);
@FOR(VEHICULOS(I):@SUM(SECUENCIA(I,J,K)|J#NE#K#AND#J#EQ#1:X(I,J,K))<
=1);
!(L.6);
@FOR(VEHICULOS(I):@SUM(SECUENCIA(I,J,K)|J#NE#K#AND#K#EQ#@SIZE(PEDIDO
S):X(I,J,K))<=1);
!(L.7);
@FOR(VEHICULOS(I):@FOR(PEDIDOS(J)|J#NE#@SIZE(PEDIDOS):@FOR(PEDIDOS(K
)|J#NE#K#AND#K#NE#1:C(I,J)+2*TCARGA(J)+2*TENTREGA(J)-1000*(1-
X(I,J,K))<=C(I,K)));
!(L.8);
@FOR(VEHICULOS(I):@FOR(PEDIDOS(K)|K#NE#1#AND#K#NE#@SIZE(PEDIDOS):@SU
M(SECUENCIA(I,J,K)|J#NE#K#AND#J#NE#@SIZE(PEDIDOS):CANTIDAD(K)*X(I,J,
K))<=CAPACIDAD(I));
!(L.9);
@FOR(VEHICULOS(I):A(I,1,1)=1);
!(L.10);
@FOR(VEHICULOS(I):@FOR(PEDIDOS(J)|J#NE#@SIZE(PEDIDOS):C(I,J)=@SUM(IN
TERVALOS(T)|T#NE#@SIZE(INTERVALOS):TINICIO(T)*A(I,J,T)));
!(L.11);
@FOR(PEDIDOS(J)|J#NE#1#AND#J#NE#@SIZE(PEDIDOS):@SUM(VEHICULOS(I):@SU
M(INTERVALOS(T)|T#NE#@SIZE(INTERVALOS):A(I,J,T))=Y(J));
!(L.12);
@FOR(VEHICULOS(I):@FOR(INTERVALOS(T)|T#NE#@SIZE(INTERVALOS):@FOR(PED
IDOS(J)|J#NE#1#AND#J#NE#@SIZE(PEDIDOS):@SUM(INTERVALOS(H)|H#LE#TSLOT
S(J):A(I,J,@IF(T-H+1#GT#0,T-H+1,@SIZE(INTERVALOS)))=Z(I,J,T)));
!(L.13);
@FOR(INTERVALOS(T)|T#NE#@SIZE(INTERVALOS):@FOR(PUNTOSDESPACHO(G):@SU
M(VEHICULOS(I):@SUM(PEDIDOS(J)|J#NE#1#AND#J#NE#@SIZE(PEDIDOS):W(J,G)
*Z(I,J,T))<=AFORO(G));
!(L.14);
@FOR(VEHICULOS(I):@FOR(PEDIDOS(J)|J#NE#@SIZE(PEDIDOS):@SUM(PEDIDOS(K
)|J#NE#K#AND#K#NE#1:X(I,J,K))=@SUM(INTERVALOS(T)|T#NE#@SIZE(INTERVAL
OS):A(I,J,T)));
!(L.15);
@FOR(VEHICULOS(I):@FOR(PEDIDOS(J)|J#NE#1#AND#J#NE#@SIZE(PEDIDOS):C(I
,J)+@SUM(PEDIDOS(K)|J#NE#K#AND#K#NE#1:(TCARGA(J)+TENTREGA(J)-
480)*X(I,J,K))+HOLGURA(I,J)=0));

!INPUT - DESPACHOS EX PLANTA;
A(14,14,16)=1;
A(14,15,5)=1;
A(12,16,6)=1;
A(13,17,8)=1;
A(15,18,8)=1;
A(16,19,13)=1;

!RANGO DE EXISTENCIA;
@FOR(SECUENCIA(I,J,K)|J#NE#K:@BIN(X(I,J,K)));
@FOR(PEDIDOS(J)|J#NE#1#AND#J#NE#@SIZE(PEDIDOS):@BIN(Y(J)));
@FOR(PTIEMPO(I,J,T)|J#NE#1#AND#J#NE#@SIZE(PEDIDOS):@BIN(A(I,J,T)));
@FOR(PTIEMPO(I,J,T)|J#NE#1#AND#J#NE#@SIZE(PEDIDOS):@BIN(Z(I,J,T)));
@FOR(ASIGNACION(I,J):@GIN(C(I,J)));
@FOR(VEHICULOS(I):@FOR(PEDIDOS(J)|J#NE#1#AND#J#NE#@SIZE(PEDIDOS):HOL
GURA(I,J)>=0));

```


CAPÍTULO 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

En el presente capítulo se muestran los resultados obtenidos al ejecutar el modelo de optimización y se realiza el análisis con relación a la asignación, secuenciación y programación de las unidades de carga a los pedidos de venta. Para ello se compara la información real o de prueba de una semana con la programación de despachos propuesta por el modelo.

5.1. Asignación de unidades de carga y secuenciación de pedidos de ventas

Para analizar la variación, en términos de asignación y secuenciación, únicamente se considera a los despachos del tipo estándar. Esto se debe a que los despachos ex planta son parte de la información de entrada en el modelo de optimización y por lo tanto deben permanecer iguales a la data real.

En la Tabla 15 se muestran los resultados con relación a la asignación de los vehículos. Como resultado general se obtiene que el 37.35% de los camiones registraron alguna variación respecto a la asignación original. Asimismo, cabe resaltar que si se solo se toma en cuenta aquellas modificaciones, que impliquen un cambio en las secuencias de entrega, se tendría que el 9.64% de las unidades experimentan un cambio significativo.

Tabla 15: Variación en la asignación de vehículos.

Día	Cantidad de Vehículos	Asignaciones Modificadas	Asignaciones y Secuencias Modificadas	Porcentaje de Asignaciones Modificadas	Porcentaje de Asignaciones y Secuencias Modificadas
Lunes	10	4	2	40.00%	20.00%
Martes	15	5	4	33.33%	26.67%
Miércoles	13	2	0	15.38%	0.00%
Jueves	15	7	0	46.67%	0.00%
Viernes	11	6	2	54.55%	18.18%
Sábado	19	7	0	36.84%	0.00%
Total	83	31	8	37.35%	9.64%

Para profundizar los resultados, se muestra la Tabla 16 con la solución del modelo para el primer día de prueba. En esta tabla se observa que cuatro de los diez camiones cambiaron su asignación respecto a la información inicial, pero solo tres pedidos presentaron una modificación en las secuencias de entregas. Por ejemplo, originalmente el vehículo 3 atiende el pedido 3 y luego el pedido 2, mientras que el vehículo 6 completa el pedido 5. Por otra parte, en la solución propuesta por el modelo el vehículo 1 se encarga del despacho del pedido 2 y posteriormente el

pedido 5, en tanto el vehículo 4 completa la entrega del pedido 3. Por lo tanto, solo dos de las asignaciones incluyen un cambio en la secuencia de entregas.

Adicionalmente, cabe resaltar que existen pedidos de ventas en los cuales solo se modifica la asignación del vehículo, mas no la secuencia de entregas. Esta situación se puede ejemplificar con las asignaciones del pedido 6 y el pedido 11. El primero de ellos fue asignado inicialmente al vehículo 1 y en la solución propuesta se derivó al vehículo 6. Sin embargo, como se aprecia en la Tabla 16 la secuencia en ambos casos es $(0 - 6 - n+1)$. Por su parte, el pedido 11 tiene la secuencia $(0 - 11 - n+1)$ para el vehículo 4 en la data real y para el vehículo 3 en la propuesta del modelo.

Tabla 16: Resultados de la asignación y secuenciación del primer día de prueba.

Unidad de Carga	Secuenciación Información Real	Secuenciación Modelo de Optimización
Vehículo 1	$(0 - 6 - n+1)$	$(0 - 2 - 5 - n+1)$
Vehículo 2	$(0 - 12 - n+1)$	$(0 - 12 - n+1)$
Vehículo 3	$(0 - 3 - 2 - n+1)$	$(0 - 11 - n+1)$
Vehículo 4	$(0 - 11 - n+1)$	$(0 - 3 - n+1)$
Vehículo 5	$(0 - 4 - n+1)$	$(0 - 4 - n+1)$
Vehículo 6	$(0 - 5 - n+1)$	$(0 - 6 - n+1)$
Vehículo 7	$(0 - 7 - n+1)$	$(0 - 7 - n+1)$
Vehículo 8	$(0 - 8 - n+1)$	$(0 - 8 - n+1)$
Vehículo 9	$(0 - 9 - n+1)$	$(0 - 9 - n+1)$
Vehículo 10	$(0 - 10 - n+1)$	$(0 - 10 - n+1)$

Por otra parte, en cuanto a lo relacionado con la secuenciación de pedidos, el resultado general indica que el 13.79% de los despachos sufrieron algún cambio en el orden de entrega. No obstante, este resultado está estrechamente vinculado con la relación que existe entre el número de camiones y la cantidad de pedidos por atender en un día. Por consiguiente, en aquellos días en los que la relación es igual a uno; es decir, se tiene un camión por cada pedido, tanto la información de prueba como la propuesta del modelo formulan la secuencia $(0 - j - n+1)$ para todos los pedidos. En cambio, en los días en los que se tiene más pedidos que camiones, se registró que en promedio el 30.00% de las entregas presentaron alguna modificación respecto a la secuencia original, tal como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 17: Variación en la secuenciación de pedidos de venta.

Día	Cantidad de Vehículos	Cantidad de Pedidos	Relación	Pedidos con Secuencia Modificada	Porcentaje de Secuencia Modificada
Lunes	10	11	0.91	3	27.27%
Martes	15	17	0.88	6	35.29%
Miércoles	13	13	1.00	0	0.00%
Jueves	15	15	1.00	0	0.00%
Viernes	11	12	0.92	3	25.00%
Sábado	19	19	1.00	0	0.00%
Total	83	87	0.95	12	13.79%

5.2. Programación de actividades de carga de los pedidos de ventas

Para evaluar los resultados, respecto a la programación de las actividades de carga, se consideran dentro del análisis a los pedidos tipo estándar y a los pedidos tipo ex planta. Dado que estos últimos son un *input* en el modelo de optimización, ya cuentan con una hora de ingreso programada a las instalaciones. Es decir, ya tienen horarios reservados en los cuales no se podrán programar los despachos tipo estándar.

El hallazgo más importante en el análisis de la información de prueba es que en cinco de los seis días se excedió la capacidad de despacho en alguno de los puntos de despacho dentro de las instalaciones. En este sentido, el punto de despacho con las mayores incidencias es Puente Químico, en el cual se encuentran dos de los principales productos de la compañía. Seguidamente, se observó que Refinería suele experimentar la acumulación de camiones luego de las dos de la tarde. Además, hay otros puntos despacho como Cloro Líquido y Producto Ferroso, que presentaron problemas en dos de los seis días.

En el Gráfico 28 se muestran los resultados del tercer día de prueba en donde se puede observar que las capacidades de despacho en Puente Químico y Cloro Líquido son excedidas. En ambos casos la capacidad es de dos unidades de carga en simultáneo; sin embargo, esto no se cumple a las 09:20 am en el caso de Puente Químico y a las 12:00 pm en el caso de Cloro Líquido. En el gráfico esto se ve representado por medio de una tercera fila de capacidad, la cual se encuentra sombreada de color e incluye el número del despacho que incumple la restricción.

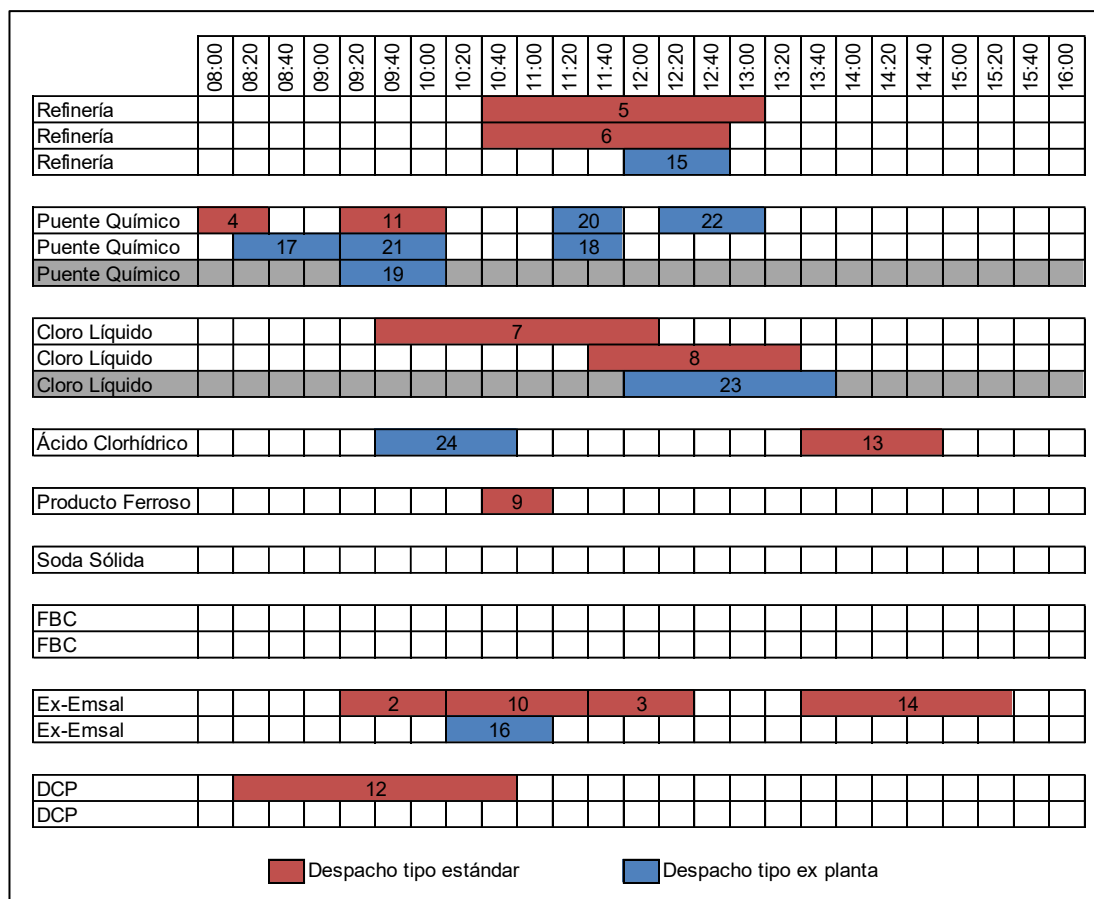


Gráfico 28: Programación de despacho real del tercer día de prueba.

Los resultados que se obtienen del modelo de optimización permiten comprobar que este es capaz de evitar que las capacidades de despacho sean excedidas en cualquiera de los puntos de despacho en la planta. En consecuencia, la programación propuesta por el modelo resulta más eficiente en cuanto al uso del espacio. Esto se puede ejemplificar por medio del Gráfico 29 en donde se compara la programación real de los despachos en el segundo día de prueba contra la solución propuesta por el modelo de optimización para el mismo día y el mismo punto de despacho.

En este caso la capacidad de despacho es superada en dos unidades de carga, lo cual es resuelto en la solución propuesta por el modelo. Del mismo modo se observa que los despachos tipo ex planta, que se encuentran marcados de color azul, mantienen su tiempo de inicio. Mientras que los despachos tipo estándar, marcados en color granate, son acomodados en los espacios disponibles. De esta manera, se obtiene una programación continua, con despachos uno después de otro y sin exceder las capacidades de las instalaciones.

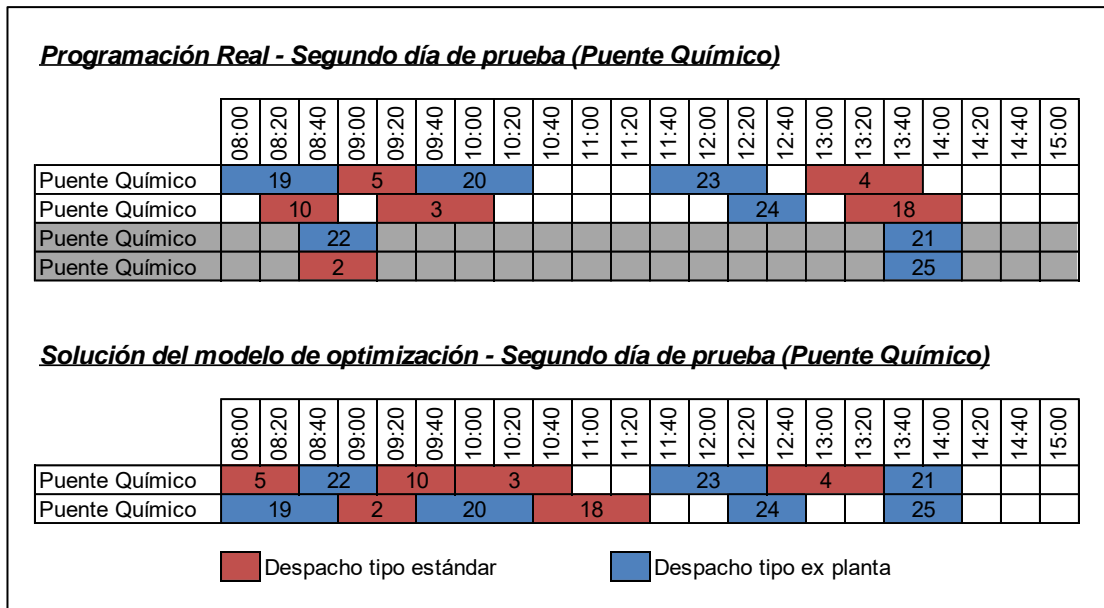


Gráfico 29: Comparación de la programación real contra la solución del modelo para el segundo día de prueba en Puente Químico.

Asimismo, el modelo de optimización también tiene la capacidad de adelantar el inicio de las actividades de carga de los pedidos de venta al tiempo más temprano que se encuentre disponible. Por ejemplo, en el Gráfico 30 se muestra la programación real y la solución del modelo para el primer día de prueba en Puente Químico.

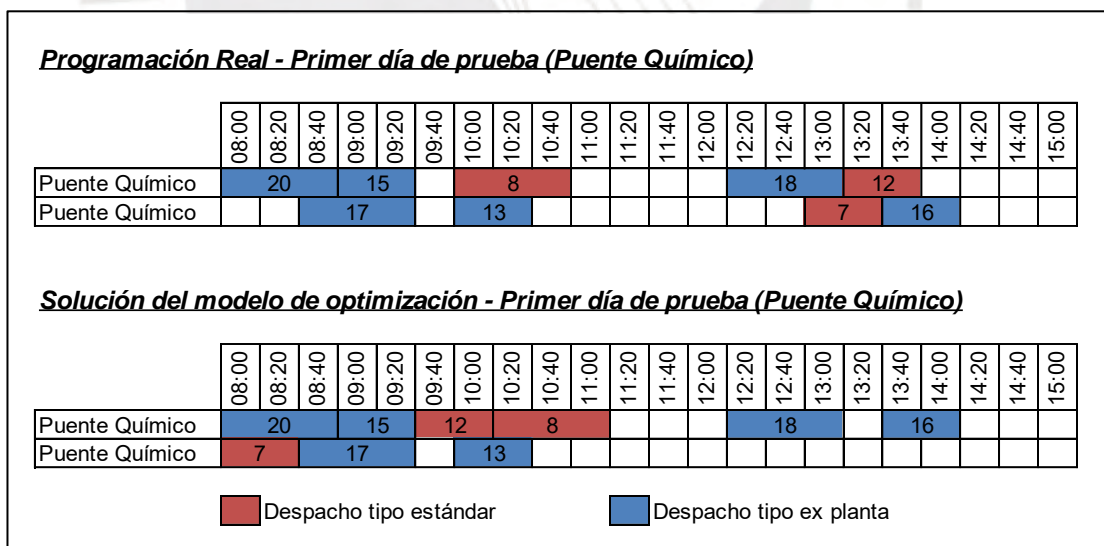


Gráfico 30: Comparación de la programación real contra la solución del modelo para el primer día de prueba en Puente Químico.

Tal como se puede observar en el cuadro anterior, los tiempos de inicio de los despachos tipo estándar fueron adelantados. En este sentido, tener la información con anterioridad para aplicar el modelo posibilita que el pedido siete inicie sus

actividades de carga a las 08:00 am en lugar de la 01:00 pm. Mientras que los pedidos ocho y doce pueden ser reacomodados entre las 09:40 am y las 11:00 am. Por una parte, el pedido ocho se retrasa veinte minutos; en tanto, el pedido doce inicia tres horas y cuarenta minutos antes.

Adicionalmente, la capacidad que tiene el modelo para adelantar los tiempos de inicio de carga, posibilitaría que algunos de los pedidos de la tarde sean cargados antes y así evitar que se congestionen vehículos más adelante, especialmente en el caso de Refinería. También se liberaría capacidad de carga para poder atender nuevos pedidos de ventas, incluyendo alguno que pueda recibirse el mismo día.



CAPÍTULO 6. EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA PROPUESTA

En el presente capítulo se desarrolla la evaluación de la propuesta de mejora desde el punto de vista económico para determinar la viabilidad de su implementación. Para ello se realiza un análisis bajo el enfoque de ingresos y costos relevantes con el fin de elaborar el flujo de caja de la propuesta. Además, se hace una estimación de los parámetros utilizados en la evaluación y se calculan los indicadores económicos.

6.1. Identificación de ingresos y egresos relevantes

Según (Horngren, C., Datar, S. & Rajan, M., 2012) para que un ingreso o egreso sea considerado como relevante deben cumplirse dos condiciones. La primera de ellas es que tenga lugar en el futuro, mientras que la segunda implica que marquen la diferencia entre dos acciones o escenarios alternativos. En este caso se evalúa la decisión de implementar o no la propuesta de mejora.

6.1.1. Ingresos relevantes generados por la propuesta

Con la implementación de esta propuesta se espera tener una mejor planificación de las actividades de despacho del día siguiente, lo cual significa mejorar la utilización y disponibilidad de los puntos de despacho. En este sentido, según los resultados que se obtuvieron de la información de prueba y el análisis efectuado en el capítulo anterior, indican que los puntos de despacho que se serían mayormente beneficiados con la propuesta serían Refinería y Puente Químico.

Asimismo, considerando el enfoque de relevancia, se espera que la mejora pueda traducirse en un ingreso adicional, el cual es generado al aceptar un requerimiento del cliente imprevisto o no planificado. Es decir, se estima que durante cada mes existen potenciales pedidos de venta que pueden materializarse en un despacho siempre y cuando la empresa tenga la capacidad de poder realizarlo. De esta manera, la mejora en Refinería y Puente Químico contribuyen a aumentar la capacidad de respuesta de la empresa para aceptar los pedidos imprevistos, por lo cual estos ingresos adicionales son relevantes. El caso contrario ocurre con los otros puntos de despacho porque podrían aceptar y realizar los pedidos imprevistos sin la necesidad de implementar la mejora; es decir, para estos casos los potenciales ingresos no son relevantes.

Para este caso se está considerando un escenario conservador en el cual la Refinería podría realizar dos despachos adicionales durante cada mes. Para ello se está tomando en cuenta los dos productos con el mayor volumen de ventas en el año que

son la Sal Industrial GN y la Sal Industrial AM. Adicionalmente, en base a la data histórica de las ventas más frecuentes, se contempla que las cantidades de cada uno de los despachos es de diez y siete toneladas, respectivamente.

Por otra parte, en cuanto a Puente Químico, este es el punto de despacho que se ve mayormente beneficiado con la propuesta de mejora, tal como se ha evaluado en el capítulo anterior. En este caso, se estima que se podrá despachar un camión adicional con quince toneladas de soda cáustica líquida, lo cual equivale a siete toneladas en base seca. Asimismo, también se incluye la venta adicional de un camión con diez toneladas de hipoclorito de sodio, manteniendo un escenario conservador. De este modo, los ingresos relevantes equivaldrían a cuatro camiones adicionales cada mes.

Tabla 18: Cantidad de toneladas adicionales vendidas por producto.

Toneladas Adicionales	Periodo 0	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
Soda Cáustica Líquida			7	7	7	7	7
Hipoclorito de Sodio			10	10	10	10	10
Sal C.Industrial GN			10	10	10	10	10
Sal C.Industrial AM			7	7	7	7	7

Toneladas Adicionales	Periodo 7	Periodo 8	Periodo 9	Periodo 10	Periodo 11	Periodo 12
Soda Cáustica Líquida	7	7	7	7	7	7
Hipoclorito de Sodio	10	10	10	10	10	10
Sal C.Industrial GN	10	10	10	10	10	10
Sal C.Industrial AM	7	7	7	7	7	7

6.1.2. Egresos relevantes generados por la propuesta

Con relación a los egresos originados por la propuesta de mejora se contempla la contratación de un analista de transporte con un sueldo básico de S/ 3,000, que se encargará de realizar la corrida del modelo y la programación de los despachos para el día siguiente. Asimismo, se le asignará la tarea de levantar información del proceso, documentar los hallazgos y llevar el control de los indicadores. Se plantea que los dos primeros meses sirvan como un periodo de conocimiento del proceso y preparación para la implementación del modelo de optimización. Posteriormente, durante el tercer periodo se propone la contratación de un practicante con una remuneración de S/ 1,000 para que apoye con las tareas de coordinación y seguimiento de lo planificado durante el día.

En ambos casos se consideran todos los egresos relacionados a los beneficios sociales como gratificaciones, ESSALUD, CTS y el pago de utilidades en el caso del

personal que se encuentre en planilla. Mientras, que en el caso del practicante se está considerando bonificación que se otorga cada seis meses.

Por otra parte, en cuanto la inversión en activo fijo se tiene planificada la compra de dos laptops valorizadas en \$ 1,267 más IGV cada una y un equipo celular, cuyo costo asciende a S/ 379 incluido IGV. Asimismo, existe una inversión en activo intangible correspondiente al uso de licencia SAP, que por contrato mantiene un costo de adquisición de \$ 720 por cada una, afecto a IGV. Además, se debe adquirir la licencia LINGO Ext. por monto de \$ 4,995, la cual permite el uso ilimitado de restricciones y variables.

Finalmente, se incurrirá en otros gastos operativos como el mantenimiento anual de cada una de las licencias SAP, que asciende a \$ 158.40 más IGV. Además, existe un costo asociado al plan de telefonía por S/ 41.90 para el celular proporcionado por la compañía. Por último, se deberá adquirir dos licencias para utilizar el correo electrónico, cuyo costo es de \$ 49.92 más IGV por cada una de ellas.

6.2. Flujo de caja

En la elaboración del flujo de caja de la presente propuesta de mejora, se considera que los ingresos y los costos de producción de las toneladas adicionales son relevantes para el análisis. Asimismo, se incluye todos los egresos que fueron mencionados en el punto anterior incluido el impuesto correspondiente. Con relación al financiamiento que requiere la propuesta de mejora, este sería asumido en su integridad con aportes propios dado que la empresa está en la capacidad de poder cubrirlos.

A continuación, se presenta el flujo de caja con los ingresos y egresos relevantes que se generan a partir de la propuesta de mejora. Cabe destacar que el presente flujo de caja es desarrollado en dólares porque es la moneda funcional con la que la empresa declara sus estados financieros.

Tabla 19: Flujo de caja de la propuesta de mejora – Parte I.

\$ (USD)	Periodo 0	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
Ingresos							
Venta Adicional Refinería			1,833	1,833	1,833	1,833	1,833
Venta Adicional Puente Químico			5,886	5,886	5,886	5,886	5,886
Total Ingresos	0	0	7,718	7,718	7,718	7,718	7,718
Egresos							
C.Venta Adicional Refinería			1,076	1,076	1,076	1,076	1,076
C.Venta Adicional Puente Químico			2,240	2,240	2,240	2,240	2,240
Gastos Administrativos	1,614	1,614	1,614	1,920	1,920	1,920	1,920
Equipos de Cómputo y Comunicación	1,595	0	0	1,495	0	0	0
Software y Licencias	5,845	0	0	850	0	0	0
Total Egresos	9,054	1,614	4,930	7,580	5,236	5,236	5,236
Flujo de Caja del Periodo	-9,054	-1,614	2,788	138	2,483	2,483	2,483

En la Tabla 19 se presenta el flujo de caja del primer semestre del año en donde se puede observar que los dos primeros periodos están destinados a profundizar los conocimientos sobre el proceso y realizar los ajustes necesarios para poner en marcha el uso del modelo de optimización. Además, se puede observar que en el tercer periodo se tiene planeado el ingreso de una persona adicional junto con los egresos los equipos de cómputo y licencias que se le asignará. En la tabla que se muestra a continuación se presenta el flujo de caja para el segundo semestre.

Tabla 20: Flujo de caja de la propuesta de mejora – Parte II.

\$ (USD)	Periodo 7	Periodo 8	Periodo 9	Periodo 10	Periodo 11	Periodo 12
Ingresos						
Venta Adicional Refinería	1,833	1,833	1,833	1,833	1,833	1,833
Venta Adicional Puente Químico	5,886	5,886	5,886	5,886	5,886	5,886
Total Ingresos	7,718	7,718	7,718	7,718	7,718	7,718
Egresos						
C.Venta Adicional Refinería	1,076	1,076	1,076	1,076	1,076	1,076
C.Venta Adicional Puente Químico	2,240	2,240	2,240	2,240	2,240	2,240
Gastos Administrativos	1,920	1,920	1,920	1,920	1,920	1,920
Equipos de Cómputo y Comunicación	0	0	0	0	0	0
Software y Licencias	0	0	0	0	0	0
Total Egresos	5,236	5,236	5,236	5,236	5,236	5,236
Flujo de Caja del Periodo	2,483	2,483	2,483	2,483	2,483	2,483

6.3. Cálculo de WACC y COK

Antes de efectuar el análisis de los indicadores económicos de la presente mejora, es necesario determinar el costo ponderado de capital (WACC - *Weighted Average Cost of Capital*) con el cual se traerá al presente cada uno de los flujos. En este caso, dado que la totalidad de la inversión será financiada por la empresa, el WACC es equivalente al COK – Costo de Capital, que será calculado de la siguiente manera.

$$COK = R_f + \beta(R_m - R_f) + R_p$$

En donde:

R_f : Tasa libre de riesgo.

β : Rentabilidad del sector respecto a la rentabilidad del mercado.

R_m : Rentabilidad del mercado.

R_p : Riesgo país.

La mayoría de las variables de entrada, que requiere esta fórmula, son obtenidas de la base de datos del profesor Aswath Damodaran, quien es un reconocido docente en la Escuela de Negocios de la Universidad de Nueva York.

Para determinar el valor de la tasa libre de riesgo y la rentabilidad del mercado se toma la información del retorno histórico de acciones, bonos y letras. En el caso de la tasa libre de riesgo se considera el promedio geométrico del retorno de los últimos diez años del bono del tesoro americano. Dada la solidez de la economía americana, se podría decir que este bono representa una inversión segura.

Por otra parte, para la rentabilidad del mercado se toma en cuenta el promedio geométrico del retorno de los últimos diez años del *Standard & Poor's 500*, que es uno de los índices bursátiles más importantes en Estados Unidos. La relevancia de este índice radica en que incluye a las quinientas empresas más representativas en la bolsa de Nueva York y que pertenecen a diversos sectores económicos. Por lo tanto, se puede decir que representa la situación del mercado.

Por último, en cuanto al parámetro β se emplea la tabla con los valores apalancados y desapalancados por tipo de sector para mercados emergentes. En este caso, el sector es químicos básicos y se utiliza únicamente el valor desapalancado debido a la ausencia de pasivos a terceros. Mientras que el riesgo país es tomado de una publicación en el diario Gestión, según el índice EMBI calculado por JP Morgan.

En la Tabla 21 se presentan los valores de cada una de las variables de entrada y se reemplazan en la fórmula para determinar el costo de capital. Asimismo, se muestra el cambio en la tasa para obtener un COK con capitalización mensual. De esta manera, el costo de capital sería de 1.17% al mes.

Tabla 21: Valores de las variables de entrada y cálculo de COK.

Parámetro	Valor	Fuente
Tasa libre de riesgo	4.40%	Base de Datos Aswath Damodaran
Beta	0.96	Base de Datos Aswath Damodaran
Rentabilidad del mercado	13.75%	Base de Datos Aswath Damodaran
Riesgo país	1.54%	Diario Gestión
COK (Anual)	14.92%	
COK (Mensual)	1.17%	

6.4. Evaluación de indicadores económicos

El análisis económico de la presente propuesta se realiza por medio de tres indicadores, los cuales se detallan a continuación. El primero de ellos es el Periodo de Recuperación de la Inversión – PRI, el cual es de siete meses.

En segundo lugar, el Valor Actual Neto – VAN del proyecto asciende a \$ 12,581.39, considerando que el costo de capital es de 1.17%. Por lo tanto, desde este punto de vista se puede concluir que la propuesta es rentable dado que el VAN es positivo.

Finalmente, en cuanto a la Tasa Interna de Retorno – TIR, esta tiene un valor de 14.10%, que resulta mayor que el costo de capital. Teniendo en cuenta que, el flujo de caja es del tipo convencional y que la TIR es mayor que el COK; entonces, se concluye que la propuesta de mejora es factible.

Tabla 22: Indicadores económicos de la propuesta de mejora.

Indicador Económico	Valor
Periodo de Recuperación de la Inversión – PRI	7 meses
Valor Actual Neto – VAN	12,581
Tasa Interna de Retorno – TIR	14.10%

6.5. Análisis de sensibilidad

El presente análisis de sensibilidad está basado en la variabilidad que podría existir en el número de ventas adicionales. Dado que esta variable no es controlada por la empresa podría afectar en los resultados de la propuesta de mejora. Para ello se considera un escenario pesimista y uno optimista.

El escenario pesimista consiste en que el número de toneladas adicionales vendidas se reduce en 40% respecto escenario base. De este modo, solo se toma en cuenta la venta de cinco toneladas de Sal Industrial GN y Sal Industrial AM. Mientras que, en el caso de los productos químicos, la venta es de cinco toneladas de soda cáustica en base seca al mes y diez toneladas de hipoclorito de sodio cada dos meses.

Tabla 23: Cantidad de toneladas adicionales vendidas – Escenario pesimista.

Toneladas Adicionales	Periodo 0	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
Soda Cáustica Líquida			5	5	5	5	5
Hipoclorito de Sodio			10		10		10
Sal C.Industrial GN			5	5	5	5	5
Sal C.Industrial AM			5	5	5	5	5

Toneladas Adicionales	Periodo 7	Periodo 8	Periodo 9	Periodo 10	Periodo 11	Periodo 12
Soda Cáustica Líquida	5	5	5	5	5	5
Hipoclorito de Sodio		10		10		10
Sal C.Industrial GN	5	5	5	5	5	5
Sal C.Industrial AM	5	5	5	5	5	5

A continuación, se muestra el flujo de caja de la propuesta de mejora en el escenario pesimista para el primer semestre del año.

Tabla 24: Flujo de caja de la propuesta de mejora en escenario pesimista – Parte I.

\$ (USD)	Periodo 0	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
Ingresos							
Venta Adicional Refinería			1,160	1,160	1,160	1,160	1,160
Venta Adicional Puente Químico			4,763	2,806	4,763	2,806	4,763
Total Ingresos	0	0	5,923	3,966	5,923	3,966	5,923
Egresos							
C.Venta Adicional Refinería			670	670	670	670	670
C.Venta Adicional Puente Químico			1,831	1,021	1,831	1,021	1,831
Gastos Administrativos	1,614	1,614	1,614	1,920	1,920	1,920	1,920
Equipos de Cómputo y Comunicación	1,595	0	0	1,495	0	0	0
Software y Licencias	5,845	0	0	850	0	0	0
Total Egresos	9,054	1,614	4,116	5,955	4,421	3,611	4,421
Flujo de Caja del Periodo	-9,054	-1,614	1,807	-1,989	1,502	356	1,502

Seguidamente, por medio de la Tabla 25 se presenta la continuación del es escenario pesimista para reflejar el comportamiento durante el segundo semestre.

Tabla 25: Flujo de caja de la propuesta de mejora en escenario pesimista – Parte II.

\$ (USD)	Periodo 7	Periodo 8	Periodo 9	Periodo 10	Periodo 11	Periodo 12
Ingresos						
Venta Adicional Refinería	1,160	1,160	1,160	1,160	1,160	1,160
Venta Adicional Puente Químico	2,806	4,763	2,806	4,763	2,806	4,763
Total Ingresos	3,966	5,923	3,966	5,923	3,966	5,923
Egresos						
C.Venta Adicional Refinería	670	670	670	670	670	670
C.Venta Adicional Puente Químico	1,021	1,831	1,021	1,831	1,021	1,831
Gastos Administrativos	1,920	1,920	1,920	1,920	1,920	1,920
Equipos de Cómputo y Comunicación	0	0	0	0	0	0
Software y Licencias	0	0	0	0	0	0
Total Egresos	3,611	4,421	3,611	4,421	3,611	4,421
Flujo de Caja del Periodo	356	1,502	356	1,502	356	1,502

En consecuencia, los tres indicadores económicos experimentaron variaciones respecto al escenario base. En primer lugar, el PRI incrementa de siete a quince meses debido a la reducción en los ingresos. Por otra parte, el VAN en el escenario pesimista es de \$ -2,659.02, mientras que la TIR es -2.49%. Desde esta perspectiva la mejora no sería rentable en un horizonte de tiempo de doce meses; sin embargo, permitiría aumentar la disponibilidad para despachar productos. Es decir, seguiría generando resultados durante los próximos meses, lo cual se refleja en el PRI que ocurriría durante el segundo año.

Tabla 26: Indicadores económicos de la propuesta de mejora – Escenario pesimista.

Indicador Económico	Valor
Periodo de Recuperación de la Inversión - PRI	15 meses
Valor Actual Neto - VAN	-2,659
Tasa Interna de Retorno - TIR	-2.49%

Por otra parte, el escenario optimista ilustra un contexto mucho más favorable para ambos negocios. En el caso de las sales, las ventas adicionales de Sal Industrial GN serían de quince toneladas al mes; mientras que en la Sal Industrial AM pasarían a ser diez toneladas mensuales. En cuanto al negocio químico, se toma en cuenta la venta adicional de un camión cisterna cada dos meses para el caso de soda cáustica e hipoclorito de sodio, respecto al escenario base. En la Tabla 27 se presenta la distribución de las ventas adicionales en cada periodo.

Tabla 27: Cantidad de toneladas adicionales vendidas – Escenario optimista.

Toneladas Adicionales	Periodo 0	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
Soda Cáustica Líquida			7	15	7	15	7
Hipoclorito de Sodio			20	10	20	10	20
Sal C.Industrial GN			15	15	15	15	15
Sal C.Industrial AM			10	10	10	10	10

Toneladas Adicionales	Periodo 7	Periodo 8	Periodo 9	Periodo 10	Periodo 11	Periodo 12
Soda Cáustica Líquida	15	7	15	7	15	7
Hipoclorito de Sodio	10	20	10	20	10	20
Sal C.Industrial GN	15	15	15	15	15	15
Sal C.Industrial AM	10	10	10	10	10	10

De esta manera, el flujo de caja de la propuesta de mejora en el escenario optimista para el primer semestre sería como se muestra en la siguiente tabla.

Tabla 28: Flujo de caja de la propuesta de mejora en escenario optimista – Parte I.

\$ (USD)	Periodo 0	Periodo 1	Periodo 2	Periodo 3	Periodo 4	Periodo 5	Periodo 6
Ingresos							
Venta Adicional Refinería			2,668	2,668	2,668	2,668	2,668
Venta Adicional Puente Químico			7,842	10,375	7,842	10,375	7,842
Total Ingresos	0	0	10,510	13,043	10,510	13,043	10,510
Egresos							
C.Venta Adicional Refinería			1,570	1,570	1,570	1,570	1,570
C.Venta Adicional Puente Químico			3,050	3,873	3,050	3,873	3,050
Gastos Administrativos	1,614	1,614	1,614	1,920	1,920	1,920	1,920
Equipos de Cómputo y Comunicación	1,595	0	0	1,495	0	0	0
Software y Licencias	5,845	0	0	850	0	0	0
Total Egresos	9,054	1,614	6,235	9,707	6,540	7,363	6,540
Flujo de Caja del Periodo	-9,054	-1,614	4,275	3,336	3,970	5,680	3,970

A continuación, se completa el flujo de caja para la segunda parte del año del escenario optimista mediante la Tabla 29.

Tabla 29: Flujo de caja de la propuesta de mejora en escenario optimista – Parte II.

\$ (USD)	Periodo 7	Periodo 8	Periodo 9	Periodo 10	Periodo 11	Periodo 12
Ingresos						
Venta Adicional Refinería	2,668	2,668	2,668	2,668	2,668	2,668
Venta Adicional Puente Químico	10,375	7,842	10,375	7,842	10,375	7,842
Total Ingresos	13,043	10,510	13,043	10,510	13,043	10,510
Egresos						
C.Venta Adicional Refinería	1,570	1,570	1,570	1,570	1,570	1,570
C.Venta Adicional Puente Químico	3,873	3,050	3,873	3,050	3,873	3,050
Gastos Administrativos	1,920	1,920	1,920	1,920	1,920	1,920
Equipos de Cómputo y Comunicación	0	0	0	0	0	0
Software y Licencias	0	0	0	0	0	0
Total Egresos	7,363	6,540	7,363	6,540	7,363	6,540
Flujo de Caja del Periodo	5,680	3,970	5,680	3,970	5,680	3,970

En este escenario los indicadores económicos reflejan mejores resultados con relación al caso inicial. Por una parte, el PRI se redujo en 3 periodos; es decir, en este caso la recuperación tiene lugar en cuatro meses. En cuanto a los otros dos indicadores, el VAN del escenario optimista es de \$ 35,567.06, mientras que la TIR es 30.52%. Bajo este punto de vista se puede concluir que la mejora podría ser muy beneficiosa, considerando que actualmente se está haciendo énfasis en las tareas de mantenimiento para poder llevar las planta a su máxima producción; además, se tiene previsto un proyecto de construcción de una nueva planta de Cloro-Soda.

Tabla 30: Indicadores económicos de la propuesta de mejora – Escenario optimista.

Indicador Económico	Valor
Periodo de Recuperación de la Inversión - PRI	4 meses
Valor Actual Neto – VAN	35,567
Tasa Interna de Retorno – TIR	30.52%

CAPÍTULO 7. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

En este último capítulo se presentan las conclusiones y recomendaciones que han sido documentadas durante el desarrollo del presente trabajo. De esta manera, se espera incorporar detalles adicionales que podrían ser incluidos para lograr un beneficio mayor. Además, este capítulo pretende enunciar otras ideas de mejora, que podrían ser el punto de partida en el desarrollo de otros proyectos en las actividades de despacho.

7.1. Conclusiones

El modelo de optimización es capaz de establecer una programación de despachos, que sirve como un plan de trabajo para el día siguiente. De esta manera, se reduce la cantidad de pedidos que deberán tratarse con carácter de urgencia. Es así que, las tareas del día se centrarían en el control y seguimiento del plan, dando tiempo a otras actividades como por ejemplo los controles del *check list* de ingreso.

Asimismo, se comprueba que el modelo de optimización tiene la capacidad de eliminar los excesos de aforo en la información de prueba. Por lo tanto, al utilizarlo serviría como una herramienta para controlar el aforo y reducir el potencial riesgo de accidentes entre vehículos. Otra ventaja del modelo es que puede adelantar los tiempos de inicio de carga de los pedidos y de esta manera generar espacios para ampliar la disponibilidad en los puntos de despacho más utilizados.

Por otra parte, trabajar bajo un programa de despachos es beneficioso para la balanza, que es el cuello de botella en el proceso, porque alivia la acumulación de camiones dado que estos ingresarían según su hora asignada. En esta misma línea, el plan ayuda a reducir el número de vehículos de carga que esperan en los exteriores de la empresa. Con ello se lograría agilizar los controles de ingreso y mantener la integridad de los conductores dada la inseguridad de la zona. Adicionalmente, tanto la reducción de la congestión de vehículos dentro y fuera de la planta beneficia indirectamente al Área de Exportaciones porque contribuye a la atención de pedidos en el puerto y evitar incurrir en posibles penalidades.

Cabe destacar que el modelo de optimización no ha sido diseñado con la intención de utilizar el menor número de vehículos, sino que tiene la finalidad de determinar si existe algún pedido que haya quedado sin asignar. De este modo, se pueden realizar los ajustes correspondientes como contactar al transportista y solicitar más unidades.

Los resultados obtenidos por el modelo matemático son muy parecidos a los despachos reales. Según el análisis realizado el 37.35% de los camiones registró alguna variación en su asignación, resultando solo el 9.64% de los camiones con cambios significativos en donde también se modificó la secuencia de entrega. Por otro lado, al analizar solo la secuenciación de pedidos se tiene que en promedio el 30.00% de entregas reflejan alguna modificación los días que hay más camiones que pedidos.

Otra característica resaltante de la propuesta es que el tiempo de recuperación de la inversión tiene lugar en pocos meses y también posibilita aumentar la disponibilidad de los puntos de despacho para la venta. Además, teniendo en cuenta que la falta de espacio es la mayor limitante para instalar una balanza adicional, que se viene haciendo énfasis en el mantenimiento para llevar la planta a su máximo de producción y que se viene desarrollando un proyecto para la construcción de una nueva planta de Cloro Soda. Entonces, la propuesta de mejora podría ser una buena opción para mantener el orden en la planta y no sobrecargar el cuello de botella.

Por último, se comprueba que el trabajo estandarizado es una herramienta que permite eliminar varios de los desperdicios encontrados en el proceso. En este caso al aplicarlo mediante la implementación de una política de programación de despachos y el uso de un modelo de optimización, se lograría tener un proceso más ordenado y un flujo de materiales, camiones e información más ágil.

7.2. Recomendaciones

Uno de los factores más importantes durante la asignación es la disponibilidad de las unidades de transporte. Para ello se recomienda establecer contratos con los transportistas para asegurar que siempre se pueda contar con los camiones, según las necesidades de cada día. Además, ayudaría a garantizar que se cumplan con todos los requisitos de seguridad y documentación requerida.

También se recomienda hacer una evaluación de los créditos otorgados a los clientes debido a que en algunos casos la demora en la validación de los pagos retrasa el ingreso de los camiones a la planta. Por lo tanto, estas unidades se quedan afuera de las instalaciones sin poder cargar. En algunos casos los clientes son pequeños, pero tienen una alta frecuencia de compra.

La reestructuración del proceso de despacho se basa en dos estrategias que podrían presentar cierta resistencia al cambio, dado que durante los últimos años el proceso se ha realizado de la manera actual. Para contrarrestar este efecto se sugiere trabajar

en capacitaciones y publicar constantemente los resultados obtenidos con el fin de convencer a los trabajadores que el nuevo estándar es más beneficioso.

En esta línea, se propone establecer dos indicadores para medir el desempeño de la mejora en términos de efectividad de la programación propuesta por el modelo. El primer indicador es el índice de efectividad del modelo matemático, que mide el porcentaje de despachos realizados de acuerdo al plan propuesto entre el total de despachos programados por el modelo. Mientras que el segundo indicador es el número de despachos no programados por el modelo. Conocer la cantidad de entregas que no pasaron por el modelo de optimización es importante para saber cuántas veces no se respeta el nuevo procedimiento y analizar las posibles causas.

Adicionalmente, como parte del trabajo estandarizado, se recomienda la generación automática de reportes diarios con los despachos atendidos y compartirlos con las Áreas de Ventas, Créditos y Cobranzas y Transportes. De esta manera, todas las partes involucradas estarán al tanto de lo que ocurre cada día. Además, esto serviría como la base para futuros reportes.

Se recomienda cambiar los dispensadores de productos líquidos en la planta de Cloro Soda porque estos representan una fuente de reproceso cuando la cantidad despachada no coincide con la cantidad en los documentos. Esta mejora podría ejecutarse por medio de una inversión solicitada por la misma planta.

Dada la complejidad que podría experimentar el modelo para casos más grandes, se sugiere que este sea el punto de partida para desarrollar una heurística que permita obtener una solución aproximada para el plan de despachos.

Bibliografía

- Anaya, J. (2007). *Logística integral: La gestión operativa de la empresa*. Pozuelo de Alarcón (Madrid): ESIC Editorial.
- Arango, M. D., Gil, H., & Zapata, J. A. (2009). Logística esbelta aplicada al transporte en el sector minero. *Boletín de Ciencias de la Tierra, Número 25*, 121-136.
- Artigues, C. (2013). *A note on time-indexed formulations for the resource-constrained project scheduling problem*. Toulouse: Universidad de Toulouse.
- Asbach, L., Dorndorf, U., & Pesch, E. (2009). Analysis, modeling and solution of the concrete delivery problem. *European Journal of Operational Research, Volume 193, Issue 3*, 820-835.
- Bajany, D. M., Xia, X., & Zhang, L. (2017). A MILP model for truck-shovel scheduling to minimize fuel consumption. *Energy Procedia, Volume 105*, 2739-2745.
- Ballou, R. H. (2004). *Logística: Administración de la cadena de suministro*. México D.F.: Pearson.
- Bouzina, K. I., & Emmons, H. (1996). Interval scheduling on identical machines. *Journal of Global Optimization volume 9*, 379-393.
- Bunte, S., & Kliwer, N. (2009). An overview on vehicle scheduling models. *Public Transp, Volume 1*, 299-317.
- Canada, J. R., Sullivan, W. G., & White, J. A. (1997). El proceso de la jerarquía analítica. En *Análisis de la inversión de capital para la ingeniería y administración* (págs. 483-507). México D.F.: Prentice-Hall Hispanoamericana.
- Carreño, A. (2011). *Logística de la A a la Z*. Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú. Fondo Editorial.
- Cavalcante, V. F., Cardonha, C. H., & Herrmann, R. G. (2013). A resource constrained project scheduling problem with bounded multitasking. *IFAC Proceedings Volumes, Volume 46, Issue 24*, 433-437.
- Council of Supply Chain Management Professionals. (2013). *CSCMP Supply Chain Management definitions and glossary*. Obtenido de CSCMP Supply Chain Management Definitions and Glossary:

https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx

Damodaran, A. (01 de enero de 2021). *Historical returns on stocks, bonds and bills: 1928-2020*. Obtenido de Damodaran Online: http://pages.stern.nyu.edu/~adamodar/New_Home_Page/datafile/histretSP.html

Damodaran, A. (05 de enero de 2021). *Total beta (Beta for completely undiversified investor) - Emerging markets*. Obtenido de Damodaran Online: <http://www.stern.nyu.edu/~adamodar/pc/datasets/totalbetaemerg.xls>

Decreto Legislativo N°1126. Decreto Legislativo que establece medidas de control en los insumos químicos y productos fiscalizados, maquinarias y equipos utilizados para la elaboración de drogas ilícitas, Lima, Perú (01 de noviembre de 2012).

Decreto Legislativo N°1339. Decreto Legislativo que modifica el Decreto Legislativo N°1126, Lima, Perú (06 de enero de 2017).

Decreto Supremo N° 007-2016-MTC. Reglamento Nacional del Sistema de Emisión de Licencias de Conducir, Lima, Perú (23 de junio de 2016).

Decreto Supremo N° 017-2009-MTC. Reglamento Nacional de Administración de Transporte, Lima, Perú (22 de abril de 2009).

Decreto Supremo N° 021-2008-MTC. Reglamento Nacional de Transporte Terrestre de Materiales y Residuos Peligrosos, Lima, Perú (10 de junio de 2008).

Decreto Supremo N° 024-2002-MTC. Reglamento Nacional de Responsabilidad Civil y Seguros Obligatorios por Accidentes de Tránsito, Lima, Perú (14 de junio de 2002).

Decreto Supremo N° 025-2008-MTC. Reglamento Nacional de Inspecciones Técnicas Vehiculares, Lima, Perú (24 de agosto de 2008).

Decreto Supremo N° 033-2009-MTC. Reglamento de la Superintendencia de Transporte Terrestre de Personas, Carga y Mercancías, Lima, Perú (16 de agosto de 2009).

Decreto Supremo N° 044-2013-EF. Reglamento del Decreto Legislativo N°1126, Lima, Perú (01 de marzo de 2013).

Decreto Supremo N° 058-2003-MTC. Reglamento Nacional de Vehículos, Lima, Perú (12 de octubre de 2003).

Decreto Supremo N° 268-2019-EF. Aprueban las listas de insumos químicos, productos y subproductos o derivados que son objeto de control, y definen los bienes fiscalizados considerados de uso doméstico y artesanal conforme D.L. N°1126, Lima, Perú (21 de agosto de 2019).

Dilworth, R. P. (1950). A decomposition theorem for partially ordered sets. *Annals of Mathematics, Second Series, Volume 51, No. 1*, 161-166.

Eliyi, D. T., & Azizoglu, M. (2004). *The fixed job scheduling problem: A literature review*. Ankara: Universidad Técnica de Oriente Medio.

Gestión. (27 de abril de 2021). *Riesgo país de Perú bajó seis puntos básicos y cerró en 1.54 puntos porcentuales*. Obtenido de Gestión: <https://gestion.pe/economia/riesgo-pais-de-peru-bajo-seis-puntos-basicos-y-cerro-en-154-puntos-porcentuales-noticia/>

Goldsby, T., & Martichenko, R. (2005). *Lean six sigma logistics: Strategic development to operational success*. Boca Raton, FL: J. Ross Publishing.

Horngren, C. T., Datar, S. M., & Rajan, M. V. (2012). *Contabilidad de costos: Un enfoque gerencial*. México D.F.: Pearson.

Kinable, J., Wauters, T., & Vanden Berghe, G. (2014). The concrete delivery problem. *Computers & Operations Research, Volume 48*, 53-68.

Kravenkit, S., & Arch-int, S. (2013). The improvement of logistic management using lean and RFID technology. *2013 International Conference on Information Science and Applications (ICISA)*, 1-4.

Lean Enterprise Institute. (s.f.). *Principles of lean*. Obtenido de Lean Enterprise Institute: <https://www.lean.org/WhatsLean/Principles.cfm>

Lindo Systems Inc. (2018). *Lingo: The modeling language and optimizer*. Chicago.

Locher, D. A. (2008). *Value stream mapping for lean development: A how-to guide for streamlining time to market*. New York: CRC Press.

Logistics Manager. (18 de enero de 2016). *Lean logistics: Maximizing efficiency and reducing waste*. Obtenido de Logistics Manager: <https://www.logistics->

manager.com/2016/01/18/lean-logistics-maximizing-efficiency-and-reducing-waste/

- Martello, S., & Toth, P. (1986). A heuristic approach to the bus driver scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, Volume 24, Issue 1, 106-117.
- Masoud, M., Lee, S., & Belkasim, S. (2016). A heuristic approach for vehicle scheduling problem with time and capacity constraints. *2016 UKSim-AMSS 18th International Conference on Computer Modelling and Simulation (UKSim)*, 230-234.
- Miller, C. E., Tucker, A. W., & Zemlin, R. A. (1960). Integer programming formulation of travelling salesman problems. *Journal of the ACM*, Volume 7, Issue 4, 326-329.
- Myerson, P. (2012). *Lean supply chain and logistics management*. New York: McGraw-Hill Education.
- Olivera, A. (2004). *Heurísticas para problemas de ruteo de vehículos*. Montevideo, Uruguay: Universidad de la República.
- Pau, J., & Navascués, R. (2001). *Manual de logística integral*. Madrid: Diaz de Santos.
- Plenert, G. J. (2007). *Reinventing lean: Introducing lean management into the supply chain*. Amsterdam: Elsevier.
- Polimeni, R. S., Fabozzi, F. J., & Adelberg, A. H. (1994). *Contabilidad de costos: Conceptos y aplicaciones para la toma de decisiones gerenciales*. Bogotá: McGraw-Hill.
- Quimpac S.A. (2018). *Memoria anual 2017*. Lima.
- Resolución de Superintendencia N°028-2017/SUNAT. Designan nuevos emisores del Sistema de Emisión Electrónica de la Guía de Remisión Electrónica para Bienes Fiscalizados, Lima, Perú (03 de febrero de 2017).
- Resolución de Superintendencia N°271-2013/SUNAT. Crea el Sistema de Emisión Electrónica de la Guía de Remisión Electrónica para Bienes Fiscalizados, Lima, Perú (04 de septiembre de 2013).

- Saaty, T. L., Peniwati, K., & Shang, J. S. (2007). The analytic hierarchy process and human resource allocation: Half the story. *Mathematical and Computer Modelling, Volume 46, Issues 7-8*, 1041-1053.
- Saha, J. L. (1970). An algorithm for bus scheduling problems. *Operational Research Quarterly, Volume 21, No. 4*, 463-474.
- Serrat, O. (2017). The five whys technique. En *Knowledge Solutions: Tools, methods, and approaches to drive organizational performance* (págs. 307-310). Singapore: Springer.
- Superintendencia del Mercado de Valores. (2018). *Quimpac S.A. | Información financiera*. Obtenido de Superintendencia del Mercado de Valores: https://www.smv.gob.pe/Bp_InformacionFinanciera?op=bq11
- Taha, H. A. (2012). *Investigación de operaciones*. México D.F.: Pearson.
- Toth, P., & Vigo, D. (2002). *The vehicle routing problem*. Philadelphia, USA: Society for Industrial and Applied Mathematics.
- Tran, T. T., Araujo, A., & Beck, J. C. (2016). Decomposition methods for the parallel machine scheduling problem with setups. *INFORMS Journal on Computing, Volume 1, Issue 1*, 83-95.
- Villaseñor, A., & Galindo, E. (2007). *Manual de lean manufacturing guía básica*. México D.F.: Editorial Limusa.
- Winston, W. L. (2005). *Investigación de operaciones: aplicaciones y algoritmos*. México D.F.: Thompson.
- Womack, J. P., & Jones, D. T. (2003). *Lean thinking*. New York: Simon & Schuster.
- Womack, J. P., Jones, D. T., & Ross, D. (1990). *The machine that changed the world*. New York: Rawson associates.
- Zhao, X., & Ning, L. (2009). Study of the lean logistics operating model based on RFID and its application in auto industry. *2009 International Symposium on Computer Network and Multimedia Technology*, 1-4.