



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN

VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y DISEÑO
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL INDUSTRIAL
SEDE TRES PASCUALAS - CONCEPCIÓN

**MODELO DE ASIGNACIÓN DE RECURSOS CON VEHÍCULOS DE
CARGA COMPLETA EN LA PLANIFICACIÓN DE LA EMPRESA GRUPO
POLYKARPO S.A.**

Tesis para optar al Título de Ingeniero Civil Industrial

Profesor Guía:
Dr. Maichel Miguel Aguayo Bustos
Estudiante:
Francisca Javiera Pulgar Farías

© Francisca Pulgar Farías.

Queda prohibida la reproducción parcial o total de esta obra en cualquier forma, medio o procedimiento, sin permiso por escrito del o los autores.

Concepción, Chile.

2024

HOJA DE CALIFICACIÓN

En _____, el ___ de _____ de _____ los abajo firmantes dejan constancia que el estudiante _____ de la carrera o programa de Ingeniería Civil Industrial ha aprobado la tesis para optar al título o grado académico de Ingeniero Civil Industrial con una nota de _____.

Profesor Evaluador

Profesor Evaluador

Profesor Evaluador

RESUMEN

La presente tesis se enfoca en el desarrollo de un modelo matemático para optimizar la asignación de recursos en una empresa de transporte de materiales químicos a granel, Polykarpo S.A. El objetivo principal es mejorar la eficiencia operativa y reducir los costos asociados con la gestión de flotas de transporte, particularmente en lo que respecta a la asignación de rampas, camiones y conductores. Dado que la empresa enfrenta desafíos debido a la complejidad de los horarios de entrega y turno de trabajo, así como también la necesidad de cumplir con estrictas normas de seguridad.

Se ha desarrollado un modelo de programación lineal entera mixta que toma en cuenta parámetros como los horarios de los pedidos, costos de uso, distancias recorridas y requerimientos de productos. La metodología incluye la recolección de datos, el desarrollo del modelo matemático en Jupyter Notebook y la prueba piloto para evaluar la efectividad del modelo. Los resultados de los experimentos demostraron una reducción de costos en tres de las cuatro instancias analizadas, alcanzando mejoras de hasta un 10,78% en situaciones de rendimiento bajo, 6,28% en rendimiento medio y 8,66% en rendimiento alto, en comparación con los costos de asignación actuales.

Se espera que la implementación de este modelo permita una asignación más eficiente de los recursos, minimizando los costos operativos y contribuyendo a la sostenibilidad de las operaciones logísticas de la empresa.

ABSTRACT

This thesis focuses on the development of a mathematical model to optimize resource allocation in a bulk chemical transport company, Polykarpo S.A. The main objective is to improve operational efficiency and reduce costs associated with fleet management, particularly regarding the allocation of ramps, trucks, and drivers. Given that the company faces challenges due to the complexity of delivery schedules and work shifts, as well as the need to comply with strict safety regulations.

A mixed-integer linear programming model has been developed that takes into account parameters such as order schedules, usage costs, distances traveled, and product requirements. The methodology includes data collection, the development of the mathematical model in Jupyter Notebook, and a pilot test to evaluate the model's effectiveness. The results of the experiments demonstrated a reduction in costs in three of the four analyzed instances, achieving improvements of up to 10.78% in low-performance situations, 6.28% in medium performance, and 8.66% in high performance, compared to current allocation costs.

It is expected that the implementation of this model will allow for a more efficient allocation of resources, minimizing operational costs and contributing to the sustainability of the company's logistics operations.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	6
CAPÍTULO I – ANTECEDENTES GENERALES.....	7
1.1 Objetivos.....	7
1.2 Alcances	7
1.3 Delimitaciones.....	7
1.4 Caracterización de la empresa	8
1.4.1 Misión y visión	8
1.4.2 Valores	9
1.5 Descripción del proceso en estudio.....	9
1.6 Descripción del problema.....	12
1.7 Planteamiento de solución	13
1.8 Metodología.....	14
CAPÍTULO II – REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1 Modelos de ruteo de vehículos con sincronización de recursos	16
2.1.1 VRP (Vehicle Routing Problem)	16
2.1.2 Sincronización de vehículos	17
2.1.3 Vehículos de Carga Completa.....	17
2.1.4 Descansos de los conductores	19
CAPÍTULO III – MODELO MATEMÁTICO.....	21
3.2 Parámetros	21
3.3 Variables de decisión	22
3.4 Formulación	22
CAPÍTULO IV – RESULTADOS COMPUTACIONALES	25
4.1 Instancias de prueba.....	25
4.2 Validación del modelo.....	26
4.3 Resultados de la experimentación	31
CAPÍTULO V – CONCLUSIONES	34
REFERENCIAS.....	35

INTRODUCCIÓN

Las empresas de transporte son cruciales en la cadena de suministro de diversas industrias, ya que depende de ellas el abastecimiento eficiente y oportuno de los clientes finales según su demanda. En particular, las empresas de transporte de materiales químicos a granel desempeñan un papel fundamental debido a la naturaleza peligrosa de los productos que manejan. Estas deben cumplir con estrictas normas de seguridad para garantizar la entrega segura y confiable de sus productos, lo que implica la implementación de rigurosos protocolos y medidas preventivas.

Polykarpo, una empresa dedicada al transporte de materiales químicos a granel enfrenta el desafío de equilibrar la seguridad y la eficiencia operativa. Además de las consideraciones de seguridad, Polykarpo debe gestionar de manera óptimo sus recursos para cumplir con los pedidos de los clientes de manera eficiente y rentable. La gestión adecuada de las flotas de transporte en la planificación logística son aspectos críticos para el éxito operativo.

En este contexto, las estrategias para mejorar la eficiencia operativa y reducir costos son importante. La optimización de recursos no solo contribuye a la rentabilidad de la empresa, sino que también mejora su capacidad de respuesta mejorando un alto nivel de servicio al cliente. El presente proyecto de título tiene como objetivo desarrollar un modelo de asignación que permita a Polykarpo optimizar la asignación de sus recursos a cada viaje, tomando en consideración parámetros como horarios de los pedidos, costos de uso de tractos y camiones, distancias recorridas y requerimiento de productos.

El modelo de asignación propuesto se basará en pedidos ya realizados y asignados por la empresa para comprobar su efectividad, buscando minimizar los costos incurridos en la asignación con el fin de tener un proceso estandarizado y óptimo que ayude a los supervisores de cada área de Polykarpo.

CAPÍTULO I – ANTECEDENTES GENERALES.

1.1 Objetivos

El objetivo general de la tesis es desarrollar un modelo de optimización para la asignación de recursos, que incremente la eficiencia operativa y minimice los costos de asignación de los recursos disponibles a cada viaje, con el fin de mejorar la productividad de la empresa.

En cuanto a los objetivos específicos que ayudarán a lograr el objetivo general son:

- Analizar el proceso actual de la asignación de recursos y la gestión de datos en Polykarpo.
- Implementar un modelo de optimización que asigne rampas y equipos a los viajes programados.
- Evaluar el impacto económico y operativo de la nueva asignación.

1.2 Alcances

Los alcances definidos para un desarrollo factible del modelo son:

- Desarrollar un modelo de programación lineal de enteros mixtos para la asignación de recursos, utilizando datos actuales de la operación para hacer una representación precisa y realista de las condiciones operativas.
- Utilizar CPLEX para desarrollar, implementar y probar el modelo de asignación de recursos, esto permitirá tener flexibilidad y control sobre el desarrollo del modelo.
- Establece KPI para evaluar el desempeño del nuevo sistema de asignación, que permita ver si el modelo está cumpliendo con su objetivo.

1.3 Delimitaciones

Es necesario tener en consideración que para llevar a cabo el estudio hay presentar ciertas delimitantes con la cuales se trabajan, tales como:

- El estudio, la implementación inicial y el análisis se realiza en la base central de operaciones de Polykarpo, ubicada en Coronel con uno de los supervisores.
- El tiempo de implementación y evaluación es de tres meses a partir de junio del 2024 a agosto del 2024.
- La información es obtenida del software con el cual trabaja la empresa que fue creada por ellos, en donde se encuentran los registros de todos los viajes realizados, también del ingeniero encargado de la información sobre costos y consumos.

1.4 Caracterización de la empresa

Polykarpo S.A. es una empresa especializada en el transporte de materiales químicos a granel, fundada en 1983. Con sede en Coronel, Chile. La empresa ha logrado posicionarse como una empresa de excelencia en la entrega de productos.

Es una empresa con más de 30 años en el rubro de manejo, transporte y logística del transporte químicos e industrial. Cuentan con equipamiento y tecnologías de última generación, para garantizar seguridad en el transporte y cuidado al medioambiente. Esto los ha llevado a tener distintas certificaciones que fomentan la confianza entre las empresas, autoridades y consumidores.

Tienen una cartera de productos extensa en donde todos requieren un cuidado especial para su manejo.

1.4.1 MISIÓN Y VISIÓN

Misión: La misión de Polykarpo es brindar soluciones de transporte de productos químicos de manera, segura, eficiente y sustentable, fomentando la innovación y el desarrollo continuo para superar las expectativas de sus clientes y contribuir al progreso de la industria y el cuidado del medio ambiente.

Misión: La visión de Polykarpo es, ser el líder indiscutible en el transporte de productos químicos garantizando la seguridad, calidad y sustentabilidad en cada proceso,

impulsando el desarrollo industrial y protegiendo el medio ambiente para las generaciones futuras.

1.4.2 VALORES

Sus valores son:

- Respeto y cuidado a sus colaboradores.
- Confianza y lealtad.
- Responsabilidad.
- Profesionalismo y compromiso.
- Participación, innovación y trabajo en equipo.
- Transparencia y probidad.
- Solidaridad.
- Cuidado del medio ambiente.
- Responsabilidad social.

1.5 Descripción del proceso en estudio

Para entender los factores involucrados en el desarrollo del modelo de asignación, a continuación, se presenta una contextualización del proceso mediante el cual se asignan los recursos. Actualmente, la empresa cuenta con cuatro supervisores de área, encargados de la comunicación con los clientes, la recepción de solicitudes de transporte, la generación de órdenes de servicio y la planificación logística de cada pedido (incluyendo el cómo, cuándo, con qué y quiénes realizarán el transporte).

Para llevar a cabo esta planificación, es esencial conocer tanto la fecha y hora en que se requiere estar en el punto de origen o "carga", como el tipo de producto a transportar. El punto de carga se refiere a la ubicación del cliente que solicita el servicio de transporte. Con esta información, los supervisores seleccionan las ramplas disponibles más adecuadas para el viaje, dado que cada una de ellas ha sido previamente asignada a un tipo específico de producto, asegurando que cumpla con las condiciones necesarias para su transporte.

La empresa opera con cuatro tipos de rampas: las revestidas o amarillas (R), las de acero inoxidable (I), las rampas chasis (C) y las de aluminio inoxidable (AL). Cada tipo de rampa está diseñada para transportar distintos productos con diferentes niveles de corrosividad. A pesar de que una rampa puede tener la capacidad de transportar varios tipos de productos, se asigna exclusivamente a uno solo. Esta política tiene como objetivo evitar los costos y tiempos adicionales asociados con los "lavados" necesarios para cambiar el tipo de producto a transportar.

Además de seleccionar la rampa adecuada para cada viaje, es necesario asignar un camión y su respectivo conductor. Esta asignación depende de varios factores: el modelo del vehículo, la disponibilidad del camión por mantenimientos programados y la disponibilidad del conductor, ya que cada uno está asignado a un camión específico. La disponibilidad del conductor está sujeta a sus días de descanso, vacaciones y licencias.

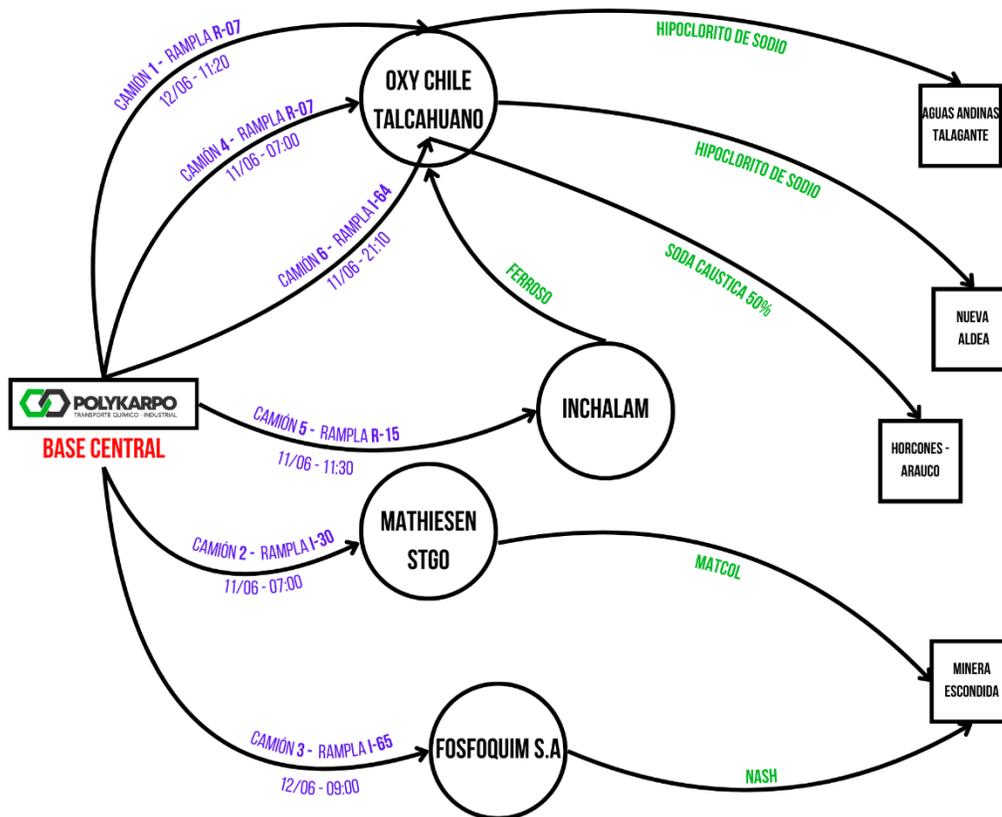
Los camiones están clasificados para viajes regionales, intermedios y de larga distancia, considerando su antigüedad, eficiencia de combustible y características de seguridad. Dado que cada conductor opera un camión en particular, cuando el conductor está en días de descanso o vacaciones, el vehículo permanece inactivo. Por ello, es crucial verificar si el conductor tiene disponibilidad para iniciar y completar el viaje dentro de su jornada laboral, la cual sigue un ciclo de 6 días de trabajo por 1 de descanso, y 5 días de trabajo por 2 de descanso, alternando cada dos semanas.

En algunos casos, es necesario transportar productos a mineras que imponen ciertas restricciones sobre los vehículos que ingresan, requiriendo certificaciones específicas para los equipos. Por lo tanto, este es un factor clave a considerar al momento de asignar los camiones.

Al transportar el producto solicitado en su respectiva rampa disponible, por el camión asignado al viaje, la ley establece que el peso total no puede exceder las 45 toneladas, con un margen de tolerancia del 5%, lo que equivale a un máximo de 47,25 toneladas. Por lo tanto, al asignar los equipos, es crucial considerar la tara del camión y la rampa para determinar si es posible transportar la cantidad de producto solicitada sin superar este límite.

Este es el escenario sobre el cual se trabajará, considerando cada una de las restricciones de asignación mencionadas para cada recurso involucrado.

A continuación, se presenta un esquema que ilustra cómo un supervisor realiza la asignación durante dos días de planificación, tomando como referencia algunos de los pedidos gestionados.



La imagen representa seis viajes realizados, todos iniciados desde la base central de Polykarpo ubicada en Coronel. Cada uno de estos viajes llega al punto de origen y/o carga, que es la ubicación de los clientes (Oxy Chile Talcahuano, Inchalam, Mathiesen Santiago y Fosfoquim S.A.) con un camión y una rampla, con un día y una hora especificada. Luego de cargar en esos puntos, se carga el producto mencionado en las ramplas y se llevan a sus destinos correspondientes (Aguas Andinas Talagante, Nueva Aldea, Horcones-Arauco y Minera Escondida). Hay una situación en particular en donde el cliente "Oxy Chile Talcahuano" es un punto de origen y también un destino del cliente "Inchalam".

La imagen ilustra seis viajes partiendo desde la base central de Polykarpo, ubicada en Coronel. Cada uno de estos viajes se dirige a un punto de origen y/o carga, que corresponde a las ubicaciones de los clientes: Oxy Chile Talcahuano, Inchalam, Mathiesen Santiago y Fosfoquim S.A. El transporte se realiza con un camión y una rampla, en fechas y horarios específicos. Tras la carga en estos puntos, los productos se trasladan hacia sus destinos correspondientes: Aguas Andinas Talagante, Nueva Aldea, Horcones-Arauco y Minera Escondida. Cabe destacar que existe una particularidad en el cliente Oxy Chile Talcahuano, que actúa tanto como punto de origen para sus productos como destino de la carga de Inchalam.

1.6 Descripción del problema

En la actualidad, la empresa enfrenta una oportunidad significativa de mejora en la gestión de sus recursos logísticos. La empresa no cuenta con un programa estándar para decidir cómo se deben realizar las asignaciones necesarias para cumplir con los pedidos de transporte. Cada pedido requiere el transporte de distintos productos, para los cuales se utilizan ramplas específicas. Debido a la naturaleza corrosiva de estos líquidos y la necesidad de lavados para cambiar de un producto a otro, las mismas ramplas se utilizan para productos similares, ya que el proceso de lavado interno no es parte de lo obligatorio que hacer después de cada viaje.

Además, es necesario asignar los camiones, los cuales, por decisión de la empresa, son utilizados únicamente por un conductor, sin realizar rotaciones entre camiones y conductores. Esta decisión se basa en consideraciones de higiene y en el tiempo que los conductores pasan a bordo del camión. Los conductores trabajan en turnos de 6x1, lo que significa que trabajan seis días consecutivos y tienen un día de descanso. Si el día de descanso coincide con un viaje en curso, se denomina “descanso en ruta” y es remunerado. Adicionalmente, cada dos semanas, los conductores trabajan en un esquema de 5x2, teniendo cinco días de trabajo y dos de descanso. Esta variabilidad en la disponibilidad de los conductores según sus turnos de descanso introduce complejidad adicional en la planificación.

Los "descansos en ruta" remunerados generan pérdidas para la empresa, ya que implican pagar más de lo presupuestado debido a la prolongación de los viajes. Actualmente, los supervisores deben tomar decisiones arbitrarias al seleccionar qué recursos asignar a cada pedido, sin contar con una herramienta que respalde estas decisiones.

La falta de un modelo sistemático y optimizado para la asignación de recursos no solo afecta la eficiencia operativa, sino que también impacta los costos. Por lo tanto, es esencial desarrollar un modelo de asignación de recursos que considere las restricciones y necesidades específicas de la empresa, con el objetivo de optimizar el uso de ramplas, camiones y conductores, y minimizar los costos asociados a los descansos en ruta remunerados.

1.7 Planteamiento de solución

Para mejorar el proceso de asignación de recursos y reducir los costos asociados, se propone la creación de un modelo matemático de programación lineal de enteros mixtos. Este modelo tiene como objetivo determinar de manera óptima qué ramplas y camiones deben ser asignados para cumplir con cada pedido de transporte, teniendo en cuenta los tiempos de disponibilidad de estos recursos.

El modelo servirá como una herramienta de apoyo para los supervisores, quienes seguirán controlando la disponibilidad y los horarios de los conductores para cada viaje. Este modelo proporcionará información sobre la utilización óptima de ramplas, camiones y conductores, ayudando a los supervisores a tomar decisiones optimizadas.

Con la implementación de este modelo, la empresa podrá optimizar la utilización de sus recursos, mejorar la planificación logística y minimizar los costos asociados, especialmente aquellos derivados de los descansos en ruta remunerados. De esta manera, se espera aumentar la eficiencia operativa y asegurar el cumplimiento de los pedidos de manera oportuna y rentable.

Además, se establecerá un KPI (Key Performance Indicator) de desempeño que permita medir la mejora obtenida mediante el modelo, comparando los costos actuales

con los costos previos a su implementación. Este KPI brindará una visión clara del impacto positivo en la reducción de costos y permitirá evaluar el progreso continuo en la optimización de recursos.

1.8 Metodología

La metodología empleada para abordar el problema compone varias etapas descritas a continuación.

Primero, el levantamiento del proceso, el cual consiste en realizar un estudio a las condiciones actuales de la empresa y procedimientos necesarios que se llevan a cabo para cumplir con la demanda, esto se ilustra con diagramas de procesos con el actual funcionamiento de las asignaciones por parte de los supervisores. También se hace una recopilación de información sobre los recursos a utilizar, las limitantes de tiempo y uso por distintas condiciones, como también los consumos y costos operacionales asociados a los recursos que se buscan mejorar en el modelo.

Luego se define el problema con los datos ya proporcionados por la empresa, en donde se establece el indicador de desempeño en el cual se pretende impactar con la mejora planeada. Identificando que la falta de un programa estándar para la asignación de recursos es una vía de mejora en la gestión logística de sus recursos, así como también los turnos de conductores y los costos de sus descansos en ruta por no completar los viajes dentro de su horario laboral.

Con lo anterior se avanza en el desarrollo de un modelo matemático de programación lineal de enteros mixtos para optimizar la asignación de ramplas y camiones. En donde el modelo comenzará enfocándose solo en la asignación de ramplas, dada la mayor complejidad de restricciones asociadas a este recurso por los productos transportados. Considerará también los tiempos de presentación y duración de los viajes. Posteriormente se incorporarán los camiones, integrando estos con las ramplas en los horarios de llegada. La formulación es en Jupyter Notebook la cual se toma como herramienta de apoyo a la toma de decisiones.

Por último y una vez implementado el modelo, se procede a realizar una prueba piloto aplicando el modelo a un conjunto de instancias con datos de prueba. El objetivo es evaluar el impacto que este genera y poder cuantificar los cambios para observar mejoras obtenidas con el “KPI de optimización de costos de los recursos”. Se comparan las asignaciones reales realizadas por los supervisores con los resultados entregados por el código de Python para verificar la efectividad de este en cuanto a reducción de costos en la planificación logística. Esta prueba sirve para determinar la viabilidad de la iniciativa.

CAPÍTULO II – REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

2.1 Modelos de ruteo de vehículos con sincronización de recursos

La logística y la optimización de operaciones de transporte son áreas críticas en la gestión de cadenas de suministro y distribución. La eficiencia en estas áreas no solo afecta el costo operativo, sino también la calidad del servicio y la satisfacción del cliente. Para abordar esta problemática, se han estudiado diversas metodologías y enfoques que abordan problemas complejos en la gestión de flotas y enrutamiento de vehículos. Esta revisión bibliográfica se centra en varios temas clave que son fundamentales para la comprensión y resolución del problema abordado.

2.1.1 VRP (VEHICLE ROUTING PROBLEM)

Los problemas VRP (Vehicle Routing Problem), son problemas de optimización que buscan determinar la mejor manera de asignar vehículos a un conjunto de puntos geográficos con el fin de minimizar costos totales. La formulación clásica del VRP considera vehículos con capacidad limitada que deben atender a un conjunto de clientes y su objetivo es encontrar las rutas óptimas que cada vehículo debe seguir para cumplir con las demandas.

El paper estudiado "The Vehicle Routing Problem with Transfers" (Maichel Aguayo, 2023), explica el concepto tradicional del VRP introduciendo la posibilidad de transferencias de cargas entre vehículos. Esta variante del problema permite que las cargas sean transferidas en un punto específico de la red logística, en lugar de requerir que cada vehículo complete todas las entregas o recogidas en una sola ruta.

El estudio se centra en como incluir transferencias puede mejorar la eficiencia operativa y reducir los costos totales de transporte. Los autores presentan un modelo matemático para el VRPT y desarrollan métodos de solución que consideran tanto las rutas de los vehículos como los puntos de transferencias. La investigación muestra que permitir transferencias puede llevar a una mejor utilización de la capacidad los vehículos y una reducción significativa en los costos operativos comparado con el VRP clásico.

2.1.2 SINCRONIZACIÓN DE VEHÍCULOS

La sincronización de vehículos se refiere a la coordinación eficiente de las operaciones de una flota de vehículos para mejorar la efectividad en la entrega de servicios o mercancías. Este concepto se ocupa en problemas logísticos complejos donde múltiples vehículos deben operar en sincronización para cumplir con restricciones de tiempo y capacidad y optimizar el uso de recursos. La sincronización puede involucrar aspectos como la coordinación de horarios, la programación de rutas y la gestión de puntos de transferencia.

El artículo "Synchronisation in vehicle routing: Classification schema, modelling framework and literature review" (Soares, Marques, Amorin, & Parragh, 2024); aborda la sincronización de vehículos en el contexto del VRP con tiempos de viaje dependientes del tiempo. En este enfoque, el problema se centra en la coordinación de los horarios de los vehículos para optimizar las rutas cuando los tiempos varían a lo largo del día, lo que añade complejidad a la sincronización.

El paper presenta un nuevo método de sincronización adaptado a las variaciones temporales en los tiempos de viaje, introduciendo una metodología innovadora que maneja dichas fluctuaciones y mejora la coordinación entre vehículos, lo cual es clave para la eficiencia operativa en entornos dinámicos. La propuesta incluye un modelo matemático y algoritmos específicos que integran la sincronización en la planificación de rutas, considerando restricciones temporales como la dependencia entre vehículos. Esta investigación mejora la eficiencia operativa al reducir los tiempos totales de viaje y los costos asociados, convirtiéndose en una herramienta práctica para enfrentar los desafíos de la sincronización incluso con tiempos de viaje variables.

2.1.3 VEHÍCULOS DE CARGA COMPLETA

El transporte mediante vehículos de carga completa (FTL) es una modalidad en la cual un vehículo es utilizado para transportar exclusivamente la carga a un solo cliente, desde el punto de origen hasta el destino final sin realizar paradas intermedias para recoger o entregar más mercancías.

Este tipo de transporte es adecuado cuando las mercancías son suficientes para llenar completamente el vehículo o cuando es necesario un servicio directo. A diferencia de los envíos car carga fraccionada, donde se llevan cargas de diferentes clientes en un solo vehículo, los de carga completa ofrecen menores tiempos de tránsito, menor manipulación del producto y en algunos casos menores costos por unidades transportada.

El objetivo en este problema es minimizar los costos de transporte y mejorar la eficiencia operativa, considerando las limitaciones de capacidad, rutas directas y ventanas de tiempo para la entrega.

Para entender lo que son los vehículos de carga completa tenemos el artículo "Review of Full Truck Load (TL) Transportation Service Procurement" (Ramanathan, Subramanian, & Cheikhrouhou, 2015) que revisa la literatura sobre la contratación de servicios de carga completa (FTL) y sus desafíos logísticos. Analiza el proceso de adquisición, incluyendo la subasta de rutas y la asignación de transportistas, enfocándose en la minimización de costos y en la eficiencia operativa. También identifica brechas en la investigación, como la falta de estudios sobre sostenibilidad y mercados emergentes.

Los vehículos de carga completa transportan un único envío de un remitente sin compartir la carga, asegurando un viaje directo desde origen a destino sin paradas adicionales para cargas o descargas intermedias.

El artículo "A mixed-integer linear programming model for the selective full-truckload multi-depot vehicle routing problem with time windows" (Bouyahyiouy & Bellabdaou, 2021); aborda uno de los problemas más complejos en la planificación de rutas de vehículos FTL: el enrutamiento desde múltiples depósitos y la inclusión de ventanas de tiempo para las entregas. Este enfoque amplía el problema clásico de enrutamiento de vehículos (VRP) aplicando un modelo que combina los desafíos de seleccionar rutas eficientes para vehículos de carga completa, gestionar la operación desde múltiples depósitos y cumplir con restricciones de tiempo específicas para las cargas y descargas.

El artículo propone un modelo de programación lineal entera mixta (MILP) para resolver este problema, donde el objetivo principal es minimizar los costos totales de

transporte, incluyendo la distancia recorrida y el número de vehículos utilizados, al tiempo que se satisfacen las ventanas de tiempo de los clientes y las limitaciones de capacidad de los vehículos. Este modelo permite seleccionar qué clientes serán atendidos por cada camión y desde qué depósito, optimizando tanto las rutas como las asignaciones de vehículos.

El enfoque presentado tiene aplicaciones prácticas en industrias donde se gestionan grandes flotas de vehículos y es necesario cumplir con restricciones de tiempo estrictas para las entregas, como en el sector minorista y la distribución de bienes de consumo.

Por otro lado, el artículo “Solving Dynamic Full-Truckload Vehicle Routing Problem Using an Agent-Based Approach” (Çabuk & Erol, 2024); aborda la complejidad del problema de ruteo de vehículos de carga completa (FTL) en entornos dinámicos en donde las condiciones cambian constantemente y necesita adaptaciones rápidas. Propone un enfoque basado en agentes que permite adaptarse a cambios en tiempo real en las demandas y condiciones de entrega, mejorando así la eficiencia del proceso logístico. La metodología presentada se centra en optimizar la asignación de vehículos y rutas, lo cual es relevante para la optimización de costos operativos en la logística de la empresa. Esta estrategia podría complementar el modelo de programación lineal entera que se utiliza en este informe, ofreciendo una perspectiva sobre cómo gestionar de manera más efectiva los cambios en las condiciones operativas.

2.1.4 DESCANSOS DE LOS CONDUCTORES

En el sector del transporte de mercancías por carretera, las legislaciones de descanso para los conductores son fundamentales para garantizar la seguridad en las carreteras y la salud de los trabajadores. Estas regulaciones establecen períodos mínimos de descanso que los conductores deben respetar entre jornadas laborales y durante sus horas de conducción.

La implementación de estas normativas enfrenta desafíos debido a la falta de infraestructura adecuada, como áreas de descanso seguras y estaciones de servicio que permitan a los conductores cumplir con los tiempos de descanso reglamentarios. Esto

genera tensiones entre la seguridad, la eficiencia operativa y el cumplimiento de la ley, especialmente en rutas de larga distancia y sectores donde las entregas rápidas son críticas.

El artículo " The long-haul full-load vehicle routing and truck driver scheduling problem with intermediate stops: An economic impact evaluation of Brazilian policy" (Mayerle, Chirolí, Figueiredo, & Rodrigues, 2020); examina cómo las legislaciones de descanso en Brasil afectan a los conductores de camiones, utilizando un enfoque de simulación basado en agentes múltiples para modelar el comportamiento de los conductores en diferentes escenarios regulatorios. El estudio se enfoca en las regulaciones de tiempo de conducción y descanso, y cómo éstas influyen en la eficiencia operativa, la seguridad y la calidad de vida de los conductores.

El paper utiliza un modelo de simulación multi-agente para analizar el impacto de la normativa actual en la operación diaria de los conductores de camiones. La simulación permite estudiar cómo diferentes configuraciones de las reglas de descanso afectan las rutas de los conductores, su productividad y su bienestar. Se considera el cumplimiento de las reglas de descanso establecidas por la "Ley del Caminero" y cómo las infracciones o el cumplimiento estricto de estas reglas pueden influir en la seguridad vial y en la eficiencia logística.

Los resultados del estudio muestran que, aunque las regulaciones de descanso son esenciales para mejorar la seguridad y reducir la fatiga de los conductores, su implementación puede generar ineficiencias operativas si no se cuenta con la infraestructura adecuada, como paradas seguras para descansar. Asimismo, el estudio destaca que un mayor cumplimiento de las normas de descanso puede llevar a incrementos en los costos operativos para las empresas de transporte, ya que los tiempos de entrega pueden verse afectados.

Este estudio aporta una visión profunda sobre los efectos de las legislaciones de descanso en Brasil, mostrando cómo estas regulaciones impactan tanto a nivel de seguridad como de costos operativos, y señalando la importancia de una infraestructura adecuada para su implementación efectiva.

CAPÍTULO III – MODELO MATEMÁTICO

Se desarrollará un modelo matemático que permitirá optimizar la asignación de recursos en la planificación de los viajes, considerando los diferentes elementos logísticos involucrados, como las ramplas, los equipos y los tiempos de viaje. El objetivo principal es minimizar los costos asociados, garantizando el cumplimiento de las restricciones operativas y de capacidad. Se introducirán los conjuntos, parámetros y variables que forman la base del modelo, así como su formulación, la cual tiene en cuenta tanto la asignación adecuada de los recursos como la sincronización en el cumplimiento de los tiempos y las limitaciones de peso.

3.1 Conjuntos

El conjunto de elementos ocupados en el modelo se muestra a continuación.

- $R = \text{Set de ramplas}, R = \{1, \dots, N\}$
- $E = \text{Set de equipos}, E = \{1, \dots, N\}$
- $V = \text{Set de viajes}, V = \{1, \dots, N\}$
- $N = \text{Set de nodos}, N = \{0, \dots, V + 1\}$
- $i = \text{Índice asociado a los nodos de salida}$
- $j = \text{Índice asociado a los nodos de llegada}$
- $k = \text{Índice asociado a las ramplas}$
- $l = \text{Índice asociado a los equipos}$

3.2 Parámetros

Los parámetros del modelo se muestran en el siguiente listado.

- $VR_{jk} = \text{Binario que indica si en el viaje } j \text{ se puede utilizar la rampla } k$
- $DD_j = \text{Indica la demanda en kilogramos en cada nodo } j$
- $PR_k = \text{Indica el peso en kilogramos de la rampla } k$
- $PE_l = \text{Indica el peso en kilogramos del equipo } l$
- $HIV_j = \text{Indica el minuto (desde el inicio de la planificación) en que se debe}$

estar en el origen del nodo j

- $TDV_j =$ Indica el tiempo de duración del viaje j
- $CC_{jl} =$ Indica los litros de combustible para el viaje j en el equipo l
- $CA_{jl} =$ Indica los litros de solución de urea para el viaje j en el equipo l
- $CM_{jl} =$ Indica el costo de $\frac{\$}{km}$ de mantenimiento para el viaje j en el equipo l
- $CR_{jk} =$ Indica el costo de $\frac{\$}{km}$ de mantenimiento para el viaje j con la rampla k
- $PC =$ Indica el costo del combustible por litro
- $PA =$ Indica el costo del solución de urea por litro
- $M =$ Número grande

3.3 Variables de decisión

- $x_{ijk} =$ Variable binaria que indica si se realizó el viaje i y luego j en la rampla k
- $y_{ijl} =$ Variable binaria que indica si se realizó el viaje i y luego j en el equipo l
- $a_{jk} =$ Variable continua que indica el tiempo de arribo al viaje j con la rampla k
- $b_{jl} =$ Variable continua que indica el tiempo de arribo al viaje j con el equipo l
- $g_{jk} =$ Variable binaria que indica si para el viaje j se ejecuta la rampla k
- $f_{jl} =$ Variable binaria que indica si para el viaje j se ejecuta el equipo l

3.4 Formulación

Para la formulación se comienza con la función objetivo, la cual busca minimizar los costos totales de asignación de ramplas y camiones a cada viaje quedando de la siguiente manera.

$$\sum_{j \in N} \sum_{k \in R} CR_{jk} * g_{jk} + \sum_{j \in N} \sum_{l \in E} [(CC_{jl} * PC) + (CA_{jl} * PA) + CM_{jl}] * f_{jl}$$

Luego para definir los parámetros dentro de los cuales deben estar las posibles soluciones cumpliendo con los criterios necesarios, están las siguientes restricciones.

1. $\sum_{i \in N} \sum_{k \in R} x_{ijk} * VR_{jk} = 1, \forall j \in N$

2. $\sum_{j \in N} x_{0jk} = 1, \forall k \in R$
3. $\sum_{i \in N} x_{i(V+1)k} = 1, \forall k \in R$
4. $\sum_{j \in N} x_{(V+1)jk} = 1, \forall k \in R$
5. $\sum_{i \in N} x_{iik} = 0, \forall k \in R$
6. $g_{jk} \leq VR_{jk}$
7. $\sum_{k \in R} g_{jk} = 1, \forall j \in V$
8. $\sum_{i \in N} x_{ijk} = g_{jk}, \forall j \in V, \forall k \in R$
9. $\sum_{i \in N} x_{jik} = g_{jk}, \forall j \in V, \forall k \in R$
10. $\sum_{j \in N} y_{0jl} = 1, \forall l \in E$
11. $\sum_{i \in N} y_{i(V+1)l} = 1, \forall l \in E$
12. $\sum_{j \in N} y_{(V+1)jl} = 1, \forall l \in E$
13. $\sum_{i \in N} y_{iil} = 0, \forall l \in E$
14. $\sum_{l \in E} f_{jl} = 1, \forall j \in V$
15. $\sum_{i \in N} y_{ijl} = f_{jl}, \forall j \in V, \forall l \in E$
16. $\sum_{i \in N} y_{jil} = f_{jl}, \forall j \in V, \forall l \in E$
17. $a_{jk} \geq a_{ik}TDV_i - (M * x_{ijk}), \forall i \in N, \forall j \in V, \forall k \in R$
18. $a_{jk} \geq HIV_j * g_{jk}, \forall j \in V, \forall k \in R$
19. $a_{jk} \leq HIV_j + 30 + [M * (1 - g_{jk})], \forall j \in V, \forall k \in R$
20. $b_{jl} \geq b_{il}TDV_i - (M * y_{ijl}), \forall i \in N, \forall j \in V, \forall l \in E$
21. $b_{jl} \geq HIV_j * f_{jl}, \forall j \in V, \forall l \in E$
22. $b_{jl} \leq HIV_j + 30 + [M * (1 - f_{jl})], \forall j \in V, \forall l \in E$
23. $\sum_{i \in N} \sum_{k \in R} x_{ijk} = \sum_{i \in N} \sum_{l \in E} y_{ijl}, \forall j \in V$
24. $\sum_{i \in N} \sum_{k \in R} (x_{ijk} * PR_k) + \sum_{i \in N} \sum_{l \in E} (y_{ijl} * PE_l) + DD_j \leq 45.000, \forall j \in V$
25. $a_{jk} - [M * (1 - g_{jk})] - [M * (1 - f_{jl})] \leq b_{jl}, \forall j \in V, \forall k \in R, \forall l \in E$
26. $a_{jk} - [M * (1 - g_{jk})] - [M * (1 - f_{jl})] \geq b_{jl}, \forall j \in V, \forall k \in R, \forall l \in E$

La **restricción 1** garantiza que a cada viaje se le asigne una rampla permitida según la matriz rampla-viaje, la cual se basa en el producto que se transporta. La **restricción 2** establece que cada rampla debe partir del nodo inicial hacia un destino, que puede ser el

nodo final si no se utiliza. La **restricción 3** exige que todas las ramplas lleguen al nodo final, ya sea desde un viaje o desde el nodo inicial si no fueron utilizadas. La **restricción 4** impide que las ramplas salgan del nodo final, permitiendo solo su llegada. La **restricción 5** asegura que las ramplas se desplacen a otro nodo, evitando que permanezcan en el mismo. La **restricción 6** determina si el viaje j fue realizado por la rampla k , asignando el valor 1 a la variable binaria g . La **restricción 7** garantiza que a cada viaje realizado se le asigne una rampla. Las **restricciones 8 y 9** aseguran que cada rampla que visita el viaje j entre desde otro nodo i y luego salga hacia otro nodo i . Las **restricciones 10 a 16** se repiten de forma similar para los camiones, cubriendo las mismas condiciones establecidas para las ramplas desde las **restricciones 2 a la 9**.

En cuanto a las restricciones que aseguran que los viajes se cumplan a tiempo, la **restricción 17** establece que la hora de llegada al viaje j por la rampla k debe ser mayor o igual al tiempo de finalización del viaje anterior, si fue realizado por la misma rampla, sumando el tiempo de viaje al nuevo destino. La **restricción 18** estipula que la hora de llegada al viaje j por la rampla k debe ser mayor o igual al momento en que se requiere el inicio del viaje, si se realiza con esa rampla. La **restricción 19** indica que la hora de llegada al viaje j por la rampla k debe ser menor o igual al tiempo de viaje hacia el origen de j , más la hora de presentación en j si el viaje se realiza con esa rampla. Las **restricciones 20, 21 y 22** son equivalentes, pero aplicadas a los camiones.

Por último, están las restricciones que involucran a las ramplas y los equipos. La **restricción 23** asegura que a cada viaje se asigne tanto una rampla como un equipo. La **restricción 24** limita el peso transportado, estableciendo que la rampla, el equipo y la cantidad de producto no deben superar el límite máximo permitido de **45.000 kg**. Las **restricciones 25 y 26** garantizan que la rampla y el equipo lleguen al viaje al mismo tiempo.

CAPÍTULO IV – RESULTADOS COMPUTACIONALES

4.1 Instancias de prueba

Para crear el modelo y probarlo, se generaron instancias que correspondían a pedidos antiguos que ya fueron planificados y finalizados, en donde la asignación fue hecha por el supervisor de una de las áreas.

Estas instancias corresponden a pedidos que se debían planificar para dos a tres días a futuro, en donde se obtiene para la todas las instancias. Los datos utilizados en el código del modelo matemático son el origen y destino de los viajes, los kilómetros recorridos, el producto y la cantidad transportada y por último la hora y fecha en que el camión debe presentarse para comenzar el viaje, es decir, el origen.

De esta manera se pueden comparar estas planificaciones ya hechas con la que el modelo propone según la solución matemática.

<i>Origen</i>	<i>Destino</i>	<i>Km</i>	<i>Producto</i>	<i>Cantidad</i>	<i>Horario</i>	<i>Equipo</i>	<i>Rampla</i>
Oxy Chile Talcahuano	Nueva Aldea	224	Hipoclorito de Sodio	24030	11/06/24 07:00	ATC-18	R-07
Mathiesen Stgo.	Minera Escondida	3002	Nash	27950	11/06/24 07:20	SCANIA-13	I-30
Oxy Chile Talcahuano	Molyb Mejillones	4098	Gas Cloro	22250	11/06/24 09:00	ACT-12	C-31
Oxy Chile Talcahuano	Codelco Chuquicamata	4325	Ácido Clorhídrico	24960	11/06/24 09:20	ACT-11	R-12
Oxy Chile Talcahuano	Molynor S.A.	3978	Gas Cloro	23100	11/06/24 11:00	SCANIA-02	C-38
Inchalam	Oxy Chile Talcahuano	80	Ferroso	24760	11/06/24 11:30	CAS-11	R-15
Oxy Chile Talcahuano	Minera Los Pelambres	1907	Ácido Clorhídrico	26140	11/06/24 14:10	ACT-10	R-19
Oxy Chile Talcahuano	Horcones-Arauco	160	Soda Caustica 50%	29070	11/06/24 21:10	CAS-09	I-64
Oxy Chile Talcahuano	Albemarle Antofagasta	3787	Ácido Clorhídrico	26460	12/06/24 08:20	SCANIA-20	R-11

Oxy Chile Talcahuano	Aguas Andinas Talagante	1113	Hipoclorito de Sodio	24970	12/06/24 11:20	VOLVO-02	R-07
Oxy Chile Talcahuano	CMPC Mininco	484	Soda Caustica 50%	27950	12/06/24 14:15	ACT-20	I-64
Fosfoquim S.A.	Minera Escondida	4055	Matcol	27000	16/06/24 09:00	ACT-15	I-65

Tabla: Información real sobre instancia 0

Además, a través de las planificaciones se puede identificar la disponibilidad de equipos y ramplas que el supervisor puede utilizar. Los datos sobre consumo de combustible, uso de solución de urea, así como los costos de mantenimiento y las taras de camiones y ramplas, fueron proporcionados por el ingeniero responsable en la empresa Polykarpo.

<i>Camión (modelos)</i>	<i>Consumo Diésel (km/L)</i>	<i>Consumo urea (km/L)</i>	<i>Mantenimiento (\$/km)</i>	<i>Tara (kg)</i>
SCANIA	2,84	46,85	36,88	9400
VOLVO	2,83	60,97	36,88	9200
CASCADIA	2,75	75,34	31,35	8900
ACTROS	2,85	73,32	37,11	9500

Tabla: Información de costos de consumo, mantenimiento y taras de los equipos

<i>Ramplas (tipos)</i>	<i>Mantenimiento (\$/km)</i>	<i>Tara (kg)</i>
Revestidas (R)	21,56	4500
Inoxidable (I)	23,03	7500
Chasis (C)	27,09	8500

Tabla: Información de costos de mantenimiento y taras de las ramplas

4.2 Validación del modelo

Para verificar el correcto funcionamiento del modelo, se llevaron a cabo pruebas con cuatro instancias, es decir, cuatro planificaciones reales generadas por el supervisor. Esto permitió comparar los costos de asignación obtenidos mediante el modelo matemático con los costos de la planificación real, con el objetivo de determinar si el modelo logra una reducción efectiva en dichos costos.

Cada instancia cuenta con distinta cantidad de viajes, de ramplas, de camiones y de días.

- INSTANCIA 0:

- Días de planificación: 2
- Número de ramplas: 11
- Número de camiones/equipos: 13
- Número de viajes: 12

<i>Origen</i>	<i>Destino</i>	<i>Km</i>	<i>REAL</i>		<i>CÓDIGO</i>	
			<i>Camión</i>	<i>Rampla</i>	<i>Camión</i>	<i>Rampla</i>
Oxy Chile Talcahuano	Nueva Aldea	224	VOLVO-02	R-07	ACT-18	R-07
Mathiesen Stgo.	Minera Escondida	3002	SCANIA-20	R-11	ACT-21	R-12
Oxy Chile Talcahuano	Molyb Mejillones	4098	ACT-20	I-64	ACT-20	I-64
Oxy Chile Talcahuano	Codelco Chuquicamata	4325	ACT-11	R-12	ACT-10	R-19
Oxy Chile Talcahuano	Molynor S.A.	3978	CAS-09	I-64	VOLVO-02	I-64
Inchalam	Oxy Chile Talcahuano	80	ACT-15	I-65	ACT-10	I-30
Oxy Chile Talcahuano	Minera Los Pelambres	1907	SCANIA-13	I-30	ACT-15	I-65
Oxy Chile Talcahuano	Horcones-Arauco	160	ACT-10	R-19	ACT-20	R-11
Oxy Chile Talcahuano	Albemarle Antofagasta	3787	ACT-12	C-31	ACT-12	C-38
Oxy Chile Talcahuano	Aguas Andinas Talagante	1113	SCANIA-02	C-38	ACT-11	C-31
Oxy Chile Talcahuano	CMPC Mininco	484	ACT-18	R-07	ACT-11	R-07
Fosfoquim S.A.	Minera Escondida	4055	CAS-11	R-15	ACT-18	R-15

Tabla: Situaciones comparativas de asignación de "INSTANCIA 0"

- INSTANCIA 1:

- Días de planificación: 3

- Número de ramplas: 21
- Número de camiones/equipos: 20
- Número de viajes: 20

<i>Origen</i>	<i>Destino</i>	<i>Km</i>	<i>REAL</i>		<i>CÓDIGO</i>	
			<i>Camión</i>	<i>Rampla</i>	<i>Camión</i>	<i>Rampla</i>
Oxy Chile Talachuano	Horcones-Arauco	160	VOLVO-01	R-07	ACT-21	R-07
Oxy Chile Talachuano	Erco Mininco	467	ACT-03	R-13	ACT-11	R-13
Oxiquim Coronel	Pesqueras Talcahuano	81	ACT-18	R-05	ACT-10	R-05
Oxy Chile Talachuano	CMPC Santa Fe	408	ACT-14	I-49	ACT-15	I-49
Oxy Chile Talachuano	Nueva aldea	224	ACT-14	I-49	VOLVO-02	I-49
Inchalam	Oxy Chile Talcahuano	80	CAS-11	R-15	ACT-14	R-15
Oxy Chile Talachuano	Erco Mininco	467	ACT-21	R-12	ACT-14	R-19
Oxy Chile Talachuano	Aguas Andinas Talagante	1113	VOLVO-01	R-07	ACT-10	R-07
Oxy Chile Talachuano	Oxiquim Coronel	69	ACT-19	R-14	ACT-18	R-02
Oxy Chile Talachuano	Minera los Pelambres	1792	VOLVO-02	R-19	ACT-10	R-19
Oxy Chile Talachuano	Nueva Aldea	224	ACT-03	I-64	ACT-15	I-49
Oxy Chile Talachuano	Nueva Aldea	224	ACT-14	I-49	ACT-14	I-64
Oxy Chile Talachuano	Nueva Aldea	224	ACT-03	R-09	ACT-10	R-07
Oxy Chile Talachuano	Codelco Chuquicamata	4325	SCANIA-04	R-17	ACT-22	R-17
Oxy Chile Talachuano	Codelco Chuquicamata	4325	SCANIA-19	R-06	ACT-21	R-11
Oxy Chile Talachuano	Molyb Mejillones	4098	ACT-22	C-23	ACT-15	C-23
Oxy Chile Talachuano	Albemarle Antofagasta	3787	SCANIA-13	R-13	ACT-20	R-17
Oxy Chile Talachuano	Huachipato	70	CAS-11	R-12	ACT-11	R-02

Inger S.A.	Nueva Aldea	205	SCANIA-19	C-19	ACT-11	C-19
Diteco Coronel	Mapa-Arauco	96	SCANIA-13	C-18	ACT-14	C-18

Tabla: Situaciones comparativas de asignación de "INSTANCIA 1"

- INSTANCIA 2:

- Días de planificación: 2
- Número de ramplas: 26
- Número de camiones/equipos: 22
- Número de viajes: 11

<i>Origen</i>	<i>Destino</i>	<i>Km</i>	<i>REAL</i>		<i>CÓDIGO</i>	
			<i>Camión</i>	<i>Rampla</i>	<i>Camión</i>	<i>Rampla</i>
Inchalam	Oxy Chile Talcahuano	80	CAS-11	R-08	ACT-20	R-15
Oxy Chile Talcahuano	Inchalam	80	ACT-17	R-19	ACT-15	R-13
Oxy Chile Talcahuano	Albemarle Antofagasta	3787	SCANIA-02	R-11	ACT-04	R-12
Oxy Chile Talcahuano	Molyb Mejillones	4098	SCANIA-04	C-33	ACT-10	C-31
Oxy Chile Talcahuano	Aguas Andinas Talagante	1113	ACT-17	R-07	ACT-11	R-09
Oxy Chile Talcahuano	Codelco Chuquicamata	4325	ACT-04	R-13	ACT-14	R-06
Oxy Chile Talcahuano	La Farfana, Santiago	1065	CAS-11	R-04	ACT-20	R-05
Oxy Chile Talcahuano	Mapa-Arauco	160	ACT-20	I-49	VOLVO-01	I-64
Oxy Chile Talcahuano	Albemarle Antofagasta	3787	ACT-21	R-12	ACT-03	R-02
Fosfoquim S.A.	Minera Escondida	8760	VOLVO-02	I-61	CAS-11	I-61
Fosfoquim S.A.	Minera Escondida	8760	ACT-03	I-60	CAS-09	I-60

Tabla: Situaciones comparativas de asignación de "INSTANCIA 2"

- INSTANCIA 3:

- Días de planificación: 2
- Número de ramplas: 31

- Número de camiones/equipos: 23
- Número de viajes: 9

<i>Origen</i>	<i>Destino</i>	<i>Km</i>	<i>REAL</i>		<i>CÓDIGO</i>	
			<i>Camión</i>	<i>Rampla</i>	<i>Camión</i>	<i>Rampla</i>
Oxy Chile Talcahuano	Erco Mininco	467	ACT-17	R-19	ACT-03	R-19
Oxy Chile Talcahuano	Nueva Aldea	224	ACT-10	I-49	ACT-03	I-64
Oxiquim Coronel	Teno-Maderas Arauco	735	ACT-04	C-30	ACT-22	C-30
Oxy Chile Talcahuano	Mapa-Arauco	224	ACT-17	R-07	ACT-22	R-09
Clariant Santiago	Minera Spence	3050	ACT-23	I-28	ACT-23	I-28
Oxy Chile Talcahuano	Codelco Chuquicamata	4325	ACT-14	R-16	ACT-18	R-02
Oxy Chile Talcahuano	Albemarle Antofagasta	3787	VOLVO-01	R-03	ACT-04	R-19
Oxy Chile Talcahuano	CMPC Santa Fe	408	ACT-10	I-49	ACT-17	I-49
Oxy Chile Talcahuano	Molyb Mejillones	4098	ACT-19	C-29	ACT-21	C-23

Tabla: Situaciones comparativas de asignación de "INSTANCIA 3"

Con la información proporcionada por el código de asignación, se puede verificar en cada instancia que se cumplen las principales restricciones establecidas. En primer lugar, la tara total combinada de camión, rampla y producto no excede los 46.000 kg. Además, se asegura que la llegada al origen se produce con un máximo de 30 minutos de retraso respecto a la hora programada. Por último, se garantiza que tanto el camión como la rampla arriban de manera conjunta, cumpliendo con los requisitos de sincronización necesarios para la operación.

A lo largo del desarrollo del proyecto, se llevaron a cabo reuniones periódicas con el supervisor de la empresa para validar los avances y garantizar que el modelo de optimización cumpliera con las expectativas operativas y estratégicas de la empresa. Estas reuniones permitieron ajustar los enfoques, validar las restricciones implementadas

en el código e ir cumpliendo con lo esperado del proyecto, así como afinar los indicadores clave de desempeño (KPI) definidos en la fase inicial.

ÍTEM	DESCRIPCIÓN	COMPLETADO
Levantamiento de proceso	Estudio detallado del problema, la generación de diagramas de proceso y el análisis de los datos disponibles.	Sí
Definición del problema	Encontrar el problema a abordar y establecer los indicadores de desempeño (KPI) que se pretende impactar.	Sí
Creación e implementación del modelo de optimización	Formulación matemática del problema como un problema de optimización y su implementación en un entorno computacional adecuado.	Sí
Prueba piloto del modelo	Aplicación del modelo a un conjunto de instancias de prueba para evaluar impacto y cuantificar las mejoras obtenidas, para generar un caso de negocio y poder escalando la iniciativa.	Sí

Tabla: CheckList de tareas a realizadas.

4.3 Resultados de la experimentación

En las primeras pruebas del modelo con el código en Jupyter Notebook, se utilizaron los precios actuales del diésel y la solución de urea (Adblue), que corresponden a \$783,32 y \$444, respectivamente. Asimismo, se consideraron los consumos de estos combustibles proporcionados por las marcas en sus fichas técnicas, tal como se mencionó anteriormente.

Al comparar los costos de asignación de cada instancia realizados por el supervisor con los costos generados por el código, se lograron mejoras en tres de las cuatro instancias, reduciendo los costos. Esto indica una mejor combinación de camión y rampa para los viajes.

INSTANCIAS	COSTOS REALES	COSTOS MODELO	% MEJORA
0	\$9.364.440	\$9.315.880	0,52%
1	\$7.742.948	\$7.715.753	0,35%

2	\$12.397.709	\$12.406.320	-0,07%
3	\$5.945.979	\$5.934.849	0,19%

Tabla: Resultados de KPI con consumos reales y precios actuales de diésel y solución de urea (Adblue)

Se observa que en la mayoría de los casos analizados hay una reducción de costos, aunque esta no supera el 1%. Sin embargo, en la instancia 2 no se encontró una solución mejor que la asignada por la empresa. Esto se debe a que el código aún puede optimizarse, considerando los casos en los que los camiones no completan todo el recorrido, sino que realizan un intercambio de ramplas en un punto intermedio del viaje y regresan a la central antes, quedando disponibles con antes, como ocurrió en la logística real.

Por otro lado, como se observa en los datos recopilados, el consumo de diésel entre los distintos modelos de camiones con los que trabaja la empresa no presenta grandes variaciones, lo que limita la reducción de costos. Sin embargo, en la práctica, el consumo puede variar según la ruta, el conductor y las condiciones del tráfico. Por este motivo, a continuación, se presentan los resultados de las distintas instancias con valores de rendimiento bajo, medio y alto, basados en los datos históricos de la empresa sobre el gasto en distintos escenarios.

- Rendimiento bajo (1,96 km/L – 2,14 km/L – 2,47 km/L)

	PLAN. REAL	PLAN. MODELO	% MEJORA	AHORRO
INSTANCIA 0	\$11.355.570	\$10.130.987	10,78%	\$1.224.483
INSTANCIA 1	\$9.606.810	\$8.041.223	16,30%	\$1.565.587
INSTANCIA 2	\$14.278.655	\$14.237.759	0,29%	\$40.896
INSTANCIA 3	\$6.518.130	\$6.319.042	3,05%	\$199.088

Tabla: Comparación de costo – Escenario 1 (Rendimiento bajo diésel)

- Rendimiento medio (2,45 km/L – 2,68 km/L – 2,85 km/L)

	PLAN. REAL	PLAN. MODELO	% MEJORA	AHORRO
INSTANCIA 0	\$9.940.205	\$9.315.880	6,28%	\$624.325
INSTANCIA 1	\$8.423.116	\$7.715.753	8,40%	\$707.363
INSTANCIA 2	\$12.826.571	\$12.536.668	2,26%	\$289.903

INSTANCIA 3	\$5.945.979	\$5.934.849	0,19%	\$11.130
--------------------	-------------	-------------	-------	----------

Tabla: Comparación de costo – Escenario 2 (Rendimiento medio diésel)

- Rendimiento alto (2,76 km/L – 3,04 km/L – 3,51 km/L)

	PLAN. REAL	PLAN. MODELO	% MEJORA	AHORRO
INSTANCIA 0	\$8.663.976	\$7.913.587	8,66%	\$750.389
INSTANCIA 1	\$7.505.506	\$6.561.826	12,57%	\$943.680
INSTANCIA 2	\$11.487.748	\$10.982.685	4,40%	\$505.063
INSTANCIA 3	\$5.246.683	\$5.039.837	3,94%	\$206.846

Tabla: Comparación de costo – Escenario 3 (Rendimiento alto diésel)

Estos escenarios demuestran que el modelo de optimización puede representar una mejora frente a la asignación actual de la empresa, ya que el consumo real de los camiones es más variable que el indicado en sus fichas técnicas por los escenarios mencionados anteriormente. En promedio, el ahorro generado en las cuatro instancias, a lo largo de los tres escenarios (12 valores en total), es de \$589.063, con un KPI promedio de 6,43%.

AHORRO PROMEDIO	KPI PROMEDIO
\$589.063	6,43%

CAPÍTULO V – CONCLUSIONES

En este informe se ha presentado un modelo de optimización para la planificación de viajes en el transporte de productos químicos, utilizando un enfoque matemático que considera tanto las especificaciones técnicas de los camiones y ramplas como los costos asociados al consumo de combustible y mantenimiento. A través de diversas instancias de prueba, se ha demostrado que el modelo es capaz de mejorar la asignación de recursos en la logística de la empresa, logrando reducciones en los costos de operación.

Los resultados obtenidos muestran una mejora en tres de las cuatro instancias analizadas, evidenciando una tendencia a la reducción de costos de hasta un 10,78% en escenarios de bajo rendimiento y un ahorro promedio de \$589.063 en las diferentes simulaciones. Esto sugiere que, a pesar de que las variaciones en el consumo de combustible entre los diferentes modelos de camiones no sean significativas, el modelo permite una mejor combinación de equipos y ramplas, optimizando la planificación de los viajes.

Es importante mencionar que la implementación efectiva de este modelo en la operación real podría requerir ajustes adicionales, particularmente en situaciones donde se presenten intercambios de ramplas y también en cuanto a los conductores que manejan cada camión. Por lo tanto, la continua mejora del modelo y su validación en entornos prácticos serán fundamentales para maximizar los beneficios de esta optimización logística.

En conclusión, la herramienta desarrollada representa un apoyo en la gestión del transporte dentro de la empresa, contribuyendo no solo a la reducción de costos, sino también a una operación más eficiente y a abrir un área de innovación para la empresa que con este estudio buscaba explorar si es posible utilizar algoritmos computacionales para mejorar sus operaciones logísticas.

REFERENCIAS

- Bouyahyiouy, K., & Bellabdaoui, A. (2021). A mixed-integer linear programming model for the selective full-truckload multi-depot vehicle routing problem with time windows. *Decision Science Letters*, 10(4), 471-486.
- Çabuk, S., & Erol, R. (2024). Solving Dynamic Full-Truckload Vehicle Routing Problem Using an Agent-Based Approach. *Mathematics*, 12(13), 2138.
- The Vehicle Routing Problem with Transfers. Maichel M. Aguayo, Francisco Aviles, Subash Sarin, and Claudia Archetti. Working paper.
- Mayerle, S. F., Chiroli, D. M. D. G., de Figueiredo, J. N., & Rodrigues, H. F. (2020). The long-haul full-load vehicle routing and truck driver scheduling problem with intermediate stops: An economic impact evaluation of Brazilian policy. *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 140, 36-51.
- Jothi Basu, R., Subramanian, N., & Cheikhrouhou, N. (2015). Review of full truckload transportation service procurement. *Transport reviews*, 35(5), 599-621.
- Soares, R., Marques, A., Amorim, P., & Parragh, S. N. (2024). Synchronisation in vehicle routing: classification schema, modelling framework and literature review. *European Journal of Operational Research*, 313(3), 817-840.