



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DEL ESTADO DE MÉXICO



FACULTAD DE INGENIERÍA

“DISEÑO DE RUTAS DE VEHÍCULOS PARA UNA EMPRESA DE SERVICIO DE TRANSPORTE DE CARGA: CASO DE ESTUDIO”

TRABAJO TERMINAL DE GRADO
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN INGENIERÍA DE LA CADENA DE SUMINISTRO

PRESENTA:

ING. JESSICA JAZMÍN VÁZQUEZ
AZOTEA

DIRECTOR DE TRABAJO TERMINAL DE
GRADO:

DR. JAVIER GARCÍA GUTIÉRREZ

CO-DIRECTORA:

DRA. LOURDES LOZA HERNÁNDEZ

TUTORA ADJUNTA:

DRA. MA. DE LOURDES NÁJERA LÓPEZ

TOLUCA, MÉXICO FEBRERO DE 2022

Contenido

| | |
|---|-----------|
| Listado de figuras | vii |
| Listado de tablas | viii |
| INTRODUCCIÓN..... | 9 |
| Planteamiento del problema..... | 11 |
| Objetivo general..... | 12 |
| Objetivos particulares..... | 13 |
| Hipótesis..... | 13 |
| Metodología..... | 13 |
| Justificación..... | 14 |
| CAPÍTULO 1 ANTECEDENTES DEL OBJETO DE ESTUDIO | 16 |
| 1.1. Descripción del objeto de estudio..... | 16 |
| 1.1.1. Situación actual del objeto de estudio | 20 |
| CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO | 27 |
| 2.1. Problema de diseño de redes..... | 27 |
| 2.2. Diseño de Redes de Servicio (SND)..... | 29 |
| 2.2.1. Planificación del Diseño de Redes de Servicio (SND)..... | 35 |
| 2.2.2. Tipos de servicios en el SND..... | 36 |
| 2.3. Descripción del modelo..... | 38 |
| 2.3.1. Decisiones tácticas | 38 |
| 2.3.2. Decisiones estratégicas..... | 43 |
| CAPÍTULO 3 CASO DE ESTUDIO | 50 |
| 3.1. Generalidades la empresa..... | 50 |
| 3.2. Servicio consolidado de la empresa | 50 |
| 3.2.1. Rutas y cobertura del servicio consolidado | 53 |
| 3.2.2. Clientes ruta Bajío..... | 55 |
| 3.3. Planteamiento del modelo | 55 |
| 3.3.1. Costo de envío desde las terminales hacia el nodo de consolidación..... | 56 |
| 3.3.2. Probabilidad de ocurrencia de cada escenario..... | 57 |
| 3.3.3. Costo por enviar la mercancía k en la ruta p en el escenario ψ | 59 |
| 3.3.4. Costo fijo por uso de la ruta p en el envío de la mercancía k , escenario ψ | 60 |
| CAPÍTULO 4 RESULTADOS EXPERIMENTALES | 64 |
| 4.1. Codificación en el programa GAMS® | 64 |

| | |
|---|----|
| 4.1.1. <i>Resultados computacionales</i> | 66 |
| 4.2. Variables para asignación de mercancías a las rutas | 69 |
| 4.3. Costos totales finales | 69 |
| 4.4. Análisis de sensibilidad | 71 |
| CAPÍTULO 5 RESULTADOS Y ANÁLISIS | 74 |
| <i>Conclusiones</i> | 74 |
| <i>Recomendaciones</i> | 75 |
| <i>Trabajo futuro</i> | 77 |
| REFERENCIAS | 78 |
| ANEXOS | 81 |

Listado de figuras

| | | |
|------------------|---|----|
| Figura 1 | Proceso Operativo Central de Servicios de la empresa en estudio..... | 18 |
| Figura 2 | Situación actual: Ruta 19 | 25 |
| Figura 3 | Situación actual: Ruta 20 | 25 |
| Figura 4 | Estructura de red a través de nodos de transbordo | 28 |
| Figura 5 | Revisión de literatura del problema de Diseño de Redes de Servicio (SND)..... | 30 |
| Figura 6 | Clasificación de redes de servicio de acuerdo a los tipos de servicio..... | 37 |
| Figura 7 | Representación de asignación de recursos a partir del nodo fuente | 44 |
| Figura 8 | Ilustración de algunos variables y parámetros del modelo | 47 |
| Figura 9 | Capacidad de los recursos propios..... | 48 |
| Figura 10 | Parámetros de las restricciones (5) y (6) | 48 |
| Figura 11 | Proceso de selección de tipo de servicio | 52 |
| Figura 12 | Ciudades destino en la ruta Bajío..... | 54 |
| Figura 13 | Probabilidad de ocurrencia de los escenarios | 59 |
| Figura 14 | Ventana 01 de ejecución GAMS®..... | 65 |
| Figura 15 | Ventana 02 de ejecución GAMS®..... | 65 |
| Figura 16 | Cantidad inicial en GAMS® de columnas y renglones | 66 |
| Figura 17 | Primer reducción de columnas y renglones en GAMS® | 66 |
| Figura 18 | Brecha inicial (GAP) primer acercamiento | 67 |
| Figura 19 | Resultados finales obtenidos por GAMS® | 67 |
| Figura 20 | Análisis de sensibilidad: probabilidad de ocurrencia de los escenarios | 72 |
| Figura 21 | Ejemplo: estructura de costos escalonada k17 (143.8 kg)..... | 73 |

Listado de tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Cronograma de salidas destino Bajío..... | 19 |
| Tabla 2 Situación actual: cantidad de servicios de los clientes (80-20) en el año de observación | 21 |
| Tabla 3 Situación actual: peso (kg) enviado por cliente del análisis 80-20 en el mes 1 de observación | 21 |
| Tabla 4 Naturaleza de la mercancía para su consolidación de acuerdo a la empresa..... | 22 |
| Tabla 5 Situación actual: ruta, ciudades, peso (kg) en el mes 1 de observación | 23 |
| Tabla 6 Situación actual: costos por ruta, costos de transportación y costos por producto dañado.... | 25 |
| Tabla 7 Ciudades incluidas en la ruta Bajío | 26 |
| Tabla 8 Situación actual: rutas 19 y 20..... | 26 |
| Tabla 9 Análisis 80-20 mercancía con destino al Bajío | 56 |
| Tabla 10 Costos de envío Oht (\$)..... | 57 |
| Tabla 11 Probabilidad de ocurrencia de los escenarios | 58 |
| Tabla 12 Costo de envío $Cpk\psi$ (\$) | 60 |
| Tabla 13 Parámetros del modelo..... | 62 |
| Tabla 14 Variables del modelo | 62 |
| Tabla 15 Ejemplos de algunos <i>solvers</i> empleados en GAMS® según el tipo de problema..... | 64 |
| Tabla 16 Cantidad de variables y restricciones del modelo en GAMS® | 67 |
| Tabla 17 Resultados variable $x1th$ (kg) | 68 |
| Tabla 18 Resultado variables $wpk\psi$ y $ypk\psi$ | 70 |
| Tabla 19 Resultado variable $x2pk\psi$ | 71 |
| Tabla 20 Análisis de sensibilidad: probabilidad de ocurrencia de los escenarios..... | 72 |
| Tabla 21 Análisis de sensibilidad: valor del costo total de la función objetivo | 73 |

INTRODUCCIÓN

La movilización de productos desde el lugar de origen hasta llegar a manos del cliente cumpliendo estándares de calidad referentes a tiempo y lugar de entrega, depende del transporte; el papel del transporte es fundamental dado que es el vínculo entre clientes y proveedores, por lo tanto, es una actividad esencial en la cadena de suministro. El transporte representa una parte importante del costo final de los productos, en consecuencia, si los productores no cuentan con servicios de transporte propios, optan por el uso de terciarios logísticos cuya función es mover los productos hasta los destinos especificados. De esta forma, los responsables de la entrega serán quienes planifiquen los envíos tomando en cuenta diversas consideraciones como tipo de servicio, costos, tiempos de entrega, entre otros. Una alternativa de transportación a un menor costo más accesible para las empresas, es el servicio de carga consolidada. Este servicio se caracteriza principalmente por la agrupación de mercancía pequeña, en volumen o peso, que no requiere el espacio total de un vehículo. De esta forma, se rentabiliza el transporte además de brindar plazos de entrega más flexibles con escalas de carga y descarga en diferentes puntos dentro de una ruta de entrega.

Para que un servicio de transporte de mercancía consolidada sea rentable, se deben considerar procesos de planificación de envíos en donde se coordinen distintas rutas, estos procesos de planificación han sido resueltos por medio del *Diseño de Redes de Servicio* (SND, acrónimo en inglés) (Crainic, 2000; Wieberneit, 2007). El objetivo principal del SND es producir un plan de carga que atienda la demanda mientras se logran los objetivos económicos y de calidad de servicio del transportista. La construcción de un plan de este tipo implica seleccionar los servicios a operar para después enrutar los envíos de los clientes a través de la red de servicios seleccionada. La viabilidad y el costo de ejecutar una red de servicio pueden

verse afectados por las necesidades y reglas de operación que deben cumplirse al administrar los recursos.

En este trabajo, el cual se desarrolla en una empresa de autotransporte de carga consolidada con destino Bajío de México, se ha resuelto el problema SND dividido en dos partes. En la primera parte, que corresponde a la programación de servicios, se establece la demanda determinada por ciertos periodos de planificación que debe cubrir cada terminal de origen a cada destino, incluyendo el proceso de consolidación de mercancía en un CEDIS, y dicho periodo de planificación corresponde a un mes típico; por otro lado, la segunda parte describe las rutas que cada mercancía seguirá para su envío por medio de una combinación de éstas y de las frecuencias de envíos en diferentes escenarios una vez que la mercancía se ha consolidado. Por medio de esta formulación, se permiten disminuir los costos de envío de mercancía consolidada para los escenarios propuestos y satisfacer así la demanda de los clientes. La base del modelo aquí presentado se toma del trabajo desarrollado por Hewitt *et al.* (2019) que aborda simultáneamente las decisiones estratégicas con respecto al tamaño y a la asignación de la flota, así como las decisiones tácticas con respecto a un plan y horario de transporte repetible que aborda explícitamente la incertidumbre en la demanda mediante el planteamiento de distintos escenarios.

La organización de este trabajo es la siguiente. En el Capítulo 1, Antecedentes del objeto de estudio, se muestra la situación actual de la empresa objeto de estudio, aspectos como la naturaleza de la mercancía, características de las rutas y de los clientes. El marco teórico referente al problema SND y el modelo base de este trabajo se encuentra en el Capítulo 2. El Capítulo 3, Caso de estudio, incluye el planteamiento del modelo matemático empleado en el diseño de red de servicio para este trabajo. En el Capítulo 4 se presentan los resultados experimentales derivados del análisis de información y la introducción del modelo matemático así como un análisis de sensibilidad que permite discutir la robustez de la solución. Finalmente, en el Capítulo 5, se listan las conclusiones, así como recomendaciones y trabajos futuros derivados del análisis y del trabajo en general.

Planteamiento del problema

La movilización de insumos, materia prima y producto terminado se encuentra a cargo de los sistemas de transporte. En México, esta movilización se da principalmente gracias a los servicios de autotransporte de carga, a la amplia red carretera del país y a la basta competencia de transportistas quienes son los encargados de ser el eslabón en la cadena de suministro que conecta a clientes, proveedores y empresas en diferentes puntos geográficos. No todas las empresas cuentan con recursos propios para hacer el movimiento de bienes y por ello recurren a empresas logísticas quienes se convierten en los responsables de la recolección, traslado y entrega. Pero, ¿qué pasa cuando la mercancía por enviar no cubre la totalidad del autotransporte en volumen o peso? Una alternativa de envío para las empresas, es el servicio de carga consolidada, el cual se caracteriza principalmente por la agrupación de mercancía pequeña que no requiere el espacio total de un vehículo. De esta forma se rentabiliza el transporte además que se generan plazos de entrega más flexibles.

En este documento se presenta el caso de estudio de una empresa mexicana de autotransporte de carga la cual proporciona servicios en vehículos completos y consolidados a nivel nacional. El tipo de mercancía que transporta tiene las siguientes características: es producto terminado, no perecedero, resistente (puede soportar peso encima, se permite el apilamiento del producto, bien del mismo tipo o soportando la carga de otro tipo de producto), no presenta propiedad de peligrosidad. La mercancía es unificada en soportes como cajas, estibas o contenedores. Dadas estas particularidades, el traslado de los productos se realiza en remolques tipo caja seca.

En lo que concierne a la operación de los servicios consolidados, actualmente la empresa genera las rutas de envío de acuerdo a la solicitud de los clientes, considerando el peso de la carga y destino de entrega, sin embargo, este método genera en promedio anual más de 500 rutas distintas para la zona del Bajío de México. Cada ruta requiere recursos monetarios que dependen de la cantidad de ciudades incluidas en las rutas, propiciando así la variación de costos de transportación cada vez que se presenta un servicio consolidado al Bajío. De esta manera, se observa que la función de la consolidación en esta empresa no se está ejecutando propiamente, pues sólo se agrupa la mercancía de manera tal que la capacidad de los vehículos

esté al máximo posible sin considerar los costos incurridos en esta ejecución y los destinos que con mayor frecuencia se solicitan.

Referente a los clientes, no se consideran características específicas de cada cliente tales como: la frecuencia de envíos, los destinos frecuentes de cada cliente, los clientes que son recurrentes en la solicitud de servicios o la fluctuación en la demanda. Es decir, no se están considerando los casos en los cuales las cantidades de envío llegan a superar la capacidad de los vehículos que induce a incurrir en servicios consolidados que no alcanzan los niveles de retribución monetaria establecidos por la empresa.

Con el crecimiento industrial que está presentando el Bajío, varios de los clientes actuales de la empresa están haciendo contratos con empresas de esta zona, de manera que se espera que la cantidad de solicitud de servicios consolidados al Bajío crezca en meses próximos; he aquí la importancia de diseñar rutas de entrega que incluyan características propias de cada cliente para proporcionar servicios de acuerdo a las necesidades de cada uno sin incurrir en gastos extras para la empresa transportista.

La problemática aquí descrita ha sido abordada para distintas instancias dentro de la literatura. Autores como Crainic (2000; 2003), Dall’Orto *et al.* (2006), Lium *et al.* (2007; 2009), Hewitt *et al.* (2019) entre otros, han estudiado el problema SND como una opción ante este problema de distribución.

Objetivo general

Elaborar el diseño de rutas de vehículos para una empresa de servicio de transporte de carga consolidada con destino en ciudades del Bajío de México, y que minimice los costos variables derivados de la combinación de rutas que presentan fluctuación en la demanda en diferentes escenarios, a través de un modelo de programación entera mixta.

Objetivos particulares

- Conocer el estado del arte referente a los distintos campos de la programación entera mixta para el problema de diseño de rutas con enfoque en el autotransporte de carga consolidada.
- Identificar una estrategia de optimización para dar solución al planteamiento del problema.
- Recopilar información del caso de estudio para realizar la modelación del problema.
- Modelar y obtener su solución que permita identificar la programación de servicios de carga consolidada con destino a las ciudades del Bajío de México por medio de la combinación de rutas y frecuencia de envíos en diferentes escenarios.
- Realizar un análisis de la solución del modelo matemático con respecto a la situación actual de la empresa y revisar la factibilidad de esta solución por medio de un análisis de sensibilidad.

Hipótesis

El diseño de rutas de vehículos para una empresa de servicio de transporte de carga consolidada con destino Bajío de México, permite disminuir los costos variables de envío de mercancía con respecto a los resultados actuales de la empresa en presencia de fluctuación en la demanda en diferentes escenarios usando un modelo de programación entera mixta considerando la consolidación de carga del transporte, así como la inclusión de la combinación de rutas y envíos.

Metodología

La metodología se desarrolló conforme a lo descrito a continuación:

i. Revisión de la literatura:

En esta sección se recopiló información correspondiente al problema de Diseño de Redes de Servicio (SND) con enfoque en el autotransporte de carga consolidada.

ii. Recopilación de información proporcionada por la empresa:

Con base en la revisión de literatura referente a modelos cuantitativos para el problema SND en el autotransporte de carga consolidada, se determinó la información requerida de la empresa para la modelación del problema.

iii. Modelación del problema cuantitativo:

En la formulación del modelo cuantitativo se empleó la información obtenida en los dos pasos anteriores para la creación de un modelo que da solución al problema.

iv. Aproximación a una solución:

Una vez modelado el problema matemático, el modelo se traduce a un *solver* de optimización a través de la interfaz del software GAMS® para proporcionar al menos una posible solución factible al modelo de programación entera mixta.

v. Comparación de resultados y su análisis:

En la etapa final de este trabajo se realizó un análisis de sensibilidad de la solución del modelo cuantitativo con respecto a la situación actual de la empresa y se revisó la factibilidad de esta solución llegando así a las conclusiones, recomendaciones y trabajo futuro.

Justificación

El presente trabajo busca diseñar la programación de servicios consolidados de autotransporte de carga para una empresa mexicana que permita la disminución de los costos variables por la combinación de rutas y frecuencia de los envíos, utilizando como base el problema de Diseño de Redes de Servicio (SND).

De acuerdo con el INEGI (2019) en la Colección de Estudios Sectoriales y Regionales, *Conociendo la Industria del Autotransporte de Carga*, el autotransporte de carga en México se sitúa por debajo de la extracción de petróleo en la posición número 8 en aporte al Producto Interno Bruto (PIB) nacional. El autotransporte de carga representa el 3.4% de esta métrica.

La importancia del transporte radica en la determinación de la eficiencia de las empresas, dado que, dentro de la cadena de suministro, el transporte asegura que la mercancía llegue al siguiente eslabón en el lugar y momento requerido por el cliente. La imagen y reputación de las empresas se ven afectadas por el incumplimiento en las entregas de mercancía cuando éstas se ejecutan a destiempo o sin asegurar las condiciones de calidad requeridas por el cliente,

quien quedará insatisfecho con el servicio (Beetrack, 2021). Por lo tanto, la prioridad en el funcionamiento del transporte y distribución debe incluir el balance entre la satisfacción del cliente y el uso eficaz de los recursos de las empresas.

El transporte terrestre de mercancía en México presenta ventajas como costos competitivos, versatilidad y accesibilidad en las rutas, por mencionar algunas, sin embargo, hay ciertos problemas recurrentes con este tipo de transporte en donde principalmente se pueden destacar la saturación y la falta de disponibilidad de equipos en temporada alta. Frecuentemente se puede presentar escasez de equipo para transportar las mercancías, por lo que hay que considerar de 2 a 3 días de anticipación para reservar la realización del servicio (Marinno Logistics Innovation, 2021).

Capítulo 1

ANTECEDENTES DEL OBJETO DE ESTUDIO

1.1. Descripción del objeto de estudio

El presente trabajo se desarrolla en una empresa dedicada al servicio de carga, con más de 50 años de experiencia en transporte. Proporciona servicios en unidades completas y paquetería con recolección, entrega a domicilio y depósito de la mercancía en alguna terminal de la empresa de transporte para posteriormente ser recogido por el cliente. La empresa tiene su sede en la ciudad de Toluca, seis terminales distribuidas en Jalisco, Veracruz, Sinaloa, Ciudad de México en Vallejo, Ciudad de México en Oriente y el centro de distribución (CEDIS) con ubicación en el Estado de México.

La infraestructura de la empresa, además de contar con las terminales antes mencionadas, incluye los vehículos con los cuales se realizan los servicios de los clientes. De acuerdo al tipo de servicio que el cliente requiera y con la finalidad de maximizar la utilización de los vehículos es como se selecciona, en primera instancia, el vehículo que será requerido para dicha tarea. Los vehículos con que se cuenta se clasifican en tres grupos de acuerdo a sus características en cuanto a dimensiones y capacidad de carga:

- Camionetas de 3.5 toneladas (de 2 a 4 vehículos por terminal)
- Torton con capacidad de 17 toneladas (de 2 a 3 vehículos por terminal y 33 vehículos foráneos quienes reparten a nivel nacional)
- Tráiler de caja seca de 53 pies con capacidad de 25 toneladas (80 vehículos foráneos quienes reparten a nivel nacional)

La dispersión de los vehículos para ejecutar la operación se rige bajo el *Proceso Operativo Central de Servicios* de la empresa, dicho proceso contiene 10 subprocesos que se describen a continuación y se ilustran en la figura 1:

1) Recolectar la mercancía en el/los domicilio(s) señalados por el cliente

Este subproceso inicia con la recepción de la solicitud del servicio en alguna de las siete instalaciones de la empresa, se registran los datos del cliente, así como los datos de la recolección. Al realizar esta tarea, se valida la disponibilidad de vehículos; en caso de no existir disponibilidad se llega a un consenso con el cliente en un nuevo horario de recolección. Una vez que se ha llegado a un acuerdo, se asigna el tipo de vehículo adecuado a las características de la mercancía.

De acuerdo al día y horario acordado se acude al domicilio señalado por el cliente para recolectar la mercancía; se realiza la validación de cantidad y descripción de mercancía con base en la factura. Se carga la mercancía en el vehículo de la empresa y se traslada a la terminal en que inició el proceso.

2) Solicitar unidades con base en la carga recibida

Cada terminal cuenta con vehículos asignados para poder disponer de ellos según lo requieran. En todas ellas se cuentan con camionetas de 3.5 toneladas y torton; cuando el servicio es en unidad completa y cuando no se cuenta con la disponibilidad de este recurso en la terminal, se hace la solicitud al departamento de tráfico en Toluca quien asignará la unidad requerida, ya sea porque ésta se encuentre disponible físicamente en la terminal en cuestión o se encuentre cercana a la misma. Cuando el servicio es consolidado, la unidad que se encarga de la recolección es una “unidad de última milla”, ya sea una camioneta de 3.5 toneladas o un torton según lo requerido.

3) Descargar y validar la mercancía que se recibe en el andén

De acuerdo a la cantidad de solicitudes de servicio, capacidad de carga del vehículo y tipo de servicio, se valida si existe capacidad disponible para programar en la ruta de recolección la colecta de la mercancía, en caso contrario se asigna otra unidad. Una vez realizado este análisis

se procede a visitar el lugar pactado por el cliente y a transportar la mercancía al almacén de la empresa de transporte.

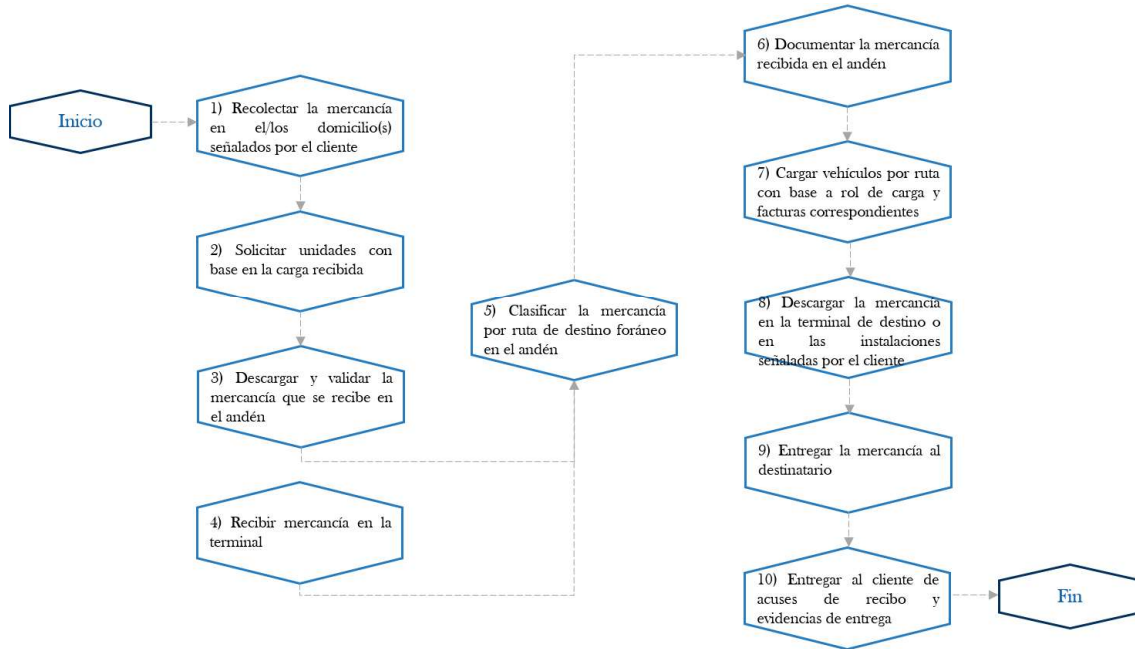


Figura 1 Proceso Operativo Central de Servicios de la empresa en estudio

Fuente: Elaboración propia

4) Recibir mercancía en la terminal

En este subproceso se valida que la información proporcionada por el cliente que refiere al peso de la mercancía coincida en lo pactado inicialmente. De no ser así se informa al cliente las discrepancias para acordar el costo correspondiente.

Si el servicio a cubrir es consolidado, la mercancía se mueve de la terminal origen al CEDIS en el Parque Industrial Toluca 2000, las terminales de Ciudad de México Oriente y Vallejo son las principales proveedoras de servicios consolidados y aunque también cuentan con la capacidad de ser distribuidoras, su función dentro de la empresa es recolectar mercancía para después enviarla al CEDIS. La formalización de esta función se ha dado con la asignación de camiones tipo torton que tienen en los circuitos Oriente-CEDIS-Oriente y Vallejo-CEDIS-Vallejo. En ambos circuitos se cuentan con horarios de salida de lunes a sábado que, de acuerdo a la demanda, se pueden reducir o ampliar. En los casos de servicios consolidados de

las terminales de Veracruz, Jalisco, Sinaloa y Toluca con destino al CEDIS, existen horarios base que pueden o no ser cumplidos. Tomando en cuenta la demanda de los servicios, una vez que se ha cubierto la capacidad total de vehículo o que la retribución económica sea superior al costo del servicio, sale la ruta con destino al CEDIS. Para estos envíos se puede recurrir a cualquiera de los tres tipos de vehículos disponibles.

Por parte del CEDIS, el cronograma de salidas hacia el Bajío de México se muestra en la tabla 1 en donde las marcas de “•” representan las salidas programadas. El tipo de unidad que puede realizar el viaje también está denotado por la marca “•”.

Tabla 1 Cronograma de salidas destino Bajío

| Origen | Destino | Semana | | | | | Tipo de vehículo | |
|--------|------------------|--------|---|---|---|---|------------------|------|
| | | L | M | X | J | V | S | 17 T |
| CEDIS | San Juan del Rio | • | | | | • | | • |
| CEDIS | Querétaro | • | | | | • | | • |
| CEDIS | Celaya | • | | | | • | | • |
| CEDIS | Morelia | | • | | | • | | • |
| CEDIS | Salamanca | | • | | | • | | • |
| CEDIS | León | | | • | | • | | • |
| CEDIS | Aguascalientes | | | • | | • | | • |

Fuente: Elaboración propia

5) Clasificar la mercancía por ruta de destino foráneo en el andén

Una vez la mercancía que se encuentra en instalaciones de la empresa transportista se agrupa por destino para colocarla dentro del almacén de acuerdo a la ruta correspondiente.

6) Documentar la mercancía recibida en el andén

En esta parte del proceso se documenta la mercancía en el sistema electrónico de la empresa para proporcionar factura al cliente o en caso de ser un servicio a crédito se emite la remisión. Se asigna un código de trazabilidad interno de la mercancía.

7) Cargar vehículos por ruta con base en el rol de carga y facturas correspondientes

Cuando la mercancía está en el CEDIS, se debe agrupar por ruta para embarcarse posteriormente. En el caso de los viajes CEDIS-terminal, se traslada la mercancía y se deposita

en la terminal destino de la empresa y los vehículos de patio de las terminales son los encargados de hacer la entrega última milla. Pero en el caso de la ruta Pacífico y Bajío, los vehículos que salen del CEDIS son los encargados de hacer la entrega directamente en las ciudades destino.

- 8) Descargar la mercancía en la terminal de destino o en el destino señalado por el cliente
- 9) Entregar la mercancía al destinatario
- 10) Entregar al cliente de acuses de recibo y evidencias de entrega

1.1.1. Situación actual del objeto de estudio

El objeto de estudio, es una empresa de transporte de carga del Estado de México, que cuenta con más de 50 años en el mercado, actualmente cuenta con siete instalaciones físicas en México, brindando servicio en unidades completas, así como consolidación de mercancía a todo el país. Este trabajo se centra en el servicio consolidado a ciudades en la zona del Bajío de México. Dicho servicio inicia con las mercancías en alguna de las terminales y después la mercancía se traslada al CEDIS, en donde se agrupa de acuerdo al destino e inicia la ruta. Es preciso considerar algunos conceptos por separado que se listan a continuación:

Clientes: la cartera de clientes del objeto de estudio es bastante amplia, sin embargo, no todos los clientes solicitan la misma cantidad de servicios al año. De acuerdo a un análisis 80-20 en donde se utiliza la cantidad de servicios solicitados y el peso de los envíos como variables de clasificación, se identifican al 20% de los clientes (22 clientes) que representan el 80% de las solicitudes de servicio; por tanto y para fines académicos, se focaliza en esta porción de clientes. En el análisis 80-20, se identificó que todos los clientes solamente envían un tipo de mercancía, por tanto, no difiere la cantidad de mercancías y la cantidad de clientes a evaluar, además que las instalaciones de entrega son CEDIS, almacenes o tiendas de conveniencia, es decir, las entregas no se realizan en domicilios particulares por las características de estos clientes. La tabla 2 incluye la cantidad de clientes del 80-20 que solicitaron servicios en cada mes, se observa que en el primer mes se atendieron a 19 de los 22 clientes. Esta información

servirá como referente para el análisis del mes en observación, en este caso es el mes 1 de la tabla 2. La tabla 3 contiene el peso que cada cliente envía durante el mes 1 de observación.

Tabla 2 Situación actual: cantidad de servicios de los clientes (80-20) en el año de observación

| Mes | Cantidad de clientes por mes |
|------------|-------------------------------------|
| Mes 1 | 19 |
| Mes 2 | 18 |
| Mes 3 | 18 |
| Mes 4 | 13 |
| Mes 5 | 18 |
| Mes 6 | 15 |
| Mes 7 | 14 |
| Mes 8 | 18 |
| Mes 9 | 14 |
| Mes 10 | 15 |
| Mes 11 | 12 |
| Mes 12 | 14 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3 Situación actual: peso (kg) enviado por cliente del análisis 80-20 en el mes 1 de observación

| Cliente | Peso enviado (kg) |
|----------------|--------------------------|
| Cliente 1 | 8,446.00 |
| Cliente 2 | 38,174.30 |
| Cliente 3 | 7,912.00 |
| Cliente 4 | 30,348.50 |
| Cliente 5 | 18,571.00 |
| Cliente 6 | 120.00 |
| Cliente 7 | 8,347.50 |
| Cliente 8 | 1,136.49 |
| Cliente 9 | 464.50 |
| Cliente 11 | 323.00 |
| Cliente 12 | 3,693.00 |
| Cliente 13 | 490.00 |
| Cliente 14 | 2,113.00 |
| Cliente 16 | 5,280.00 |
| Cliente 18 | 576.00 |
| Cliente 19 | 1,408.00 |
| Cliente 20 | 980.00 |
| Cliente 21 | 64.00 |
| Cliente 22 | 2,971.00 |

Fuente: Elaboración propia

Mercancía: La naturaleza de la mercancía determina la manera en cómo se realiza la recepción, consolidación y transporte de la misma. En la tabla 4 se presentan las características de la mercancía que se transporta en los servicios consolidados al Bajío de México de la empresa caso de estudio. En la columna uno se encuentran la clasificación de los tipos de carga de acuerdo al peso, la vida útil del producto, la resistencia, propiedad de peligrosidad y el volumen. La columna dos incluye la clasificación de la mercancía de acuerdo al tipo de carga y finalmente, en la columna tres, la descripción de las columnas previas.

Rutas: La zona del Bajío que está cubierta por los servicios del objeto de estudio consta de 27 ciudades. A partir de las solicitudes de servicio se identifican los destinos y se genera la ruta que los vehículos deberán seguir para las entregas. La tabla 5 ejemplifica el comportamiento de las rutas, la cantidad de ciudades visitadas por ruta y el peso (kg) contenido en cada ruta durante el mes 1 de actividades de carga consolidada con destino al Bajío

Tabla 4 Naturaleza de la mercancía para su consolidación de acuerdo a la empresa

| Tipo de carga de acuerdo a: | Clasificación: | Especificación: |
|------------------------------------|---|--|
| Peso | Cargas medias | Las mercancías tienen un peso mínimo de 5 kg y un máximo de 25 por unidad de carga |
| | Cargas pesadas | El peso de la mercancía oscila entre los 25 kg y una tonelada. |
| | Cargas muy pesadas | Mercancía con pesos superiores a la tonelada. |
| Vida útil del producto | Carga no perecedera | Mercancía cuya vida útil no condiciona la forma de recepción, transporte, almacenaje y expedición la carga. |
| Resistencia | Cargas resistentes | La mercancía puede soportar peso encima, se permite el apilamiento del producto, bien del mismo tipo o soportando la carga de otro tipo de producto. |
| | Cargas ligeras | Estas cargas pueden apilarse unas sobre otras, pero estableciendo límites. |
| Propiedad de peligrosidad | La mercancía NO pone en riesgo la vida humana y el medio donde se transporta. NO poseen características explosivas, combustibles, oxidantes, venenosas, radiactivas o corrosivas. | |
| Volumen | Cargas grandes o en estibas | El estudio aquí desarrollado se enfoca únicamente en el peso de la mercancía ya que una vez unificada la mercancía se evalúa de acuerdo al peso |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5 Situación actual: ruta, ciudades, peso (kg) en el mes 1 de observación

| Ruta | Cantidad de ciudades | Peso (kg) |
|-------------|-----------------------------|------------------|
| Ruta 1 | 5 | 5,471.50 |
| Ruta 2 | 16 | 9,703.00 |
| Ruta 3 | 22 | 8,403.99 |
| Ruta 4 | 16 | 6,322.00 |
| Ruta 5 | 12 | 7,186.00 |
| Ruta 6 | 12 | 5,707.00 |
| Ruta 7 | 2 | 6,471.10 |
| Ruta 8 | 11 | 9,604.00 |
| Ruta 9 | 13 | 10,809.00 |
| Ruta 10 | 8 | 4,142.50 |
| Ruta 11 | 10 | 9,440.00 |
| Ruta 12 | 4 | 10,590.00 |
| Ruta 13 | 8 | 6,663.70 |
| Ruta 14 | 12 | 5,571.50 |
| Ruta 15 | 7 | 5,147.00 |
| Ruta 16 | 9 | 6,961.50 |
| Ruta 17 | 18 | 6,719.50 |
| Ruta 18 | 11 | 6,418.00 |
| Ruta 19 | 14 | 8,270.50 |
| Ruta 20 | 4 | 3,047.00 |
| Ruta 21 | 3 | 13,581.00 |
| Ruta 22 | 2 | 4,318.00 |

Fuente: Elaboración propia

Capacidad: En el análisis de la empresa, un factor externo que limita el uso de un solo tipo de vehículo es la infraestructura de las ciudades de entrega, así como sus reglamentos de tránsito, siendo estas limitantes en cuanto a peso y dimensiones. Ésta es la principal razón por la cual la capacidad de envío desde el CEDIS se limita a vehículos de 17,000 kg. Sin embargo, la empresa dispone de hasta 5 de los 33 vehículos foráneos del mismo tipo de manera simultánea para cubrir el servicio consolidado del Bajío, en el caso de demanda alta.

Costos: Hay dos costos principales asociados con el envío de mercancía consolidada: el primero es el costo por ruta determinado por el pago de casetas, ligado con la cantidad de destinos, y el segundo, el consumo de combustible el cual depende del rendimiento que tiene el vehículo. El objeto de estudio cuenta con vehículos con rendimientos desde 2.7 km/l hasta

3.5 km/l. Para fines académicos se emplea el valor promedio de estos rendimientos (3.1 km/l). Como es posible observar, la variabilidad de este costo no sólo es causada por la diversidad en rendimiento, sino también por la cantidad de rutas posibles que se pueden generar a partir de las ciudades de entrega. Otro costo es el de transportación, que implica factores como manejo de mercancía, pago de maniobras de carga y descarga, pago de honorarios al conductor y maniobristas, entre otros. Este costo variable representa una proporción de la tarifa que se cobra al cliente. El esquema tarifario del objeto de estudio se rige por el uso de la función de costos de escalón que, a partir de un costo base, incrementa cuando el rango del peso aumenta. La tabla 6 muestra el costo incurrido por ruta durante el mes de observación.

Existe un tercer costo asociado con la mercancía que sufre deterioro mientras se encuentra bajo resguardo de la empresa transportista (recepción, almacén, traslado o descarga), que es el costo por daño de mercancía, el cual puede aplicar sobre el valor total de la mercancía o sólo en una fracción de éste, dependiendo la cantidad de mercancía dañada y de acuerdo al convenio que se llegue con el cliente. La incidencia por producto dañado repercute en el costo final del servicio proporcionado dado que este gasto es cubierto por la empresa de transporte. Actualmente la empresa no considera este costo dentro de sus métricas de costos de servicio, sin embargo, es indispensable considerar que por cada servicio consolidado al Bajío, un promedio de 2 cajas se dañan por el manejo de mercancía; lo anterior, representa el 5% del costo de transportación del servicio. Como no es considerado actualmente este costo adicional en la empresa, la información que refiere a la cantidad promedio de mercancía dañada se obtuvo con base en la experiencia práctica de los conductores quienes son los responsables de reportar las incidencias a las oficinas de la empresa logística. La columna 4 de la tabla 6 incluye el costo por producto dañado que corresponde al 5% del costo de transportación, como se mencionó anteriormente.

En las figuras 2 y 3, se ejemplifican las rutas 19 y 20 de la tabla 6, las cuales muestran las ciudades que son incluidas en dichas rutas, se observa que, la ruta 19 posee 14 de las 27 ciudades que cubren la zona del Bajío, en contraste la ruta 20 sólo incluye 4 de éstas; el costo total de estas rutas difiere, como se ha mencionado con anterioridad, en la cantidad de ciudades que visitan y el peso (kg) que es transportado. La tabla 7 contiene el listado de ciudades incluidas en la ruta Bajío con sus respectivos identificadores.

Tabla 6 Situación actual: costos por ruta, costos de transportación y costos por producto dañado

| Ruta | Costos por ruta (\$) | Costos de transportación (\$) | Costo por producto dañado (\$) | Total (\$) |
|--------------|----------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------|
| Ruta 1 | \$16,949.77 | \$4,658.87 | \$232.94 | \$21,841.58 |
| Ruta 2 | \$17,524.74 | \$10,858.68 | \$542.93 | \$28,926.35 |
| Ruta 3 | \$33,329.60 | \$17,538.13 | \$876.91 | \$51,744.64 |
| Ruta 4 | \$18,253.30 | \$15,365.49 | \$768.27 | \$34,387.06 |
| Ruta 5 | \$19,473.12 | \$15,365.49 | \$768.27 | \$35,606.88 |
| Ruta 6 | \$27,821.97 | \$13,901.39 | \$695.07 | \$42,418.43 |
| Ruta 7 | \$24,198.50 | \$15,365.49 | \$768.27 | \$40,332.26 |
| Ruta 8 | \$17,173.81 | \$5,985.99 | \$299.30 | \$23,459.10 |
| Ruta 9 | \$19,404.30 | \$13,901.39 | \$695.07 | \$34,000.76 |
| Ruta 10 | \$18,859.04 | \$13,901.39 | \$695.07 | \$33,455.50 |
| Ruta 11 | \$19,378.77 | \$13,901.39 | \$695.07 | \$33,975.23 |
| Ruta 12 | \$16,895.08 | \$10,858.68 | \$542.93 | \$28,296.69 |
| Ruta 13 | \$15,809.15 | \$16,316.11 | \$815.81 | \$32,941.07 |
| Ruta 14 | \$22,625.26 | \$10,275.44 | \$513.77 | \$33,414.47 |
| Ruta 15 | \$18,766.33 | \$15,365.49 | \$768.27 | \$34,900.09 |
| Ruta 16 | \$21,732.58 | \$13,901.39 | \$695.07 | \$36,329.04 |
| Ruta 17 | \$22,437.10 | \$10,858.68 | \$542.93 | \$33,838.71 |
| Ruta 18 | \$19,008.83 | \$10,858.68 | \$542.93 | \$30,410.44 |
| Ruta 19 | \$21,399.04 | \$13,901.39 | \$695.07 | \$35,995.50 |
| Ruta 20 | \$12,941.46 | \$7,430.20 | \$371.51 | \$20,743.17 |
| Ruta 21 | \$15,770.31 | \$15,365.49 | \$768.27 | \$31,904.07 |
| Ruta 22 | \$20,545.90 | \$9,108.96 | \$455.45 | \$30,110.31 |
| Total | \$440,297.94 | \$274,984.21 | \$13,749.21 | \$729,031.36 |

Fuente: Elaboración propia

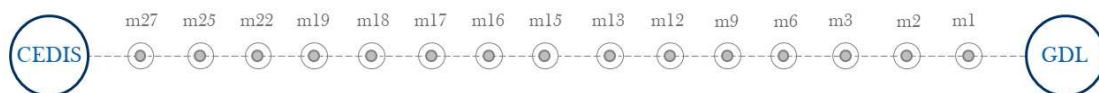


Figura 2 Situación actual: Ruta 19

Fuente: Elaboración propia

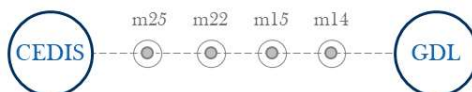


Figura 3 Situación actual: Ruta 20

Fuente: Elaboración propia

Tabla 7 Ciudades incluidas en la ruta Bajío

| Ciudad | Id | Ciudad | Id |
|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|
| Tepatitlán | m1 | León | m15 |
| Zacatecas | m2 | Pénjamo | m16 |
| Tlajomulco De Zúñiga | m3 | Guanajuato | m17 |
| El Salto | m4 | Silao | m18 |
| Arandas | m5 | Irapuato | m19 |
| Zapopan | m6 | Salamanca | m20 |
| Guadalajara | m7 | Cortázar | m21 |
| Tlaquepaque | m8 | Celaya | m22 |
| Tonalá | m9 | San Miguel De Allende | m23 |
| La Barca | m10 | San José De Iturbide | m24 |
| Ocotlán | m11 | Querétaro | m25 |
| Lagos De Moreno | m12 | Acámbaro | m26 |
| San Juan De Los Lagos | m13 | San Juan Del Rio | m27 |
| Aguascalientes | m14 | | |

Fuente: Elaboración propia

La tabla 8, incluye la comparación entre estas dos rutas con referencia al peso (kg), cantidad de ciudades visitadas, costos por ruta y costos de trasportación. La diferencia más evidente entre estas rutas son los *costos por ruta* que contrastan significativamente derivado de la cantidad de ciudades incluidas en las rutas.

Tabla 8 Situación actual: rutas 19 y 20

| | Ruta 19 | Ruta 20 |
|--------------------------------|----------------|----------------|
| Peso (kg) | 8,270.50 kg | 3,047.00 kg |
| Cantidad de ciudades visitadas | 14 | 4 |
| Costos por ruta (\$) | \$21,399.04 | \$12,941.46 |
| Costos de trasportación (\$) | \$13,901.39 | \$7,430.20 |

Fuente: Elaboración propia

Los modelos de diseño de redes son ampliamente usados para representar diversos problemas de gestión de planificación y operación en transporte. Estas formulaciones juegan un papel importante en las decisiones relativas a la operación de los sistemas de transporte de carga con envío menor a la capacidad de la unidad de transporte (LTL, por las siglas en inglés de *Less-Than-Truckload*) (Crainic, 2003) ya que intervienen en la selección de frecuencias, horarios, así como la asignación de recursos humanos y materiales para la ejecución de los servicios (Crainic, 2000).

2.1. Problema de diseño de redes

El problema de diseño de redes de forma general, se representa por grafos que contienen nodos conectados por enlaces o arcos dirigidos que pueden poseer características como longitud, capacidad, costo, entre otras. Algunos de los nodos representan el origen de la mercancía a transportar a través de los enlaces, mientras que otros nodos constituyen el destino de dicha demanda o en algunos casos estos nodos serán empleados como nodos de transbordo cuyas funciones engloban el transbordo de mercancía entre vehículos o la retención de mercancía mientras se programa la salida de éstas en un tiempo posterior.

La figura 4 ejemplifica la estructura de red con nodos de transbordo, en donde los nodos 1 y 2 fungen como nodos de origen que, a través de los arcos, comparten información entre ellos o con los nodos destino (nodos 3, 5 y 6), o con el nodo de transbordo (nodo 4) que es el mediador entre los nodos de origen y los nodos destino (nodos 7, 8, n).

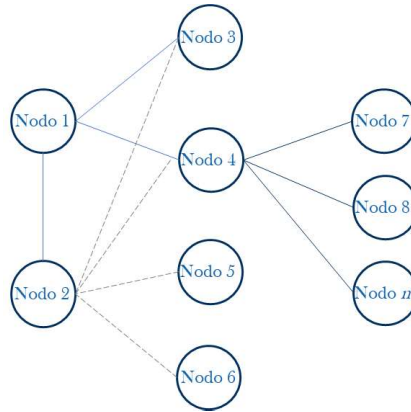


Figura 4 Estructura de red a través de nodos de transbordo
Fuente: Elaboración propia

El objetivo del problema de diseño de redes es seleccionar los enlaces que, de acuerdo a sus características, satisfagan la demanda al costo del sistema más bajo posible calculado como el costo fijo total de los enlaces seleccionados más el costo variable total de uso de la red. Crainic (2000) muestra una versión del Diseño de Red Capacitado para Múltiples Productos con Costos lineales (MCND), donde, dado un grafo $G = (N, A)$ en donde N es el conjunto de nodos, A es un conjunto de enlaces y $k \in K$ del conjunto de productos que serán transportados a través de la red. El modelo se plantea de la siguiente forma:

$$\text{Min} \sum_{(lm) \in A} f_{lm} y_{lm} + \sum_{(lm) \in A} \sum_{p \in P} c_{lm}^k x_{lm}^k \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{m \in N} x_{lm}^k - \sum_{m \in N} x_{ml}^k = d_l^k \quad l \in N, k \in K \quad (2)$$

$$\sum_{p \in P} x_{lm}^k \leq u_{lm} y_{lm} \quad (l, m) \in A \quad (3)$$

$$(x, y) \in S, (l, m) \in A, k \in K \quad (4)$$

$$y \in Y \quad (l, m) \in A \quad (5)$$

$$x_{lm}^k \geq 0 \quad (l, m) \in A, k \in K \quad (6)$$

Donde f_{lm} representa el costo fijo de emplear el enlace (l, m) , y_{lm} son variables enteras que reflejan las decisiones de enrutamiento para cada enlace (l, m) , y es una variable binaria dada por

$$y = \begin{cases} 1 & \text{sólo si el enlace es seleccionado} \\ 0 & \text{en otro caso} \end{cases}$$

Mientras que c_{lm}^k corresponde al costo de transporte por unidad de flujo del producto $k \in K$ por el enlace (l, m) , x_{lm}^k representa variables de decisión de flujo continuo, indica la cantidad de bienes $k \in K$ enviados en el enlace (l, m) , por lo anterior, la función objetivo del MCND indica el costo total del sistema. En este punto se consideran las compensaciones entre los costos de ofrecer la infraestructura o servicios de transporte y los de operar el sistema para hacer fluir el tráfico. La ecuación (2) es la restricción de balance de la demanda, es decir, la suma de las cantidades del producto $k \in K$ enviadas a través del enlace (l, m) . La restricción (3), es identificada como una restricción forzada, establece que el flujo total en el enlace (l, m) no puede exceder la capacidad u_{lm} si el enlace se elige en el diseño de la red (es decir, $y_{lm} = 1$) y debe ser 0 si (l, m) si no es parte de la red seleccionada (es decir, $y_{lm} = 0$). La ecuación (4) captura restricciones adicionales relacionadas con el diseño de la red o las relaciones entre las variables de flujo, mientras que la ecuación (6) supone que las variables deben ser no negativas.

El modelo anterior representa la forma más simple del modelo de diseño de redes, del cual se desprende el planteamiento del modelo de *Diseño de Redes de Servicio* (SND) que integra diversos niveles de planificación y se presenta en la siguiente subsección.

2.2. Diseño de Redes de Servicio (SND)

El *Diseño de la Red de Servicios* o SND es un problema central en el transporte de mercancías, que implica la determinación de la red de transporte más rentable y las características de los servicios correspondientes. Siendo éste la base teórica del presente Trabajo Terminal de Grado, se ha realizado una revisión de la literatura correspondiente al tema. El compendio de la literatura revisada se encuentra en la figura 5, organizada de forma ascendente a partir del año 2000 hasta los estudios del 2020 disponibles en línea.

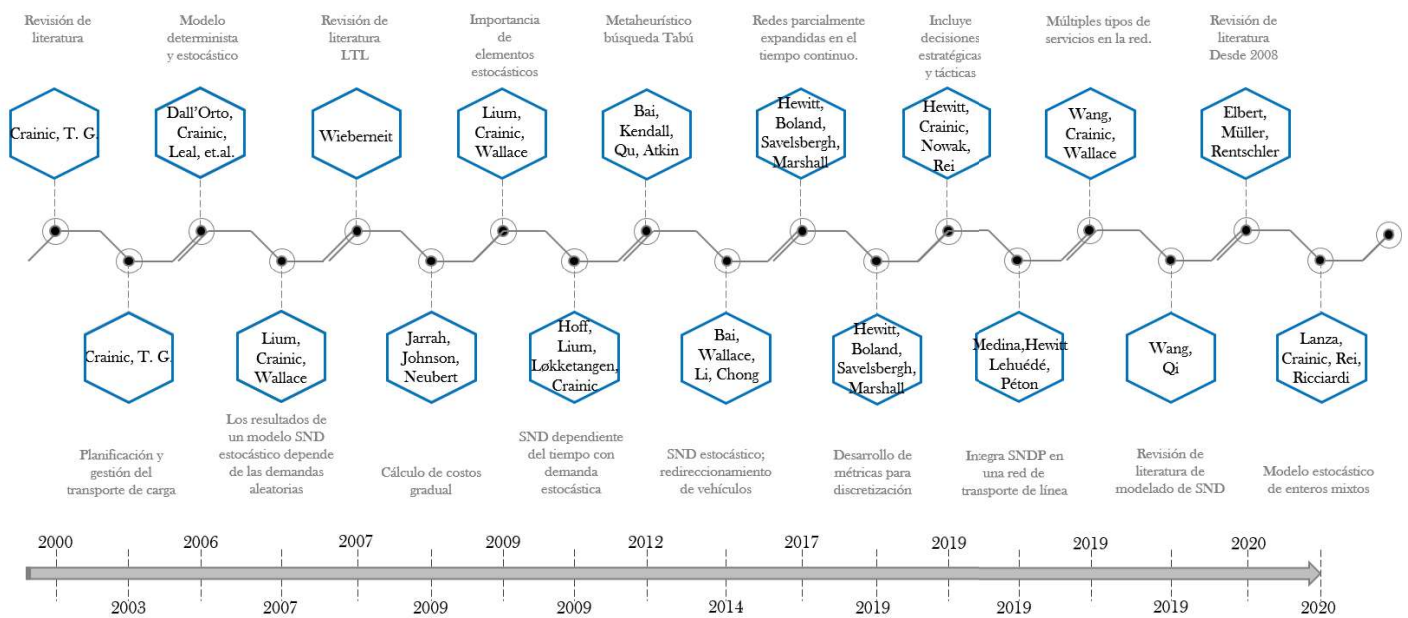


Figura 5 Revisión de literatura del problema de Diseño de Redes de Servicio (SND)

Fuente: Elaboración propia

La contribución inicial está dada por Crainic (2000) quien presenta una revisión del estado del arte de los esfuerzos de modelado del SND y desarrollos de programación matemática para este problema, exaltando la planificación táctica como parte fundamental de las operaciones de transportistas que sustentan sus operaciones en la consolidación de mercancías. A su vez, resalta el uso de SND para designar las principales cuestiones tácticas como son: selección y programación de servicios, especificación de las operaciones de la terminal y enrutamiento de la carga. Con un enfoque en el transporte de carga de larga distancia interurbano, Crainic (2003) muestra los principales problemas de planificación y gestión de este modo de transporte y realiza una revisión breve de la literatura, se describe de forma general los sistemas de transporte de carga y los problemas de planificación con perspectiva en el reposicionamiento de recursos vacíos.

La especialización en el SND, ahora dinámicas (SNDPD), las presentan Dall'Orto *et al.* (2006) quienes hacen una formulación con valores estocásticos que dependen del tiempo, tiene como objetivo optimizar el problema en un horizonte de planificación dado y propone un enfoque de solución basado en principios de programación dinámica a partir de una sola terminal que despacha servicios a varios clientes y otras terminales. Aunado a este modelo, proponen una formulación estática, de período único, del problema de un solo nodo que aparece como un subproblema al abordar la versión dependiente del tiempo y los casos de diseño de redes de servicios generales.

Lium *et al.* (2007) muestran cómo las correlaciones entre las demandas aleatorias en un problema de diseño de red de servicio afectan las rutas óptimas de los camiones, así como la flexibilidad en el envío de productos básicos, demuestran que un diseño puede tener fallas si se basa en correlaciones incorrectas. Se considera también para el planteamiento de este modelo la consolidación de mercancía que toma el papel de enviar pequeñas cargas juntas a largas distancias y a su vez la cobertura; cuando las demandas aleatorias viajan por los mismos caminos, particularmente si están correlacionadas negativamente, la consolidación implica cobertura. La solución se realiza por medio de un modelo de simulación que incluye la generación de escenarios indicando que, si un procedimiento de generación de escenarios produce correlaciones aleatorias o sesgadas, puede dar lugar a resultados engañosos del modelo estocástico.

Con aplicación en la red de transporte en Europa, Wieberneit (2007) revisa diferentes formulaciones de problemas publicados en la literatura. Analiza y compara la solución específica, mostrando que se han desarrollado buenos enfoques de solución para los SNDP. Generalmente, todos los problemas se enfocan en una parte específica de todo su problema de planificación táctica. Jarrah *et al.* (2009) presentan un modelo apegado a las necesidades del diseño de una red de servicio de una empresa, proporcionando una herramienta de planificación viable para usar semanalmente para volver a planificar el plan de carga de la siguiente semana. Esto permite a las empresas que ofrecen servicio LTL regenerar los planes de carga todas las semanas basándose en el pronóstico de carga más actualizado y preciso con las últimas tendencias de carga.

La incertidumbre en la demanda de los servicios o productos juega un papel importante en la construcción de horarios en el SND, las soluciones basadas en la demanda incierta cuentan con características que proporcionan valor en cuanto a flexibilidad operativa con horarios robustos. Prevalen diferencias estructurales que difieren de las soluciones deterministas. Dentro de las principales diferencias está en el número de rutas entre el origen y destinos así como el uso de los vehículos resultante de la consolidación de mercancías que representa el principal problema de correlación (la correlación entre mercancías). Es aquí en donde se retoma el trabajo realizado en 2007 y en 2009 por Lium *et al.* (2007; 2009) donde los autores realizan contribuciones al modelo primario.

Una vez que ya se han incluido elementos estocásticos en el SDN y la dependencia del tiempo, Hoff *et al.* (2009) hacen una contribución en la cual se representa por medio de escenarios la demanda fluctuante e integran un modelo que tiene balance de vehículos vacíos, costo de carga en terminales intermedias, costos asociados con el movimiento de carga utilizando los servicios seleccionados y los costos de penalización por no poder entregar la carga. Es decir, es un primer acercamiento a los problemas reales de SND, para los cuales se alcanza su solución a través de una meta-heurística, y tiene estrecha relación con el trabajo de Lium *et al.* (2007). Otra contribución donde se utiliza una meta-heurística fue introducida por Bai *et al.* (2012), quienes a través de un modelo híbrido de búsqueda Tabú lograron la disminución del tiempo en más de un tercio.

Bai *et al.* (2014) continúan esta línea de trabajo con una extensión del modelo de programación estocástica de Lium *et al.* (2009) y proponen un modelo de diseño de redes con redireccionamiento de vehículos, así como la subcontratación de servicios para manejar la incertidumbre de la demanda. Del mismo modo, se introduce explícitamente un conjunto de variables enteras para el desvío de vehículos en la segunda etapa del programa estocástico. Los resultados ofrecen diversas opciones de redireccionamiento y flexibilidad para manejar la incertidumbre, sin embargo, aunque el modelo parece adaptarse a un caso real, esta contribución está enfocada a evaluar numéricamente casos extraídos de la literatura.

Boland *et al.* (2017) desarrollaron un algoritmo para resolver problemas SND usando redes expandidas en el tiempo el cual evita tener que introducir aproximaciones del modelo, lo que mejora la calidad en la solución, para mantener el tamaño del tiempo expandido. Los resultados obtenidos a través de Solve-CTSNDP demuestran que esta aproximación es bastante efectiva. Sin embargo, hay mejoras que aumentarán su eficiencia, una de ellas es en las iteraciones iniciales, que sugieren resolver por medio de la relajación de la programación lineal o resolver el problema dentro de un porcentaje de la solución óptima. En Boland *et al.* (2019), los autores resaltan el impacto en la calidad de la solución al planteamiento del SND en donde las redes expandidas en el tiempo son comunes para modelar problemas de transporte, sin embargo, su uso requiere adoptar un esquema de discretización. Los resultados empíricos muestran que ésta es una elección importante, ya que la pérdida principal en la calidad de la solución se debe a la pérdida de rutas de bajo costo viables en el tiempo y la pérdida de consolidaciones potenciales. Las instancias con alta flexibilidad se ven menos afectadas por la magnitud de la discretización, pero pueden ser difíciles de resolver, con tasas de costos altas, ya que una alta flexibilidad permite mayores posibilidades de consolidación y una tasa de costos alta hace hincapié en las consolidaciones sobre rutas.

El aporte de estas contribuciones al trabajo de Hewitt *et al.* (2019) se conjugan para que ellos desarrollen un modelo para el problema SND programado que aborda decisiones estratégicas con respecto al tamaño y la asignación de la flota, incluida la adquisición y la subcontratación, así como decisiones tácticas referentes a un plan y horario de transporte repetible. Dadas las dificultades computacionales asociadas con la resolución exacta de

programas estocásticos, proponen dos formas basadas en la generación de columnas para abordar el modelo, un modelo heurístico que descompone el problema de optimización en múltiples dimensiones y evalúa una solución vecina en todos los escenarios, además aplican los conocimientos para un transportista LTL y en la red de un transportista postal europeo. Los resultados de la efectividad de los métodos heurísticos propuestos sugieren un estudio del impacto del entorno operativo en la toma de decisiones gerenciales, tanto en el nivel estratégico como en el táctico.

El problema de enrutamiento y SND que integra decisiones de planificación de transporte local y de larga distancia es importante para los transportistas de servicio consolidado que requieren brindar servicios eficientes que involucren la sincronización de sus movimientos. En este sentido, Medina *et al.* (2019) presentan dos formulaciones a este problema, la primera está basada en un conjunto de reglas para entregas locales el cual tiene mayor facilidad de modelado en comparación con el segundo enfoque en el que, el tiempo de resolución es más rápido, pero su modelado está limitado.

Wang y Qi (2019) proponen formulaciones de optimización robustas deterministas y de dos etapas emplean un conjunto de incertidumbres sin probabilidad para hacer frente a la incertidumbre de la demanda en el modelo robusto propuesto, en donde el método de descomposición de Bender se ve aminorado en contraste con enfoque de generación de columnas y restricciones empleado. También analizan el impacto de considerar múltiples tipos de servicios en el sistema de transporte confirmando que la diversificación de los tipos de servicios ayuda a reducir el costo total y el número total óptimo de vehículos utilizados en la red.

Posteriormente, se estudia la calidad de las soluciones deterministas en problemas SND estocásticos analizando las formulaciones dependientes del tiempo (servicios programados). Wang *et al.* (2019) proponen un esquema de medición para evaluar el nivel de propiedades estructurales potencialmente beneficiosas (uso de rutas múltiples y compartición de rutas) en diferentes soluciones. Los resultados muestran que las propiedades estructurales tienen alto impacto y están correlacionadas con el desempeño de una solución en el entorno estocástico.

Lanza *et al.* (2020) trabajan en el problema estocástico de diseño de red de servicio programado, pero ahora incluye la incertidumbre en los tiempos de viaje, así como la calidad de las entregas referida a la operación puntual. La solución de este planteamiento se genera a través de una metaheurística basada en la cobertura progresiva. Finalmente, Elbert *et al.* (2020) resumen el estado actual sobre los diferentes modos de transporte a partir del 2008 y categorizan en términos de características del problema, a las formulaciones de modelos y los enfoques de solución, basándose en la incertidumbre de la demanda, los tiempos de transporte, los costos y las capacidades.

2.2.1. Planificación del Diseño de Redes de Servicio (SND)

El problema de SND incluye la planificación del transporte de la mercancía desde su origen hasta su destino. Para realizar la planificación del sistema de transporte es preciso considerar los tres niveles de planificación de acuerdo a Crainic (2000) y Wieberneit (2007):

- I. Planificación estratégica o de largo plazo, el nivel más alto de gestión está involucrado y es responsable de tomar decisiones sobre la estructura física en cuanto a recursos, ubicaciones e infraestructura.

- II. Planificación táctica o de mediano plazo, es el diseño de la red de transporte. Su enfoque radica en la asignación eficiente de los recursos existentes para ejecutar las órdenes de transporte. Por tanto, todo el sistema de transporte se divide en distribución de larga distancia y tráfico regional. Las decisiones tácticas pueden incluir:
 - a. Selección de servicios
 - b. Distribución del tráfico. Decisión sobre qué rutas de servicio y terminales se debe transportar el pedido.
 - c. Equilibrio de vehículos vacíos. Estrategias generales de equilibrado de vacíos.
 - d. Planificación de vehículos y tripulaciones. En la planificación de vehículos y tripulaciones, los planificadores deben respetar los requisitos legales y sociales.

III. Planificación operativa o de corto plazo, está descentralizada en unidades operativas.

Los planificadores (gestión local, despachadores) se enfrentan a un entorno dinámico, en el que, los pedidos pueden realizarse con muy poca antelación o llegar dinámicamente. Además, las ventanas de tiempo para recoger y entregar mercancía varían de un cliente a otro.

Sin embargo, las formulaciones del problema SND se desarrollan típicamente para ayudar a la planificación táctica, aunque puede emplearse para la planificación a nivel estratégica-táctica o táctica-operativa de acuerdo con las necesidades del entorno de toma de decisiones (Hewitt *et al.*, 2019).

El objetivo de tales formulaciones es planificar servicios y operaciones para responder a la demanda y asegurar la rentabilidad de la empresa. Aborda simultáneamente varias operaciones realizadas en diferentes instalaciones el enrutamiento de la carga a través de la red. Debe planificarse para garantizar una entrega oportuna y confiable de acuerdo con las especificaciones del cliente y los propios objetivos del transportista, Crainic (2000). No obstante, en el diseño de una red de servicio no sólo se busca la reducción de costos, dependiendo el enfoque de la empresa, se busca también la maximización de los beneficios. En este sentido, el beneficio estará dado por la disposición que el cliente tenga por cubrir precios altos en los servicios ofertados aún si para la empresa no representa eficiencia en el servicio.

2.2.2. Tipos de servicios en el SND

De acuerdo a la descripción general del SND y los problemas de flujo de la red dada por Elbert *et al.* (2020) se destaca la introducción de variables de decisión en las redes de servicios que responden a servicios dinámicos o no dinámicos, ya sea con una estructura de red dada o una estructura de red variable. Los atributos de estas dimensiones son listadas a continuación:

I. Red de servicio dinámico con estructura de red variable

En este tipo de red, la capacidad de los servicios está dada por dos principios que refieren “a tiempo”. El primer principio se basa en el número de servicios dentro de un horario

determinado, mientras que el segundo, tiene como base el número de servicios en la red, pero en un periodo de planificación determinado.

II. Red de servicio dinámico con estructura de red dada

En esta red se proporcionan los horarios del transporte y se eligen los servicios de transporte dado un conjunto predefinido de órdenes de transporte

III. Red de servicio no dinámico con estructura de red variable

El caso de este tipo de red determina un subconjunto de arcos abiertos, sin considerar los horarios de transporte.

IV. Red de servicio no dinámico con estructura de red dada

Semejante a un problema de flujo de red.

El esquema de la clasificación realizada por Elbert *et al.* (2020) se ilustra en la figura 6.

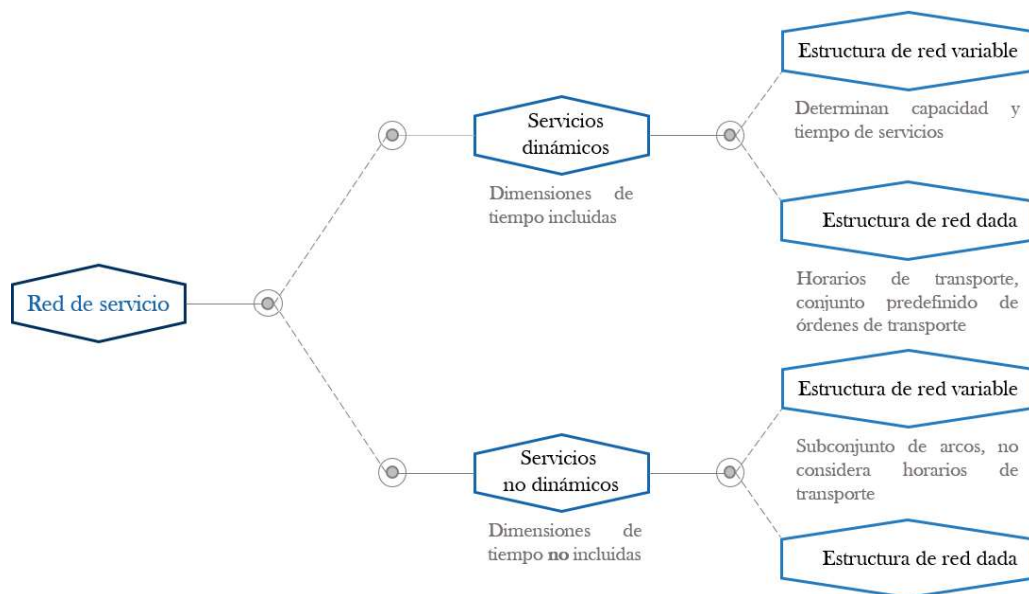


Figura 6 Clasificación de redes de servicio de acuerdo a los tipos de servicio

Fuente: Adaptación de Elbert *et al.* (2020)

2.3. Descripción del modelo

Para la solución del SND del presente objeto de estudio en cuestión, se propone el modelo desarrollado por Hewitt *et al.* (2019) que aborda simultáneamente las decisiones estratégicas con respecto al tamaño y la asignación de la flota, incluida la adquisición y la subcontratación, así como las decisiones tácticas con respecto a un plan y horario de transporte repetible que aborda explícitamente la incertidumbre en la demanda mediante el uso de escenarios. Este es el primer modelo que considera este conjunto completo de decisiones al tiempo que reconoce la incertidumbre en los volúmenes de carga.

El modelo propuesto se basa en el supuesto que cada envío de un cliente tiene un origen y un destino conocidos, pero existe cierto nivel de incertidumbre con relación a los volúmenes mensuales de envíos de los clientes. Esta incertidumbre se incorpora al proceso de toma de decisiones mediante el uso de un modelo basado en escenarios de dos etapas.

2.3.1. Decisiones tácticas

Las decisiones tácticas que refieren a los itinerarios de los recursos y la red de servicio asociada son decisiones de primera etapa, y sólo las rutas de envío y las decisiones de subcontratación se pueden tomar después de que se revelen los volúmenes de envío.

Sea:

A un conjunto de terminales, y

Σ un conjunto de servicios directos potenciales entre terminales en A

En donde, no se hacen distinciones sobre la infraestructura o carreteras sobre las que se realiza el transporte. En el nivel táctico de planificación, los servicios se seleccionan y programan según la duración del cronograma, la cual se divide en $T = \{1, 2, \dots, TMAX\}$ periodos de tiempo

Luego, el plan seleccionado se repetirá según la duración del programa. Sobre la base de estos períodos, se crea una red espacio-tiempo dada por $G = (N, A)$ donde

N es el conjunto de nodos que modela las operaciones de terminales en diferentes períodos. Por ejemplo: $N = \Lambda \times T = \{l_t \mid l \in \Lambda, t \in T\}$ donde l_t representa la terminal l en el período t .

A representa el conjunto de arcos con dos tipos de ellos. El primero es un *arco de servicio* (del conjunto S) y modela la operación de un servicio entre dos terminales en un punto en el tiempo. El segundo es un *arco de retención* y modela la oportunidad de que un recurso o envío esté inactivo en una terminal de un período al siguiente. Por lo tanto, $A = S \cup H$.

S corresponde a los arcos de servicio ($s \in S$), para cada servicio posible, donde $s = (l, m)$ entre las terminales $l, m \in \Lambda$ y el período de tiempo $t \in \{1, \dots, TMAX\}$.

Se agrega el arco $(l_t, m_{t'=(t+\pi_{lm}) \bmod TMAX})$ para s en donde se asume que el servicio de l a m requiere π_{lm} periodos del tiempo de viaje.

Debido a la presunción de que las demandas de flete siguen un patrón repetitivo, la red espacio-tiempo se construye para apoyar el diseño de horarios que se repetirán. Se modela un servicio de duración π_{lm} que sale de una terminal en el período t cuando llega al destino en el período $(t + \pi_{lm}) \bmod TMAX$.

u_s corresponde al límite de la demanda de envío que puede soportar el servicio $s = (l, m)$. Se establece la capacidad $u_{l_t, m_{t'}}$ de ese servicio en diferentes tiempos t de u_s .

H corresponde a los arcos de retención, los cuales no tienen capacidad de demanda ni de utilización de recursos. Se agregan a los arcos H de la forma $(l_t, l_{(t+1) \bmod TMAX})$ para cada terminal l en el período t .

Se modela un envío que está disponible en la terminal l en el período a y debe transportarse a la terminal m en el período b como una mercancía con índice k , nodo de origen $o(k) = l_a$ y nodo de destino $d(k) = m_b$. Definiendo así una combinación de terminal de origen (l) ,

tiempo disponible (a), terminal de destino (m) y tiempo de vencimiento (b). Además, cuando varios envíos comparten esta misma combinación, una mercancía puede representar una agregación de esos envíos individuales. En donde:

K representa el conjunto de mercancías $k \in K$.

Nota 1: Se asume que el conjunto de productos K y sus ciudades y horarios de origen y destino se conocen. Se modela la incertidumbre del volumen de la demanda en el conjunto de escenarios Ψ .

De este modo se define lo siguiente:

ψ como la probabilidad de ocurrencia de un escenario ($\psi \in \Psi$), y
 $q^{k\psi}$ representa el volumen de la mercancía $k \in K$ en el escenario $\psi \in \Psi$, con:
 $q_i^{k\psi} = q^{k\psi}$ cuando $i = o(k)$
 $q_i^{k\psi} = -q^{k\psi}$ cuando $i = d(k)$
 $q_i^{k\psi} = 0$ en otro caso

Con respecto al enrutamiento de un envío, se hacen las siguientes consideraciones para mercancías:

P_k^ψ como el conjunto de caminos para la mercancía $k \in K$ en el escenario $\psi \in \Psi$, cada uno de los cuales constituye una secuencia de servicios programados (del conjunto S) desde el origen de ese producto, $o(k)$, hasta su destino, $d(k)$.

Hacer empleo de cada una de las rutas, conduce a incurrir en:

c_p costo variable total pagado por los servicios, una vez integrada la mercancía $k \in K$ en este costo se convierte en:
 $c_p^k = \sum_{(l_t, m_{t'}) \in A \cap p} c_{l_t m_{t'}}^k$ donde $c_{l_t m_{t'}}^k$ es el costo de la mercancía $k \in K$ a través de servicio $(l_t, m_{t'})$.

Nota 2: Para un arco de servicio, este parámetro de costo puede modelar los costos de manejo asociados con la carga del envío en un vehículo en la terminal de origen y la descarga en la terminal de destino. Este parámetro también puede modelar el impacto que puede tener el peso de un envío en el costo de ejecutar un servicio.

Para un arco de retención, este parámetro puede modelar otras actividades de manejo, o la asignación del costo del espacio físico a los envíos en función de la cantidad de espacio en la terminal que requieren. La decisión de cómo enrutar un envío se toma después de que se observan las demandas.

$x_p^{k\psi}$ representa la fracción de la demanda de la mercancía $k \in K$ que viaja a través de la ruta $p \in P$ en el escenario $\psi \in \Psi$.

Nota 3: Cada conjunto de caminos p contiene una ruta que corresponde a la entrega directa de ese envío desde su origen hasta su destino por un transportista externo.

$y_{l_t m_{t'}}$ es una variable binaria encargada de activar si la mercancía viaja o no en el arco de servicio $(l_t, m_{t'}) \in S \subset A$.

f_{lm} representan el costo fijo por la ejecución de un servicio.

Nota 4: Este parámetro se puede utilizar para modelar los costos generales, como el mantenimiento de las instalaciones y la mano de obra, así como el costo de transporte real de un recurso que viaja desde la terminal l a la terminal m . Este parámetro también se puede indexar por el período de tiempo t para entornos en los que los costos de transporte dependen del tiempo, como en áreas donde se utilizan tarifas de tráfico basadas en la congestión.

$y_{l_t m_{t'}}^e$ es una variable binaria que modela la opción de ejecutar ese mismo servicio, aunque con el uso de un recurso propiedad de terceros. Esta variable representa la decisión de usar o no la tercerización para envío de mercancías, pero bajo un contrato fijo, estos gastos "ya están incluidos" en los costos generales.

f_{lm}^e representa el costo fijo de usar tercerización por medio de contratos.

$y_{l_t m_t}^{\sigma\psi}$ es una variable binaria que se emplea en el caso de uso de servicios "spot". En este caso no existe contrato con los terciarios y los servicios no son requeridos en forma recurrente.

f_{lm}^{σ} es el parámetro de costo fijo de usar tercerización en el caso de uso de servicios "spot".

Si se modela que la ejecución de un servicio requiere el uso de un recurso que debe regresar periódicamente a su terminal de origen asignado, se deben considerar los ciclos de retorno, en donde:

τ corresponde al ciclo representado como la secuencia de posibles movimientos durante la duración de la programación para un recurso asignado a la terminal h en el grafo G que inicia y termina en el nodo $h_t \in N$ en algún tiempo $t \in T$.

θ_{h_t} representa el conjunto de ciclos, sea $\theta_h = \cup_{t=1}^{TMAX} \theta_{h_t}$ conjunto de todos los ciclos que requieren un recurso asignado a la terminal h y que parten de allí en algún período de tiempo durante la duración del programa.

Las reglas que rigen los movimientos que puede realizar un recurso durante la duración del programa están codificadas en la definición del conjunto θ_{h_t} . Es necesario resaltar que esto permite modelar reglas que varían, tanto por la terminal h a la que está asignado el recurso, como por el período t durante el cual comienza el itinerario.

Nota 5: Para los presentes experimentos, sólo se impone la regla de que el itinerario de un recurso debe comenzar y terminar en la terminal asignada al recurso.

Por tanto, un ciclo válido es aquel que comienza partiendo de h en el período t y termina llegando a l más tardío. Se tiene en cuenta que un ciclo que comienza en h_t puede volver a h varias veces, y si la última vez que vuelve a h en el período $t' < t + TMAX$, los arcos de retención adjuntos permiten alcanzar h_{t+TMAX} .

$z_h^{\tau} \in \{0,1\}$ representa si un recurso con terminal de casa $h \in A$ ejecuta el ciclo $\tau \in \theta_h$.

O_h^{τ} es el costo asociado al elegir esta ruta.

Como τ modela la ruta usada para el envío de la mercancía O_h^τ , incluye también costos de transportación. En donde

$r_{l_t m_{t'}}^\tau$ es una variable binaria con respecto a la combinación de servicios con itinerarios de recursos. Denota si un arco $l_t m_{t'} \in A$ es contenido en un ciclo τ .

2.3.2. Decisiones estratégicas

En la primera etapa de este modelo también se incluyen decisiones estratégicas sobre la cantidad de recursos adquiridos, la asignación de nuevos recursos y la reasignación de los existentes. Con respecto a ello, se utiliza una capa de "fuente" conceptual en la red espacio-tiempo para modelar las decisiones de adquisición y de asignación de recursos. Hay dos tipos de nodos en esta capa.

El primero es un *nodo de adquisición*, denotado por \bar{A} , que representa la adquisición de un nuevo recurso. Este nodo se conecta a cada una de las terminales l al comienzo del horizonte de planificación táctica con un arco que representa la asignación de un recurso recién adquirido a esa terminal.

El segundo tipo, es un *nodo de reasignación* de recursos existentes. Como tal, se agrega un nodo para cada terminal $l' \in A$ a esta capa y luego arcos que conectan ese nodo a cada terminal $l \in A$ al comienzo del horizonte de planificación táctica. Estos arcos representan la reasignación de un recurso actualmente asignado de la terminal l a la terminal l' . Para simplificar el desarrollo del modelo matemático, se incluyen arcos en los que $l = l'$ en cuyo caso el recurso no se reposiciona.

A^+ denota el conjunto de terminales A junto con el nodo de adquisición

La unión entre el nodo A de la capa fuente y el nodo T3 en el periodo 1 del horizonte de planificación modela la adquisición de un nuevo recurso que se asigna a T3 en la figura 7. De

igual forma, la unión de T1 de la capa fuente y T2 en el tiempo 1 (b), modela la reasignación de un recurso actualmente asignado de T1 a T2. Por último, el arco *c* entre T1 en la capa fuente y en el período de tiempo 1 modela un recurso que permanece en T1.

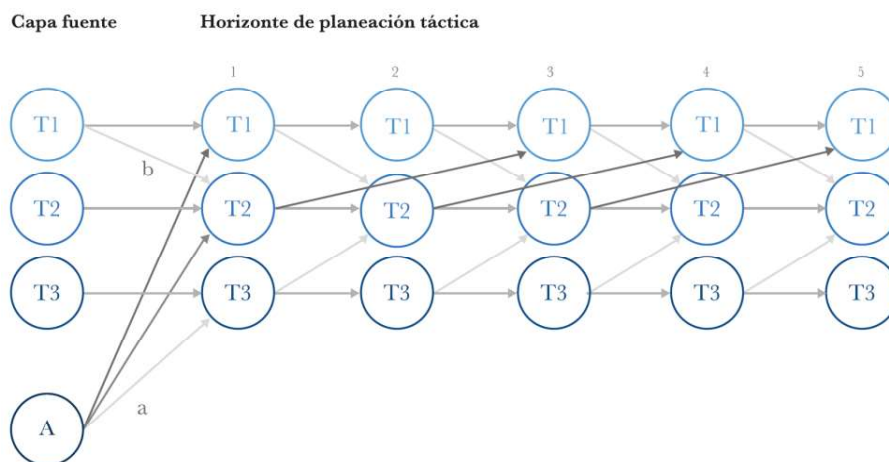


Figura 7 Representación de asignación de recursos a partir del nodo fuente
Fuente: Hewitt *et al.* (2019)

$a_{wh}, w \in \Lambda^+, h \in \Lambda$ es una variable entera que representa el número de recursos adquiridos de la fuente w (ya sea mediante adquisición o reposicionamiento) y asignados a la terminal h , que conlleva un costo F_{wh} que representa el costo de asignar un recurso a la terminal h desde la fuente w . Cuando w corresponde al nodo de adquisición, la variable representa la compra de un nuevo recurso y su posterior asignación a la terminal h . Si el recurso que se modela es un equipo, F_{wh} podría incluir el costo de adquisición, sólo amortizado. Sin embargo, si el recurso es un individuo, este parámetro podría incluir salarios y alguna amortización de un bono por firmar pagado al individuo.

Cuando w representa una terminal existente, la variable a_{wh} corresponde a la asignación de un recurso que está asignado actualmente de la terminal w a la terminal h . En este caso, F_{wh} incluye cualquier costo asociado con tal acción, como el transporte. Cuando $w = h$, esta variable representa dejar recursos en su terminal asignada actualmente.

l_w el número de recursos existentes asignados a la terminal w .

Una vez establecidos los elementos que intervienen en el modelo de optimización se plantea la función objetivo la cual corresponde a:

$$\min \sum_{w \in \Lambda^+} \sum_{h \in \Lambda} F_{wh} a_{wh} + \sum_{h \in \Lambda} \sum_{\tau \in \theta_h} O_h^\tau z_h^\tau + \sum_{(l_t, m_{t'}) \in S} f_{lm} y_{l_t m_{t'}} + \sum_{(l_t, m_{t'}) \in S} f_{lm}^e y_{l_t m_{t'}}^e \quad (1)$$

$$+ \sum_{\psi \in \Psi} \varphi_\psi * \left(\sum_{k \in K} \sum_{p \in P_k^\psi} c_p^k q^{k\psi} x_p^{k\psi} + \sum_{(l_t, m_{t'}) \in S} f_{lm}^\sigma y_{l_t m_{t'}}^{\sigma\psi} \right) \quad (2)$$

Sujeto a:

$$\sum_{p \in P_k^\psi} x_p^{k\psi} = 1 \quad \forall k \in K, \psi \in \Psi \quad (3)$$

$$\sum_{k \in K} \sum_{p \in P_k^\psi: (l_t, m_{t'}) \in p} q^{k\psi} x_p^{k\psi} \leq u_{l_t, m_{t'}} (y_{l_t, m_{t'}} + y_{l_t, m_{t'}}^e + y_{l_t, m_{t'}}^{\sigma\psi}) \quad \forall (l_t, m_{t'}) \in S, \psi \in \Psi \quad (4)$$

$$\sum_{h \in \Lambda} a_{wh} = l_w \quad \forall w \in \Lambda \quad (5)$$

$$\sum_{\tau \in \theta_h} z_h^\tau = \sum_{w \in \Lambda^+} a_{wh} \quad \forall h \in \Lambda \quad (6)$$

$$y_{l_t, m_{t'}} + y_{l_t, m_{t'}}^e + y_{l_t, m_{t'}}^{\sigma\psi} \leq 1 \quad \forall (l_t, m_{t'}) \in S, \psi \in \Psi \quad (7)$$

$$y_{l_t, m_{t'}} \leq \sum_{h \in \Lambda} \sum_{\tau \in \theta_h} r_{l_t, m_{t'}}^\tau z_h^\tau \quad \forall (l_t, m_{t'}) \in S \quad (8)$$

$$a_{wh} \in Z \quad \forall w \in \Lambda^+, h \in \Lambda \quad (9)$$

$$z_h^\tau \in \{0,1\} \quad \forall h \in \Lambda, \tau \in \theta_h \quad (10)$$

$$y_{l_t, m_{t'}} \in \{0,1\} \quad \forall (l_t, m_{t'}) \in S \quad (11)$$

$$y_{l_t, m_{t'}}^e \in \{0,1\} \quad \forall (l_t, m_{t'}) \in S \quad (12)$$

$$y_{l_t, m_{t'}}^{\sigma\psi} \in \{0,1\} \quad \forall (l_t, m_{t'}) \in S, \psi \in \Psi \quad (13)$$

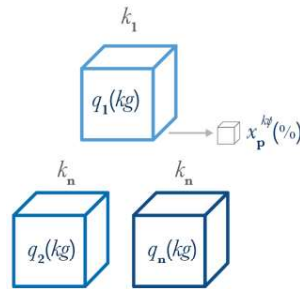
$$x_p^{k\psi} \geq 0 \quad \forall p \in P_k^\psi, \forall k \in K, \psi \in \Psi \quad (14)$$

La función objetivo está integrada por dos componentes que al ser sumados deberán dar como resultado la minimización de los costos. La ecuación (1) está integrada por la sumatoria del producto del componente F_{wh} que representa el costo fijo por adquirir un recurso (compra de un vehículo amortizado y/o salarios por firma de un contrato de un trabajador) por la cantidad de recursos adquiridos o asignados a una terminal h desde la fuente w (a_{wh}). La sumatoria del producto $O_h^\tau z_h^\tau$ es el costo asociado con la ruta que puede incluir el mantenimiento de un recurso con terminal origen h (ciclo operativo); este valor se activa de acuerdo al valor de la variable binaria z_h^τ que representa si un recurso con terminal origen h ejecuta el ciclo τ .

La tercer sumatoria de la función objetivo corresponde al costo fijo del transporte (f_{lm}), es decir, los costos generales como el mantenimiento de las instalaciones y mano de obra, es el costo de ejecución del servicio de (l, m) valiendo de recursos propios, cuyo valor se activa respecto al valor de la variable binaria $y_{l_t m_{t'}}$. Con referencia a la sumatoria del costo por emplear el servicio de un terciario logístico por medio de contratos (f_{lm}^e) será activado siempre y cuando la variable binaria $y_{l_t m_{t'}}^e$ sea 1. En términos generales, la ecuación (1) representa los costos en los que se incurre antes de que se realice la demanda, es decir, son costos fijos.

La ecuación (2) está integrada por la sumatoria de la probabilidad de ocurrencia del escenario ψ (φ_ψ) que multiplica a la sumatoria de los gastos de transporte ($c_p^k q^{k\psi} x_p^{k\psi}$), en caso de ser un arco de servicio c_p^k es el costo de la mercancía k viajando en el arco $(l_t, m_{t'})$ en la ruta $p \in P$. Éste es el costo de manejo asociado con la carga del envío de origen y descarga en el destino. Sin embargo, si el arco es de retención, el costo representa las actividades de manipulación de la mercancía y/o costo por el espacio que ocupará la mercancía en las instalaciones de la empresa. El valor de $q^{k\psi}$ que multiplica a $x_p^{k\psi}$ corresponde a la cantidad de la mercancía $k \in K$ que es enviada a través de la ruta $p \in P$ en el escenario $\psi \in \Psi$. A este costo de transporte variable se suma el costo por emplear el servicio de un *outsourcing* mediante servicios “spot” (f_{lm}^σ) y se activa si el valor de $y_{l_t m_{t'}}^{\sigma\psi}$ es 1; por lo tanto, el objetivo de la ecuación (2) está encaminado a los recursos esperados para cada escenario.

A partir de la ecuación (3) se empiezan a listar las restricciones a las cuales está sujeta la función objetivo. Previamente a describir las restricciones, se parte de la figura 8 que ilustra las variables y los parámetros incluidos en las restricciones. El índice $k \in K$ representa la mercancía que será enviada a través de un nodo de servicio y se pueden tener n cantidad de mercancías, mientras que $q^{k\psi}$ corresponde a la cantidad de la mercancía. En el caso del índice $k \in K$ en cada escenario $\psi \in \Psi$, sus unidades de medida se expresan en unidades de masa (o volumen, según sea el caso). Por otra parte, $x_p^{k\psi}$ indica una fracción del total de la mercancía $k \in K$ que viajará en la ruta $p \in P$ del escenario $\psi \in \Psi$. Por lo tanto, la restricción (3) indica que la suma de todas las fracciones de la mercancía $k \in K$ que viajen en las distintas rutas debe ser igual a 1, lo que garantiza que el total de la mercancía $k \in K$ sea entregada.



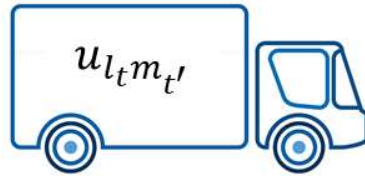
Donde:

- $k \in K$ Conjunto de mercancías
- $q^{k\psi}$ Volumen (total) de la mercancía $k \in K$ en el escenario $\psi \in \Psi$
- $x_p^{k\psi}$ Fracción del volumen de la mercancía $k \in K$ que viaja a través de la ruta $p \in P$ en el escenario $\psi \in \Psi$

Figura 8 Ilustración de algunos variables y parámetros del modelo

Fuente: Elaboración propia

La restricción (4) es la restricción de capacidad de los arcos de servicio que estará limitada por la capacidad de carga de los vehículos. La variable $q^{k\psi}$ se multiplica por el valor porcentual de $x_p^{k\psi}$ y el producto debe ser menor o igual al valor de la capacidad de los arcos de servicio $u_{l_t m_t'}$ de cualquiera de los tres tipos de recursos (propios, por contrato, servicio “spot”). La figura 9 ejemplifica esta restricción para la capacidad de los recursos propios.



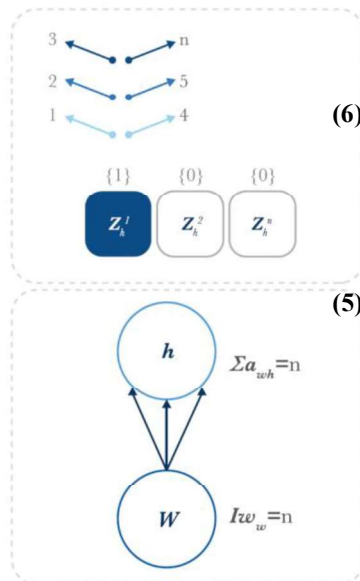
Donde:

$u_{l_t m_{t'}}$ Capacidad del servicio

Figura 9 Capacidad de los recursos propios

Fuente: Elaboración propia

En la figura 10 se ejemplifican las restricciones (5) y (6). La restricción (5) se enfoca en la sumatoria de la cantidad de recursos que se asignan a la terminal h desde la fuente w , (a_{wh}), la cual debe ser igual a la cantidad de recursos inicialmente asignados a la terminal w , (I_w). Es decir, que de manera independiente, al momento en que sean asignados estos recursos, si el número inicial de ellos es n , esa misma cantidad es la que deberá llegar a la terminal h .



Donde:

$z_h^\tau \in \{0,1\}$ Representa si un recurso con terminal de casa $h \in A$ ejecuta el ciclo $\tau \in \theta_h$
 h Terminales
 W Nodo fuente
 a_{wh} Corresponde a la asignación de un recurso que está asignado actualmente de w a la terminal h
 I_w Número de recursos existentes asignados a la terminal w

Figura 10 Parámetros de las restricciones (5) y (6)

Fuente: Elaboración propia

En la restricción (6) se tiene el valor binario de z que indica si un ciclo τ es ejecutado por un recurso con origen en la terminal h y es igual al número de los recursos asignados a la terminal h desde la fuente w . La figura 10 muestra en ejemplo de tres ciclos τ en donde se selecciona el primero y sólo de este ciclo pueden salir la cantidad de recursos n que fueron asignados, lo que limita a que se empleen solamente los recursos asignados en ese ciclo y sea eficaz la operación.

La restricción (7) limita al uso exclusivo de un tipo de recurso, lo cual está ligado a la ecuación (4). La ecuación (8) garantiza que los servicios que se ejecutan y requieren un recurso propio estén cubiertos. Finalmente, las restricciones (9), (10), (11), (12), (13) y (14) definen la naturaleza de las variables de decisión del modelo y sus dominios.

En este capítulo se expone el contexto actual del objeto de estudio con respecto al proceso de servicios consolidados ofertados a ciudades localizadas en el Bajío de México. Se presenta un panorama general de la empresa para dar paso a la descripción del proceso de selección de servicio consolidado, y a su vez se dan a conocer las características de los recursos empleados y la adaptación del modelo propuesto en el capítulo anterior.

3.1. Generalidades la empresa

Como se presentó en el Capítulo 1, el objeto de estudio es una empresa de transporte de carga en México que oferta servicios en camiones completos, consolidados. De acuerdo al objetivo general planteado se analiza la posibilidad de realizar servicios de forma consolidada con la reducción del costo total de envíos.

3.2. Servicio consolidado de la empresa

El servicio LTL proporcionado por la empresa en cuestión, se subdivide en seis tipos de servicio, los cuales se enumeran a continuación:

- i. Paquetería con entrega a domicilio: Se refiere a entregar la mercancía al destinatario en la dirección del destino señalada por el cliente.
- ii. Paquetería con servicio ocurre: La mercancía se entrega en alguna de las terminales de la empresa objeto de estudio y el destinatario la recoge en la terminal señalada por el cliente.
- iii. Paquetería con recolección a domicilio: Se recolecta la mercancía en el domicilio señalado por el cliente.

- iv. Paquetería con entregas por cita: Por medio de un acuerdo con el cliente, se realizan entregas de mercancía en ventanas de tiempo establecidas.
- v. Paquetería con almacenaje: La mercancía es custodiada por la empresa hasta tener una disposición dada por el cliente.
- vi. Paquetería con almacenaje por contrato: La mercancía es custodiada por la empresa hasta tener una disposición dada por el cliente, con control de inventarios por contrato mensual.

Para la disposición de un servicio consolidado se puede seleccionar uno de los seis servicios o de la conjunción de ellos. La regla de operación no se limita a la solicitud de un solo servicio para la entrega de mercancía, sino que se da prioridad a los requerimientos del cliente. El proceso de envío comienza con la solicitud del servicio desde una de las terminales de la empresa o bien, desde el CEDIS. Cada receptor del servicio es el responsable de verificar el cumplimiento de las entregas, aunque exista consolidación de la mercancía en el CEDIS. De igual manera, en el origen del servicio se establecen los costos de envío conforme a las características de la mercancía. La figura 11 muestra el flujo del proceso de selección de tipo de servicio ya sea esté completo o consolidado.

Como es posible observar en la figura 11, la selección del tipo de servicio se establece por dos criterios: peso de mercancía y tiempo de entrega (ventana horaria). Una vez que se activa un servicio, el primer paso es dimensionar la mercancía ya sea por peso físico (kg) o peso volumétrico (m^3) según el que resulte mayor de entre los dos. Para efectos de este caso de estudio, por las características particulares del tipo de carga, se considera el peso físico de la mercancía. Si el peso de la mercancía es menor a 15,000 kg se especifica según lo dictado por el cliente si la mercancía deberá ser entregada con cita (fecha y hora), si la especificación es afirmativa, se calcula el tiempo de traslado para asegurar cumplir con la entrega en los estándares estipulados. Si la mercancía no lleva cita, de igual forma se hace una estimación del tiempo de traslado para conocimiento del cliente y de acuerdo a los tiempos de traslado se considera si la mercancía se puede consolidar en una ruta para su entrega.

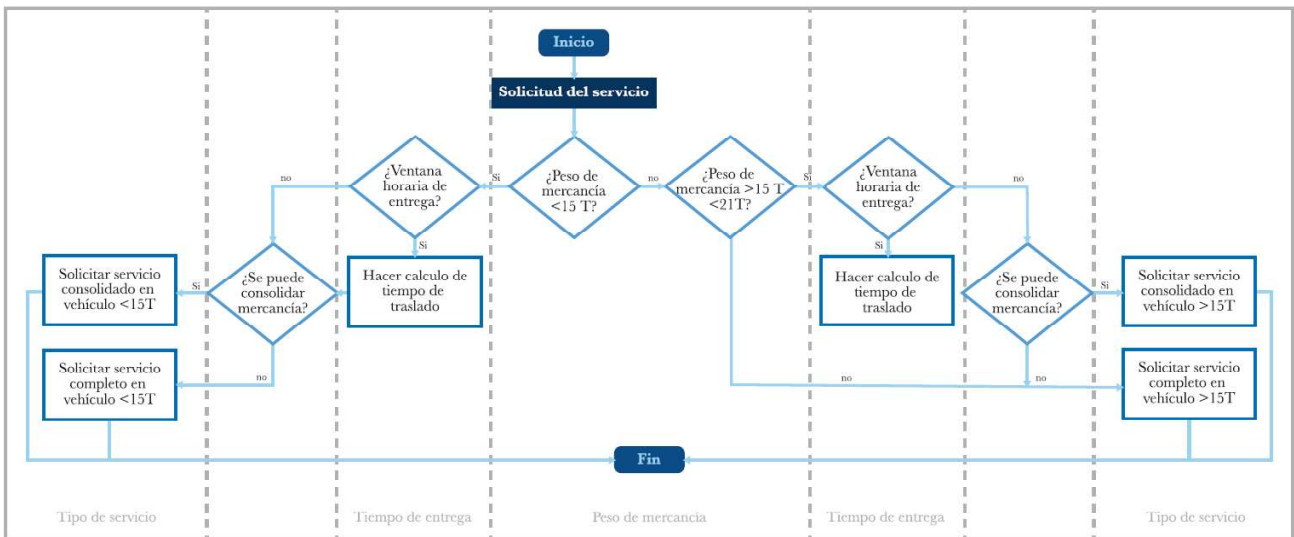


Figura 11 Proceso de selección de tipo de servicio

Fuente: Elaboración propia

Al ser mercancía con peso menor a 15,000 kg, si se opta por consolidar el envío se realiza en un vehículo con capacidad máxima de 17,000 kg; pero si no se consolida, se sugiere al cliente que el envío sea por medio de un servicio *completo* (un solo vehículo transporta una sola orden de envío) en vehículo con capacidad máxima de 17,000 kg.

El segundo caso que depende del peso de la mercancía se da cuando la mercancía es mayor a 17,000 kg, pero menor a 21,000 kg. Al igual que el caso anterior se consideran los tiempos de entrega y la factibilidad a ser entregada por medio de un servicio consolidado. La diferencia radica en el tipo de vehículo a emplear, que en este caso sería de una capacidad máxima de 25,000 kg.

Cuando el cliente está de acuerdo con el tipo de servicio y sus costos, la empresa debe considerar la rentabilidad del efectuar un servicio consolidado, pues la regla principal de la empresa es: *“La suma del costo todos los envíos, deberán cumplir, por lo menos, con una rentabilidad del 50% del costo total del flete”*. Si esta rentabilidad es inferior a este límite y considerando el formato de rentabilidad de la empresa que agrupa ciertos factores (como número de repartos, km de recorrido, rendimiento del combustible del vehículo) se debe solicitar la autorización ya sea del gerente de ventas o del gerente de operaciones. Para los servicios consolidados se parte de un costo base para que se autorice el servicio. En vehículos de 17,000 kg la suma de los servicios individuales consolidados debe ser por lo menos de \$16,000. En caso de no cubrir el monto mínimo se debe notificar al cliente que no se ejecutará el servicio en el tiempo pactado; si es posible realizar cambiar el día de entrega se hace, de otro modo, se plantea el caso al gerente de ventas y/o al gerente de operaciones para la autorización del servicio.

3.2.1. Rutas y cobertura del servicio consolidado

El servicio consolidado se puede activar en cualquiera de las siete terminales. Se ofrece continuidad con la consolidación de mercancía en el CEDIS, y es ahí en donde la mercancía toma la ruta de acuerdo al destino de entrega. La empresa tiene tres rutas base: ruta Bajío, ruta Pacífico y ruta Sureste. De acuerdo al objetivo de este trabajo, el estudio se focaliza en la ruta Bajío que a su vez cuenta con 120 rutas las cuales están integradas por la combinación de dos

o más de las 27 ciudades en la ruta Bajío, estas ciudades se ilustran en la figura 12, la misma figura, también contiene el área limítrofe que considera la empresa para los servicios del Bajío, dentro de ella se encuentran varias ciudades, sin embargo, existen otras que están fuera del área y también se incluyen en este estudio debido a que la integración de las rutas más importantes al Bajío contiene entregas en destinos aledaños a Jalisco.

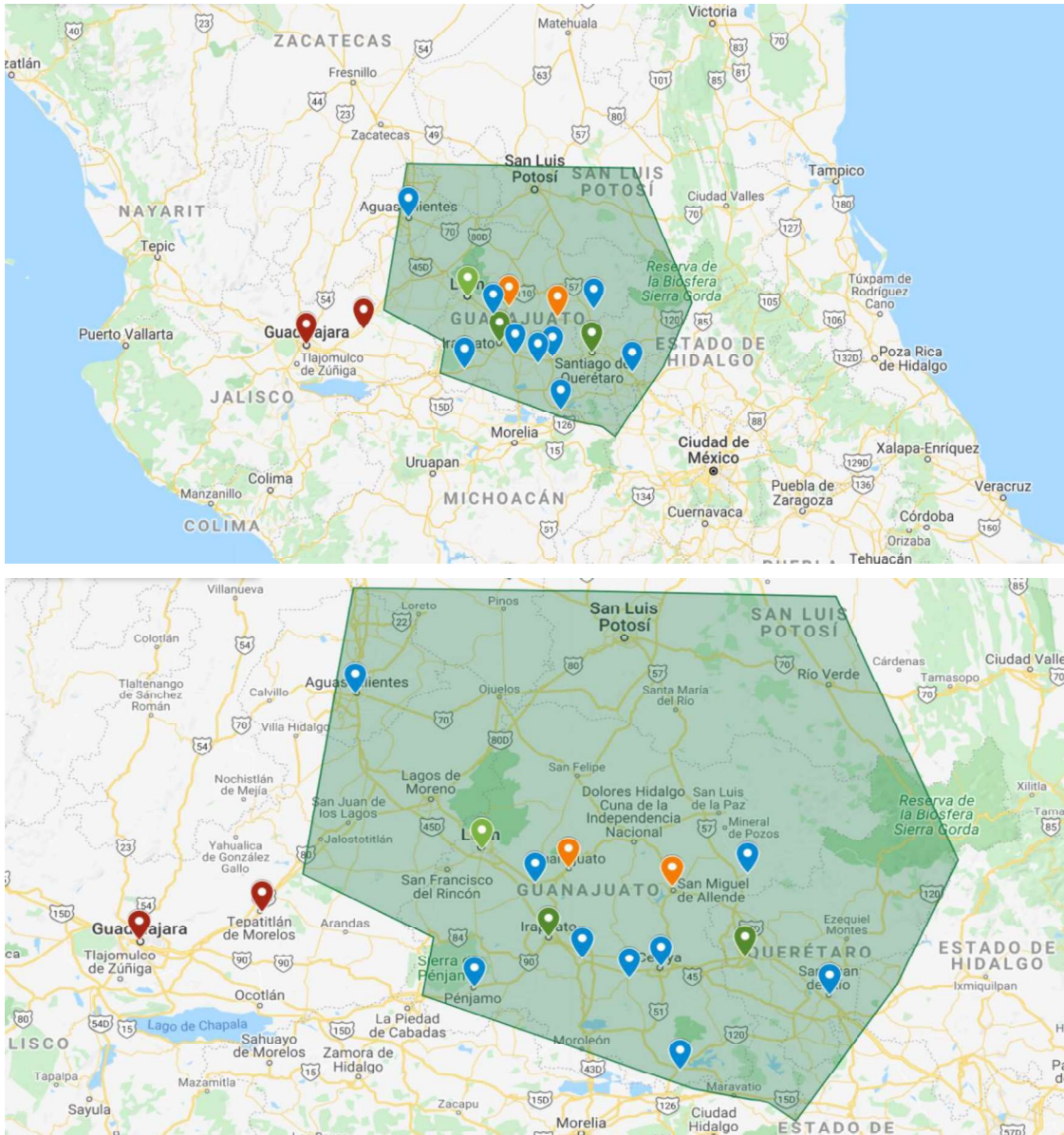


Figura 12 Ciudades destino en la ruta Bajío
Fuente: Elaboración propia con Google Earth (2021)

3.2.2. Clientes ruta Bajío

El servicio consolidado de la empresa cuenta con 27 ciudades destino dentro de la zona Bajío, sin embargo, la cantidad de remitentes oscila entre los 110 y 120. Para propósito de este estudio se realizó un análisis 80-20 de los clientes que anualmente representan la mayor cantidad de solicitudes de servicios; los clientes se les identificó con la letra k y un número consecutivo, estos clientes se muestran en la tabla 9. Como se observa, sólo 22 clientes representan el 80% de las solicitudes de servicio. Es preciso mencionar que también se identificó que cada cliente sólo envía un tipo de mercancía y por lo tanto no difiere la cantidad de clientes y mercancías. Dada esta condición, estos 22 clientes han sido seleccionados para ser parte del caso de estudio. En el análisis de clientes se incluyen a quienes se identificaron con 12 servicios anuales, dado que representa de manera teórica que por lo menos una vez al mes realizan un envío y mantienen constancia en las solicitudes a través del año, tal es el caso del cliente-mercancía $k22$.

3.3. Planteamiento del modelo

Se propone un modelo inspirado en la formulación del SND propuesta por Hewitt *et al.* (2019) que aborda decisiones estratégicas con respecto al tamaño y asignación de flota, al mismo tiempo, incluyen decisiones tácticas con respecto a un plan y cronograma de transporte repetible, la solución de este modelo está orientada en la imitación de las operaciones de un transportista de carga LTL y también en la red de un transportista postal aéreo.

El modelo propuesto, tiene el objetivo de minimizar los costos variables derivados de la combinación de rutas y frecuencia de envíos por medio del uso del SND a través de la selección y programación de los servicios; el costo total del sistema está integrado por cuatro componentes:

- i) costo de envío desde las terminales hacia el nodo de consolidación,
- ii) probabilidad de ocurrencia de cada escenario,
- iii) costo por enviar la mercancía $k \in K$ en la ruta $p \in P$ en el escenario $\psi \in \Psi$, y
- iv) costo fijo por usar la ruta $p \in P$ en el envío de la mercancía $k \in K$ en el escenario $\psi \in \Psi$.

Tabla 9 Análisis 80-20 mercancía con destino al Bajío

| Cliente | Solicitudes de servicio | % |
|----------------|--------------------------------|---------------|
| k1 | 243 | 16.30% |
| k2 | 205 | 13.80% |
| k3 | 186 | 12.50% |
| k4 | 112 | 7.50% |
| k5 | 78 | 5.20% |
| k6 | 45 | 3.00% |
| k7 | 43 | 2.90% |
| k8 | 43 | 2.90% |
| k9 | 27 | 1.80% |
| k10 | 27 | 1.80% |
| k11 | 25 | 1.70% |
| k12 | 24 | 1.60% |
| k13 | 22 | 1.50% |
| k14 | 22 | 1.50% |
| k15 | 21 | 1.40% |
| k16 | 21 | 1.40% |
| k17 | 20 | 1.30% |
| k18 | 19 | 1.30% |
| k19 | 18 | 1.20% |
| k20 | 17 | 1.10% |
| k21 | 15 | 1.00% |
| k22 | 12 | 0.80% |
| Total | | 83.50% |

Fuente: Elaboración propia

3.3.1. Costo de envío desde las terminales hacia el nodo de consolidación

Las mercancías se trasladan desde su origen que puede ser cualquiera de las 7 terminales de la empresa, ya sea en el periodo en que están disponibles o en periodos posteriores y se trasladan a sus destinos dentro de los plazos de entrega a través de una terminal intermediaria (CEDIS). Esta formulación asume una holgura constante para el manejo de cargas de transbordo. La capacidad de envío de las terminales origen está determinada por la cantidad de recursos asignados a cada una.

Se creó una red espacio-tiempo que incluye el conjunto de sucursales de origen $h \in H$ donde $h=1, 2, \dots, 7$, en cada uno de los periodos $t=0, \dots, T-1$. El periodo de planificación es

de un mes, esta decisión se toma con base en los ciclos de solicitud de servicios de cada cliente, a partir de una observación de tres meses se pudo observar que en las dos primeras semanas de un mes la cantidad de servicios va en aumento, cuando llega la tercera semana se encuentra en la cresta de pedidos y en la última semana disminuyen las solicitudes de servicios, este comportamiento se observa en los tres meses de observación. Esta red incluye el costo de envío O_h^t , desde las sucursales origen hacia el centro de consolidación. Como es posible observar en la tabla 10, el costo varía de acuerdo al día de envío de la mercancía. Se observa que existe una tarifa de descuento conforme al día de envío, en donde los costos más bajos corresponden a días en donde ya existen servicios programados de envíos, mientras que los costos altos corresponden a días en donde se podría considerar como servicio extemporáneo, dado que no existe programación de salida de vehículos o se tienen otras restricciones como son de horarios de tránsito. Sólo se incluyen los costos de 5 sucursales, dado que, para el caso del CEDIS, la mercancía llega allí por recursos del cliente y la sucursal de Sinaloa no hace uso del servicio consolidado para el Bajío de México.

Tabla 10 Costos de envío O_h^t (\$)

| Sucursal | Sábado | Domingo | Lunes | Martes | Miércoles | Jueves | Viernes |
|----------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|------------|
| h1 | \$1,160.00 | \$1,160.00 | \$1,000.00 | \$1,000.00 | \$1,000.00 | \$1,000.00 | \$1,000.00 |
| h2 | \$580.00 | \$580.00 | \$500.00 | \$500.00 | \$500.00 | \$500.00 | \$500.00 |
| h3 | \$5,040.00 | \$5,040.00 | \$6,000.00 | \$6,000.00 | \$6,000.00 | \$5,040.00 | \$5,040.00 |
| h4 | \$5,040.00 | \$5,040.00 | \$6,000.00 | \$6,000.00 | \$6,000.00 | \$5,040.00 | \$5,040.00 |
| h5 | \$928.00 | \$928.00 | \$800.00 | \$800.00 | \$800.00 | \$800.00 | \$800.00 |

Fuente: Elaboración propia

La variable Z_h^t en donde $Z \in \{0,1\}$ determina si en el periodo t se ejecuta el servicio desde la sucursal de origen $h \in H$.

3.3.2. Probabilidad de ocurrencia de cada escenario

En la observación y análisis de los datos referentes a la demanda expresada en kilogramos de los clientes del análisis 80-20, se pudo detectar que la distribución de probabilidad de los datos de envío no se asemeja a alguna distribución conocida, por tanto, para la generación de la probabilidad de ocurrencia de los escenarios de este trabajo, se usó la distribución empírica

que es una medida estadística que indica la probabilidad de ocurrencia de un evento a partir de los resultados de éste. Se construye para datos continuos agrupados en función de la frecuencia absoluta de las observaciones de una variable discreta con valores entre 0 y 1 (Humboldt-Universität zu Berlin, 2021), cuanto mayor sea la probabilidad empírica obtendrá un valor cercano a 1 o 1, por el contrario, cuanto menos probable sea la ocurrencia de un evento, los valores serán cercanos o iguales a 0 (Probabilidad y Estadística, 2021).

La información que se utilizó para realizar el cálculo de las probabilidades de ocurrencia de los escenarios corresponde al peso (kg) de los servicios consolidados que se recopilaron durante un año de observación. A partir de esta base de datos, se ordenaron todos los valores encontrados de forma descendente y se realizó la frecuencia absoluta de los datos que insidían en los rangos del esquema de costos de la empresa, es decir, se contabilizó cuantas solicitudes de servicio contaban con pesos (kg) en el rango de 1 a 100 kg, 101 a 200 kg, 201 a 300 kg como se muestran en la columna 1 de la tabla 12. De esta manera, se eligieron marcas de clase en donde existen “saltos” significativos dentro del esquema de costos de la empresa, delimitando así 5 escenarios (“saltos” significativos) para este trabajo. Posterior a este paso y en función a la frecuencia relativa acumulada, se hizo uso de la distribución empírica para determinar la probabilidad de ocurrencia de cada escenario, como se observa en la tabla 11. La figura 13 ilustra la distribución empírica para las probabilidades de ocurrencia de cada escenario.

Tabla 11 Probabilidad de ocurrencia de los escenarios

| Probabilidad de ocurrencia de cada escenario | Frecuencia relativa acumulada | Escenario |
|---|--------------------------------------|------------------|
| 25.16% | 25% | Escenario 1 |
| 26.13% | 51% | Escenario 2 |
| 23.33% | 75% | Escenario 3 |
| 18.28% | 93% | Escenario 4 |
| 7.10% | 100% | Escenario 5 |

Fuente: Elaboración propia

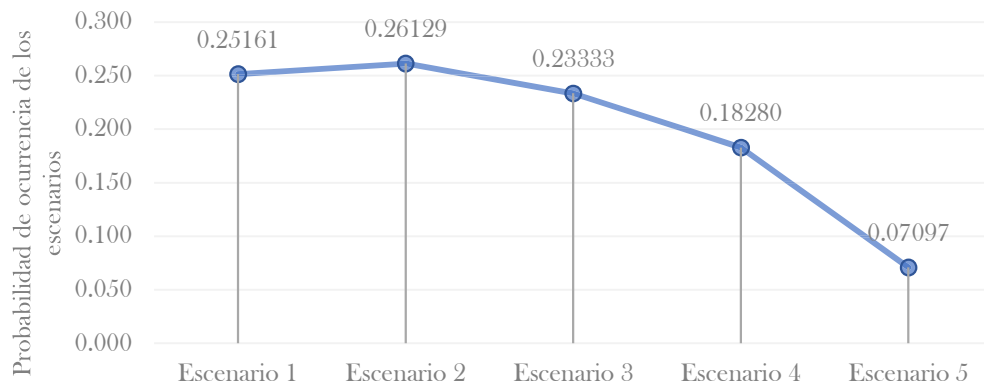


Figura 13 Probabilidad de ocurrencia de los escenarios

Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Costo por enviar la mercancía k en la ruta p en el escenario ψ

El costo variable $C_p^{k\psi}$, corresponde al envío de la mercancía $k \in K$ a través de la ruta $p \in P$ en el escenario $\psi \in \Psi$. En donde el costo está determinado por dos factores: el peso (kg) de la mercancía y la ciudad destino (km) de acuerdo al tabulador de la empresa, está determinado por la función de “escalón” para costos agrupados por peso como se muestra en la tabla 12. La interpretación de esta tabla se da de la siguiente manera: cuando el peso de la mercancía oscila entre 1 y 100 kg y el destino de ella se encuentra en un rango de 100 km, se incurre en un costo de \$109.04, sin importar si sólo es un kilogramo o son 99.99 kg. Sin embargo, si se envía 101 kg a la misma distancia de entrega, el costo aumente de manera escalonada a \$145.39. De manera análoga si el peso es el mismo (1 a 100 kg) pero el destino cambia en un rango de 200 km, también incrementa el costo de envío $C_p^{k\psi}$ a \$123.61.

$w_p^{k\psi}$, $w \in \{0,1\}$, es una variable binaria que representa si se envía o no la mercancía $k \in K$ por la ruta $p \in P$ en el escenario $\psi \in \Psi$.

Tabla 12 Costo de envío $C_p^{k\psi}$ (\$)

| Kg | 100 km | 200 km | 300 km | 400 km | 500 km |
|--------------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1 a 100 kg | \$109.04 | \$123.61 | \$135.21 | \$167.49 | \$187.42 |
| 101 a 200 kg | \$145.39 | \$164.76 | \$180.37 | \$223.31 | \$249.89 |
| 201 a 300 kg | \$218.07 | \$274.16 | \$270.76 | \$334.97 | \$266.85 |
| 301 a 400 kg | \$436.16 | \$494.31 | \$540.83 | \$669.93 | \$749.68 |
| 401 a 500 kg | \$560.81 | \$635.59 | \$695.91 | \$785.14 | \$878.60 |
| 501 a 1200 kg | \$934.61 | \$1,059.23 | \$1,158.93 | \$1,256.13 | \$1,405.66 |
| 1,201 a 1,500 kg | \$1,402.20 | \$1,523.72 | \$1,617.19 | \$1,776.11 | \$1,906.98 |
| 1,501 a 2,000 kg | \$1,869.23 | \$2,708.31 | \$2,874.46 | \$3,156.93 | \$3,389.54 |
| 2,001 a 3,000 kg | \$3,579.07 | \$3,889.25 | \$4,127.86 | \$4,533.48 | \$4,867.54 |
| 3,001 a 4,000 kg | \$4,984.61 | \$5,416.61 | \$5,748.93 | \$6,313.84 | \$6,779.07 |
| 4,001 a 5,000 kg | \$6,230.77 | \$8,770.77 | \$7,186.16 | \$7,892.31 | \$8,473.84 |
| 5,001 a 6,000 kg | \$7,276.93 | \$11,924.93 | \$8,423.39 | \$9,270.78 | \$9,968.61 |
| 6,001 a 7,000 kg | \$8,123.09 | \$14,879.09 | \$9,460.62 | \$10,449.25 | \$11,263.38 |
| 7,001 a 8,000 kg | \$8,769.25 | \$17,633.25 | \$10,297.85 | \$11,427.72 | \$12,358.15 |
| 8,001 a 9,000 kg | \$9,215.41 | \$20,187.41 | \$10,935.08 | \$12,206.19 | \$13,252.92 |
| 9,001 a 10,000 kg | \$9,661.57 | \$22,741.57 | \$11,572.31 | \$12,984.66 | \$14,147.69 |
| 10,001 a 11,000 kg | \$10,107.73 | \$25,295.73 | \$12,209.54 | \$13,763.13 | \$15,042.46 |
| 11,001 a 12,000 kg | \$10,553.89 | \$27,849.89 | \$12,846.77 | \$14,541.60 | \$15,937.23 |
| 12,001 a 13,000 kg | \$11,000.05 | \$30,404.05 | \$13,484.00 | \$15,320.07 | \$16,832.00 |
| 13,001 a 14,000 kg | \$11,446.21 | \$32,958.21 | \$14,121.23 | \$16,098.54 | \$17,726.77 |
| 14,001 a 15,000 kg | \$11,892.37 | \$35,512.37 | \$14,758.46 | \$16,877.01 | \$18,621.54 |
| 15,001 a 16,000 kg | \$12,338.53 | \$38,066.53 | \$15,395.69 | \$17,655.48 | \$19,516.31 |
| 16,001 a 17,000 kg | \$12,784.69 | \$40,620.69 | \$16,032.92 | \$18,433.95 | \$20,411.08 |

Fuente: Elaboración propia, con información de la empresa

3.3.4. Costo fijo por uso de la ruta p en el envío de la mercancía k , escenario ψ

Las rutas de entrega al Bajío son la combinación de las 27 ciudades destino, sin embargo, hacer la combinación completa de los destinos, resultaría una cantidad extensa de posibles rutas, en donde, al final existen combinación que en el contexto de la empresa no son empleadas y al implementar la solución al modelo, el software limitaría en el ingreso de variables. Por tanto, de acuerdo un análisis anual de las combinaciones entre los distintos destinos, resultaron ser 120 rutas que se repiten para Bajío e incluyen a los clientes del análisis 80-20. Ésta es la cantidad de rutas que se emplean en la solución del modelo.

Cada ruta tiene un costo fijo F_p , el cual considera el costo de casetas, gasto de combustible (determinado por la cantidad de kilómetros desde el origen del servicio en las sucursales hacia el centro de consolidación hasta el destino más lejano multiplicado por el rendimiento de cada vehículo). $y_p^{k\psi}$ donde $y \in \{0,1\}$, representa la variable binaria del envío de la mercancía $k \in K$ a través de la ruta $p \in P$ en el escenario $\psi \in \Psi$.

El modelo entonces se convierte en:

$$MIN \sum_{h \in H} \sum_{t \in T} O_h^t Z_h^t + \sum_{\psi \in \Psi} \Phi_{\psi} \left[\sum_{k \in K} \sum_{p \in P} C_p^{k\psi} W_p^{k\psi} + F_p y_p^{k\psi} \right] \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{h \in H} x1_t^h = q1^t \quad \forall h \in \Lambda, \tau \in \theta_h \quad (2)$$

$$q2_p^{k\psi} - x2_p^{k\psi} = 0 \quad \forall p \in P, k \in K, \psi \in \Psi \quad (3)$$

$$\sum_{t \in T} x1_t^h \leq v1^h \quad \forall h \in \Lambda, \tau \in \theta_h \quad (4)$$

$$\sum_{p \in P_k^{\psi}} x2_p^{k\psi} \leq v2^k \quad \forall p \in P, k \in K, \psi \in \Psi \quad (5)$$

$$\sum_{p \in P_k^{\psi}} x2_p^{k\psi} \leq U_p \quad \forall p \in P, k \in K, \psi \in \Psi \quad (6)$$

$$x1_t^h \leq MZ_h^t \quad \forall h \in \Lambda, \tau \in \theta_h \quad (7)$$

$$x2_p^{k\psi} \leq M y_p^{k\psi} \quad \forall p \in P, k \in K, \psi \in \Psi \quad (8)$$

$$x2_p^{k\psi} \leq M W_p^{k\psi} \quad \forall p \in P, k \in K, \psi \in \Psi \quad (9)$$

$$z_h^t \in \{0,1\} \quad \forall h \in \Lambda, \tau \in \theta_h \quad (10)$$

$$y_p^{k\psi} \in \{0,1\} \quad \forall p \in P, k \in K, \psi \in \Psi \quad (11)$$

$$w_p^{k\psi} \in \{0,1\} \quad \forall p \in P, k \in K, \psi \in \Psi \quad (12)$$

$$x1_t^h \geq 0 \quad \forall h \in \Lambda, \tau \in \theta_h \quad (13)$$

$$x2_p^{k\psi} \geq 0 \quad \forall p \in P, k \in K, \psi \in \Psi \quad (14)$$

Se resumen los parámetros y variables del modelo en las tablas 13 y 14 respectivamente:

Tabla 13 Parámetros del modelo

| Parámetro | Descripción |
|----------------|---|
| O_h^t | Costo del ciclo operativo τ por un recurso con sucursal origen h (\$) |
| $C_p^{k\psi}$ | Costo por unidad de volumen-distancia de la mercancía $k \in K$ que viaja por la ruta p en el escenario ψ (\$) |
| F_p | Costo fijo por uso de la ruta p (\$) |
| U_p | Capacidad de la ruta p (kg) determinada por la capacidad de los vehículos (17,000 kg) |
| ϕ_ψ | Probabilidad de ocurrencia del escenario ψ |
| $q1^t$ | Demanda en el periodo t (kg) |
| $q2_p^{k\psi}$ | Demanda de la mercancía $k \in K$ que viaja por la ruta p en el escenario ψ (kg) |
| $v1^h$ | Capacidad de envío de la sucursal h (kg) |
| $v2^k$ | Capacidad de envío de la mercancía k (kg) |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14 Variables del modelo

| Variable | Descripción |
|---------------------------|---|
| $x1_t^h$ | Cantidad de mercancía enviada desde la sucursal h en el periodo t (kg) |
| $x2_p^{k\psi}$ | Cantidad de mercancía k enviada por la ruta p (kg) |
| $Z_h^t \in \{0,1\}$ | Si el ciclo τ es ejecutado por un recurso con sucursal origen h . |
| $w_p^{k\psi} \in \{0,1\}$ | Si la mercancía k viaja por la ruta p en el escenario ψ . |
| $y_p^{k\psi} \in \{0,1\}$ | Si se utiliza la ruta p en el escenario ψ para entregar la mercancía k . |
| M | Número suficientemente grande que garantice el uso de las variables binarias |

Fuente: Elaboración propia

Las restricciones 2 y 3 están destinadas a cubrir la demanda en los periodos y de la mercancía requerida, respectivamente. La restricción 4, en conjunto con la 5, limitan la capacidad de envío que poseen tanto las sucursales como cada mercancía. La restricción 6 limita la cantidad de envío de la variable $x_2^{k\psi}$ en los vehículos. Las restricciones de la 7 a la 9, consideran un número grande que garantice el uso de las variables binarias Z_h^t , $w_p^{k\psi}$ y $y_p^{k\psi}$. Las restricciones de la 10 a la 12, refieren a las variables binarias usadas en el modelo, finalmente las restricciones 13 y 14 son de la no negatividad de las variables.

4.1. Codificación en el programa GAMS®

El modelo fue resuelto utilizando el software GAMS® para Windows 10 con procesador Intel(R) Core (TM) i5-8250U, en él, se introdujeron función objetivo, restricciones y datos correspondientes al modelo de optimización.

El software GAMS® (General Algebraic Modeling System) es un programa desarrollado por A. Brooke, D. Kendrick y A. Meeraus. Por medio del empleo de este software, se permite dar solución a problemas de optimización simples o complejos, a través la formulación de un modelo matemático que se introduce en el lenguaje de modelización y con la posterior aplicación de un *solver* o solucionador asociado (GAMS, 2021), en la tabla 15 se muestran algunos de los *solvers* más utilizados.

Tabla 15 Ejemplos de algunos *solvers* empleados en GAMS® según el tipo de problema

| Tipo de problema | <i>Solvers</i> |
|------------------------------|--------------------------|
| LP (programación lineal) | OSL, CPLEX, MINOS, BDMLP |
| NLP (programación no lineal) | CONOPT, MINOS |
| MIP (programación mixta) | OSL, CPLEX, ZOOM |

Fuente: Elaboración propia

El código completo en la sintaxis de GAMS® se encuentra en el anexo 1. Las figuras 14 y 15 son las ventanas después de la ejecución en el software y el *solver* empleado fue CPLEX®, en donde se observa la solución óptima del modelo. Además, presenta un GAP absoluto de

0.00 lo que indica que esta solución es la mejor posible; el modelo que se introdujo corresponde a la programación entera mixta.

```

untitled_91 |
Flow cuts applied: 4
Multi commodity flow cuts applied: 10
Gomory fractional cuts applied: 1
MIP status(101): integer optimal solution
Fixing integer variables, and solving final LP...
Tried aggregator 1 time.
LP Presolve eliminated 39930 rows and 39963 columns.
Aggregator did 10 substitutions.
All rows and columns eliminated.
Presolve time = 0.03 sec.
Fixed MIP status(1): optimal

Proven optimal solution.

MIP Solution:      554349.733682      (180 iterations, 1 nodes)
Final Solve:      554349.733682      (0 iterations)

Best possible:    554349.733682
Absolute gap:     0.000000
Relative gap:    0.000000
  
```

Figura 14 Ventana 01 de ejecución GAMS®
Fuente: Elaboración propia

```

ITG_VAZQUEZ_AZOTEA_ENERO_2022
Solution Report      SOLVE ITG_JESSICA Using MIP From line 239

          S O L V E      S U M M A R Y

MODEL  ITG_JESSICA      OBJECTIVE  CT
TYPE   MIP              DIRECTION  MINIMIZE
SOLVER CPLEX           FROM LINE  239

**** SOLVER STATUS      1 Normal Completion
**** MODEL STATUS      1 Optimal
**** OBJECTIVE VALUE    554349.7337

RESOURCE USAGE, LIMIT      0.548      1000.000
ITERATION COUNT, LIMIT    180      2000000000

IBM ILOG CPLEX   Jul  4, 2010 23.5.1 WIN 18414.18495 VS8 x86/MS Windows
Cplex 12.2.0.0, GAMS Link 34
  
```

Figura 15 Ventana 02 de ejecución GAMS®
Fuente: Elaboración propia

4.1.1. Resultados computacionales

En la figura 16 se presentan los valores iniciales de GAMS® que refieren al número de conjuntos de ecuaciones, conjunto de variables, ecuaciones individuales, variables individuales, valores diferentes a cero y variables discretas de los cuales se parte para la ejecución del modelo para el SND.

| MODEL STATISTICS | | | |
|---------------------|--------|--------------------|--------|
| BLOCKS OF EQUATIONS | 25 | SINGLE EQUATIONS | 39,940 |
| BLOCKS OF VARIABLES | 18 | SINGLE VARIABLES | 39,973 |
| NON ZERO ELEMENTS | 93,866 | DISCRETE VARIABLES | 26,586 |

Figura 16 Cantidad inicial en GAMS® de columnas y renglones

Fuente: Elaboración propia

A partir de estos valores en el primer acercamiento a la solución se redujeron las cantidades para cada elemento después de hacer una búsqueda dinámica, resultando así los valores de la figura 17:

```
Tried aggregator 1 time.  
Presolve time = 0.01 sec.  
Probing time = 0.00 sec.  
MIP emphasis: balance optimality and feasibility.  
MIP search method: dynamic search.  
Parallel mode: none, using 1 thread.  
Tried aggregator 1 time.  
LP Presolve eliminated 125 rows and 125 columns.  
Reduced LP has 37 rows, 150 columns, and 450 nonzeros.  
Presolve time = 0.00 sec.
```

Figura 17 Primer reducción de columnas y renglones en GAMS®

Fuente: Elaboración propia

Como se observa, la cantidad de restricciones disminuyó a 37 por medio del uso de Programación Lineal, en cuanto a la cantidad de variables quedó en 125, con estos datos se obtuvo una brecha inicial (GAP inicial) de 1.54% (véase figura 18), esto quiere decir que la mejor solución será \$664,402.0298, pero la solución actual difiere solamente un 1.54% de la mejor solución.

| Nodes | | Objective | IInf | Best Integer | Cuts/ | | Gap |
|-------|------|-------------|------|--------------|-------------|-------|-------|
| Node | Left | | | | Best Node | ItCnt | |
| 0 | 0 | 551567.3096 | 7 | | 551567.3096 | 14 | |
| 0+ | 0 | | | 560189.7337 | 551567.3096 | 14 | 1.54% |
| 0 | 0 | 554059.5950 | 11 | 560189.7337 | Cuts: 16 | 33 | 1.09% |
| 0 | 0 | 554267.4617 | 8 | 560189.7337 | Cuts: 18 | 54 | 1.06% |
| 0 | 0 | 554271.6869 | 5 | 560189.7337 | Cuts: 5 | 58 | 1.06% |
| 0+ | 0 | | | 555149.7337 | 554271.6869 | 58 | 0.16% |
| 0 | 0 | 554275.9031 | 2 | 555149.7337 | Cuts: 2 | 62 | 0.16% |
| 0+ | 0 | | | 554349.7337 | 554275.9031 | 62 | 0.01% |
| 0 | 0 | 554281.4394 | 10 | 554349.7337 | MCF: 1 | 67 | 0.01% |

Figura 18 Brecha inicial (GAP) primer acercamiento

Fuente: Elaboración propia

GAMS® realizó otra reducción de variables y ecuaciones como se ilustra en la figura 19 y es en esta reducción en donde se encuentra el GAP = 0.00%, representando así el encuentro con la mejor solución al problema, así como la solución óptima.

| Nodes | | Objective | IInf | Best Integer | Cuts/ | | Gap |
|-------|------|-------------|------|--------------|-------------|-------|-------|
| Node | Left | | | | Best Node | ItCnt | |
| 0+ | 0 | | | 554349.7337 | 554281.4394 | 180 | 0.01% |
| 0 | 0 | 554281.4394 | 10 | 554349.7337 | 554281.4394 | 180 | 0.01% |
| 0 | 0 | 554281.4394 | 10 | 554349.7337 | 554349.7337 | 180 | 0.00% |

Figura 19 Resultados finales obtenidos por GAMS®

Fuente: Elaboración propia

Se puede observar que derivado de la formulación del modelo la cantidad de variables continua, variables binarias y ecuaciones es considerable, sin embargo, por la naturaleza de la solución, las etapas de *presolve* elimina renglones y columnas que no son activas para disminuir el número de iteraciones al momento de encontrar la solución óptima, el resumen de la cantidad de variables y restricciones se muestra en la tabla 16.

Tabla 16 Cantidad de variables y restricciones del modelo en GAMS®

| | Cantidad original | Cantidad final |
|----------|-------------------|----------------|
| Filas | 39,940 | 84 |
| Columnas | 39,973 | 130 |
| Binarias | 26,586 | 55 |

Fuente: Elaboración propia

Tabla 17 Resultados variable $x1_t^h$ (kg)

| Período | h1 | h2 | h3 | h4 | h5 | h6 |
|--------------|----------|----------|----------|----------|-----------|----------|
| Lunes 3 | 8,723.00 | | | | | |
| Martes 4 | | | | | | 980.00 |
| Sábado 8 | | | 2,316.60 | | | 1,090.40 |
| Domingo 9 | | | | | | 1,013.50 |
| Lunes 10 | | 1,548.80 | | | | 2,011.20 |
| Martes 11 | | | | | | 6,471.10 |
| Miércoles 12 | | | | | | 4,646.99 |
| Jueves 13 | | | | | 14,029.70 | |
| Viernes 14 | | | | 3,268.10 | | 999.40 |
| Sábado 15 | | | | | | 5,925.00 |
| Domingo 16 | | | | | | 160.50 |
| Lunes 17 | | | | | 14,237.00 | |
| Martes 18 | | | | | 10,095.00 | |
| Miércoles 19 | | | | | | 3,793.00 |
| Jueves 20 | 6,814.00 | | | | | |
| Viernes 21 | | | | | | 3,982.00 |
| Sábado 22 | | | | | | 1,332.00 |
| Domingo 23 | | | | | | 602.00 |
| Lunes 24 | | | | | 12,500.50 | |
| Martes 25 | | | | | | 637.00 |
| Miércoles 26 | | | | | | 4,173.50 |
| Jueves 27 | | | | | | 6,330.20 |
| Viernes 28 | | | | | | 4,921.00 |
| Sábado 29 | | | | | | 1,884.00 |
| Domingo 30 | | | | | 12,818.50 | |

Fuente: Elaboración propia

Los resultados referentes a las variables que corresponden al envío de mercancía desde las terminales $h \in H$ en los periodos $t \in T$, se muestran en la tabla 17, en donde al activarse la variable binaria Z_h^t se genera una solicitud de servicio y le corresponde un valor de la variable $x1_t^h$ que representa una cantidad de la demanda. Los resultados de la tabla proporcionan un cronograma de salida de los vehículos desde las terminales $h \in H$ considerando la satisfacción de la demanda y la capacidad de envío de las terminales. Es importante resaltar que para la terminal h6 la variable Z_h^t es activada en 18 ocasiones, esto debido a que en esta terminal la mercancía es llevada por los clientes, lo que no representa un costo de traspotación para la empresa. Conforme a la tabla 17, se observa que para el periodo correspondiente al Lunes 3,

se deberá enviar, desde la terminal h1 8,723.00 kg de la mercancía proveniente de los clientes del análisis 80-20 y con este envío se cubre la demanda para este período y para estos clientes, sin incurrir en excedentes de la capacidad de la terminal de origen. En el caso del periodo Sábado 8, debe existir un envío de 2,316.60 kg provenientes de la sucursal h3 y 2,316.60 kg de la terminal h6, para así cubrir los requerimientos de los clientes en los periodos establecidos.

4.2. Variables para asignación de mercancías a las rutas

En el caso de las variables binarias $w_p^{k\psi}$ y $y_p^{k\psi}$ para todos los escenarios, son activadas cuando se envía la cantidad $x_2^{k\psi}$ de la mercancía $k \in K$ a través de la ruta $p \in P$. La tabla 18 contiene la activación de ambas variables para todos los escenarios. Para explicar la tabla 18, se toma como ejemplo la mercancía $k1$, la cual puede ser incluida en las rutas $p5$, $p40$, $p54$, $p80$ y $p98$, esta inclusión se debe a que la ciudad destino de esta mercancía se encuentra en todas las rutas antes mencionadas; otro ejemplo es la mercancía $k3$ que puede incluirse en las rutas $p5$, $p17$, $p25$, $p27$, $p40$, $p45$, $p74$, $p80$, $p109$ y $p112$ por lo tanto estas dos mercancías pueden consolidarse en las rutas $p5$, $p40$ y $p80$. Así es como se garantiza la consolidación de mercancías en una misma ruta.

4.3. Costos totales finales

La sumatoria de la variable $x_2^{k\psi}$, mercancía $k \in K$, enviada por las rutas $p \in P$ para los escenarios $\psi \in \Psi$ del 1 al 5 se muestran en la en la tabla 19, se observa que el resultado de esta sumatoria para los escenarios $\psi = 1,2$ es inferior a la capacidad de los vehículos, U_p (17,000kg), por tanto, no existe inconveniente al hacer los envíos. Sin embargo, para los escenarios $\psi = 3$ y 4 en ruta $p = 85$ esta capacidad se ve superada por la sumatoria de la variable $x_2^{k\psi}$. En el caso del escenario $\psi = 3$ el excedente del peso es una cantidad que puede ser consolidada en otro vehículo con destino bajío; en los casos en donde se presenta esta situación, la mercancía se enruta en otro servicio consolidado de manera tal que sean redituables las ganancias en ambos servicios consolidados; si la mercancía corresponde a un solo cliente, éste no presenta inconformidad siempre y cuando la mercancía sea entregada en el mismo periodo. En el caso

del escenario $\psi = 5$, rutas $p = 1, 5, 34, 40, 34, 40, 45, 54, 74, 80, 85, 88, 98, 109$ y 111 sobrepasan la capacidad de los vehículos, U_p , en esta situación la mercancía se enruta varios vehículos retomando que la empresa cuenta con hasta cinco vehículos que pueden ser usados de manera simultánea para efectuar los servicios consolidados al Bajío, aunque es preciso resaltar que éste es el escenario menos probable de ocurrencia.

Tabla 18 Resultado variables $w_p^{k\psi}$ y $y_p^{k\psi}$

| | p1 | p5 | p17 | p25 | p27 | p30 | p34 | p40 | p45 | p54 | p74 | p80 | p85 | p88 | p96 | p98 | p109 | p111 | p112 | p116 | p118 | | |
|-----|----|----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|------|------|------|------|---|---|
| k1 | 1 | | | | | | | 1 | 1 | | | 1 | | | | | | | | | | 1 | |
| k2 | 1 | | 1 | | 1 | 1 | 1 | | | | | | 1 | 1 | | | | | 1 | | | | 1 |
| k3 | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | 1 | 1 | | 1 | 1 | | | | | 1 | | 1 | | | | |
| k4 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | 1 | | | | | 1 | |
| k5 | | | | | | | | 1 | 1 | | | 1 | | | 1 | | 1 | | | | | | |
| k6 | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| k7 | 1 | 1 | | 1 | | | | | 1 | 1 | | | 1 | | | 1 | | | | | | | |
| k8 | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| k9 | | | | | | | | | | 1 | | | | | 1 | | 1 | | | | | | |
| k11 | | | | 1 | | | | | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | 1 | |
| k12 | 1 | | 1 | 1 | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | |
| k13 | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | | | | | | |
| k14 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | |
| k16 | | | | | | | | | | 1 | | 1 | | | | | | | | | | | |
| k18 | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| k19 | | | 1 | | | | 1 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| k20 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 |
| k21 | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 |
| k22 | | | | | 1 | | | 1 | 1 | | | | | | 1 | | | | | | | 1 | |

Fuente: Elaboración propia

Finalmente, la variable CT , contiene el costo total de transporte incurrido después de representar los 5 escenarios, dicho valor es: **\$554,349.73.**

Tabla 19 Resultado variable $x2_p^{k\psi}$

| Ruta | $x2_p^{k1}$ escenario 1 | $x2_p^{k2}$ escenario 2 | $x2_p^{k3}$ escenario 3 | $x2_p^{k4}$ escenario 4 | $x2_p^{k5}$ escenario 5 |
|------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| p1 | 1,918.65 | 4,562.17 | 7,519.22 | 15,554.12 | 41,608.18 |
| p5 | 1,281.71 | 1,946.15 | 4,265.37 | 7,930.27 | 20,062.95 |
| p17 | 1,530.78 | 3,640.63 | 7,507.45 | 16,440.38 | 9,657.31 |
| p25 | 1,177.86 | 2,533.07 | 5,713.27 | 11,182.71 | 2,697.29 |
| p27 | 855.39 | 2,555.68 | 5,291.01 | 12,397.94 | 9,637.50 |
| p30 | 788.11 | 2,502.62 | 6,461.08 | 15,021.93 | 9,657.31 |
| p34 | 1,135.23 | 2,657.12 | 4,186.25 | 9,365.31 | 41,721.70 |
| p40 | 1,062.33 | 2,406.97 | 5,753.92 | 11,223.08 | 26,999.41 |
| p45 | 1,277.65 | 2,700.28 | 5,927.93 | 11,060.39 | 28,793.91 |
| p54 | 1,191.89 | 2,392.02 | 4,893.24 | 8,074.72 | 34,512.63 |
| p74 | 382.62 | 1,053.12 | 3,287.90 | 7,348.18 | 23,529.13 |
| p80 | 2,242.31 | 4,398.41 | 8,487.83 | 13,017.45 | 26,932.36 |
| p85 | 5,411.04 | 10,372.59 | 17,895.60 | 32,053.75 | 23,921.08 |
| p88 | 369.12 | 1,061.56 | 1,732.46 | 4,073.49 | 19,750.15 |
| p96 | 892.88 | 1,774.73 | 2,920.16 | 4,694.91 | 16,505.24 |
| p98 | 1,035.31 | 2,005.18 | 3,242.87 | 5,559.11 | 21,884.32 |
| p109 | 865.19 | 1,897.94 | 4,493.98 | 8,410.63 | 26,825.07 |
| p111 | 369.12 | 1,061.56 | 1,732.46 | 4,073.49 | 75,504.26 |
| p112 | 8.86 | 58.56 | 160.38 | 471.31 | 9,657.31 |
| p116 | 639.05 | 1,268.78 | 2,849.45 | 5,237.40 | 8,518.67 |
| p118 | 369.12 | 1,061.56 | 1,732.46 | 4,073.49 | 12,820.24 |

Fuente: Elaboración propia

4.4. Análisis de sensibilidad

Para identificar que tan robusto es el modelo propuesto, se ha elaborado un análisis de sensibilidad que identifica los efectos que se producen en la solución óptima ante perturbaciones efectuadas en los valores de probabilidad de ocurrencia de cada escenario. Retomando los valores iniciales de estas probabilidades, se identificó el escenario con mayor porcentaje de ocurrencia, destacando el Escenario 2 entre los cinco escenarios propuestos, con 26.13% de probabilidad de ocurrencia. Una vez identificado este parámetro, se determinó realizar variaciones en él incrementando porcentualmente el 40% y 20% de su magnitud actual, y de manera análoga disminuyendo porcentualmente el 20%, 40% y 60% en su magnitud de probabilidad de ocurrencia de dicho escenario. La tabla 20 contiene el valor inicial de la probabilidad de ocurrencia de los escenarios, así como los valores resultantes de la adición y disminución de porcentajes.

Tabla 20 Análisis de sensibilidad: probabilidad de ocurrencia de los escenarios

| Escenario | +40% | +20% | Valor inicial | -20% | -40% | -60% |
|-------------|-------|-------|---------------|-------|-------|-------|
| Escenario 1 | 21.6% | 23.4% | 25.2% | 26.9% | 28.7% | 30.5% |
| Escenario 2 | 36.6% | 31.4% | 26.1% | 20.9% | 15.7% | 10.5% |
| Escenario 3 | 20.0% | 21.7% | 23.3% | 25.0% | 26.6% | 28.3% |
| Escenario 4 | 15.7% | 17.0% | 18.3% | 19.6% | 20.9% | 22.2% |
| Escenario 5 | 6.1% | 6.6% | 7.1% | 7.6% | 8.1% | 8.6% |

Fuente: Elaboración propia

De manera intuitiva se puede deducir que al incrementar el valor de la probabilidad del Escenario 2 los valores de los demás escenarios disminuirán proporcionalmente, de forma contraria, al disminuir el valor inicial de la probabilidad los demás escenarios aumentarán en su probabilidad de ocurrencia. Estos cambios se ilustran en la figura 20, en donde el Escenario 2 está identificado por la barra naranja y se observa cómo los escenarios restantes responden a las modificaciones del valor inicial del escenario 2, aumentando o disminuyendo según sea el caso.

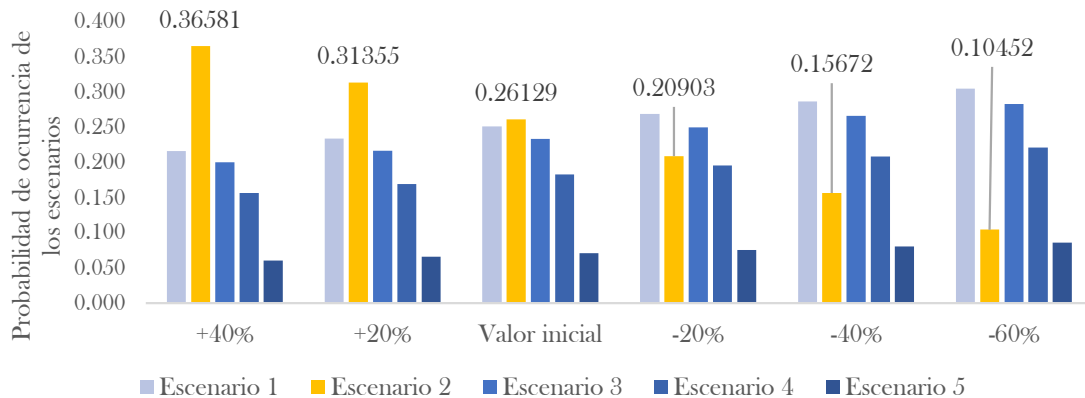


Figura 20 Análisis de sensibilidad: probabilidad de ocurrencia de los escenarios

Fuente: Elaboración propia

Una vez determinadas las distintas variaciones en la probabilidad de ocurrencia de los escenarios, se aplicaron estos cambios en la función objetivo del modelo de programación entera mixta planteado, obteniendo así los resultados del costo que se muestran en la tabla 21. Existen modificaciones del resultado inicial que corresponde a un costo total de \$554,349.73, después de integrar las variaciones en las probabilidades, el costo se mantiene en un rango de

\$546,073.56 - \$555,898.17, se indica así que el modelo es robusto en función de los cambios aplicados a los escenarios.

Tabla 21 Análisis de sensibilidad: valor del costo total de la función objetivo

| | +40% | +20% | Valor inicial | -20% | -40% | -60% |
|-------------|--------------|--------------|---------------|--------------|--------------|--------------|
| Costo total | \$ 546,073.5 | \$ 550,488.7 | \$ 554,349.7 | \$ 550,866.6 | \$ 555,898.1 | \$ 554,391.3 |

Fuente: Elaboración propia

Se puede concluir que la robustez del modelo, referente al valor del costo total de la función objetivo, obedece a la agrupación de valores en la estructura de costos, recordando que la estructura de costos de la empresa es escalonada. La figura 21 presenta cómo se adapta el modelo planteado a la estructura de costos que actualmente maneja la empresa. Dado que las variaciones se realizan sobre el valor de la probabilidad del Escenario 2, el cambio en los porcentajes es relativamente bajo en ponderación con el total de los datos, por tanto, estos cambios no afectan en gran medida el costo total de la función objetivo. La figura 21 es un ejemplo de la estructura de escalón presente en la mercancía *k17* que, en el modelo presentado, tiene peso de 143.8 kg, analizando el caso donde el incremento es de 40% sobre el valor de la probabilidad del Escenario 2, el incremento no afecta el costo, dado que no escala al siguiente nivel de costo, lo mismo ocurre en el caso de reducción del 40%, en donde no alcanza a disminuir el costo. Esta situación no aplica de manera general para todas las mercancías, debido a que existen demandas que se encuentran en el límite de los escalones y una variación puede hacer incurrir en un nuevo costo, pero permanece en el rango de costos mostrado en la tabla 21.

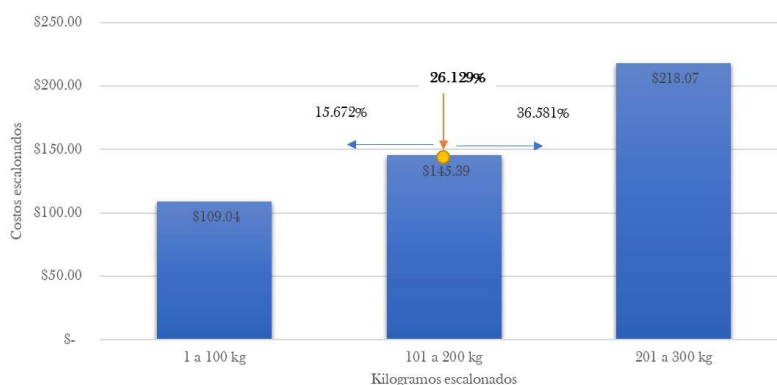


Figura 21 Ejemplo: estructura de costos escalonada *k17* (143.8 kg)

Fuente: Elaboración propia

Conclusiones

Una vez realizada la experimentación del este trabajo, se cuenta con la información necesaria y suficiente que permite llegar a las conclusiones siguientes:

Por medio del uso del modelo SND se logró elaborar la programación de servicios de carga consolidada con destino Bajío de México para una empresa de autotransporte, el resultado del uso de métodos de optimización permitió la minimización de costos variables derivados de la combinación de rutas y frecuencias de envíos en diferentes escenarios en donde se abordan demandas distintas para cada escenario, tal como se planteó en el objetivo general de este trabajo. En la comparación de la situación actual del objeto de estudio, contrastada con los resultados obtenidos de GAMS®, se observa que el costo total por realizar envíos, representaría una disminución del **24%** en comparación con el costo de la situación actual mostrada en el Capítulo 1, en donde el costo por un mes de servicios consolidados al Bajío de México es de **\$729,031.36**; en comparación con el resultado del modelo planteado en este trabajo, que se encuentra influenciado por la variación del peso (kg) de la demanda el cual se representa a través de cinco escenarios distintos, mostró en costo total de **\$554,349.73**, propiciando así una reducción de **\$174,681.61**. El costo total después del modelado disminuye, logrando así la afirmación de la hipótesis planteada, que refiere a la aplicación de programación entera mixta en la construcción de la programación de servicios consolidados para una empresa de autotransporte de carga como un método que permite disminuir el costo total actual de envío de mercancía consolidada y satisface la demanda de los clientes, en presencia de fluctuación de la demanda en distintos escenarios.

En lo que refiere a los objetivos particulares, se revisó la literatura de los últimos 20 años que corresponde al problema SND con enfoque en el autotransporte de carga consolidada, como se muestra en el Capítulo 2. La información requerida para la modelación del problema, se obtuvo de datos proporcionados por la empresa objeto de estudio, se utilizó para la generación de los escenarios; gracias a esta información se logró modelar y realizar la parte experimental del modelo matemático.

Así mismo, se realizó el análisis de la solución del modelo con respecto a la situación actual de la empresa constatando así la factibilidad de esta solución por medio de un análisis de sensibilidad aplicado a las probabilidades de ocurrencia de los escenarios en la función objetivo del modelo planteado, en donde se observa que dicho modelo es robusto en función al costo total. Después de incluir perturbaciones en la probabilidad de ocurrencia en los escenarios tomando como base el valor inicial del Escenario 2 se identificó que el costo total cambió, sin embargo, permanece dentro de un rango de costos con variación mínima, lo anterior es debido a la estructura de costos de escalón que actualmente maneja la empresa para el servicio consolidado. Es importante resaltar, con base en lo anterior, el ajuste que tiene el modelo a la forma actual de operar de la empresa.

Recomendaciones

Como se observó en el Capítulo 4, existen escenarios en donde la demanda excede la capacidad de los vehículos, lo cual conduce a la toma de decisiones estratégicas entre las cuales se puede optar por:

- i. **Penalización por no envío:** Esta opción es la menos viable de las tres, dado que al no enviar la mercancía que excede la capacidad, no sólo reciben una penalización económica por parte del cliente, sino que la empresa pierde confiabilidad, lo cual tiene impacto a mediano plazo puesto que el cliente a quien no se le esté cumpliendo optará por buscar otro prestador de servicio y así se perderá el cliente que, recordando, los clientes analizados representan el 80% de las solicitudes de servicios.
- ii. **Vehículo adicional:** Esta opción es viable siempre y cuando el porcentaje del excedente supere el 60% de la capacidad del vehículo, es un costo adicional para la empresa, pero

considerando la cantidad de mercancía en la ruta, es conveniente incurrir en este costo que en la penalización por no envío.

- iii. La tercera opción se refiere a la subcontratación, en donde los excedentes sean menores al 50% de la capacidad del vehículo se opte por la asignación de esta mercancía a terciarios, se recomienda que la relación con estas empresas se dé a través de contratos a largo plazo, en donde, solamente esa empresa sea la encargada de realizar los envíos del objeto de estudio, garantizando así las entregas en tiempo y forma.

Trabajo futuro

Dado que distribución de la demanda en los escenarios es distinta para cada caso, y las decisiones de envío se toman después de conocer las cantidades de envío, se propone el uso de tarifas reducidas, con la finalidad de atenuar la demanda estacional que llegara a presentar la demanda de los servicios consolidados al Bajío, lo cual, permitirá hacer la caracterización de la demanda específica de cada cliente proporcionando así escenarios con distribución de probabilidad de ocurrencia distinta para cada cliente. Con esta propuesta, se lograrán demandas que se apeguen más al comportamiento de cada mercancía cumpliendo las especificaciones de cada cliente, al mismo tiempo, se permitirá acceder a un número mayor de clientes potenciales y afianzar el vínculo comercial con los clientes que ya forman parte del 80-20 de los clientes actuales de la empresa. Lo anterior refiere a la manera en la que se podría atenuar el comportamiento de la demanda.

Ahora bien, referente al uso de los vehículos se puede considerar el crecimiento de la empresa por medio de logística 3PL (*Third Party Logistics*, logística tercerizada), que refiere a la contratación de un proveedor para que lleve a las entregas de última milla en ciudades aledañas dentro de la zona de cobertura en el Bajío. Al trabajar 3PL la empresa transportista no asumiría costos como el pago de salarios; la empresa 3PL sería la responsable de gestionar sus centros de almacenaje (dentro del Bajío), por lo que se permite acercar la mercancía al cliente final y con plazos de entrega más cortos. Esta propuesta se puede adherir al modelo matemático planteado en este trabajo como un costo por hacer uso de un servicio tercerizado en dos vertientes, por medio de un servicio spot o por medio de contratos a largo plazo.

Otro trabajo futuro, está relacionado con la posibilidad de consolidar mercancía en el Bajío, esta propuesta se encamina a la apertura de una nueva terminal en el Bajío, sin embargo, esta decisión correspondería a la dirección de la empresa; durante el desarrollo de este trabajo se identificaron tres ciudades potenciales que podrían fungir como centros de consolidación.

REFERENCIAS

- Bai, R., Kendall, G., Qu, R., & Atkin, J. A. D. (2012). Tabu assisted guided local search approaches for freight service network design. *Information Sciences*, 189, 266-281. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2011.11.028>
- Bai, R., Wallace, S. W., Li, J., & Chong, A. Y. L. (2014). Stochastic service network design with rerouting. *Transportation Research Part B: Methodological*, 60, 50-65. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2013.11.001>
- Beetrack. (2021) Logística de transporte y distribución: importancia, funciones y tipos. Recuperado 4 de agosto de 2021, de <https://www.beetrack.com/es/blog/logistica-transporte>
- Boland, N., Hewitt, M., Marshall, L., & Savelsbergh, M. (2017). The Continuous-Time Service Network Design Problem. *Operations Research*, 65(5), 1303-1321. <https://doi.org/10.1287/opre.2017.1624>
- Boland, N., Hewitt, M., Marshall, L., & Savelsbergh, M. (2019). The price of discretizing time: a study in service network design. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 8(2), 195-216. <https://doi.org/10.1007/s13676-018-0119-x>
- Crainic, T. G. (2000). Service network design in freight transportation. *European Journal of Operational Research*, 122(2), 272-288. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(99\)00233-7](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(99)00233-7)
- Crainic, T. G. (2003). Long-Haul Freight Transportation. *International Series in Operations Research & Management Science*, 451-516. https://doi.org/10.1007/0-306-48058-1_13
- Dall'Orto, L. C., Crainic, T. G., Leal, J. E., & Powell, W. B. (2006). The single-node dynamic service scheduling and dispatching problem. *European Journal of Operational Research*, 170(1), 1-23. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.06.016>
- Elbert, R., Müller, J. P., & Rentschler, J. (2020). Tactical network planning and design in multimodal transportation - A systematic literature review. *Research in Transportation Business & Management*, 35, 100462. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2020.100462>

- GAMS Software GmbH. (2021). GAMS. GAMS-The general algebraic modeling system. Recuperado 19 de octubre de 2021, de <https://www.gams.com/products/gams/gams-language/>
- Hewitt, M., Crainic, T. G., Nowak, M., & Rei, W. (2019). Scheduled service network design with resource acquisition and management under uncertainty. *Transportation Research Part B: Methodological*, 128, 324–343. <https://doi.org/10.1016/j.trb.2019.08.008>
- Hoff, A., Lium, A.-G., Løkketangen, A., & Crainic, T. G. (2009). A metaheuristic for stochastic service network design. *Journal of Heuristics*, 16(5), 653-679. <https://doi.org/10.1007/s10732-009-9112-8>
- Humboldt-Universität zu Berlin. (2021, 18 marzo). *Empirical Distribution Function - MM*Stat International*. Recuperado 26 de enero de 2022, de https://wikis.hu-berlin.de/mmint/Basics:_Empirical_Distribution_Function/en
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI). (2019). *Conociendo la Industria del Autotransporte de carga*. <https://www.inegi.org.mx/>
- Jarrah, A. I., Johnson, E., & Neubert, L. C. (2009). Large-Scale, Less-than-Truckload Service Network Design. *Operations Research*, 57(3), 609–625. <https://doi.org/10.1287/opre.1080.0587>
- Lanza, G., Crainic, T. G., Rei, W., & Ricciardi, N. (2020). Scheduled service network design with quality targets and stochastic travel times. *European Journal of Operational Research*, 288(1), 30-46. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2020.05.031>
- Lium, A.-G., Crainic, T. G., & Wallace, S. W. (2007). Correlations in stochastic programming: A case from stochastic service network design. *Asia-Pacific Journal of Operational Research (APJOR)*, 24, 161-179. 10.1142/S0217595907001206.
- Lium, A.-G., Crainic, T. G., & Wallace, S. W. (2009). A Study of Demand Stochasticity in Service Network Design. *Transportation Science*, 43(2), 144-157. <https://doi.org/10.1287/trsc.1090.0265>
- Marinno Logistics Innovation. (2021). *La importancia del transporte terrestre de carga en México*. <https://www.marinno.com.mx/transporte-terrestre/la-importancia-del-transporte-terrestre-de-carga-en-mexico/>
- Medina, J., Hewitt, M., Lehuédé, F., & Péton, O. (2019). Integrating long-haul and local transportation planning: the Service Network Design and Routing Problem. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 8(2), 119–145. <https://doi.org/10.1007/s13676-017-0114-7>

- Probabilidad y Estadística (2021, 20 septiembre). Probabilidad empírica: definición, fórmula, ejemplos. Probabilidad y Estadística. <https://www.probabilidadyestadistica.net/probabilidad-empirica/>
- Wang, X., Crainic, T. G., & Wallace, S. W. (2019). Stochastic Network Design for Planning Scheduled Transportation Services: The Value of Deterministic Solutions. *INFORMS Journal on Computing*, 31(1), 153-170. <https://doi.org/10.1287/ijoc.2018.0819>
- Wang, Z., & Qi, M. (2019). Service network design considering multiple types of services. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 126(February), 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.tre.2019.03.022>
- Wieberneit, N. (2007). Service network design for freight transportation: a review. *OR Spectrum*, 30(1), 77-112. <https://doi.org/10.1007/s00291-007-0079-2>

Anexo 1 Código del modelo de optimización

```

1 $TITLE TTG_VAZQUEZ_AZOTEA_ENERO_2022
2 ** INCLUYE COSTO POR MERCANCIA DAÑADA 5%
3 ** escenarios 25% 26% 23% 18% 7%
4
5
6 SET
7 h sucursales / OTE, MTZ, VER, GDL, VAL, T2000 /
8 t periodos / sabado1, domingo2, lunes3, martes4, miercoles5, jueves6, viernes7,
9 sabado8, domingo9, lunes10, martes11, miercoles12, jueves13, viernes14,
10 sabado15, domingo16, lunes17, martes18, miercoles19, jueves20, viernes21,
11 sabado22, domingo23, lunes24, martes25, miercoles26, jueves27, viernes28,
12 sabado29, domingo30, lunes31/
13 k mercancias / k1*k22 /
14 p rutas / p1*p120 /
15 ;
16
17 parameter
18 demandat(t) Demanda en el periodo t [kg]
19 capacidadh(h) Capacidad de la sucursal h [kg]
20 O(h,t) Costo [$] de envio desde h en el periodo t
21 F(p) Costo fijo por ruta
22
23 E1_demandakp(k,p) Demanda [kg] de la mercancia k en la ruta p en el escenario 1
24 E1_capacidadk(k) Capacidad de envio [kg] de la mercancia k en el escenario 1
25 E1_C(k,p) Costo [$] de envio de la mercancia k en la ruta p para el escenario»
26 o 1
27 E2_demandakp(k,p) Demanda [kg] de la mercancia k en la ruta p en el escenario 2
28 E2_capacidadk(k) Capacidad de envio [kg] de la mercancia k en el escenario 2
29 E2_C(k,p) Costo [$] de envio de la mercancia k en la ruta p para el escenario»
30 o 2
31 E3_demandakp(k,p) Demanda [kg] de la mercancia k en la ruta p en el escenario 3
32 E3_capacidadk(k) Capacidad de envio [kg] de la mercancia k en el escenario 3
33 E3_C(k,p) Costo [$] de envio de la mercancia k en la ruta p para el escenario»
34 o 3
35 E4_demandakp(k,p) Demanda [kg] de la mercancia k en la ruta p en el escenario 4
36 E4_capacidadk(k) Capacidad de envio [kg] de la mercancia k en el escenario 4
37 E4_C(k,p) Costo [$] de envio de la mercancia k en la ruta p para el escenario»
38 o 4

```

```

38
39   E5_demandakp(k,p)  Demanda [kg] de la mercancia k en la ruta p en el escenario 5
40   E5_capacidadk(k)  Capacidad de envio [kg] de la mercancia k en el escenario 5
41   E5_C(k,p)         Costo [$] de envio de la mercancia k en la ruta p para el escenari
o 5
42 ;
43
44 $onecho >' tasks.txt
45   par=demandat      rng=demandat1!a1   rdim=1
46   par=capacidadh    rng=capacidadh1!a1   rdim=1
47   par=O              rng=O1!a1       rdim=1 odim=1
48   par=F              rng=F1!a1       rdim=1
49
50   par=E1_demandakp  rng=demandakp1!a1   rdim=1 odim=1
51   par=E1_capacidadk rng=capacidadk1!a1   rdim=1
52   par=E1_C          rng=C1!a1       rdim=1 odim=1
53
54   par=E2_demandakp  rng=demandakp2!a1   rdim=1 odim=1
55   par=E2_capacidadk rng=capacidadk2!a1   rdim=1
56   par=E2_C          rng=C2!a1       rdim=1 odim=1
57
58   par=E3_demandakp  rng=demandakp3!a1   rdim=1 odim=1
59   par=E3_capacidadk rng=capacidadk3!a1   rdim=1
60   par=E3_C          rng=C3!a1       rdim=1 odim=1
61
62   par=E4_demandakp  rng=demandakp4!a1   rdim=1 odim=1
63   par=E4_capacidadk rng=capacidadk4!a1   rdim=1
64   par=E4_C          rng=C4!a1       rdim=1 odim=1
65
66   par=E5_demandakp  rng=demandakp5!a1   rdim=1 odim=1
67   par=E5_capacidadk rng=capacidadk5!a1   rdim=1
68   par=E5_C          rng=C5!a1       rdim=1 odim=1
69 $offecho
70
71 $call gdxrw INDATA_TTG.xlsx trace=3 @tasks.txt
72 $gdxin INDATA_TTG.gdx
73 $load demandat
74 $load capacidadh
75 $load o
76 $load F
77
78 $load E1_demandakp
79 $load E1_capacidadk
80 $load E1_C
81
82 $load E2_demandakp
83 $load E2_capacidadk
84 $load E2_C
85
86 $load E3_demandakp
87 $load E3_capacidadk
88 $load E3_C
89
90 $load E4_demandakp
91 $load E4_capacidadk
92 $load E4_C
93
94 $load E5_demandakp
95 $load E5_capacidadk
96 $load E5_C
97
98 $gdxin
99

```

```

100 Scalar
101     bigM          Número suficientemente grande;
102     bigM =       smax(h,      capacidadh(h));
103
104 Scalar
105     E1_bigM1      Número suficientemente grande
106     E1_bigM2      Número suficientemente grande;
107     E1_bigM1=     smax(k,      E1_capacidadk(k));
108     E1_bigM2=     smax((k,p),E1_demandakp(k,p));
109 Scalar
110     E2_bigM1      Número suficientemente grande
111     E2_bigM2      Número suficientemente grande;
112     E2_bigM1=     smax(k,      E2_capacidadk(k));
113     E2_bigM2=     smax((k,p),E2_demandakp(k,p));
114 Scalar
115     E3_bigM1      Número suficientemente grande
116     E3_bigM2      Número suficientemente grande;
117     E3_bigM1=     smax(k,      E3_capacidadk(k));
118     E3_bigM2=     smax((k,p),E3_demandakp(k,p));
119 Scalar
120     E4_bigM1      Número suficientemente grande
121     E4_bigM2      Número suficientemente grande;
122     E4_bigM1=     smax(k,      E4_capacidadk(k));
123     E4_bigM2=     smax((k,p),E4_demandakp(k,p));
124 Scalar
125     E5_bigM1      Número suficientemente grande
126     E5_bigM2      Número suficientemente grande;
127     E5_bigM1=     smax(k,      E5_capacidadk(k));
128     E5_bigM2=     smax((k,p),E5_demandakp(k,p));
129
130
131 Variable
132     x1(h,t)       Cantidad de mercancía enviada desde la sucursal h en el periodo t [kg]
133     ]
134     z(h,t)        Variable binaria en donde sera 1 si el arco se usa en solución y 0 en»
135     otro caso
136     CT            Costo total de transporte [$]

```



```

135
136 E1_x2(k,p) Cantidad de mercancía k enviada por la ruta p [kg] en el escenario 1
137 E1_W(k,p) Variable binaria en donde sera 1 si aplica el costo de envío de la me»
rcancia k en la ruta p y 0 en otro caso en el escenario 1
138 E1_Y(k,p) Variable binaria en donde sera 1 si aplica el costo fijo de envío de »
la mercancía k en la ruta p y 0 en otro caso en el escenario 1
139
140 E2_x2(k,p) Cantidad de mercancía k enviada por la ruta p [kg] en el escenario 2
141 E2_W(k,p) Variable binaria en donde sera 1 si aplica el costo de envío de la me»
rcancia k en la ruta p y 0 en otro caso en el escenario 2
142 E2_Y(k,p) Variable binaria en donde sera 1 si aplica el costo fijo de envío de »
la mercancía k en la ruta p y 0 en otro caso en el escenario 2
143
144 E3_x2(k,p) Cantidad de mercancía k enviada por la ruta p [kg] en el escenario 3
145 E3_W(k,p) Variable binaria en donde sera 1 si aplica el costo de envío de la me»
rcancia k en la ruta p y 0 en otro caso en el escenario 3
146 E3_Y(k,p) Variable binaria en donde sera 1 si aplica el costo fijo de envío de »
la mercancía k en la ruta p y 0 en otro caso en el escenario 3
147
148 E4_x2(k,p) Cantidad de mercancía k enviada por la ruta p [kg] en el escenario 4
149 E4_W(k,p) Variable binaria en donde sera 1 si aplica el costo de envío de la me»
rcancia k en la ruta p y 0 en otro caso en el escenario 4
150 E4_Y(k,p) Variable binaria en donde sera 1 si aplica el costo fijo de envío de »
la mercancía k en la ruta p y 0 en otro caso en el escenario 4
151
152 E5_x2(k,p) Cantidad de mercancía k enviada por la ruta p [kg] en el escenario 5
153 E5_W(k,p) Variable binaria en donde sera 1 si aplica el costo de envío de la me»
rcancia k en la ruta p y 0 en otro caso en el escenario 5
154 E5_Y(k,p) Variable binaria en donde sera 1 si aplica el costo fijo de envío de »
la mercancía k en la ruta p y 0 en otro caso en el escenario 5
155 ;
156
157 Positive Variable x1,E0_x2,E1_x2,E2_x2,E3_x2,E4_x2,E5_x2;
158 Binary variable E0_Y,E1_Y,E2_Y,E3_Y,E4_Y,E5_Y,E0_W,E1_W,E2_W,E3_W,E4_W,E5_W,Z;
159
160 Parameter
161 g(h) Garantiza el envío de 80% de la capacidad de la sucursal;
162 g(h) = capacidadh(h)* 0.8;
163
164 Equation
165 cost Definir función objetivo
166 demanda(t) Satisfacer la demanda en el en el periodo t
167 capacidad1(h) Límite de suministro en la sucursal h
168 capacidad2(h) Límite de suministro en la sucursal h
169 maxship(h,t) Asegura envío cero si la variable de binaria es 0'
170 *ESCENARIO 1
171 E1_demanda1(k,p) Satisfacer la demanda de la mercancía k en la ruta p en el escenario »
1

```

```

172 E1_capacidad3(k) Límite de suministro en la mercancía k en el escenario 1
173 E1_maxship1(k,p) Asegura envío cero si la variable de binaria es 0
174 E1_maxship2(k,p) Asegura envío cero si la variable de binaria es 0
175 *ESCENARIO 2
176 E2_demanda1(k,p) Satisfacer la demanda de la mercancía k en la ruta p en el escenario »
2
177 E2_capacidad3(k) Límite de suministro en la mercancía k en el escenario 2
178 E2_maxship1(k,p) Asegura envío cero si la variable de binaria es 0
179 E2_maxship2(k,p) Asegura envío cero si la variable de binaria es 0
180 *ESCENARIO 3
181 E3_demanda1(k,p) Satisfacer la demanda de la mercancía k en la ruta p en el escenario »
3
182 E3_capacidad3(k) Límite de suministro en la mercancía k en el escenario 3
183 E3_maxship1(k,p) Asegura envío cero si la variable de binaria es 0
184 E3_maxship2(k,p) Asegura envío cero si la variable de binaria es 0
185 *ESCENARIO 4
186 E4_demanda1(k,p) Satisfacer la demanda de la mercancía k en la ruta p en el escenario »
4
187 E4_capacidad3(k) Límite de suministro en la mercancía k en el escenario 4
188 E4_maxship1(k,p) Asegura envío cero si la variable de binaria es 0
189 E4_maxship2(k,p) Asegura envío cero si la variable de binaria es 0
190 *ESCENARIO 5
191 E5_demanda1(k,p) Satisfacer la demanda de la mercancía k en la ruta p en el escenario »
5
192 E5_capacidad3(k) Límite de suministro en la mercancía k en el escenario 5
193 E5_maxship1(k,p) Asegura envío cero si la variable de binaria es 0
194 E5_maxship2(k,p) Asegura envío cero si la variable de binaria es 0
195 ;
196
197 cost.. CT =e= sum((h,t), O(h,t)*Z(h,t)) + sum((k,p),0.2516*((E1_C(k,p)*E1_Y(k,p))+ »
(E1_C(k,p)*0.05) +(F(p)*E1_W(k,p))))
198 + sum((k,p),0.2612*((E2_C(k,p)*E2_Y(k,p))+ »
(E2_C(k,p)*0.05) +(F(p)*E2_W(k,p))))
199 + sum((k,p),0.2333*((E3_C(k,p)*E3_Y(k,p))+ »
(E3_C(k,p)*0.05) +(F(p)*E3_W(k,p))))
200 + sum((k,p),0.1827*((E4_C(k,p)*E4_Y(k,p))+ »
(E4_C(k,p)*0.05) +(F(p)*E4_W(k,p))))
201 + sum((k,p),0.0709*((E5_C(k,p)*E5_Y(k,p))+ »
(E5_C(k,p)*0.05) +(F(p)*E5_W(k,p)))));
202
203
204 demanda(t) .. sum(h, x1(h,t)) =e= demandat(t);
205 capacidad1(h) .. sum(t, x1(h,t)) =g= g(h);
206 capacidad2(h) .. sum(t, x1(h,t)) =l= capacidadh(h);
207 maxship(h,t) .. x1(h,t) =l= bigM *Z(h,t);
208
209
210 *ESCENARIO 1
211 E1_demanda1(k,p) .. E1_demandakp(k,p)-E1_x2(k,p)=e= 0;
212 E1_capacidad3(k) .. sum(p, E1_x2(k,p)) =l= E1_capacidadk(k);
213 E1_maxship1(k,p) .. E1_x2(k,p) =l= E1_bigM1*E1_Y(k,p);
214 E1_maxship2(k,p) .. E1_x2(k,p) =l= E1_bigM2*E1_W(k,p);
215 *ESCENARIO 2
216 E2_demanda1(k,p) .. E2_demandakp(k,p)-E2_x2(k,p)=e= 0;
217 E2_capacidad3(k) .. sum(p, E2_x2(k,p)) =l= E2_capacidadk(k);
218 E2_maxship1(k,p) .. E2_x2(k,p) =l= E2_bigM1*E2_Y(k,p);
219 E2_maxship2(k,p) .. E2_x2(k,p) =l= E2_bigM2*E2_W(k,p);
220 *ESCENARIO 3
221 E3_demanda1(k,p) .. E3_demandakp(k,p)-E3_x2(k,p)=e= 0;
222 E3_capacidad3(k) .. sum(p, E3_x2(k,p)) =l= E3_capacidadk(k);
223 E3_maxship1(k,p) .. E3_x2(k,p) =l= E3_bigM1*E3_Y(k,p);
224 E3_maxship2(k,p) .. E3_x2(k,p) =l= E3_bigM2*E3_W(k,p);
225 *ESCENARIO 4

```

```

230 *ESCENARIO 5
231 E5_demanda1(k,p).. E5_demanda(k,p)-E5_x2(k,p)=e= 0;
232 E5_capacidad3(k).. sum(p, E5_x2(k,p)) =l= E5_capacidadk(k);
233 E5_maxship1(k,p).. E5_x2(k,p) =l= E5_bigM1*E5_Y(k,p);
234 E5_maxship2(k,p).. E5_x2(k,p) =l= E5_bigM2*E5_W(k,p);
235
236 option limRow = 0, limCol = 0, optCr = 0;
237
238 Model TTG_JESSICA / all /;
239 solve TTG_JESSICA using mip minimizing CT;
240
241 Display x1.l, z.l, E1_x2.l, E1_W.l,E1_Y.l,E2_x2.l,E2_W.l,E2_Y.l,E3_x2.l,E3_W.l,E3_Y.l,E4_»
x2.l,E4_W.l,E4_Y.l,E5_x2.l,E5_W.l,E5_Y.l;
242 execute unload "resultados_TTG.gdx" x1.l, z.l, E1_x2.l, E1_W.l,E1_Y.l,E2_x2.l,E2_W.l,E2_Y»
.l,E3_x2.l,E3_W.l,E3_Y.l,E4_x2.l,E4_W.l,E4_Y.l,E5_x2.l,E5_W.l,E5_Y.l
243 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=x1.L rng=x1!'
244 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=z.L rng=z!'
245
246 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=E1_x2.l rng=E1_x2!'
247 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=E1_W.l rng=E1_W!'
248 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=E1_Y.l rng=E1_Y!'
249
250 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=E2_x2.l rng=E2_x2!'
251 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=E2_W.l rng=E2_W!'
252 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=E2_Y.l rng=E2_Y!'
253
254 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=E3_x2.l rng=E3_x2!'
255 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=E3_W.l rng=E3_W!'
256 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=E3_Y.l rng=E3_Y!'
257
258 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=E4_x2.l rng=E4_x2!'
259 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=E4_W.l rng=E4_W!'
260 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=E4_Y.l rng=E4_Y!'
261
262 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=E5_x2.l rng=E5_x2!'
263 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=E5_W.l rng=E5_W!'
264 execute 'gdxxrw.exe resultados_TTG.gdx c=resultados_TTG.xls var=E5_Y.l rng=E5_Y!'
265

```