

OPTIMIZACIÓN MULTIOBJETIVOS DE CADENAS DE TRANSPORTE INTERMODAL PARA SUMINISTRO DE AUTOPARTES EN UN DÍA DETERMINADO

MULTIOBJECTIVES OPTIMIZATION FOR INTERMODAL TRANSPORT CHAIN TO SUPPLY AUTO PARTS IN A SPECIFIC DAY

Jasso-Carbajal M.C.^{1*}, Almazán-Torres E. ¹

¹ División de Ingeniería Industrial de la Universidad Politécnica del Valle de Toluca, km. 5.6 carretera Toluca-Almoloya de Juárez, Santiaguito Tlalcilcali, C.P. 50904, Almoloya de Juárez, Estado de México.

*mariacristinajasso@upvt.edu.mx

RESUMEN

El propósito principal de este trabajo fue desarrollar un modelo matemático que ayude a resolver problemas de optimización con dos objetivos: con el fin de seleccionar la mejor cadena de transporte intermodal para el abastecimiento de autopartes de Europa a Toluca, considerando la disponibilidad de rutas en un momento determinado. Primero, se propuso construir un centro de consolidación de carga en Europa, que sustituyera al anterior. Las rutas modales potenciales fueron evaluadas desde ese centro de consolidación hasta el destino final, Toluca. Posteriormente se reunió la información sobre proveedores de los modos de transporte, avión, barco, camión, tren; y los costos y tiempos de recorrido y transbordo. Enseguida se construyó la red de transporte intermodal. Se encontró que las rutas no estaban conectadas todos los días debido a la disponibilidad de los proveedores, por lo que se debían diseñar las redes de transporte para cada día de la semana, principalmente porque las navieras tenían salidas semanales con destino a México. El modelo matemático se formuló como uno de optimización que considera costo y tiempo de recorrido y de transbordo, resultando un modelo matemático de la distancia más corta con restricciones adicionales. El lenguaje

de modelación GAMS-Cplex fue utilizado para la solución, generando un conjunto de soluciones de la frontera de eficiencia, a través del método ε -restricción.

Palabras clave: distancia más corta; ε -restricción; frontera de eficiencia; momento determinado; optimización multiobjetivos.

ABSTRACT

The main objective of this work was to build a mathematical model that helps solve optimization problems with two objectives: to select the best intermodal transport chain for the supply of auto parts from Europe to Toluca, considering the availability of routes at a specific day. First, a load consolidation center was proposed to build in Europe, which would replace the previous one. The potential modal routes were evaluated from that consolidation center to the final destination, Toluca. Subsequently, information was gathered on suppliers of means of transportation, airplane, ship, truck and train; and the costs and times of travel and transshipment were obtained. Then the intermodal transport network was built. It was found that the routes were not connected every day due to the availability of the suppliers, so the transport networks had to be designed for each day of the week, mainly because the shipping companies had weekly departures to Mexico. The mathematical model was formulated as one of optimization that considers cost and time of travel and transfer, resulting in a mathematical model of the shortest path with additional constraints. GAMS-Cplex modeling language was used to solve this one, generating a set of efficiency frontier solutions, through the ε -constraint method.

Keywords: ε -constraint method; efficiency frontier; multiobjectives optimization; specific day; shortest path problem.

INTRODUCCIÓN

Como resultado de la globalización de las cadenas de abastecimiento, el transporte de carga ha asumido una nueva dimensión e importancia. Debido al crecimiento de la economía de las últimas dos décadas, los movimientos de bienes se han incrementado sustancialmente en el mundo en todos los segmentos y modos de transporte: en los tramos nacionales (transporte carretero, ferroviario, aéreo y fluvial), en los nodos de transferencia (como los puertos y los aeropuertos) y en los tramos de transporte internacional (marítimo, aéreo y carretero) [1]. El crecimiento del transporte intermodal también ha sido notable. Una prueba de ello es el incremento de terminales intermodales en el país, ya que en el año 2002 existían 21, para el año 2007 ya eran 56, de las cuales siete eran terminales privadas automotrices y 49 públicas [2]. En 2014 operaron 55 terminales de carga

permisionadas y 10 terminales de carga operadas por concesionarios ferroviarios [3]. En particular, el sector automotriz tiene una estrecha colaboración con clientes y proveedores ubicados en todo el mundo, principalmente en Estados Unidos de América, Canadá y Europa. Para soportar los procesos de producción y de servicio al cliente a través de las partes de repuesto, las armadoras recurren a proveedores ubicados fuera de México.

La toma de decisiones efectiva sobre la elección de rutas intermodales para hacer llegar un producto de un origen a un destino en un entorno global, requiere de un análisis cuidadoso que tome en cuenta todas las posibilidades de transporte disponibles en un momento determinado. Esa decisión es complicada debido a las características de las instalaciones con que cuenta cada punto de transbordo, el acuerdo comercial definido entre proveedor-cliente, la velocidad, la

confiabilidad de todo el trayecto, la capacidad y costos asociados a cada modo. Muchos de estos factores son conflictivos entre ellos, lo que es mejor para uno puede ser malo para el otro. Por ejemplo, el transporte marítimo es menos frecuente y más lento que el aéreo, pero notablemente más barato. Por lo tanto, es relevante proporcionar un mecanismo que permita a las empresas diseñar la cadena de transporte intermodal más eficiente entre ellas y sus proveedores.

Robinson y Bookbinder [4] desarrollaron un modelo de programación entera mixta para el diseño de la red de transporte entre Canadá, Estados Unidos y México, bajo el Tratado de Libre Comercio con América del Norte (TLCAN); optimizaron los costos totales de la distribución a través de los modos camión y ferrocarril, considerando capacidades variables; en este caso de estudio determinaron la ubicación de proveedores, mercados y centros de distribución y se obtuvieron

ahorros en costos anuales. Gaytán, Pérez y García [5] propusieron una metodología multicriterio para el rediseño de la cadena de transporte de una empresa ubicada en México; formularon un modelo de optimización bicriterio considerando costo y tiempo de entrega; usaron la metaheurística NSGA-II para obtener un subconjunto de soluciones representativas de la frontera Pareto, las cuales se valoraron después mediante el criterio confiabilidad utilizando el proceso de jerarquización analítica. Chang [6] modeló la selección de modos de transporte formulando un problema de flujo multiservicios, multimodal y multiobjetivos, considerando las ventanas de tiempo que existen en cada modo; el modelo lo resolvió haciendo uso de relajación lagrangiana para descomponer el problema original en subproblemas a los cuales se les aplicó algoritmos de la distancia más corta con ventanas de tiempo. Mejía, Arroyo y Gaytán [7],

formularon un modelo de optimización que considera costo y tiempo; dividieron el problema y lo resolvieron con relajación lagrangiana; utilizaron el método de las ponderaciones y el de la ε -restricción para identificar el conjunto de soluciones eficientes.

En problemas multiobjetivos, éstos están siempre en conflicto, pues la solución óptima para un objetivo no es la solución óptima para los otros; de hecho, la mejora en un objetivo suele implicar el empeoramiento de los demás; por eso el concepto de solución óptima de los problemas con un único objetivo es reemplazado por el concepto de solución eficiente en los problemas multiobjetivos; una solución se dice eficiente si la única manera de mejorar uno de los objetivos es empeorar alguno(s) de los restantes objetivos; en general, los problemas multiobjetivos suelen tener muchas soluciones eficientes, y quien toma las

decisiones suele elegir alguna entre ellas teniendo en cuenta los valores que alcanzan los distintos objetivos en las soluciones eficientes [8].

METODOLOGÍA

El presente caso de estudio se refiere a una empresa ubicada en Toluca, Estado de México, dedicada al ensamble de autos y camionetas para el mercado nacional e internacional. Para poder satisfacer sus líneas de producción y el servicio al cliente a través de las partes de repuesto, la empresa ha trabajado con 174 proveedores localizados en Europa. Geográficamente, el mayor número de proveedores se encuentran en Alemania (41 %), España (22 %) y Francia (9 %), y el resto en Italia, Inglaterra, Mónaco, Polonia, Portugal, Bélgica y Hungría (28 %). El 78 % de la carga importada de Europa se encuentra concentrada en 18 empresas, equivalente al 10 % de los proveedores. En años pasados, las

compras realizadas a los proveedores europeos sumaron 51 millones de pesos anuales. La empresa realizó cerca de 1482 operaciones con los proveedores, ocasionando costos de transporte de alrededor de siete millones de pesos anuales. También se reportaron incrementos en los costos de transporte debido a que hubo más recorridos de las plantas de los proveedores al nodo de consolidación de carga, el puerto de Antwerp en Bélgica, a través de un operador logístico, quien opera bajo términos de comercio internacional (Incoterm Exwork) [9].

Una vez embarcada la mercancía en Antwerp, se transportaba por barco al puerto de Veracruz y posteriormente a Toluca por camión. El costo de transporte para las importaciones se componía del costo terrestre de cada proveedor al puerto marítimo Antwerp; del puerto Antwerp, al puerto de arribo en Veracruz, México; y del costo terrestre del puerto de

Veracruz hasta la ciudad de Toluca.

Frecuentemente los proveedores tenían la necesidad de enviar cargas pequeñas al centro de consolidación y utilizaban sólo un modo de transporte; no se consideraba que existen otros modos de transporte que pueden ser más efectivos. La práctica podía mejorarse, pues no se seguía ninguna metodología que garantizara que esta importación de autopartes fuera la que otorgara costos y tiempos de recorrido menores, de acuerdo a las condiciones para embarcar en un momento determinado. Se determinaron supuestos como: manejar contenedores para barco de 20 pulgadas y su equivalente en tamaño para avión; la demanda de embarque es para un día determinado; la mejor decisión se toma para un contenedor en particular; los costos de inventario son ignorados para el presente caso de estudio, así como la confiabilidad de las empresas transportistas. La metodología que se

utilizó es la siguiente:

1. Proponer la construcción de un centro de consolidación de carga, identificando geográficamente a los proveedores europeos.
2. Identificar las rutas intermodales potenciales de los diferentes modos de transporte del centro de consolidación en Europa y México.
3. Estimar costos y tiempos de recorrido y de transbordo para cada empresa que preste el servicio.
4. Construir la red que represente a las cadenas de transporte intermodal.
5. Construir el modelo de optimización.
6. Resolver el modelo de optimización.
7. Construir la frontera de eficiencia para identificar el conjunto de soluciones eficientes.

RESULTADOS

Centro de consolidación de carga. Se sugirió a la empresa construir un centro de

consolidación de carga de contenedores, basados en reducir los costos de transporte evitando envíos de embarques pequeños de cada proveedor al puerto de consolidación actual; los pequeños volúmenes se pueden atender diseñando rutas de recolección de las instalaciones de los proveedores; los tiempos y costos de transporte se pueden mejorar identificando nuevas rutas que hagan uso de esquemas de transporte intermodal, para un día determinado. El método adecuado fue el del centro de gravedad. Éste toma en cuenta la ubicación de los mercados, el volumen de productos que se embarca a esos mercados y los costos de embarque, para encontrar la mejor localización de un centro de distribución [10]. Este centro de consolidación de carga debía ubicarse en Metz, Francia; tiene conectividad ferroviaria [11] y por carretera [12].

Modos de transporte. Los modos de transporte considerados fueron avión,

barco, camión y tren. Se tomaron en cuenta las navieras publicadas en el semanario “Carga y Mar”, publicación especializada en transporte de carga, cadena logística y servicios relacionados [13]. Se propusieron como nodos de transbordo los aeropuertos Charles de Gaulle, D’Orly, Metz-Nancy y Lyon, todos en Francia, por la conectividad que hay con Metz [12]; puertos marítimos de Le Havre en Francia, de Antwerp en Bélgica, de Rotterdam en Holanda y de Bremerhaven en Alemania; el puerto de

Altamira en Tamaulipas y el de Veracruz [13]; el aeropuerto Benito Juárez en la ciudad de México, y de allí a Toluca. Revisando el semanario “Carga y Mar” se encontró que la frecuencia de salida de las navieras de cualquier puerto elegido en Europa es de forma semanal [13].

La red. Se realizaron tablas de tiempos y de costos de recorrido para la construcción de una red general, enseguida se muestra un fragmento de la tabla de tiempos (el tiempo de transbordo ya está integrado) (**Figura 1**)

SEGMENTO MODAL		TIEMPO - GENERAL (DIAS)											
		P R O V E E D O R E S											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		DASCHER LOGISTI	HA CAS TRANSPORT	TRANSFESA	SNCF FRET	RURTALBAHN CARGO	SNCB LOGISTICS	ERS RAILWAYS	TRANSPORT	AERO MEXICO	AIR CANADA	BRITISH AIRWAYS	AIR FRANCE
1.2.3	METZ - CHARLES - CAMIÓN	1.6	1.3	1.5									
1.2.4	METZ - CHARLES - TREN				2.9	2.9	2.8						
1.3.3	METZ - D'ORLY - CAMIÓN	1.4	1.7	1.9									
1.3.4	METZ - D'ORLY - TREN				2.4	2.8	2.6						
1.4.3	METZ - METZ NANCY - CAMIÓN	1.3	1.0	1.2									
1.4.4	METZ - METZ NANCY - TREN				2.3	2.0	2.1						
1.5.3	METZ - LYON - CAMIÓN	3.1	3.0	3.0									
1.5.4	METZ - LYON - TREN				5.1	4.9	5.1						
1.6.3	METZ - LE HAVRE - CAMIÓN	3.0	2.2	2.4									
1.6.4	METZ - LE HAVRE - TREN				4.2	4.0	3.7						
1.7.3	METZ - ANTWERP - CAMIÓN	2.3	2.4	2.5									
1.7.4	METZ - ANTWERP - TREN					4.4	4.3	4.8					
1.8.3	METZ - ROTTERDAM - CAMIÓN	2.8	2.7	3.0									
1.8.4	METZ - ROTTERDAM - TREN					4.9	4.6	5.1					
1.9.3	METZ - BREMERHAVEN - CAMIÓN	3.2	3.0	2.9									
1.9.4	METZ - BREMERHAVEN - TREN					4.5	4.8	4.9					
2.10.1	CHARLES - MÉXICO - AVIÓN								1.8	1.6	2.2		
3.10.1	D'ORLY - MÉXICO - AVIÓN									1.8	2.5		
4.10.1	METZ NANCY - MÉXICO - AVIÓN											2.2	
5.10.1	LYON - MÉXICO - AVIÓN									2.6	2.4		

Figura 1. Tiempos de recorrido y transbordo para la red general.

La información se lee así: para ir de Metz al aeropuerto de Charles por camión (alfabéticamente: avión, barco, camión, tren) se cuenta con tres proveedores: con Dascher Logistics (1), con HaCas Transport (2) y con Transfesa (3), con los tiempos de recorrido en días; por tren se cuentan con tres proveedores (4, 5, 6). Estos mismos proveedores están disponibles para ir de Metz a D'Orly, Metz-Nancy, Lyon y Le Havre. Y la misma analogía se hace para el resto de la información. El modelo matemático se construiría a partir de esta red general

(Figura 2), es decir, suponiendo que siempre hay disponibilidad de las empresas de logística.

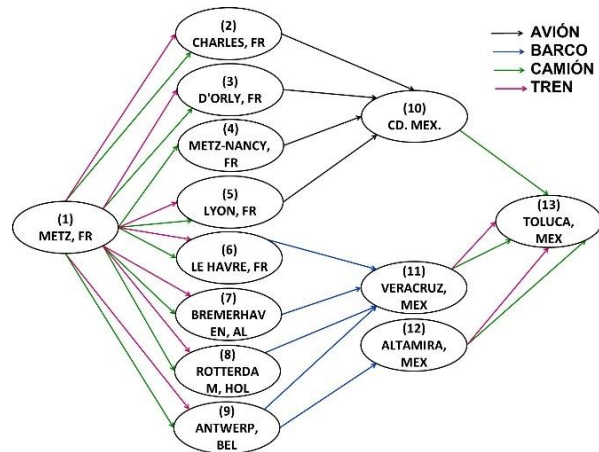


Figura 2. Red general de transporte para cualquier día de la semana.

Sin embargo, por razón anterior se quitarán los nodos que no tengan

conectividad para un día específico, entonces también en las tablas de costos y tiempos, la celda correspondiente estará vacía para el día en cuestión; enseguida se muestra un fragmento de la tabla de tiempos para el lunes, donde se observa que no hay disponibilidad de transporte de camión y de tren de Metz al aeropuerto

D'Orly; la empresa Dascher Logistics no da servicio de camión los lunes de Metz a cualquiera de los nodos sucesivos; también no hay conectividad por camión o por tren de Metz a los puertos de Antwerp, Rotterdam y Bremerhaven (**Figura 3**)

SEGMENTO MODAL		TIEMPO - LUNES (DIAS)											
		P R O V E E D O R E S											
		1 DASCHER LOGISTICS	2 HA CAS TRANSPORT	3 TRANSFESA	4 SNCF FRET	5 RURTLBAHN CARGO	6 SNCB LOGISTICS	7 ERS RAILWAYS	8 TRANSPORT	9 AERO MEXICO	10 AIR CANADA	11 BRITISH AIRWAYS	12 AIR FRANCE
1.2.3	METZ - CHARLES - CAMIÓN		1.3	1.5									
1.2.4	METZ - CHARLES - TREN				2.9	2.9	2.8						
1.3.3	METZ - D'ORLY - CAMIÓN												
1.3.4	METZ - D'ORLY - TREN												
1.4.3	METZ - METZ NANCY - CAMIÓN		1.0	1.2									
1.4.4	METZ - METZ NANCY - TREN				2.3	2.0	2.1						
1.5.3	METZ - LYON - CAMIÓN		3.0	3.0									
1.5.4	METZ - LYON - TREN				5.1	4.9	5.1						
1.6.3	METZ - LE HAVRE - CAMIÓN		2.2	2.4									
1.6.4	METZ - LE HAVRE - TREN				4.2	4.0	3.7						
1.7.3	METZ - ANTWERP - CAMIÓN												
1.7.4	METZ - ANTWERP - TREN												
1.8.3	METZ - ROTTERDAM - CAMIÓN												
1.8.4	METZ - ROTTERDAM - TREN												
1.9.3	METZ - BREMERHAVEN - CAMIÓN												
1.9.4	METZ - BREMERHAVEN - TREN												
2.10.1	CHARLES - MÉXICO - AVIÓN								1.6	2.2			
3.10.1	D'ORLY - MÉXICO - AVIÓN												
4.10.1	METZ NANCY - MÉXICO - AVIÓN											2.2	
5.10.1	LYON - MÉXICO - AVIÓN								2.6	2.4			

Figura 3. Tiempos de recorrido y transbordo para el lunes.

De aquí la importancia de una red dinámica. Entonces se construyeron las redes de lunes a domingo; las redes del lunes y jueves son mostradas en la **figura 4** y **5**, respectivamente. Éstas muestran que no es posible programar un embarque

un día en particular, sin considerar la disponibilidad de los prestadores de servicios de transporte, pues determinan que el tiempo y costo de este envío puede variar según el día de la semana en que se decida embarcar.

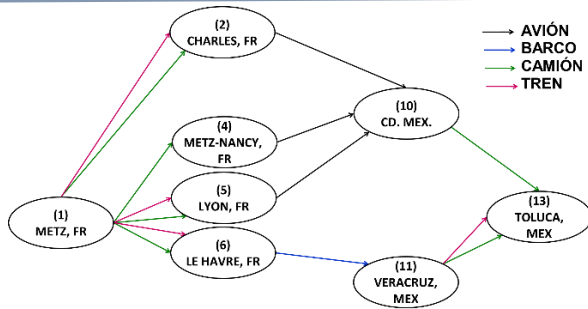


Figura 4. Red del lunes.

Por ejemplo, la red del lunes tiene ocho nodos y 14 segmentos modales, mientras que la red del jueves tiene 7 nodos y solamente nueve segmentos modales.

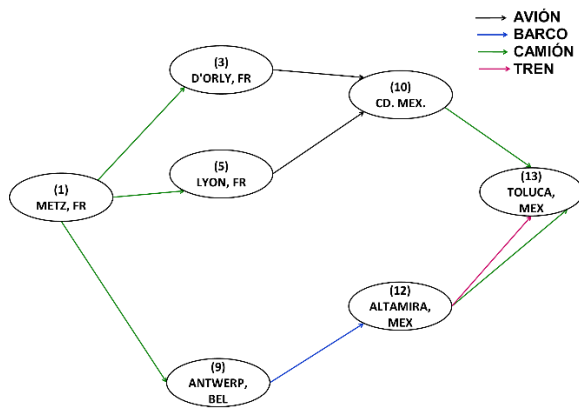


Figura 5. Red del jueves.

Modelo matemático. Sea la red dirigida $G = (N, A)$ que consta de un conjunto finito de nodos origen y nodos destino $N = \{1, 2, 3, \dots, n\}$, $M = \{1, 2, 3, 4\}$, $P = \{1, 2, \dots, 23\}$, donde n indica el número de

nodos para cada día de la semana, para este caso $n = 13$, M son los cuatro modos de transporte ($1 = avión, 2 = barco, 3 = camión, 4 = tren$) y P son los 23 proveedores logísticos; y de un conjunto de arcos dirigidos asociados a cada segmento modal $A = \{(i, j, m, p) \mid i, j \in N, m \in M, p \in P\}$, que unen pares de nodos en N ; el arco (i, j, m, p) es incidente en los nodos i y j . El modelo considera que i es el nodo origen, j es el nodo siguiente que sirve de conexión para el nodo final; $S(i)$ es el conjunto de nodos sucesores inmediatos de i , y $P(i)$ es el conjunto de nodos predecesores inmediatos de i . Entonces se definen:

a) Los parámetros (conocidos y constantes)

c_{ijmp} : es el costo de recorrido por contenedor a través del arco $(i, j, m, p) \in A$

a_{jm1m2} : es el costo de transbordo en el nodo j del modo $m1$ al modo $m2$

t_{ijmp} : es el tiempo de recorrido a través del arco $(i, j, m, p) \in A$

d_{jm1m2} : es el tiempo de transbordo en el nodo j del modo $m1$ al modo $m2$

b) Las variables de decisión:

$$x_{ijmp} = \begin{cases} 1, & \text{si se une } i \text{ con } j, \text{ usando el modo } m \text{ con el proveedor } p \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (1)$$

$$\forall (i, j, m, p) \in A$$

$$y_{jm1m2} = \begin{cases} 1, & \text{si en el nodo } j \text{ se transborda del modo } m1 \text{ al modo } m2 \\ 0, & \text{en otro caso} \end{cases} \quad (2)$$

$$\forall j \in N, \text{ con } m1, m2 = 1, 2, 3, 4$$

El modelo matemático se muestra como sigue:

$$\text{Min} = \sum_{(ijmp) \in A} c_{ijmp} x_{ijmp} + \sum_{j \in N} \sum_{m1=1}^4 \sum_{m2=1}^4 a_{jm1m2} y_{jm1m2} \quad (3)$$

$$\text{Min} = \sum_{(ijmp) \in A} t_{ijmp} x_{ijmp} + \sum_{j \in N} \sum_{m1=1}^4 \sum_{m2=1}^4 d_{jm1m2} y_{jm1m2} \quad (4)$$

Sujeta a:

$$\sum_{p=1}^{23} \sum_{m=1}^4 \sum_{j \in S(i)} x_{ijmp} - \sum_{p=1}^{23} \sum_{m=1}^4 \sum_{j \in P(i)} x_{ijmp} = \begin{cases} 1, & \text{si } i = 1 \\ 0, & \text{si } i \neq 1, n \\ -1, & \text{si } i = n \end{cases} \quad (5)$$

$$x_{ijm1p} \leq \sum_{m2=1}^4 y_{jm1m2} \quad \forall (i, j, m1, p) \in A, j \neq n \quad (6)$$

$$x_{jkm2p} \geq \sum_{m1=1}^4 y_{jm1m2} \quad \forall (j, k, m2, p) \in A \quad (7)$$

$$\sum_{m=1}^4 x_{ijmp} \leq 1 \quad \forall (ij) \in N, p \in P \quad (8)$$

$$\sum_{p=1}^{23} x_{ijmp} \leq 1 \quad \forall (ij) \in N, m \in M \quad (9)$$

$$x_{ijmp} \in \{0,1\} \quad \forall (i, j, m, p) \in A \quad (10)$$

$$y_{jm1m2} \in \{0,1\} \quad \forall j \in N, \quad \text{con } m1, m2 = 1, 2, 3, 4 \quad (11)$$

Las expresiones (3) y (4) son las funciones objetivo que expresan la minimización del costo y del tiempo de recorrido y de transbordo, respectivamente; la expresión (5) indica que una unidad de flujo que sale del nodo i , es igual a una unidad de flujo que entra al nodo j (conservación de flujo), estas restricciones pertenecen al problema de la distancia más corta [14]. Las expresiones (6) y (7) garantizan que sólo un transbordo a cualquier modo de transporte puede ocurrir en cada nodo; la expresión (8) indica que sólo se

puede utilizar un modo de transporte en cada nodo; la expresión (9) muestra que puede utilizarse sólo un proveedor en cada nodo; las expresiones anteriores corresponden a un problema de la distancia más corta con restricciones adicionales [14]. Las expresiones (10) y (11) indican que las variables x y y son binarias, tomarán valores de 0 ó 1.

La estructura del modelo matemático es de la distancia más corta con dos objetivos en conflicto y restricciones adicionales, pues mientras uno busca el costo mínimo, el otro busca la distancia

más corta, lo que significa que no se encontrará un punto óptimo donde el costo y el tiempo sean menores. Sin embargo, puede encontrarse una gama de buenas soluciones [14].

El modelo matemático es el mismo para cada día de la semana, lo que cambia es la disponibilidad de las rutas (mismas que se tomarán en cuenta en la solución del modelo). En lo sucesivo, se mostrarán las soluciones para los días lunes y jueves, exclusivamente. Este modelo resultante se resolvió a través del lenguaje General Algebraic Modeling System (GAMS) con el solver Cplex [15], ya que resultó ser un modelo pequeño, por lo que no hay necesidad de recurrir a algún algoritmo para su solución; en este lenguaje de programación, las tablas de tiempos y costos para cada día de la semana son muy importantes, con ellas no es necesario tener un modelo matemático para cada día de la semana.

DISCUSIÓN

Alternativa de solución. Para cuando existen varios objetivos, la programación multiobjetivos pretende establecer el conjunto de soluciones eficientes o Pareto óptimas (frente Pareto), en vez de buscar un único óptimo [8]. La frontera de soluciones eficientes o frente Pareto, está formada por soluciones factibles, tales que no existe otra solución factible que proporcione una mejora en un objetivo sin producir un empeoramiento en al menos otro de los objetivos; el frente Pareto es el conjunto de parejas (f_1, f_2) asociados a cada punto eficiente [16]. El método de las restricciones (ε -Constraint Method) es la técnica de generación de soluciones eficientes; opera a través de la optimización de un objetivo mientras que a los otros objetivos se les asigna un nivel de aspiración, incorporándolos al conjunto de restricciones, como una restricción paramétrica. Para cada valor

que se dé a este parámetro o nivel de aspiración, se obtendrá un elemento del conjunto de soluciones eficientes [17].

Para este caso de estudio, las soluciones eficientes para el lunes resultaron ser siete (**Tabla 1**).

Tabla 1. Soluciones eficientes para lunes.

NO.	ARCO	MODOS DE TRANSFERENCIA	PROVEEDOR	COSTO (\$)	DÍAS
1	Metz-Charles-México-Toluca	Camión-avión-camión	2,10,17	104,289	5.4
2	Metz-Metz/Nancy-México-Toluca	Camión-avión-camión	3,12,17	99,993	5.9
3	Metz-Metz/Nancy-México-Toluca	Camión-Avión-Camión	5,12,17	98,665	6.7
4	Metz-Le Havre-Veracruz-Toluca	Camión-barco-camión	2,14,19	80,072	23.6
5	Metz-Le Havre-Veracruz-Toluca	Camión-barco-camión	3,14,20	68,962	24.4
6	Metz-Le Havre-Veracruz-Toluca	Tren-barco-camión	6,14,21	62,830	25.8
7	Metz-Le Havre-Veracruz-Toluca	Tren-barco-camión	4,14,20	61,022	26.4

La ruta ideal por ser la del menor tiempo de recorrido es la uno, pero es la menos ideal por tener el costo más elevado; la ruta siete es la ideal por ser la más barata, y al mismo tiempo la menos ideal por ser la del mayor tiempo de recorrido; las rutas tres y cuatro podrían considerarse como las que brindan intermedios en cuanto a costo, con \$18,593 de diferencia y 16.9 días de

diferencia en recorrido.

Los puntos eficientes (o no dominados) se presentan a continuación (**Figura 4**). A partir de aquí, el tomador de decisiones deberá elegir la estrategia que mejor satisfaga las necesidades de embarque para un día en particular, dependiendo de la disponibilidad de los proveedores con los que se trabaje.

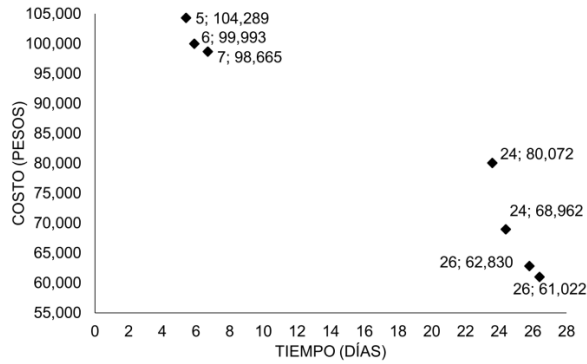


Figura 4. Puntos no dominados en el espacio de soluciones del lunes.

También se muestran las cuatro

soluciones eficientes para el jueves (Tabla 2); para este caso, la mejor ruta debido al menor tiempo de recorrido es la uno, pero es la peor porque el costo es el más elevado; de igual forma, la mejor ruta es la cuatro por tener el menor costo, y al mismo tiempo la peor por tener el tiempo de recorrido más largo.

Tabla 2. Soluciones eficientes para jueves.

NO.	ARCO	MODOS DE TRANSFERENCIA	PROVEEDOR	COSTO (\$)	DÍAS
1	Metz-D'Orly-México-Toluca	Camión-avión-camión	1,10,17	98,531	5.7
2	Metz-D'Orly-México-Toluca	Camión-avión-camión	3,10,17	98,215	6.2
3	Metz-Antwerp-Altamira-Toluca	Camión-barco-camión	1,14,18	74,712	30.7
4	Metz-Antwerp-Altamira-Toluca	Camión -barco-camión	1,15,21	64,300	39.0

Los puntos eficientes (o no dominados) del jueves se presentan a continuación (figura 5).

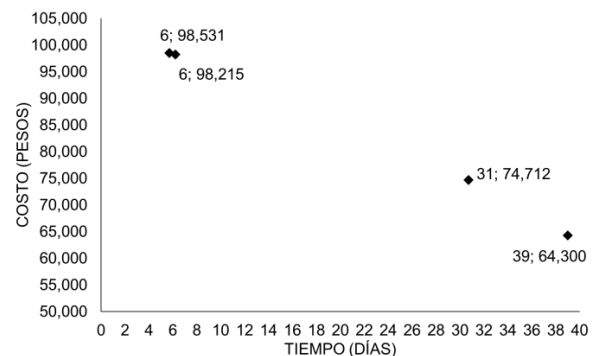


Figura 5. Puntos no dominados en el espacio de soluciones del jueves.

CONCLUSIONES

En un ambiente global de negocios, las empresas tienen la necesidad de poner atención especial en los costos y tiempos de transporte, de tal manera que aseguren su posición actual y futura en el mercado, cada vez más competitivo. Para que se logre lo anterior, es necesario hacer uso del transporte intermodal, considerando que cada empresa es especial, por lo que se necesitan utilizar diferentes metodologías para encontrar aquella solución que satisfaga la optimización de ambos criterios, costo y tiempo. Sin embargo, para que la toma de decisiones sea efectiva, se requiere de un análisis cuidadoso que considere todas las posibilidades de transporte disponibles en un momento determinado. Es decir, aun cuando un origen tenga conectividad con un destino, no necesariamente indica que la ruta puede ser utilizada en cualquier momento.

En este caso de estudio se propuso construir un centro de consolidación de carga; para su ubicación se utilizó el método del centro de gravedad. Se usó la optimización multiobjetivos para el diseño de cadenas de transporte intermodal de lunes a domingo, considerando costos y tiempos de recorrido y de transbordo, así como la disponibilidad de las rutas también de lunes a domingo. Fue formulado un modelo matemático que resultó ser de la distancia más corta con restricciones adicionales; se utilizó el lenguaje de programación Gams-Cplex para su solución, empleando el método ϵ -restricción para generar el conjunto de soluciones eficientes. De esta manera, se identificaron rutas y modos de transporte que antes no estaban siendo considerados, implicando con ello mayores costos que los que sugiere esta metodología.

Esta metodología puede ser adoptada

por empresas que tengan la necesidad de disminuir sus costos y tiempos de transporte, debido a la importación y/o exportación de productos entre Europa y Toluca.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco enormemente al doctor Juan Gaytán Iniestra, profesor investigador de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma del Estado de México, por el apoyo brindado para la realización del presente trabajo.

REFERENCIAS

[1] Barbero, J. A., Guerrero, P. (2017). El transporte automotor de carga en América Latina: soporte logístico de la producción y el comercio. Banco Interamericano de Desarrollo. Monografía IDB-MG-482, pág. 14.

[2] Martner, C., Pérez, J. A., y Herrera A. (2008). "Diagnóstico General sobre la Plataforma Logística de Transporte de Carga en México", Secretaría de Comunicaciones y Transportes, Instituto Mexicano Del Transporte. Publicación Técnica No. 233, Sanfandila, Querétaro

[3] Dirección General de Desarrollo Ferroviario y Multimodal (2014). Anuario estadístico: Terminales de carga 2014. Anuarios Dirección General de Transporte Ferroviario y Multimodal Edición Digital. Secretaría de Comunicaciones y Transportes. <http://www.sct.gob.mx/transporte-y-medicina-preventiva/transporte-ferroviario-y-multimodal/anuarios-dgtfm-edicion-digital/>. Fecha de consulta 15 de enero de 2015

[4] Robinson, A. G., Bookbinder, J. H. (2007). "NAFTA Supply Chains: Facilities Location and Logistics". International Transactions in Operational Research, vol. 14, no. 2, pp. 179-199.

[5] Gaytán, J., Pérez, J., García, J. (2007). A Multi-criteria Decision Framework for the Transportation Network Redesign for an Auto Parts Company under an Evolutionary Approach. Memorias del RED-M 2007, Culiacán, Sin. México.

[6] Chang, T.S. (2008). Best routes selection in international intermodal networks. Computers & Operations Research. In press, vol. 35, no. 9, pp. 2877–2891.

[7] Mejía-Argueta, C., Arroyo-López, P.E., Gaytán-Iniestra, J. (2014). Un enfoque multicriterio para el diseño de una red para el transporte de embarques internacionales. Facultad de Contaduría y Administración, Universidad Nacional Autónoma de México, Vol. 59, no. 4, pp. 193-221.

- [8] Deb, K. (2008). Multi-Objective Optimization using Evolutionary Algorithms. 1st Edition. John Wiley & Sons Ltd.
- [9] International Chamber of Commerce México (ICC). Incoterms 2010. <https://www.iccmex.mx/comisiones-de-trabajo/incoterms-2010/las-reglas-incoterms>. Fecha de consulta 30 de diciembre de 2013.
- [10] Collier, D. A, Evans, J. R (2009). Administración de operaciones. 2ª. Edición, Cengage Learning, pp. 379-382.
- [11] Raileurope (2014). Red ferroviaria de Francia. https://es.oui.sncf/media/carte/Carte_GENERALE_EN.pdf. Fecha de consulta 13 de febrero de 2014.
- [12] Google maps (2014). Ubicación de Metz, Francia. <https://www.google.com/maps>. Fecha de consulta 20 de febrero de 2014.
- [13] Semanario “Carga y Mar” (2012), Publicación Especializada en Transporte de Carga, Cadena Logística y Servicios Relacionados. Impresiones Modernas, SA de CV. www.imprimo.com.mx/cargaymar.html. Fecha de consulta 15 de marzo del 2014.
- [14] Ahuja, R. K. Magnanti, T. L. and Orlin, J. B. (2014). Network Flows: Theory, Algorithms, and Applications. Pearson Education.
- [15] Lenguaje de programación GAMS-CPLEX (2014). Definición de Gams-Cplex. https://www.gams.com/latest/docs/UG_Introduction.html. Fecha de consulta 25 de marzo de 2014.
- [16] Eusébio, A, Figueira, J. R. (2009). Finding non-dominated solutions in biobjective integer network flow problems. Computers and Operations Research vol. 36, no. 9, pp. 400-416.
- [17] Dehghan, S., Kazemi, A., Adjady N. (2014). Multi-objective robust transmission expansion planning using information-gap decision theory and augmented ε – constraint method. The Institution of Engineering and Technology. Vol. 8, no. 5, pp. 828-840.