

UN MODELO PARA EL ENRUTAMIENTO DE NAVES TRAMP CON LIMITACIÓN DE CALADO Y TIEMPO DE ACCESO A LOS SITIOS

F. López-Ramos, PUCV, francisco.lopez.r@ucv.cl
R-G. González-Ramírez, UANDES, rgonzalez@uandes.cl
A. Guarnaschelli, PUCV, armando.guarnaschelli@ucv.cl
D. Hirmas, PUCV, davidhirmas@gmail.com
M. Sanhueza, PUCV, marco.sanhueza@live.cl

RESUMEN

Este trabajo estudia el enrutamiento de naves tramp así como su planificación considerando la capacidad del sitio y la posibilidad de dividir la carga. Se propone un modelo de optimización para su resolución incluyendo las características mencionadas. La capacidad del sitio considera tanto la limitación de calado como su disponibilidad temporal. El modelo es validado usando un caso de aplicación real basado en una compañía naviera chilena. Esta validación considera tanto aspectos de calidad de la solución como de desempeño computacional.

Palabras clave: Enrutamiento de naves tramp, capacidad del sitio, división de la carga.

This work studies the tramp ship routing and scheduling problem considering berth capacities and load splitting. An optimisation model to solve this problem including these features is proposed. Capacity is modeled alongside two dimensions: draft capacity at docking places and their temporal availability. The model is validated using a real-world case study based on a Chilean shipping company. A discussion on the quality of the model is given considering both computational performance and applicability.

Keywords: Tramp ship routing, berth capacity, load splitting.

1. INTRODUCCIÓN

Alrededor al 80 % del comercio internacional se realiza por modo marítimo. Ello posiciona al transporte marítimo como el primer modo de transporte para comercio exterior. A pesar de que el tráfico marítimo disminuye en los últimos años, en el 2013 volvió a resurgir con un aumento del 3.8 %. La flota mundial ha experimentado un crecimiento continuo del 4.1 % anual en el 2013, alcanzando un total de 1.69 billones de tpm en Enero del 2014 (UNCTAD, 2014). Las compañías navieras están constantemente buscando conseguir economías de gran escala de modo de conseguir reducir los costos de transporte. Estos son altamente influenciados por el precio del combustible y, por ello, la planificación de sus rutas es un tema crítico.

Las compañías navieras operan con una flota de vehículos que proveen transporte marítimo a clientes, los cuales pueden ser importadores o exportadores de mercancía. Las decisiones a tomar radican a nivel táctico y operacional, considerando el enrutamiento y la planificación de las naves ya sea

para proveer un servicio de tipo *liner* (servicio regular) o bien de tipo *tramp* (un solo servicio).

Los problemas de las compañías navieras son heterogéneos porque las operaciones realizadas por las compañías son muy diversas. Por tanto, requisitos específicos para el modelado deben de ser considerados. Diversas revisiones bibliográficas pueden encontrarse en (Ronen, 1983, 1993; Christiansen et al., 2004, 2013). En la más reciente (Christiansen et al., 2013) se hace especial hincapié en la necesidad de incorporar aspectos de manejo del terminal. Entre ellos, se resalta la asignación de nave a sitio, aspecto que es considerado como uno de los más importantes para trabajo futuro. Este aspecto tiene importantes implicaciones para las compañías navieras, las cuales no tiene manejo directo sobre el terminal portuario.

En este artículo, se aborda el problema de enrutamiento y planificación de naves tramp para una compañía naviera que provee transporte marítimo durante la temporada de la fruta en Chile. El problema incorpora requisitos específicos del terminal portuario así como restricciones de calado y acceso temporal a los sitios del terminal. Estas restricciones son críticas durante la temporada de cruceros porque las ventanas de tiempo son significativamente estrechas. Por este motivo, la compañía naviera permite que la carga de pallets se pueda efectuar en varios sitios del mismo terminal u de otro de modo que se pueda obtener una solución factible. El cuello de botella radica en la determinación de una secuencia de visitas a los sitios para cada nave de modo que se minimice los costos relacionados con el transporte marítimo y el uso de recursos y personal del terminal así como del cumplimiento del máximo número de contratos posible y de las restricciones del terminal portuario.

1.1. Revisión de la literatura

La cantidad de artículos publicados sobre enrutamiento y planificación de naves se ha incrementado significativamente en los últimos años Christiansen et al. (2013). Sin embargo, la investigación se ha centrado principalmente en servicios de transporte de tipo *liner*. Consecuentemente, hay una cantidad bastante limitada de artículos que tratan problemas para proveer servicios de tipo *tramp*. Los primeros trabajos relacionados con el problema de transporte de naves *tramp* (*PTNT*) son provistos por Appelgren (1969, 1971). En éstos, se proponen métodos de optimización para resolver el *PTNT*. Los trabajos subsiguientes presentan aplicaciones reales del *PTNT*, especialmente en la industria naviera (Kim y Lee, 1997; Bausch et al., 1998; Sherali et al., 1999; Fagerholt, 2004; Brønmo et al., 2007; Gatica y Miranda, 2011; Halvorsen-Weare et al., 2013; Castillo-Villar et al., 2014).

Una característica importante estudiada en la literatura es el tamaño del pedido. Las compañías navieras suelen tener cierta flexibilidad en el tamaño del pedido y, consecuentemente, el problema a resolver determina el tamaño óptimo de la carga a transportar (Brønmo et al., 2007, 2010; Korsvik y Fagerholt, 2010). No obstante, las decisiones relacionadas con el número de contratos a cumplir se omiten.

Recientemente, se ha abordado la división de la carga en varias naves (Anderson et al., 2011; Korsvik et al., 2011; Hennig et al., 2011, 2012). Sin embargo, ninguno de estos trabajos considera limitaciones de acceso y calado de los sitios.

El *PTNT* ha sido estudiado en otras áreas como el licuado del gas natural (*LGN*), (Halvorsen-Weare y Fagerholt, 2013; Halvorsen-Weare et al., 2013). Las aplicaciones prácticas que surgen en esta Área difieren de las del campo tradicional del transport naviero porque los terminales portuarios son privados y, por tanto, dedicados a las actividades relacionadas con el *LGN*.

Tirado et al. (2013) tratan un *PTNT* con ciertos elementos estocásticos. En este trabajo, se proponen tres métodos diferentes para abordar variaciones en el tamaño del pedido a transportar, los cuales se centran en replanificar parte de la solución proporcionada por un modelo de optimización.

Fagerholt et al. (2013) afrontan un caso especial de *PTNT* (el *project shipping*). Este trabajo incorpora características de acumulado y acoplamiento de carga en el modelo, permitiendo así una representación más detallada del proceso de carga.

Otros trabajos de la literatura permiten variar la velocidad de desplazamiento de la nave (Fagerholt et al., 2010; Norstad et al., 2011; Gatica y Miranda, 2011). En el último trabajo, se compara el uso de velocidad fija y variable mediante dos modelos de optimización diferentes. Los resultados muestran que se pueden reducir los costos de transporte significativamente variando la velocidad.

Moon et al. (2015) consideran aspectos de implantación relacionados con la flota de naves y el diseño de la red para el *PTNT*. La problemática se trata bajo un punto de vista estratégico donde el enrutamiento se realiza a través de una red *hub & spoke*.

Finalmente, Yongheng and Grossmann (2015) abordan el problema de enrutamiento del inventario marítimo donde el inventario considera contenedores vacíos que deben ser reubicados. El propósito es determinar los tiempos en los cuales la naves visitan los puertos y la secuencia de carga y descarga de estos contenedores. Para resolver este problema, se proponen varios modelos continuos y discretos en el tiempo.

1.2. Contribuciones

Este trabajo contribuye al estado del arte sobre *ENT* incorporando características específicas del terminal portuario en el modelo de optimización. Estas características se refieren a la posibilidad de dividir la carga de pallets en la misma nave en diversas ventanas de tiempo disponibles de los sitios de atraque. Esto permite afrontar con éxito las limitaciones de calado y de tiempo de acceso a los sitios. En este trabajo, la división de la carga difiere respecto de como es usualmente referida en la literatura, donde la carga se divide entre las distintas naves disponibles.

El resto del artículo se organiza del siguiente modo. El capítulo 2 describe el problema bajo estudio. El capítulo 3 presenta el grafo bajo el cual descansa el modelo de optimización. El capítulo 4 muestra la formulación matemática del modelo. El capítulo 5 presenta el caso de estudio junto con sus pruebas computacionales. Finalmente, el capítulo 6 provee las conclusiones y directrices para trabajo futuro.

2. DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Una compañía naviera tiene un portfolio de clientes que quieren exportar fruta fuera del país. La compañía ofrece servicios de transporte desde la ubicación terrestre del cliente hasta un puerto marítimo destino de la mercancía. Para cada cliente, se establece uno o varios contratos que definen el origen, el destino y fechas relevantes.

La fruta se transporta en pallets desde la localidad terrestre del cliente hacia un puerto cercano. En este, los pallets son descargados del camión y llevados al patio de carga donde se cargan en la nave correspondiente.

Las naves se controlan a través de unos itinerarios o rutas, las cuales incluyen los tiempos de estadía y operación en los diferentes terminales portuarios. En el terminal, las naves atracan en los sitios, los cuales representan los lugares habilitados para la carga de pallets.

Habitualmente, no todos los pallets pueden ser cargados en la nave en un solo sitio debido a restricciones de calado y ventana de atención del sitio. El calado del sitio limita la profundidad bajo la cual la nave puede hundirse en el agua según su carga, mientras que la ventana de atención restringe los tiempos de llegada y el tiempo máximo que pueden estar la nave atracada. El calado de la nave es equivalente al desplazamiento de agua máximo cuando está completamente cargada. En este trabajo, se refiere al desplazamiento de la nave como al cambio en la distancia vertical entre la línea del agua y la parte inferior del casco de la nave cuando se incrementa su carga.

Para trabajar con estas restricciones, los pallets se cargan en varios sitios del mismo terminal portuario u otro cercano. Asimismo, se asume que existe al menos un sitio con suficiente capacidad (calado y ancho de ventana) para cargar los pallets restantes de los contratos que debe cumplir la nave.

El problema descrito es modelado y resuelto usando técnicas de programación matemática. Asimismo, las decisiones a tomar son:

- La ruta de cada nave, compuesta de un conjunto ordenado de visitas a los sitios.
- Una planificación para cada ruta, incluyendo los tiempos de llegada, atraque y partida, y evitando solapamiento entre naves que operen en alguno o todos los sitios de la ruta.
- Cantidad de pallets a cargar a la nave en cada sitio.

El modelo asume que:

- Todos los pallets con el mismo destino están pre-asignados a una nave.
- Los pallets se cargan a las naves a un ritmo promedio constante.
- Los orígenes de las naves se saben de antemano.
- Las naves viajan a velocidad constante.

- Las naves tienen suficiente capacidad para cargar y transportar todos los pallets pre-asignados.
- Las naves tienen suficiente combustible para llegar a su destino.
- El horizonte de planificación es una semana.

El problema se formula usando una representación basada en una red de flujo, la cual se describe en la siguiente capítulo.

3. REPRESENTACIÓN DE LA RED DE FLUJO

El flujo de pallets viaja a través de un grafo dirigido $G = (N, A)$ que constituye una red. En esta red, los arcos $(i, j) \in A$ representan los posibles caminos a través de los cuales se desplazan las naves. Los nodos N incluyen los orígenes y destinos de las naves (N^O y N^D , respectivamente) así como los sitios ventana (N^B), los cuales representan las combinaciones de ventanas de atención y sitios reales. Los nodos $i \in N^O$ y $j \in N^B$ están unidos entre sí así como los nodos $i \in N^B$ con $j \in N^D$ y las parejas de nodos $i, j \in N^B$.

La figura 1 muestra la representación de la red G para un ejemplo sencillo con dos naves, dos contratos (cada uno asociado a una nave diferente) y ocho sitios ventana. Cada par de sitios ventana se corresponde con un sitio real que dispone de dos ventanas de tiempo. Asimismo, se asocian dos pares de sitios ventana con un terminal portuario distinto. Los nodos N^B , N^O y N^D así como sus interconexiones están dibujadas con color amarillo, azul y verde, respectivamente. Por motivos de espacio, solo se ha dibujado los arcos uniendo el primer par de sitios ventana con el resto.

4. FORMULACIÓN MATEMÁTICA

Este capítulo presenta la formulación del modelo de optimización que resuelve el problema de enrutamiento y planificación de naves tramp considerando la capacidad de los sitios y la posibilidad de dividir la carga de pallets.

4.1. Definición de conjuntos

$A(s)$ Conjunto de arcos a través de los cuales se puede desplazar la nave s .

$A_i^+(s)$ Conjunto de arcos entrantes al nodo $i \in N(s)$.

$A_i^-(s)$ Conjunto de arcos salientes del nodo $i \in N(s)$.

$\tilde{A}(s)$ Subconjunto de arcos uniendo las parejas de sitios ventana donde la nave s puede atracar, así como aquellos arcos uniendo los sitios ventana con el nodo destino de la nave s .

$\tilde{A}_i^+(s)$ Conjunto de arcos entrantes al nodo $i \in \tilde{N}(s)$.

$\tilde{A}_i^-(s)$ Conjunto de arcos salientes del nodo $i \in \tilde{N}(s)$.

$A_b^+(s)$ Conjunto de arcos entrantes al sitio ventana b por los cuales puede viajar la nave s .

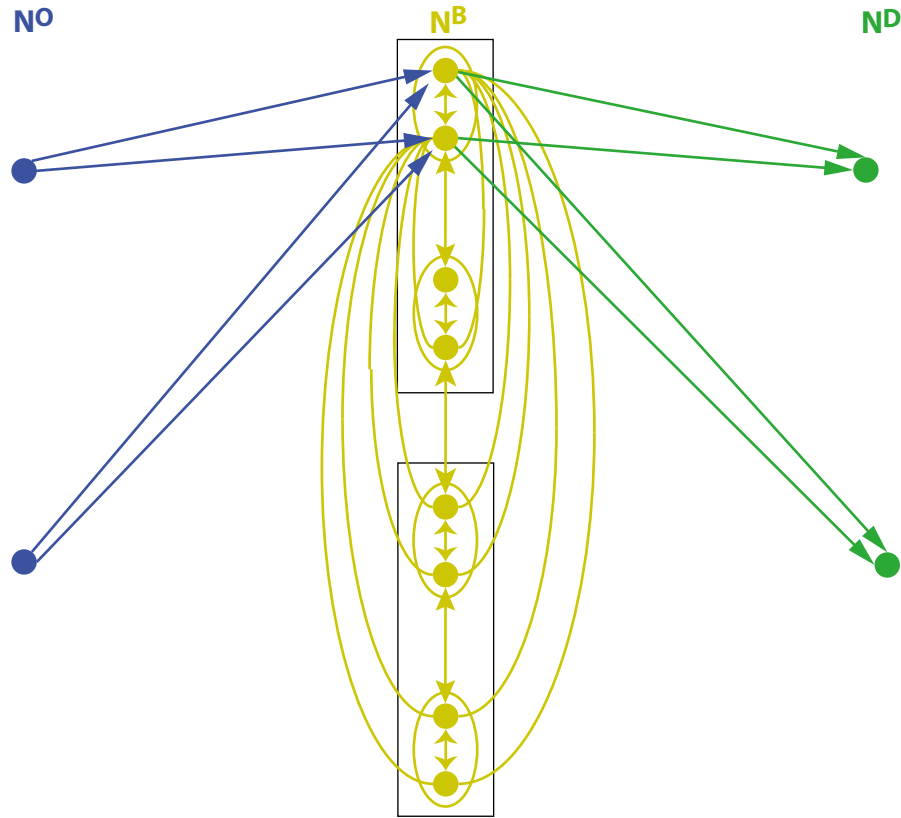


Figura 1. Representación de la red para un ejemplo sencillo con dos naves, dos contratos, cuatro sitios y dos ventanas de atención asociadas a cada sitio.

C^s Conjunto de contratos asociados a la nave s .

$N(s)$ Conjunto de nodos que pueden ser visitados por la nave s .

$N^B(s)$ Subconjunto de nodos representando los sitios donde la nave s puede atracar.

$N^B(s_1, s_2)$ Subconjunto de nodos representando los sitios donde las naves s_1 y s_2 pueden atracar.

S Conjunto de naves asociadas a algún contrato.

4.2. Definición de parámetros

d_0^s Desplazamiento de la nave s en vacío.

Δd^s Incremento en el desplazamiento de la nave s por pallet cargado.

\bar{d}_b Calado del sitio b .

g^c Número de pallets establecidos en el contrato $c \in C^s$ que deben ser transportados por la nave s .

$M_{a,s}^d$ Constante para inhabilitación de restricciones (5).

$M_{a,s}^T$ Constante para inhabilitación de restricciones (7).

l_b Límite inferior de la ventana de atención del sitio ventana b .

u_b Límite superior de la ventana de atención del sitio ventana b .

t_a^s Tiempo de desplazamiento de la nave s a través del arco $a \in A(s)$.

t_i^p Tiempo promedio de carga de un pallet en la nave atracada en el sitio i .

θ_a^s Costo de combustible de la nave s en desplazarse del nodo $i(a)$ al nodo $j(a)$.

$\Delta\theta_a^s$ Incremento en el costo de combustible de la nave s cuando se desplaza del nodo $i(a)$ al nodo $j(a)$ por pallet cargado.

$\theta_{b,s}$ Tarifa a pagar por la nave s cada vez que atraque en el sitio b .

$\theta_{b,c}$ Costo de carga de un pallet del contrato c en el sitio b .

θ^c Penalización por no cargar un pallet del contrato c en la nave $s(c)$.

θ^s Costo de operación para la tripulación de la nave s por unidad de tiempo.

4.3. Definición de variables de decisión

VARIABLES CONTINUAS NO NEGATIVAS:

T_i^s Tiempo de llegada de la nave s al nodo $i \in N(s)$.

x_b^c Número de pallets del contrato $c \in C$ cargados en la nave $s(c)$ en el sitio ventana b .

\tilde{x}^c Número de pallets del contrato $c \in C$ no cargados en la nave $s(c)$.

Δd_a^s Incremento en el desplazamiento acumulado de la nave s cuando parte del nodo $i(a)$ y se dirige al nodo $j(a)$.

VARIABLES BINARIAS:

v_a^s Variable con valor 1 cuando la nave $s \in S$ viaja a través del arco $a \in A(s)$, valor 0 en caso contrario.

$y_b^{s_1, s_2}$ Variable con valor 1 cuando la nave s_1 atraque en el sitio ventana b , valor 0 en caso contrario.

4.4. Modelo de Optimización

$$\begin{aligned} \text{mín} \sum_{s \in S} \left[\theta^s \left(T_{d(s)}^s - T_{o(s)}^s \right) + \sum_{b \in N^B(s)} \left(\sum_{a \in A_b^+(s)} \theta_b^s v_a^s + \sum_{c \in C^s} \theta_b^c x_b^c \right) + \dots \right. \\ \left. \dots + \sum_{a \in A(s)} \theta_a^s v_a^s + \sum_{a \in \tilde{A}(s)} \Delta\theta_a^s \Delta d_a^s \right] + \sum_{c \in C} \theta^c \tilde{x}^c \end{aligned} \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{b \in N^B(s)} x_b^c + \tilde{x}^c = g^c, \quad \forall s \in S, c \in C^s \quad (2)$$

$$\sum_{a \in A_i^+(s)} v_a^s - \sum_{a \in A_i^-(s)} v_a^s = \begin{cases} 1 & \text{si } i = o(s) \\ -1 & \text{si } i = d(s) \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases}, \quad \forall s \in S, i \in N(s) \quad (3)$$

$$\sum_{a \in \tilde{A}_i^+(s)} \Delta d_a^s - \sum_{a \in \tilde{A}_i^-(s)} \Delta d_a^s = \begin{cases} \Delta d^p \sum_{c \in C^s} (g^c - \tilde{x}^c) & \text{si } i = d(s) \\ -\Delta d^p \sum_{c \in C^s} x_i^c & \text{en caso contrario} \end{cases}, \quad \forall s \in S, i \in N(s) \setminus \{o(s)\} \quad (4)$$

$$\Delta d_a^s \leq M_{a,s}^d v_a^s, \quad \forall s \in S, a \in \tilde{A}(s) \quad (5)$$

$$x_b^c \leq g^c \sum_{a \in A_b^+(s)} v_a^s, \quad \forall s \in S, c \in C^s, b \in N^B(s) \quad (6)$$

$$T_{j(a)}^s \geq T_{i(a)}^s + t_a^s + \Phi_{i(a)}^s - M_{a,s}^T (1 - v_a^s), \quad \forall s \in S, a \in A(s) \quad (7)$$

$$T_b^{s_2} \geq T_b^{s_1} + \Phi_b^s - u_b (1 - y_b^{s_1, s_2}), \quad \forall s_1, s_2 \in S, b \in N^B(s_1, s_2) \quad (8)$$

$$\sum_{a \in A_b^+(s_1)} v_a^{s_1} + \sum_{a \in A_b^+(s_2)} v_a^{s_2} \leq y_b^{s_1, s_2} + y_b^{s_2, s_1} + 1, \quad \forall s_1, s_2 \in S, b \in N^B(s_1, s_2) \quad (9)$$

$$T_b^s \geq l_b \sum_{a \in A_b^+(s)} v_a^s, \quad \forall s \in S, b \in N^B(s) \quad (10)$$

$$T_b^s + \Phi_b^s \leq u_b \sum_{a \in A_b^+(s)} v_a^s, \quad \forall s \in S, b \in N^B(s) \quad (11)$$

$$\sum_{a \in A_b^+(s)} \Delta d_a^s + \Delta d^p \sum_{c \in C^s} x_b^c \leq \bar{d}_b - d_0^s, \quad \forall s \in S, b \in N^B(s) \quad (12)$$

La función objetivo (1) representa los costos asociados a la compañía naviera, los cuales incluyen (según orden de aparición) el costo de la tripulación de las naves, la tarifa por atraque en sitio ventana, el costo por carga de pallets, el costo del combustible y la penalización por no cargar pallets.

Por lo que respecta las constricciones, (2) establece el balance de pallets de cada contrato. Esta constricción permite no cargar todos los pallets de un contrato a expensas de pagar un costo de penalización. La siguiente constricción (3) lleva a cabo el enrutamiento de la naves a través de la red G . El enrutamiento es representado como el balance de flujo unitario que viaja desde el nodo origen de la nave ($o(s)$) hasta su nodo destino ($d(s)$). Por tanto, los sitios representan los nodos

intermedios por donde el flujo se conserva.

Las constricciones (4) realizan el balance del incremento de desplazamiento acumulado de las naves a través de G . En cada nodo, pueden suceder dos situaciones. Si resulta ser el nodo destino de la nave ($i = d(s)$), entonces la nave pierde todo su incremento de desplazamiento acumulado por la carga de pallets. En caso contrario, resulta ser un sitio ventana y, por tanto, el incremento de desplazamiento acumulado de la nave en alguno de los arcos salientes del sitio ventana debe de ser el incremento de desplazamiento acumulado que tenía la nave a través de alguno de los arcos entrantes al sitio ventana más el incremento producido por los pallets cargados en el sitio ventana.

Las constricciones (5) - (6) enlazan las variables de enrutamiento de naves con las de incremento del desplazamiento de la nave y el número de pallets cargados, respectivamente. En (5), el parámetro $M_{a,s}^d$ establece el máximo incremento de desplazamiento que se puede producir en la nave s cuando viaja a través del arco $a \in \tilde{A}(s)$.

Las constricciones (7) establecen la secuencia de llegada a dos nodos $i(a)$ y $j(a)$ que se visitan consecutivamente por la misma nave. Se toma en cuenta el tiempo de desplazamiento entre los nodos $i(a)$ y $j(a)$, así como el tiempo de carga de pallets si $i(a)$ es un sitio ventana. Éste último aspecto se expresa a través de la función Φ_i^s del modo siguiente:

$$\Phi_i^s = \begin{cases} t_i^p \sum_{c \in C^s} x_i^c & \text{si } i \in N^B(s) \\ 0 & \text{en caso contrario} \end{cases} \quad (13)$$

El parámetro $M_{a,s}^T$ inhabilita (7) cuando no son activas. Las siguientes constricciones (8) - (9) coordinan el atraque en el mismo sitio ventana de dos naves $s_1, s_2 \in S$ de modo que no haya solapamiento alguno. Por ejemplo, si la nave s_1 atraque primero, entonces se asegura que la nave s_2 atraque después de que todos los pallets de s_1 hayan sido cargados. Si alguna o ninguna de las naves atracan en el sitio ventana, estas restricciones no surgen efecto.

Las constricciones (10) - (11) verifican que las naves atracan en los nodos ventana dentro de sus límites temporales. Finalmente, las constricciones (12) aseguran que el desplazamiento actual de la nave en un cierto arco más su incremento debido a la carga de pallets en el sitio ventana destino del arco donde opere no exceda el calado del sitio.

5. RESULTADOS

Este capítulo presenta dos tipos de experimentos. El primer tipo se usa para validar el modelo, mientras que el segundo tipo evalúa su desempeño. La formulación matemática del modelo ha sido codificada en AMPL, y resuelta con CPLEX versión 12.4.0 bajo la estación de trabajo R5500 con procesador Intel(R) Xeon(R) CPU E5645 2.40 GHz y 48 GBytes de RAM.

5.1. Validación del modelo

Para la validación del modelo, se generaron instancias del tamaño del problema real, basándose parcialmente en información provista por la compañía naviera. La información referente a la

planificación que actualmente se usa no se muestra debido a la confidencialidad de los datos. La siguiente tabla provee los componentes principales de cada instancia, i.e., el número de naves usadas ($|S|$), el número de contratos a satisfacer ($|C|$), el número promedio de contratos asignados a nave ($|C^s|$), el número de sitios disponibles ($|B|$), el número promedio de ventanas de atención por nave ($|W^b|$) y el número total de pallets que se desean transportar (G). Usando esta nomenclatura $2S4C3BW$ es una instancia con dos naves, cuatro contratos y tres pares de sitio ventana.

Instancia	$ S $	$ C $	$ C^s $	$ B $	$ W^b $	G
2S4C4BW	2	4	2	2	2	10678
4S12C4BW	4	12	3	2	2	26423
2S4C3BW	2	4	2	1	3	10678
3S6C8BW	3	6	2	4	2	26480
2S8C6BW	2	8	4	3	2	12989

Tabla 1. Elementos principales de cada instancia usada en la validación del modelo

Todas estas instancias se resolvieron de manera óptima considerando tanto la representación de la red mostrada en la figura 1 como una versión reducida de ésta donde solo se permite atracar una vez en cada sitio. Para probar el modelo con la representación reducida, se añadieron las variables $\delta_{b,s}^w$, las cuales denotan si la nave s atraca en el sitio b dentro de la ventana de atención w . Asimismo, las variables v_a^s fueron reemplazadas en (9)-(11) por las variables $\delta_{b,s}^w$ del siguiente modo:

$$\delta_{b,s_1}^w + \delta_{b,s_2}^w \leq y_b^{s_1,s_2} + y_b^{s_2,s_1} + 1, \quad \forall s_1, s_2 \in S, b \in N^B(s_1, s_2), w \in W^b \quad (14)$$

$$T_b^s \geq l_w^b \delta_{b,s}^w, \quad \forall s \in S, b \in N^B(s), w \in W^b \quad (15)$$

$$T_b^s + t_b^p \sum_{c \in C^s} g^c x_b^c \leq u_w^b \delta_{b,s}^w + M_b (1 - \delta_{b,s}^w), \quad \forall s \in S, b \in N^B(s), w \in W^b \quad (16)$$

donde el parámetro M_b inhabilita las constricciones según el caso. Finalmente, se añadieron las siguientes constricciones:

$$\sum_{w \in W^b} \delta_{b,s}^w = \sum_{a \in A_b^+(s)} v_a^s, \quad \forall s \in S, b \in N^B(s) \quad (17)$$

Éstas aseguran que solo una ventana de atención de cada sitio se pueda seleccionar. La Tabla 2 muestra los resultados en cuanto a desempeño para todas las instancias descritas bajo las dos representaciones de la red. En la tabla, se reportan los valores de la función objetivo de la solución óptima para cada representación (FO^1 y FO^2 , respectivamente), los tiempos de resolución (T_{CPU}^1 y T_{CPU}^2) en segundos y, finalmente, el gap relativo. Éste muestra la diferencia entre las dos funciones objetivo.

De los resultados se desprende que el tiempo computacional no es significativamente diferente entre las dos representaciones cuando de ambas se obtiene la misma solución óptima. Sin embargo, cuando ambas soluciones difieren, el tiempo de cómputo de la representación completa es más alto pero se encuentra mejores soluciones.

Instancia	FO ¹	T _{CPU} ¹	FO ²	T _{CPU} ²	GAP (%)
2S4C4BW	624327	0.03	624327	0.05	0
4S12C4BW	4198941	0.7	4153328	1.2	1
2S4C3BW	1009872	0.02	688314	0.03	47
3S6C8BW	3918782	0.4	3494117	13	12
2S8C6BW	2204902	0.08	1672292	0.1	32

Tabla 2. Sumario de los resultados obtenidos para cada instancia sobre cada representación

La tabla 3 reporta el detalle de las soluciones de ambas representaciones para la instancia 2S4C3BW, la cual denota la diferencia más alta entre ambas soluciones. Junto con la ruta de cada nave, se escribe entre paréntesis los tiempos de llegada y partida de cada sitio, el tiempo de partida del origen de la nave y el tiempo de arribo al destino de la nave.

Representación	Nave	Itinerario
Completa	1	O1(0) - B1(5,60) - B1(66,70) - D1(78)
	2	O2(41) - B1(70,126) - B1(136,170) - D2(184)
Reducida	1	O1(61) - B1(66,124) - D1(133)
	2	O2(107) - B1(136,225) - D2(241)

Tabla 3. Detalle de la solución para la instancia 2S4C3BW

Los resultados indican que la representación completa de la red genera itinerarios más rápidos, permitiendo a las naves llegar más tempranamente a destino. Éstos se consiguen visitando el sitio B1 dos veces, en lugar de una, por la misma nave.

5.2. Desempeño del modelo

Para ver el desempeño del modelo, se realizaron pruebas con instancias de tamaño mayor, tomando como instancia de partida la 4S12C4BW. A continuación, en ésta instancia se aumentaron el número de naves, sitios ventana, contratos y cantidad de pallets asociados a los contratos. El número de naves se varía entre 4-20, y para cada variación el número de contratos y sus cantidades de pallets se duplicaron. El número de sitios ventana se estableció entre 4-32. Cada combinación se probó con cada combinación de número de naves y contratos. Estas instancias fueron resueltas por CPLEX, de nuevo, dando un margen de una hora máximo.

La tabla 4 muestra los valores de la función objetivo para la mejor solución hallada por CPLEX (OF), el tiempo de cómputo (T_{CPU}) en segundos, el gap de *Branch & Bound* (GAP) así como las iteraciones realizadas por *Branch & Bound* y *Simplex* (It^{b&b} y It^{Simplex}, respectivamente).

De los resultados se desprende que en casi todas las instancias probadas CPLEX no puede cerrar el *gap* de *branch & bound* en el tiempo límite de una hora. Asimismo, este *gap* varía significativamente, manteniéndose entre el 16% y 83%. Se probó con límites de tiempo superiores pero el *gap* no se redujo significativamente. A pesar de ello, CPLEX encuentra siempre una solución factible cuyo valor de función objetivo es significativamente mejor, lo cual nos hace pensar que se ha obtenido una solución cercana al óptimo. A pesar de esta limitación, bajo un punto de vista

Instancia	FO	T_{CPU}	GAP	$It^{b\&b}$	# $It^{Simplex}$
4S12C4WB	4153328	3	0	17133	273164
4S12C8WB	3500752	3600	16	8321499	309845282
4S12C16WB	3443737	3600	50	2365834	127548673
4S12C32WB	3344471	3600	52	431146	40423379
8S12C4WB	5708051	3600	27	11097731	300677863
8S12C8WB	4645771	3600	36	3176145	184214700
8S12C16WB	4633456	3600	41	946654	50683423
8S12C32WB	4584444	3600	41	184363	10637181
12S12C4WB	17031326	3600	74	4988669	209953148
12S12C8WB	7354142	3600	43	1904840	103716543
12S12C16WB	6877223	3600	41	635922	40158400
12S12C32WB	6789595	3600	41	51650	3446219
16S12C4WB	29803408	3600	80	4823738	249629855
16S12C8WB	10693353	3600	48	1457643	70589057
16S12C16WB	9160915	3600	41	697509	35403860
16S12C32WB	8994827	3600	41	186857	11626399
20S12C4WB	42838211	3600	83	2927502	185198895
20S12C8WB	20793477	3600	67	1203023	67494617
20S12C16WB	11675405	3600	42	465847	21763301
20S12C32WB	11326480	3600	41	100251	6632613

Tabla 4. Desempeños obtenidos para las sucesivas extensiones de la instancia 4S12C4WB.

de negocios, la capacidad de obtener soluciones factibles buenas para este problema es de un gran valor.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJO FUTURO

Este trabajo presenta un modelo de optimización que resuelve el problema de enrutamiento y planificación de naves trampa. El modelo es formulado como un problema mixto-entero lineal y determina los lugares donde los pallets van a ser cargados en las naves, los itinerarios de las naves con la posibilidad de atracar varias veces en el mismo sitio, y la coordinación de las naves que atracan en la misma ventana de tiempo de un sitio. Asimismo, el modelo considera limitaciones del sitio referentes a ventanas de tiempo y al calado. Estas limitaciones no han sido previamente abordadas en la literatura sobre problemas de naves trampa.

Bajo un punto de vista práctico, este modelo proporciona una solución factible. Actualmente, la compañía naviera realiza la planificación de sus naves de modo manual, encontrándose con serias dificultades para hallar una solución factible. Estas dificultades surgen cuando se intenta hallar un itinerario que verifique tanto las limitaciones de calado y de ventana de tiempo de los sitios como de coordinación entre naves. Estos aspectos son considerados al mismo tiempo por el modelo y, por ello, es posible hallar una solución técnicamente factible. Asimismo, el modelo permite a los

planificadores evaluar distintos escenarios variando distintos elementos del problema, tales como los contratos, la velocidad de la nave y los tiempos de carga de pallets, entre otros.

El modelo presenta ciertas limitaciones. Una de ellas es la no consideración de los costos de transporte terrestre a la hora de elegir el terminal portuario donde cargar los pallets. Este aspecto influye en la negociación entre los clientes y la compañía. Otra limitación importante es que no se considera la incertidumbre y el riesgo en los parámetros del modelo. Por ejemplo, que hacer si surgen nuevos clientes una vez la nave empezó el recorrido según estaba planificado, o si ésta se demora más de lo previsto en llegar a un sitio en una cierta ventana de atención. Estas limitaciones se piensan abordar en un trabajo futuro.

Agradecimientos

Este trabajo fue parcialmente financiado por el Concilio Nacional de México para la Ciencia y Tecnología, a través de la beca SEP-CONACYTCB-2014-01-240814; y por la Vicerrectoría de Investigación y Desarrollo de la Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, a través del proyecto 037.499/2015. Asimismo, queremos agradecer la determinación y el esfuerzo realizado por la Asociación Mexicana de Logística (*AML*) y al Instituto Mexicano de Transporte (*IMT*) por proveernos una plataforma de colaboración reconocida internacionalmente. Por último, pero no menos importante, dar especiales agradecimientos a un planificador anónimo de la compañía naviera quien nos permitió entender completamente el complejo sistema de planificación de ésta.

Referencias

- Appelgren LH. (1969). A column generation algorithm for a ship scheduling problem. *Transp Sci*, 3, 53-68.
- Appelgren LH. (1971). Integer programming methods for a vessel scheduling problem. *Transp Sci*, 5, 64-78.
- Andersson H, Christiansen M, Fagerholt K. (2011). The Maritime Pickup and Delivery Problem with Time Windows and Split Loads. *INFOR*, 49, 79-91.
- Bausch DO, Brown GG, Ronen D. (1998). Scheduling short term marine transport of bulk products. *Maritime Policy and Management*, 25, 335-348.
- Brønmo G, Christiansen M, Nygreen B. (2007). Ship routing and scheduling with flexible cargo sizes. *J Oper Res Soc*, 58, 1167-1177.
- Brønmo G, Nygreen B, Lysgaard J. (2010). Column generation approaches to ship scheduling with flexible cargo sizes. *Eur J Oper Res*, 200, 139-150.
- Castillo-Villar K, González-Ramírez RG, Miranda P, Smith NR. (2014). A Heuristic Procedure for a Ship Routing and Scheduling Problem with Variable Speed and Discretized Time Windows. *Math Probl Eng*, 2014, 1-13.

- Christiansen M, Fagerholt K, Ship Routing and Ronen D. (2004). Scheduling: Status and Perspectives. *Transp Sci*, 38, 1-18.
- Christiansen M, Fagerholt K, Nygreen B, Ronen D. (2013). Ship Routing and scheduling in the new milenium. *Eur J Oper Res*, 228, 467-483.
- Fagerholt K. (2004). A computer-based decision support system for vessel fleet scheduling-experience and future research. *Decis Support Syst*, 37, 35-47.
- Fagerholt K, Laporte G, Norstad I. (2010). Reducing fuel emissions by optimizing sped on shipping routes. *J Oper Res Soc*, 61, 523-529.
- Fagerholt K, Hvattum LM, Johnsen TAV, Korsvik JE. (2013). Routing and scheduling in project shipping. *Ann Oper Res*, 207, 67-81.
- Gatica RA, Miranda PA. (2011). Special Issue on Latin-American Research: A Time Based Discretization Approach for Ship Routing and Scheduling with Variable Speed. *Netw Spat Econ*, 11, 465-485.
- Halvorsen-Weare EE, Fagerholt K. (2013). Routing and scheduling in a liquefied natural gas shipping problem with inventory and berth constraints. *Ann Oper Res*, 203, 167-186,
- Halvorsen-Weare EE, Fagerholt K, Rönnqvist M. (2013), Vessel routing and scheduling under uncertainty in the liquefied natural gas business. *Comput Ind Eng*, 64, 290-301.
- Hennig F, Furman KC, Kocis GR, Nygreen B, Song J. (2011). Crude oil tanker routing and scheduling. *INFOR* 49, 153-170.
- Hennig, F., Nygreen, B., Christiansen, M., Fagerholt, K., Furman, K.C., Song, J., Kocis, G.R., Warrick, P.H., 2012. Maritime crude oil transportation - a split pickup and split delivery problem. *Eur J Oper Res* 218, 764-774.
- Kim SH, Lee KK. (1997). An optimization-based decision support system for ship scheduling. *Comput Ind Eng*, 33, 689-692.
- Korsvik JE, Fagerholt K. (2010). A tabu search heuristic for ship routing and scheduling with flexible cargo quantities. *J Heuristics* 16, 117-137.
- Korsvik JE, Fagerholt K, Laporte G. (2011). A large neighbourhood search heuristic for ship routing and scheduling with split loads. *Comput Oper Res* 38, 474-483
- Moon IK, Qiu ZB, Wang JH. (2015). A combined tramp ship routing, fleet deployment, and network design problem, *Marit Policy Manag*, 42, 68-91.
- Norstad I, Fagerholt K, Laporte G. (2011). Tramp ship routing and scheduling with speed optimization. *Transp Res Part C* 19, 853-865.
- Ronen D. (1983). Cargo ships routing and scheduling: Survey of models and problems. *Eur J Oper Res*, 12, 119-126.

- Ronen D. (1993). Ship scheduling: The last decade. *Eur. J Oper Res*, 71, 325-333.
- Sherali HD, Al-Yakoob SM, Hassan MM. (1999). Fleet management models and algorithms for an oil-tanker routing and scheduling problem. *IIE Transactions*, 31, 395-406.
- Tirado G, Hvattum LM, Fagerholt K, Cordeau J-F. (2013). Heuristics for dynamic and stochastic routing in industrial shipping. *Comput Oper Res*, 40, 253-263.
- UNCTAD secretariat. (2014). *Maritime Transport Review*. In: Rogers, J., (eds), United Nation Publications. Ed. UNCTAD, Geneva.
- Yongheng J, Grossmann IE. (2015). Alternative mixed-integer linear programming models of a maritime inventory routing problem. *Comput Chem Eng*. To appear in 2015.