

Modelo MILP para la Asignación de Muelles en Puertos Marítimos con Restricciones de Tránsito y Mareas en el Canal de Acceso

Marco J. Rainoldi¹, M. Celeste Kees¹[0000-0002-3692-2547], Guillermo Durand^{1,2} y M. Susana Moreno¹[0000-0001-5744-5586]

¹ Planta Piloto de Ingeniería Química - PLAPIQUI (UNS – CONICET)

² Departamento de Ingeniería Química, Universidad Nacional del Sur (UNS)
Bahía Blanca, Argentina

{mrainoldi,mckees,gdurand,smoreno}@plapiqui.edu.ar

Resumen. Los puertos marítimos desempeñan un papel fundamental en el comercio internacional y en el crecimiento económico global lo que ejerce una creciente presión sobre sus autoridades para optimizar los recursos mediante la mejora de la programación de sus operaciones. Una tarea crucial es asignar y programar los barcos a los muelles a fin de minimizar su tiempo de permanencia en las terminales portuarias. Generalmente, esta operación se ve complicada por factores relacionados con el impacto de las mareas, el calado de los barcos y las restricciones de circulación en el canal de ingreso y salida del puerto. En este trabajo se presenta un modelo de programación mixta entera lineal (MILP) multiperíodo que integra los problemas de asignación discreta de barcos a muelles y de programación de su tránsito en los diversos segmentos del canal, considerando simultáneamente los ciclos de las mareas. El objetivo es reducir el tiempo total del servicio de los barcos en el puerto. El modelo determina el momento de ingreso y egreso de cada barco en las distintas secciones del canal, el muelle de atraque, el período en el cual comienza y finaliza su estadía en el mismo, y los tiempos de espera previos y posteriores a su procesamiento.

Palabras clave: Modelo MILP Multiperíodo, BAP, Programación del Tránsito en Canales, Ciclos de Mareas.

1 Introducción

Hoy en día, la industria del transporte marítimo juega un papel crucial en el comercio global, conectando de manera eficiente y segura diversas regiones y países a través de los océanos. Los puertos forman una parte fundamental de esta industria, al ser terminales que permiten no solo la carga y descarga de mercancías, el embarque y desembarque de pasajeros, la manipulación de productos, su almacenamiento y transferencia, sino que también realizan diversas tareas de gestión, control, dragado, apoyo a los buques, entre otras.

Por sus características, las terminales portuarias presentan diversos desafíos en el planeamiento y gestión de su funcionamiento. Uno de los principales problemas

operativos es el de asignación de sitios de atraque también conocido como BAP (del inglés *Berth Allocation Problem*) que consiste en asignar un conjunto de barcos a espacios de atraque dentro del puerto en un determinado horizonte de tiempo para optimizar el uso de los recursos portuarios [1]. Debido a la relevancia de este problema, diversos autores han desarrollado modelos de optimización empleando diferentes funciones objetivo [1-4]. Generalmente, se busca minimizar el tiempo total de servicio de todos los barcos en el puerto, definido como el tiempo transcurrido entre la hora de arribo y la hora en la que finaliza el servicio [1] aunque también se han considerado otras metas como las de minimizar el tiempo total de permanencia en el puerto, reducir el número de barcos rechazados, disminuir la desviación entre los atraques reales y programados, etc. [3].

A su vez, en el BAP existen varias restricciones temporales y espaciales que conducen a diferentes formulaciones [5]. Dependiendo de los tiempos de llegada de los buques, los modelos en la literatura se clasifican en estáticos o dinámicos. En el caso estático, todos los barcos han llegado al puerto antes de que comience la programación mientras que, en el caso dinámico, los barcos pueden llegar en cualquier momento durante todo el horizonte de planificación. Por otra parte, dependiendo de cómo es la disposición de los muelles en el puerto, el BAP se denomina discreto, continuo o híbrido. En el caso discreto, solo se puede atender un barco en cada muelle a un determinado tiempo independientemente de su tamaño, mientras que en el caso continuo los barcos pueden compartir un muelle, siempre que sus esloras lo permitan y no superen el largo total del mismo. En el enfoque híbrido, el muelle a veces actúa como discreto y otras como continuo, dependiendo de las necesidades de los barcos entrantes [3].

Por otra parte, en muchos puertos marítimos, como ocurre en el puerto de Bahía Blanca, el acceso al mar abierto es posible únicamente a través de canales de ingreso por los que los barcos deben transitar. Estos canales de navegación suelen estar restringidos debido ya sea al estrechamiento natural, que impide que los barcos se crucen en algunas secciones, o a limitaciones de profundidad relacionadas con la marea, lo que puede impedir su circulación, generando así demoras en las operaciones del puerto. Por lo tanto, varios autores han abordado la programación del movimiento de barcos en canales restringidos [5-7]. En la mayoría de los estudios, el problema de la programación de canales y el BAP se han estudiado por separado. En aquellos en que los han combinado, se han considerado canales de sección única, ya sean unidireccionales o bidireccionales, con restricciones relativamente simples. En general, faltan investigaciones sobre vías navegables restringidas con entornos y reglas de navegación complejas en las que se incluyan factores que realmente afectan la programación, como son los ciclos de las mareas y los conflictos de tránsito.

En los últimos años, se han realizado esfuerzos significativos para introducir restricciones de mareas al abordar el problema de asignación de muelles [8-10]. Zhen y col. [8] resuelven el BAP incorporando ventanas de tiempo que reflejan las condiciones de marea para el ingreso y salida de barcos en un puerto al cual se accede a través de un canal que cuenta con un solo segmento restringido. Por otro lado, Cheimanoff y col. [9] abordan el BAP considerando múltiples muelles continuos con arribos dinámicos, donde las salidas de los barcos cargados se restringen a los períodos de marea alta. Jiang y col. [10] proponen un modelo general que combina el BAP con la programación de

buques en un canal donde existe un número fijo de segmentos, considerando las emisiones de carbono, el tiempo de las mareas y los conflictos de tránsito.

Basados en los estudios anteriores, en este artículo nos concentramos en el BAP dinámico y discreto. Además, de acuerdo a nuestro conocimiento, no se ha implementado este problema en conjunción con la programación del movimiento de barcos en canales que consten de un número variable de segmentos, cada uno con restricciones particulares de circulación y calado, situación que se presenta en varios puertos. Por ello en este trabajo se amplía el problema de asignación discreta de muelles para abordar un caso más complejo en el que se incluyen tanto la programación del tránsito de los barcos en los diversos segmentos del canal de acceso al puerto, así como las restricciones de su movimiento debido a los ciclos de las mareas. Para ello se desarrolla un modelo de programación mixta entera lineal (MILP) multiperíodo que tiene por objetivo minimizar el tiempo total de servicio de los barcos dentro del horizonte de planificación especificado. El problema consiste en decidir el momento en el que cada barco ingresa y egresa de las distintas secciones del canal, el muelle de atraque, el período en el cual comienza y finaliza su estadía en el mismo, y los tiempos de espera previos y posteriores a su procesamiento.

2 Descripción del Problema

La Fig. 1 ilustra los principales eventos del problema bajo estudio. En un horizonte de planificación dividido en $t = 1, 2, \dots, |T|$ períodos de tiempo, un conjunto de barcos $V = \{1, 2, \dots, |V|\}$ deben atracar en un puerto que dispone de un conjunto discreto de muelles $B = \{1, 2, \dots, |B|\}$ para realizar las operaciones de carga o descarga. El puerto cuenta, a su vez, con un fondeadero donde los barcos o buques tienen la posibilidad de anclar y esperar el momento de ingreso para realizar su carga/descarga en los muelles.

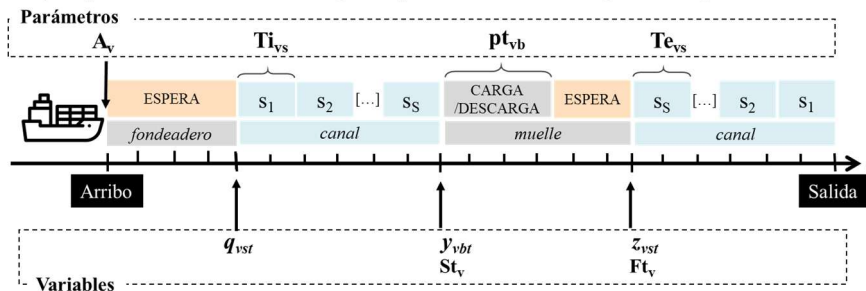


Fig. 1. Eventos clave para programar las operaciones de los barcos en el puerto.

El acceso al puerto desde el fondeadero se realiza a través de un canal dividido en diferentes segmentos $s = 1, 2, \dots, |S|$ que tienen limitaciones tanto de calado como de ancho, las que determinan la imposibilidad de cruces de barcos en algunos de ellos ($SC \subset S$) o de circulación para buques de gran calado durante intervalos de marea baja en otros ($SK \subset S$). Es por esto que un factor clave que afecta el tránsito de barcos de gran calado ($v \in VH$) dentro del canal de ingreso al puerto son los ciclos de mareas.

Sea K el conjunto de ciclos de mareas altas, donde para cada ciclo $k = 1, 2, \dots, |K|$ se conoce el período de inicio y el de finalización definido mediante los parámetros hw_k y ew_k , respectivamente. Además, se conoce el tiempo que demora cada barco v en cruzar cada sección s del canal tanto para ingresar al puerto (Ti_{vs}) como para salir del mismo (Te_{vs}) valores que pueden diferir debido diversos factores como la relación velocidad/carga de cada barco. Asimismo, se establece un número máximo de barcos (NV) que pueden estar simultáneamente dentro de cada sección del canal.

Dado que se aborda un BAP dinámico, se asume que cada barco v llega al puerto en un determinado tiempo de arribo A_v dentro del horizonte de planificación. Este comenzará su tránsito por el canal en ese mismo momento o esperará en el fondeadero a que algún muelle se libere y/o a que las condiciones de tránsito del canal sean oportunas. Una vez que este ingresa al puerto, atracará en el muelle b disponible cuyas condiciones tanto de calado como de eslora o largo máximas (D_b^{max}, L_b^{max}) sean superiores a las requeridas por el barco (D_v, L_v). El barco comenzará las operaciones de preparación de atraque y manipulación antes de que comiencen las de carga o descarga. Todas estas tareas se completan en un tiempo de procesamiento conocido pt_{vb} . Una vez finalizadas las actividades de carga/descarga en el muelle, el barco podrá partir inmediatamente o esperar en el mismo hasta que el canal sea transitable, para lo cual incurrirá en un tiempo de espera adicional dentro del puerto.

El objetivo del problema es asignar los espacios de atraque a los barcos entrantes en el horizonte de planificación a fin de minimizar el tiempo total de servicio de todas las embarcaciones en el puerto. En este trabajo, este tiempo comprende, como muestra la Fig. 1, el período completo desde su arribo hasta que efectivamente deja el puerto, es decir, se contabilizan los tiempos de espera en el fondeadero, demoras en transitar el canal tanto para ingresar como salir del puerto, el tiempo de manipulación de todas las embarcaciones en los diversos muelles, así como el tiempo de espera para abandonar los mismos. Por lo que el modelo propuesto permite reducir los tiempos de espera de los buques y mejorar la eficiencia general del puerto.

3 Modelo Matemático Propuesto

El modelo matemático propuesto para el problema de atraque de buques con restricciones de marea y tránsito en el canal de acceso se formula como un modelo MILP. Antes de presentar la formulación del mismo, a continuación, se detallan las variables utilizadas.

Variables de decisión

y_{vbt}	1 si el barco v atraca en el muelle b en el período t
x_{vbt}	1 si el barco v esta atracado en el muelle b en el período t
q_{vst}	1 si el barco v ingresa al puerto por el segmento s del canal en el período t
z_{vst}	1 si el barco v deja el puerto por el segmento s del canal en el período t
w_{vk}	1 si el barco v cruza el canal en el intervalo de marea alta k para ingresar al puerto
u_{vk}	1 si el barco v cruza el canal en el intervalo de marea alta k para salir del puerto
St_v	tiempo de inicio del procesamiento del barco v en el muelle

Ft_v tiempo en el que finaliza la estadia del barco v en el muelle
 TS tiempo total de servicio de todas las embarcaciones en el puerto

3.1 Formulación MILP

En base a las definiciones anteriores, el modelo MILP se formula como sigue:

$$TS = \sum_{v \in V} Ft_v - A_v \quad (1)$$

Sujeto a:

$$\sum_{b \in B} \sum_{t \in T} y_{vbt} = 1 \quad \forall v \in V \quad (2)$$

$$\sum_{v \in V} x_{vbt} = 1 \quad \forall b \in B, t \in T \quad (3)$$

$$St_v = \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} t \cdot y_{vbt} \quad \forall v \in V \quad (4)$$

$$\sum_{b \in B} \sum_{t \in T} x_{vbt} = \sum_{b \in B} \left(pt_{vb} \cdot \sum_{t \in T} y_{vbt} \right) \quad \forall v \in V \quad (5)$$

$$\sum_{\substack{t' \leq t + pt_v - 1 \\ t' \geq t}} x_{vbt'} \geq pt_{vb} \cdot y_{vbt} \quad \forall v \in V, b \in B, t \in T \quad (6)$$

$$Ft_v \geq St_v + \sum_{b \in B} \sum_{t \in T} x_{vbt} \quad \forall v \in V \quad (7)$$

$$D_v \cdot \sum_{t \in T} y_{vbt} \leq D_b^{max} \quad \forall v \in V, b \in B \quad (8)$$

$$L_v \cdot \sum_{t \in T} y_{vbt} \leq L_b^{max} \quad \forall v \in V, b \in B \quad (9)$$

$$St_v \geq Ft_{v'} - M \cdot \left(2 - y_{v'bt} - \sum_{t' \geq t} y_{vb,t'+1} \right) \quad \forall (v \wedge v') \in V, \quad (10)$$

$$v' \neq v, b \in B, t \in T$$

$$\sum_{t \in T} q_{vst} = 1 \quad \forall v \in V, s \in S \quad (11)$$

$$\sum_{t \in T} z_{vst} = 1 \quad \forall v \in V, s \in S \quad (12)$$

$$St_v = \sum_{t \in T} t \cdot q_{vst} + \sum_{\substack{s' \leq |S| \\ s' \geq s}} Ti_{vs'} \quad \forall v \in V, s \in S \quad (13)$$

$$Ft_v + \sum_{\substack{s' \leq |S| \\ s' \geq s}} Te_{v,s'+1} = \sum_{t \in T} t \cdot z_{vst} \quad \forall v \in V, s \in S \quad (14)$$

$$St_v \geq A_v + \sum_{s \in S} Ti_{vs} \quad \forall v \in V \quad (15)$$

$$\sum_{t' \geq t}^{t + \max(Ti_{vs}, Te_{vs}) - 1} q_{vst'} + z_{v'st} \leq 1 \quad \forall (v \wedge v') \in V, v' \neq v, s \in SC, \quad (16)$$

$$t \in T$$

$$\sum_{v \in V} q_{vst} \leq NV \quad \forall s \in S, t \in T \quad (17)$$

$$\sum_{v \in V} z_{vst} \leq NV \quad \forall s \in S, t \in T \quad (18)$$

$$\sum_{k \in K} w_{vk} = 1 \quad \forall v \in VH \quad (19)$$

$$St_v - \sum_{s \in SK} Ti_{vs} \geq hw_k - M \cdot (1 - w_{vk}) \quad \forall v \in VH, k \in K \quad (20)$$

$$St_v \leq ew_k + M \cdot (1 - w_{vk}) \quad \forall v \in VH, k \in K \quad (21)$$

$$\sum_{k \in K} u_{vk} = 1 \quad \forall v \in VH \quad (22)$$

$$Ft_v \geq hw_k - M \cdot (1 - u_{vk}) \quad \forall v \in VH, k \in K \quad (23)$$

$$Ft_v + \sum_{s \in SK} Te_{vs} \leq ew_k + M \cdot (1 - u_{vk}) \quad \forall v \in VH, k \in K \quad (24)$$

La función objetivo en la Ec. (1) minimiza el tiempo total de servicio de todos los barcos en el puerto, dentro del horizonte de planificación especificado. La Ec. (2) asegura que cada barco v se asigne a un único muelle b en un único período de tiempo t mientras que la Ec. (3) garantiza que en cada muelle b atraque un único barco v por período. La Ec. (4) determina el tiempo al cual inicia el procesamiento del barco v en el muelle asignado en el puerto. Las restricciones (5) y (6) aseguran que el barco v permanezca en el muelle los períodos que determinan su tiempo de procesamiento pt_v y que esos tiempos sean consecutivos. La restricción (7) calcula el tiempo al cual finaliza el procesamiento del barco v , que incluye el tiempo de espera en el muelle. Las restricciones (8) y (9) determinan que los barcos no superen las limitaciones de eslora y calado permitidas en el muelle b . La restricción (10) establece que si el barco v ingresa en algún período posterior al ingreso de v' al muelle b , entonces el inicio de su procesamiento debe ocurrir después que v' deja el muelle. Así, la Ec. (10) impide la superposición en tiempo y espacio logrando que si el barco v debe esperar para poder salir del puerto luego de completar sus tareas, la espera se realice en el muelle b donde se atendió.

Las restricciones (11)-(18) se relacionan con el canal de ingreso al puerto. Las Ecs. (11) y (12) establecen que cada barco v ingrese y egrese de cada sección del canal s en un único período t . La Ec. (13) establece que el barco inicia su procesamiento una vez que ingresa al canal y transita por todos sus segmentos mientras que la Ec. (14) establece que una vez que el barco finaliza su estadía en el muelle b comience a transitar cada segmento del canal hasta dejar el puerto. La restricción (15) determina que el barco inicie sus actividades en el muelle luego de su arribo y una vez que haya cruzado el canal. La Ec. (16) evita que se produzcan cruces de barcos en el canal en los segmentos $s \in SC$ donde no están permitidos. Las restricciones (17) y (18) controlan que, no se supere el número máximo de barcos que pueden circular en la misma dirección dentro de cada sección s del canal en un determinado período de tiempo.

Las Ecs. (19)-(24) gobiernan la circulación restringida por los ciclos de marea. Las restricciones (19), (20) y (21) determinan que los buques de gran calado ($v \in VH$) con limitaciones de tránsito en el canal, ingresen al puerto durante los intervalos de marea alta k . Por último, las restricciones (22), (23) y (24) establecen que el proceso de salida de estos buques se realice también durante los períodos de marea alta k .

Las restricciones (10), (20), (21), (23) y (24) son de tipo big-M, donde M es un escalar cuyo valor es suficientemente grande de forma tal que si las variables binarias involucradas toman valor 1 las mismas sean consideradas.

4 Ejemplos Numéricos

El modelo MILP detallado en la sección previa se ilustra a través de dos ejemplos numéricos. Cada uno de ellos fue implementado y resuelto en el software GAMS Studio 43, en una computadora con un procesador Intel(R) Core (TM) i7-6700 con una velocidad de 3.40 GHz, con 8,00 GB de RAM. Se empleó el código comercial CPLEX

22.1.1.0 con una diferencia de integralidad del 0%, a fin de asegurar la optimalidad global en las soluciones.

En cada ejemplo, se considera la planificación de las operaciones de un número diferente de barcos en un puerto marítimo. En el primer ejemplo, se tiene un total de $|V| = 6$ barcos o buques mientras que en el segundo son $|V| = 10$ los que arriban al puerto. En ambos casos, se considera un horizonte de planeamiento de 3 días (72 h) que se discretiza en periodos de tiempo iguales correspondientes a una hora ($|T| = 72$).

El canal de acceso al puerto está dividido en tres segmentos ($|S| = 3$), cada uno con un ancho y longitud determinado. Debido a restricciones propias del puerto, todos los barcos, independientemente de su tamaño, deben transitar los segmentos a una velocidad fija, por lo que el tiempo de circulación en cada uno de ellos depende únicamente de su longitud. Por ello, cualquier barco demora un total de 3 h en transitar el segmento 1 (s_1), mientras que en los segmentos s_2 y s_3 el tiempo de circulación es de 2 h. A su vez, por limitaciones en el ancho, no se permite el cruce de embarcaciones en estas 2 últimas secciones. En cada período t , el número máximo de barcos que pueden atravesar en simultáneo cada segmento es $NV = 4$. En el horizonte de planificación se tiene un total de $|K| = 6$ ciclos de marea alta, los cuales inician en los periodos $hw_k = t_6, t_{18}, t_{30}, t_{42}, t_{54}$ y t_{66} , finalizando cada uno de ellos luego de transcurridas unas 6 h. Las características del canal, las restricciones de circulación en los segmentos y las condiciones de marea alta se mantienen iguales en los dos casos analizados.

En ambos ejemplos, el puerto dispone de un total de $|B| = 4$ muelles, cada uno con un largo máximo permitido de $L_{b1}^{max} = 250$ m, $L_{b2}^{max} = L_{b4}^{max} = 230$ m, $L_{b3}^{max} = 220$ m y un calado máximo de $D_{b1}^{max} = D_{b3}^{max} = 19$ m, $D_{b2}^{max} = D_{b4}^{max} = 20$ m. En este trabajo, se asume que todos los muelles b poseen la misma cantidad de cintas transportadoras y el mismo equipamiento, por lo que el factor determinante del tiempo de procesamiento es la capacidad/tamaño de los barcos. Se establece así que el tiempo de procesamiento es de 6 h para los barcos de calado menor a 11 m, 8 h para los de calado entre 11 y 14 m y 10 h para los buques de calado mayor a 14 m. Asimismo, estos últimos poseen restricciones de circulación en los segmentos s_2 y s_3 del canal, puesto que requieren la presencia de marea alta para el ingreso/egreso de los mismos. Cada barco está caracterizado por un calado y una eslora dimensiones que, a su vez se relacionan con su capacidad de carga/descarga, esto es, mayor calado implica un mayor tiempo de carga/descarga. En las Tablas 1 y 2, se presentan los datos de calado, eslora y tiempo de carga/descarga de cada barco junto a su hora de arribo al puerto para los ejemplos 1 y 2, respectivamente. A continuación, se detallan los resultados obtenidos.

Tabla 1. Ejemplo 1 - Datos de cada barco.

Barco	Calado, D_v (m)	Eslora, L_v (m)	Arribo, A_v (h)	Tiempo de carga/descarga, pt_v (h)
v_1	13	160	2	8
v_2	15	180	12	10
v_3	11	145	2	6
v_4	15	182	8	10
v_5	11	140	28	6
v_6	15	190	18	10

Tabla 2. Ejemplo 2 - Datos de cada barco.

Barco	Calado, D_v (m)	Eslora, L_v (m)	Arribo, A_v (h)	Tiempo de carga/descarga, pt_v (h)
v_1	12	158	12	8
v_2	15	175	2	10
v_3	11	145	2	6
v_4	16	190	8	10
v_5	11	140	8	6
v_6	15	180	8	10
v_7	11	150	22	6
v_8	12	160	19	8
v_9	12	160	5	8
v_{10}	11	140	27	6

Ejemplo 1:

La formulación matemática de este problema involucra 15.673 restricciones, 6.084 variables binarias y 6.097 variables continuas. La solución óptima se obtuvo en 4 s (tiempo de CPU), con un valor de la función objetivo para el tiempo total de servicio todos los barcos en el puerto de 126 h.

En la Fig. 2 se muestra en detalle la ubicación y actividad de cada barco en cada período del horizonte de planificación. Se utilizan códigos de color para diferenciar cada unidad mientras que la longitud de los bloques indica el tiempo de permanencia en cada posición. Dentro de los bloques se utilizan las letras de los índices utilizados en la formulación matemática, esto es letras s y b , para señalar los periodos en que el barco está transitando por cada segmento del canal y aquellos en los que se encuentra atracado en un muelle, respectivamente. A su vez, en la sección de fondo de del diagrama se resaltan los periodos de marea alta mediante celdas en color celeste claro.

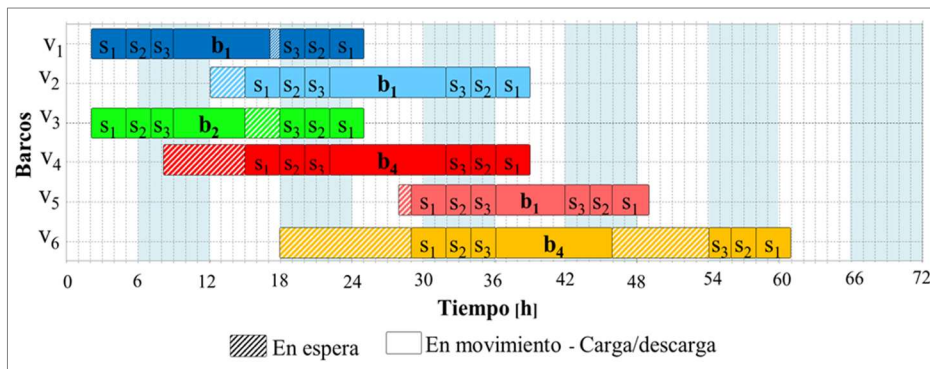


Fig. 2. Ejemplo 1 - Movimiento de los barcos a lo largo del horizonte de planificación.

Como se puede apreciar en la Fig. 2, los barcos v_1 y v_3 ingresan simultáneamente al canal de acceso en el período t_2 , es decir, en el momento en que arriban al puerto ($A_v = 2$ h) y son asignados a los muelles b_1 y b_2 , respectivamente, sin incurrir en demoras. En cambio, los barcos v_2 , v_4 , v_5 y v_6 , cuyos horarios de arribo se detallan en la Tabla 1, deben esperar en el fondeadero durante 3, 7, 1 y 11 h, respectivamente, antes de poder ingresar a la primera sección del canal. En este caso, los barcos v_2 , v_4 y v_6 tienen un gran calado, por lo que deben esperar para hacer coincidir su traslado por los segmentos s_2 y s_3 con los períodos de marea alta. Se observa que v_2 y v_5 se asignan al muelle b_1 mientras que v_4 y v_6 atracan en el muelle b_4 .

Con respecto a las demoras en el muelle, se puede ver que los barcos v_1 , v_3 y v_6 tuvieron que esperar períodos de 1, 3 y 8 h, respectivamente, para poder ingresar al canal y salir del puerto. Por otro lado, se nota que el último barco que parte del puerto es v_6 , liberando el muelle b_4 cuando comienza el quinto ciclo de marea alta (t_{54}) para finalmente salir del canal en t_{61} . Además, este barco presenta el mayor tiempo de permanencia (42 períodos) en el puerto, incurriendo en largos plazos de espera tanto en el fondeadero como en el muelle al finalizar su procesamiento. Esto se debe a que, al tratarse de una unidad de gran calado, debe aguardar a que inicien los ciclos de marea alta para circular por el canal. En particular, se aprecia que a pesar de arribar en el comienzo del ciclo de marea alta k_2 , la embarcación 6 no puede ingresar al canal en ese ciclo porque no tiene suficiente tiempo para pasar por las secciones s_2 y s_3 (4 períodos luego de pasar por s_1).

En la Fig. 3, las flechas descendentes indican los períodos de ingreso de los barcos a cada sección del canal, mientras que las flechas ascendentes señalan los períodos de salida de dichos segmentos. Se observa que los buques v_2 , v_4 y v_6 que dependen ciclos de marea alta para circular, efectivamente transitaron las secciones s_2 y s_3 durante dichos intervalos. Por ejemplo, los barcos v_2 y v_4 ingresan al segmento s_2 cuando inicia el ciclo k_2 (t_{18}), mientras que el buque v_6 lo hizo en el período t_{32} del ciclo k_3 . Posteriormente los barcos v_2 y v_4 salen en el ciclo k_3 y el barco v_6 en el ciclo k_5 . En este caso, no se observan cruces de unidades en el segmento s_1 para ningún período.

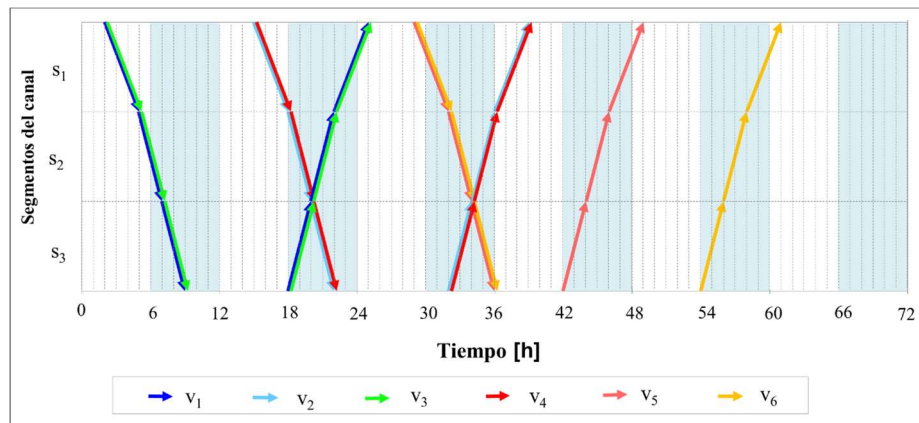


Fig. 3. Ejemplo 1 - Movimiento de los barcos a través de los segmentos de canal.

Es importante mencionar que en este ejemplo no se emplea el muelle b_3 . A pesar de ello, la mayoría de los barcos tuvieron que esperar antes de poder llevar a cabo sus actividades en el puerto. Esto se debe a las restricciones de cruce en los segmentos s_2 y s_3 del canal, así como a los ciclos de marea que condicionan el ingreso a los muelles, independientemente de si estos están disponibles o no.

Ejemplo 2:

Este problema involucra 10.137 variables continuas y 10.116 variables binarias en 42.845 restricciones. El tiempo de resolución es de 168 segundos de CPU, obteniéndose un valor para la función objetivo de 194 h.

De manera similar al caso previo, en la Fig. 4 se puede apreciar el movimiento/posición de los barcos a lo largo de todo el horizonte de planificación. Se observa que pese a haber incrementado el número de barcos, es posible asignarle a cada uno un muelle dentro del horizonte de planificación. Se puede notar que los horarios de arribo de los barcos se mantuvieron en un rango similar al caso anterior, llegando los primeros barcos en t_2 y el último en t_{27} .

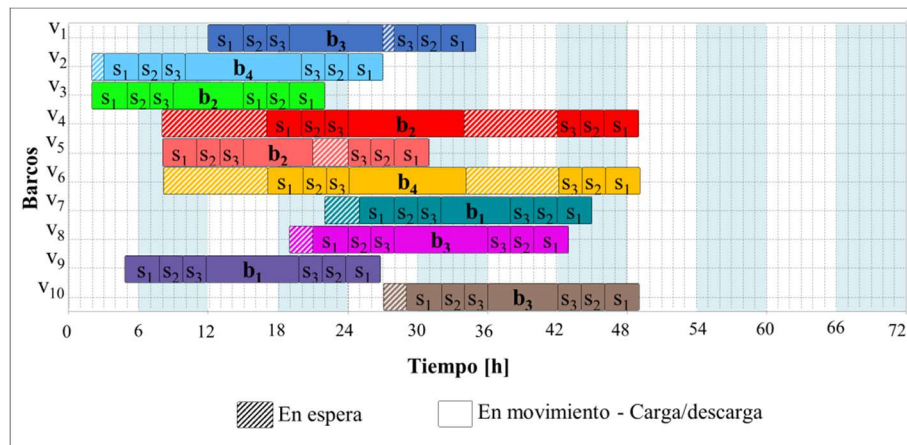


Fig. 4. Ejemplo 2 - Movimiento de los barcos a lo largo del horizonte de planificación.

En la Fig. 4 se observa que, en esta ocasión, se utilizaron los 4 muelles disponibles en el puerto y se logró el ingreso de todas las unidades dentro de las 48 h de iniciada la programación. Específicamente, en el muelle b_1 atracan v_7 y v_9 , en b_2 atracan v_3 , v_4 y v_5 , en b_3 atracan v_1 , v_8 y v_{10} , y en b_4 atracan v_2 y v_6 . Además, solo 4 de los 10 barcos no incurrir en demoras en el fondeadero (v_1 , v_3 , v_5 y v_9), mientras que el resto tuvieron que esperar entre un mínimo de 1 h (v_2) hasta un máximo de 9 h (v_4 y v_6) en el mismo. Por otra parte, únicamente los barcos v_1 , v_4 , v_5 y v_6 esperan en el muelle una vez finalizado su procesamiento. En particular, los buques v_4 y v_6 presentan un comportamiento similar al de la embarcación 6 del ejemplo previo, es decir, se verifican lapsos de espera tanto en el fondeadero como en el muelle, atribuible al requerimiento de marea alta para la circular en los segmentos s_2 y s_3 del canal.

En la Fig. 5 se muestra el tránsito de los barcos a través de las diferentes secciones del canal. Para resaltar el cruce de unidades en el segmento s_1 se emplearon circunferencias en línea punteada. Se aprecia que, por ejemplo, los barcos v_5 y v_{10} se cruzan en la primera sección del canal en el período t_{29} . Como indica la Tabla 2, sólo los buques v_2 , v_4 y v_6 están restringidos a circular en marea alta. Se observa que v_2 ingresa a las secciones restringidas en el ciclo k_1 mientras que los barcos v_4 y v_6 , transitan el canal durante el ciclo k_2 . Como se mencionó, estas dos últimas unidades tienen asociados elevados tiempos de espera en muelle, saliendo en el ciclo k_4 .

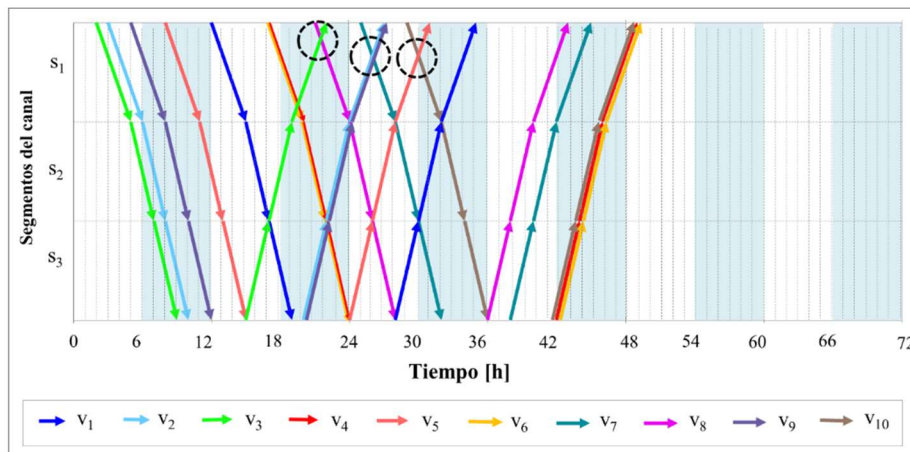


Fig. 5. Ejemplo 2 - Movimiento de los barcos a través de los segmentos de canal.

Al comparar los resultados de los dos ejemplos, se puede deducir que, si bien el incremento en el número de barcos aumentó el tiempo total de barcos en el puerto, en ambos casos se logró el procesamiento de todos los barcos en el puerto dentro del horizonte de tiempo establecido, siendo suficiente el número de muelles disponible. Se observa cierta similitud en ambos casos en cuanto a los tiempos de espera para los barcos cuyo tránsito por el canal depende de los ciclos de marea.

5 Conclusiones

En este trabajo se propuso un modelo MILP multiperíodo para abordar simultáneamente el problema de asignación discreta de barcos a muelles y el de programación de su ingreso/egreso a diferentes segmentos del canal de acceso en un puerto marítimo considerando los ciclos de marea. El objetivo es reducir el tiempo total de las actividades de todos los barcos en el puerto.

La formulación propuesta permite definir el período en que cada barco ingresa y egresa de cada segmento del canal, el muelle en el que atraca y el momento en que entra y sale del mismo, determinando los tiempos de espera tanto en el fondeadero como en el propio muelle.

El modelo desarrollado fue aplicado a dos ejemplos numéricos para mostrar su desempeño. De acuerdo con las soluciones obtenidas, se demuestra que el cumplimiento de las restricciones de circulación provoca frecuentes periodos de espera tanto en el fondeadero como en los muelles. La solución del ejemplo 1 indica que, aun habiendo muelles desocupados, la espera resulta inevitable debido a las condiciones de marea, cruce y cantidad de barcos circulando en simultáneo consideradas para el tránsito por el canal.

En general, se advierte que el movimiento de barcos de gran calado, dependiente de mareas altas, está sujeto a largos plazos de espera. Se observa que, aun habiendo arribado al fondeadero en ciclos de marea alta, deben eventualmente demorar su ingreso al canal por no contar con tiempo suficiente para salir del mismo antes de que baje la marea.

Comparando los ejemplos, se deduce que un mayor número de barcos puede aumentar los cruces en los segmentos del canal habilitados. Sin embargo, dependiendo de los valores de diferentes parámetros (calado, largo, tiempos de arribo, etc.), esto no necesariamente implica un mayor uso del horizonte de tiempo disponible para atender a todos los barcos en el puerto. En particular, los 6 barcos del ejemplo 1 concluyen sus operaciones empleando un 83% del horizonte de planificación, mientras que los 10 barcos del ejemplo 2 completan todas sus tareas en solo el 67% del mismo.

La existencia de puertos con características muy diversas evidencia la necesidad de desarrollar técnicas de modelado que integren todas las características del problema. La formulación propuesta en este trabajo permite definir tanto la cantidad de segmentos como sus limitaciones de circulación según el caso a resolver, lo que agrega versatilidad a su aplicación. Asimismo, la discretización del horizonte de planificación puede ajustarse a las condiciones operativas de cada puerto en particular. Esto representa una importante ventaja a la hora de realizar la planificación de las actividades portuarias, siendo este una de las principales contribuciones del modelo.

Como trabajo futuro, se planea realizar un análisis de sensibilidad sobre los principales parámetros del modelo, como por ejemplo el número de segmentos del canal, la cantidad de segmentos aptos para el cruce de barcos, la duración de los ciclos de marea, el calado máximo admitido en los muelles, entre otros, para evaluar su impacto en la solución. Dada la incertidumbre asociada al horario de arribo de los barcos, se propone modificar la formulación para abordar parámetros inciertos.

Referencias

1. Cordeau, J. F., Laporte, G., Legato, P., Moccia, L.: Models and tabu search heuristics for the berth allocation problem. *Transportation Science* **39**, 526–538 (2005)
2. Guan, Y., Xiao, W. Q., Cheung, R. K., Li, C. L.: A multiprocessor task scheduling model for berth allocation: heuristic and worst case analysis. *Operations Research Letters* **30**, 343–350, (2002)
3. Buhkal, K., Zuglian, S., Ropke, S., Larsen, J., Lusby, R.: Models for the discrete berth allocation problem: A computational comparison. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review* **47**(4), 461-473, (2011)

4. Jos, B. C., Harimanikandan, M., Rajendran, C., Ziegler, H.: Minimum cost berth allocation problem in maritime logistics: new mixed integer programming models. *Sādhanā* **44**, 1-12, (2019)
5. Corry, P., Bierwirth, C.: The berth allocation problem with channel restrictions. *Transportation Science* **53**(3), 708-727, (2019)
6. Lalla-Ruiz, E., Shi, X., Voß, S.: The waterway ship scheduling problem. *Transportation Research Part D: Transport and Environment* **60**, 191-209, (2018)
7. Li, J., Zhang, X., Yang, B., Wang, N.: Vessel traffic scheduling optimization for restricted channel in ports. *Computers and Industrial Engineering* **152**, 107014, (2021)
8. Zhen, L., Liang, Z., Zhuge, D., Lee, L. H., Chew, E. P.: Daily berth planning in a tidal port with channel flow control. *Transportation Research Part B: Methodological* **106**, 193-217, (2017)
9. Cheimanoff, N., Fontane, F., Kitri, M. N., Tchernev, N.: Exact and heuristic methods for the berth allocation problem with multiple continuous quays in tidal bulk terminals. *Expert Systems with Applications* **201**, 117141, (2022)
10. Jiang, X., Zhong, M., Shi, J., Li, W., Sui, Y., Dou, Y.: Overall scheduling model for vessels scheduling and berth allocation for ports with restricted channels that considers carbon emissions. *Journal of Marine Science and Engineering* **10**(11), 1757, (2022)