

Meta-heurística para la Resolución de un Problema de Asignación de Atrques para Barcos Portacontenedores

Christopher Expósito-Izquierdo, Kevin Robayna-Hernández, Belén Melián-Batista, José Marcos Moreno-Vega*

Departamento de Ingeniería Informática y de Sistemas
Universidad de La Laguna
38271 La Laguna, España

Resumen Este trabajo presenta un nuevo problema multiobjetivo de atraque de barcos portacontenedores en el contexto de terminales marítimas de contenedores. En concreto, este problema persigue minimizar los tiempos de espera de los barcos para ser servidos, los costes asociados al movimiento de contenedores y el tiempo que los contenedores están en la terminal. Este problema de optimización es resuelto en este trabajo mediante una Búsqueda por Vecindarios Grandes adaptativa, la cual emplea un parámetro de ajuste dinámico que permite destruir parte de las soluciones mientras que un método de reparación las reconstruye posteriormente. El rendimiento de esta técnica es evaluado en un conjunto amplio de escenarios realistas. Los resultados indican su gran eficacia y eficiencia, proporcionando soluciones de alta calidad en todos los casos mediante tiempos de computación reducidos.

Keywords: Problema de Asignación de Atrques, Terminal Marítima de Contenedores, Búsqueda por Vecindarios Grandes

1. Introduction

El rol que la industria y la logística marítima tienen a la hora de mejorar el comercio y el crecimiento económico es incuestionable. A día de hoy, de acuerdo al Review of Maritime Transport 2014 publicado por la United Nations Conference on Trade And Development (UNCTAD)¹, un volumen total de casi 9.6 billones de toneladas de mercancías han sido movidas alrededor del mundo por la industria marítima durante 2013, lo que representa un crecimiento de un 3.8% en el comercio marítimo mundial. Esto significa que sobre un 90% del volumen comercial a nivel internacional es hoy en día manipulado por la industria marítima. En este sentido, las señales de recuperación económica prevén que los volúmenes de comercio marítimo mundial crezcan al menos durante los

* Email: {cexposit, krobayna, mbmelian, jmmoreno}@ull.es

¹ <http://unctad.org>

próximos años. Bajo este escenario, las principales rutas marítimas están actualmente conectando Asia, América y Europa, siendo éstas las tres regiones líderes en términos económicos en el mundo.

La discusión previa revela una creciente presión ejercida sobre los gestores portuarios para mejorar el rendimiento global cuando se realizan operaciones de trasbordo de mercancías, y consecuentemente incrementar la competitividad de las terminales marítimas de contenedores. Con este objetivo en mente, las principales contribuciones de este trabajo son las descritas a continuación:

- Introducir un nuevo Problema de Asignación de Atraques para barcos portacontenedores que persigue determinar cómo planificar la llegada de los barcos portacontenedores y gestionar los contenedores incluidos en sus planes de estiba.
- Proponer una Búsqueda por Vecindarios Grandes adaptativa que permita resolver el problema de optimización planteado de una forma eficiente.
- Proponer un conjunto de instancias de referencia que recoja las principales características del trasbordo de contenedores entre diferentes barcos portacontenedores en una terminal marítima de contenedores.

El resto del presente trabajo está organizado tal como sigue. La Sección 2 presenta el Problema de Asignación de Atraques con flujos de contenedores de trasbordo en terminales marítimas de contenedores. Posteriormente, la Sección 3 presenta la meta-heurística propuesta para la resolución del problema planteado. La Sección 4 presenta varios experimentos computacionales destinados a evaluar el rendimiento de la meta-heurística propuesta. Por último, la Sección 5 plantea las principales conclusiones extraídas del trabajo e indica varias líneas de trabajo futuro a desarrollar.

2. Problema de Asignación de Atraques

El Problema de Asignación de Atraques, PAA, tiene como objetivo determinar el instante y lugar de atraque de los barcos llegados hasta una terminal marítima de acuerdo a una función objetivo.

Los datos de entrada del PAA están compuestos por un conjunto de n barcos portacontenedores denotado como V , y un conjunto de m de atraques denotado como B en los cuales los barcos deben atracar a lo largo del horizonte de planificación, $H > 0$. Cada barco portacontenedores debe ser atracado en un atraque y cada atraque $b \in B$ solo está disponible para servir a los barcos portacontenedores en una cierta ventana de tiempo. Ésta está definida como $[tw_b, tw'_b]$, donde $tw'_b > tw_b$. Específicamente, tw_b y tw'_b representan el instante de tiempo más pronto y más tarde en que el atraque $b \in B$ está disponible, respectivamente.

Cada barco $v \in V$ tiene una ventana de tiempo para visitar la terminal portuaria. Esta ventana de tiempo está definida como $[t_v, t'_v]$ donde $t'_v > t_v$. En este contexto, t_v y t'_v representan respectivamente, el instante de tiempo de atraque y de partida más pronto y más tarde del barco v . El instante de atraque de cada barco portacontenedores $v \in V$ se denota como bt_v , donde $bt_v \geq t_v$. El

tiempo de espera de cada barco $v \in V$ es el tiempo que pasa desde el comienzo de su ventana de tiempo hasta que atraca. Esto viene definido por la siguiente expresión:

$$wt_v = bt_v - t_v. \quad (1)$$

Además, el tiempo de servicio de un barco depende del volumen de contenedores transportado y las características del atraque que se le ha asignado (por ejemplo, número de grúas, productividad de las grúas, vehículos de transporte interno disponibles, etc). También hay que considerar que el tiempo de servicio de un barco portacontenedores $v \in V$ está en un determinado atraque $b \in B$ es $s_{vb} > 0$. Así que, el instante de partida de un barco $v \in V$ cuando es asignado al atraque $b \in B$ es $dt_v = bt_v + s_{vb}$, donde $dt_v \leq t'_v$. Finalmente, se asume que cada barco portacontenedores puede ser atracado en todos los atraques:

$$t_v + s_{vb} \leq t'_v, \forall v \in V, b \in B. \quad (2)$$

Los contenedores en una terminal marítima de contenedores están organizados en grupos, los cuales están definidos como C . Un grupo $c \in C$, es un conjunto de contenedores $n(c) > 0$ que comparten algunas características (por ejemplo, puerto de destino, peso, dimensiones, etc). Por esa razón, deben ser almacenados simultáneamente en el patio y transportados por el mismo barco.

El patio de la terminal, denotado como Y , se usa para almacenar los contenedores hasta que empiecen a ser recogidos por los barcos o los camiones para que continúen sus rutas. Un grupo de contenedores es almacenado en un subconjunto de pilas adyacentes en un bloque dentro del patio. Los grupos de contenedores asociados con el patio se expresan como $C_Y = C_Y^L \cup C_Y^U$ (donde $C_Y^L \cap C_Y^U = \emptyset$). C_Y^L representa aquellos contenedores que ser descargados de los barcos llegados a puerto y posteriormente almacenados en el patio, mientras que C_Y^U representa aquellos contenedores a ser retirados del patio.

El movimiento de los contenedores dentro de la terminal marítima requiere de un conjunto de vehículos de transporte interno para mover los contenedores desde su origen a su destino. El coste de mover un contenedor desde un origen, $s \in T$, hasta un destino, $d \in T$, es definido como $f_{sd} > 0$. Por lo tanto, el coste de mover un grupo de contenedores, $c \in C$, es calculado como $n(c) \cdot f_{s(c)d(c)}$.

El tiempo que estará un grupo de contenedores, $c \in C$, en la terminal está denotado como $t(c)$ y definido como sigue:

$$t(c) = \begin{cases} bt_{v'(c)} - bt_{v(c)}, & \text{if } c \in C^{BB} \\ H - dt_{v(c)}, & \text{if } c \in C^{BY} \\ bt_{v'(c)}, & \text{if } c \in C^{YB} \end{cases} \quad (3)$$

La primera parte de la expresión determina que los contenedores de un flujo entre barcos están en la terminal desde que llegan en el barco origen hasta que llegue el barco destino. La segunda parte de la ecuación determina que aquellos contenedores llegan en un barco serán almacenados en la terminal hasta el final del horizonte de planificación. La tercera parte de la ecuación indica que los contenedores de un flujo entre el patio y un atraque estarán en la terminal hasta que llegue el barco en el que han de ser cargados.

De acuerdo con la descripción anterior, a continuación se nombran las distintas decisiones que se han de tomar en el PAA:

- Asignar un atraque para cada barco portacontenedores.
- Determinar el instante de atraque de cada barco portacontenedores.
- Seleccionar el origen y destino de cada grupo de contenedores cuando éstos son desconocidos.

La función objetivo del PAA persigue minimizar (i) el tiempo de espera de los barcos portacontenedores, (ii) el coste derivado de mover los contenedores entre atraques y el patio, y (iii) el tiempo que los contenedores están en la terminal. Esto se expresa formalmente de la siguiente manera:

$$\text{mín } \alpha_1 \cdot \sum_{v \in V} wt_v + \alpha_2 \cdot \sum_{c \in C} n(c) \cdot f_{s(c)d(c)} + \alpha_3 \cdot \sum_{c \in C} n(c) \cdot t(c), \quad (4)$$

donde α_1 , α_2 , y α_3 son parámetros del problema cuyos valores son elegidos por el decisor.

En la literatura científica existen multitud de metodos para manejar problemas de optimización multiobjetivos. En este caso, el problema es solucionado con el bien conocido método de suma pesada [?].

La Figura 1 muestra un ejemplo ilustrativo del PAA en el cual se considera una terminal compuesta por $m = 4$ atraques. Además, se consideran $n = 6$ barcos a ser servidos y 5 grupos de contenedores. En este caso, los barcos 1 y 6 son asignados al atraque 1, los barcos 5 y 3 al atraque 2, el barco 2 al atraque 3, y, por último, el barco 4 al atraque 4. Los períodos de tiempo en que los atraques no están disponibles están representados por las áreas sombreadas. Específicamente, los atraques 1, 3 y 4 están disponibles después de un cierto instante de tiempo, mientras que el atraque 2 está siempre disponible. Los instantes de atraque de los barcos están subordinados a la disponibilidad de los atraques y sus ventanas de tiempo. Por ejemplo, el barco 4 tiene que esperar a que el atraque 4 esté disponible, aunque su ventana de tiempo le permitiera atracar con anterioridad. Un caso similar ocurre cuando el barco 6 intenta atracar y el atraque no está disponible debido a que ya hay otro barco en el atraque siendo servido, así que tiene que esperar a que el barco anterior se vaya. Por otro lado, el ejemplo a analizar tiene 5 flujos de contenedores. Particularmente, dos grupos de 189 y 65 contenedores son descargados del barco 1 y 4 respectivamente y almacenados en el patio de la terminal. También, un grupo de 72 contenedores es cargado en el barco 4. Finalmente, dos grupos de 35 y 120 contenedores son descargados del barco 5 y cargados en los barcos 1 y 2, respectivamente.

Finalmente, se ha de mencionar que el PAA con atraques discretos se ha probado que es \mathcal{NP} -duro [?]. De igual forma, el PAA introducido en este artículo puede ser fácilmente reducido éste eliminando los costes de mover los contenedores y los flujos de los mismos. Por consiguiente, se puede decir que este PAA es también \mathcal{NP} -duro.

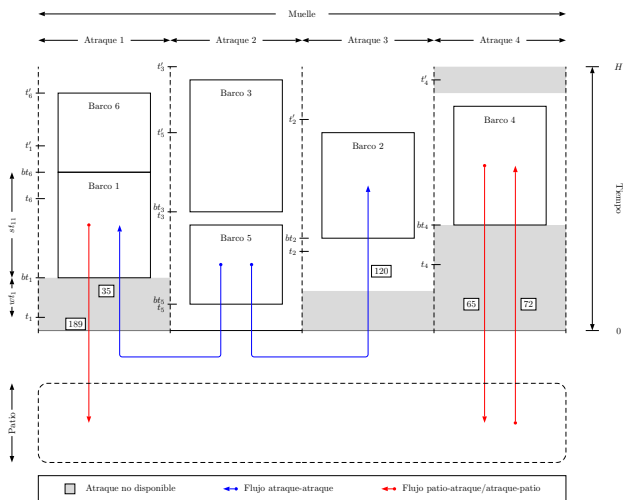


Figura 1: Ejemplo de un Problema de Asignación de Atraques compuesto de $n = 6$ barcos, $m = 4$ atraques, y 5 flujos de contenedores

3. Búsqueda por Vecindarios Grandes

En esta sección se propone una meta-heurística denominada Búsqueda por Vecindarios Grandes adaptativa, BVGA, con el propósito de resolver el Problema de Asignación de Atraques, PAA, introducido en la Sección 2.

El método general de la BVGA fue inicialmente introducido en [?] para abordar el problema de rutado de vehículos con instantes de recogida y entrega. La idea principal consiste en explotar diferentes vecindarios grandes de forma adaptativa. Específicamente, se aplica un gran número de heurísticas robustas dedicadas a destruir y reparar de forma iterativa de acuerdo a una función de clasificación indicando el éxito de las heurísticas anteriores. La BVGA ha sido útil para resolver un gran número de problemas de optimización encontrados en la literatura científica. Algunos ejemplos representativos son encontrados en los artículos [?], [?] y [?], donde se abordan problemas de rutado de operarios y problemas de planificación, problema de rutado de vehículos con tiempos acumulados y problema de planificación de proyectos con recursos limitados, respectivamente.

Algorithm 1: Búsqueda por Vecindarios Grandes Adaptativa

```
1 Data: Problema  $P$ ,  $max$ ,  $maxWI$ ,  $\lambda_{inicial}$ ,  $maxPL$ ,  $\Delta$ 
2 Result: Mejor solución
3  $mejorSolución \leftarrow Voraz(P)$ 
4  $contador \leftarrow 0$ 
5 for  $i = 0; i < max; i++$  do
6    $actual \leftarrow ReconstrucciónVoraz(mejorSolución, \lambda_{start}, maxPL, \Delta)$ 
7   if  $!actual.esFactible()$  then
8      $actual \leftarrow Voraz(P)$ 
9    $actual \leftarrow BúsquedaLocal(P, actual)$ 
10  if  $f(actual) < f(mejorSolución)$  then
11     $mejorSolución \leftarrow actual$ 
12     $contador \leftarrow 0$ 
13  else
14     $contador++$ 
15    if  $contador = maxWI$  then
16       $finalizarbucle$ 
17 return  $mejorSolución$ 
```

La BVGA propuesto en este trabajo emplea un conjunto de parámetros para la resolución del PAA bajo análisis. Éstos son los descritos a continuación:

- max , indica el número máximo de iteraciones del procedimiento principal.
- $maxWI$, indica el número máximo de iteraciones sin mejora del procedimiento principal.
- $\lambda_{inicial}$, indica el factor de destrucción inicial.
- $maxPL$, indica el número máximo de iteraciones del procedimiento de reconstrucción.
- Δ , indica cuanto se incrementa el factor de destrucción por iteración en el método de reconstrucción.

El pseudocódigo de la BVGA se muestra en el Algoritmo 1. El algoritmo comienza generando una solución mediante un procedimiento voraz que asigna los barcos portacontenedores a los atraques disponibles y asigna los orígenes y destinos de los flujos de contenedores respetando un orden topológico, tal como se describe en la Sección 3.1. Cada solución es destruida parcialmente y posteriormente reconstruida para servir como punto de partida a una búsqueda local. Este proceso es repetido hasta que un número máximo de iteraciones es alcanzado. Finalmente, la mejor solución encontrada por el algoritmo es retornada.

El Algoritmo 2 muestra el pseudocódigo del procedimiento de reconstrucción voraz empleado por la meta-heurística. En este caso, se reconstruye una solución para intentar explorar en un espacio de búsqueda más grande que permita aumentar la probabilidad de encontrar el óptimo global del problema a resolver. De forma adaptativa e iterativa se va destruyendo un $\lambda_{start} + \Delta$ por ciento de la solución, línea 6. Dicho factor se denota como λ' y siempre es menor o igual a 100 %, línea 4. Una vez destruido parte de la solución se tiene que reparar para

Algorithm 2: Reconstrucción Voraz

```
1 Data: solución  $S$ ,  $\lambda_{start}$ ,  $maxPL$ ,  $lambdaI$ 
2 Result: nuevaSolución
3 nuevaSolución  $\leftarrow$  soluciónVacía()
4 for ( $\lambda' = \lambda_{start}$ ;  $\lambda' \leq 100$ ;  $\lambda' += \Delta$ ) do
5   | for  $i = 0$ ;  $i < maxPL$ ;  $i ++$  do
6   |   | nuevaSolución  $\leftarrow$  Destruir( $S$ ,  $\lambda'$ )
7   |   | nuevaSolución  $\leftarrow$  Reconstruir(nuevaSolución, ordenTopológico( $S$ ))
8   |   | nuevaSolución.evaluar()
9   |   | if nuevaSolución.esFactible() then
10  |   |   | finalizarbucle
11 return nuevaSolución
```

ello se generará un nuevo orden topológico y se irán añadiendo a la solución los barcos que no lo estén aún. Una vez evaluada la nueva solución, línea 8, y se comprueba si es factible, línea 9. Si la solución es factible se detiene el bucle, línea 10, y se devuelve la solución, línea 11. En caso que no sea factible este método devuelve una solución nula.

3.1. Orden Topológico

El *orden topológico* es uno de los más importantes términos en teoría de grafos debido a sus innumerables aplicaciones. Algunos ejemplos representativos se pueden encontrar en los trabajos [?], [?], y [?]. En términos generales, un orden topológico de un grafo lineal es una ordenación lineal de sus vértices de tal manera que, si (i, j) es uno de sus arcos, entonces i aparece antes que j en el orden.

En el contexto del PAA introducido en la Sección 2, seleccionar un conjunto factible de barcos orígenes y destinos para cada grupo contenedor es una de las decisiones a realizar. Con este propósito, de forma preliminar se selecciona el barco origen y destino para algunos grupos contenedores. Específicamente, un barco origen y un barco destino ha de ser determinado para cada movimiento de un grupo de contenedores de atraque-a-atraque y patio-a-atraque.

4. Resultados Computacionales

La BVGA ha sido implementada en Java SE 8 y ha sido ejecutada en un ordenador equipado con un Intel 3.16 GHz y 4 GB of RAM. Las instancias del problema han sido generadas de acuerdo a las características de terminales marítimas de contenedores reales.

El Cuadro 1 muestra un subconjunto de la media de los resultados computacionales devueltos por un procedimiento multiarranque que genera una solución mediante el procedimiento constructivo y luego aplica una búsqueda local

n	Tran. (%)	Multiarranque			BVGA		
		$f(x)$	Tiempo (s.)	Iter.	Tiempo (s.)	Iter.	Desv. (%)
10	25	10682675.71	0.25	35.81	0.34	46.11	-5.81
	50	10846399.71	0.31	37.92	0.51	47.53	-10.17
20	25	23094985.44	1.15	34.71	2.09	55.34	-21.22
	50	26602826.99	1.49	36.32	2.76	62.82	-21.23
30	25	44775497.05	2.58	38.42	7.97	65.02	-30.65
	50	42962754.69	2.66	39.09	6.04	67.44	-37.41
40	25	57603445.22	7.60	38.19	18.18	66.85	-32.98
	50	60064336.14	8.76	35.01	22.72	72.30	-37.26

Cuadro 1: Media de resultados cuando se establece $\lambda = 25\%$ y $\Delta = 5\%$

hasta que se satisfaga el criterio de parada y la meta-heurística BVGA en escenarios con $m = 10$ atraques. El algoritmo ha sido ejecutado con un número máximo de iteraciones de 100 ó 20 iteraciones sin mejora de la mejor solución encontrada. Cada fila representa 10 instancias del problema, donde cada algoritmo ha sido ejecutado 10 veces por instancia. La columna n representa el número de barcos, cuyo rango va desde 10 a 40. *Tran. (%)* representa el porcentaje de grupos de contenedores a enviar entre pares de barcos. Como se puede comprobar, el BVGA es muy efectivo y eficiente. Especialmente, esta meta-heurística proporciona mejores resultados que el procedimiento multiarranque en todos sus casos donde $\lambda = 25\%$ y $\Delta = 5\%$. Las mejoras de resultados alcanzan casi el 40% en las instancias de problema más grandes empleando unos 22 segundos como máximo. Cabe señalar que la metaheurística finaliza su ejecución siempre empleando menos de las 100 iteraciones establecidas en el criterio de parada.

5. Conclusiones y Líneas de Trabajo Futuras

En este trabajo se aborda un nuevo Problema de Asignación de Atraques multi-objetivo en el contexto de terminales marítimas de contenedores. Este problema tiene un alto impacto en términos económicos y de competitividad en las terminales marítimas de contenedores a nivel mundial. Para poder dar solución a dicho problema se han propuesto varias metaheurísticas. Entre ellas caben ser destacadas un procedimiento multiarranque y una Búsqueda por Vecindarios Grandes Adaptativo.

Los resultados computacionales indican el buen rendimiento de la Búsqueda por Vecindarios Grandes propuesto. Concretamente, esta meta-heurística proporciona soluciones de alta calidad mediante tiempos de computación reducidos.

Tras finalizar este trabajo se pueden plantear diversas líneas de trabajo futuro. En este sentido, entre las principales líneas de trabajo futuras cabrían ser destacadas las siguientes:

- Estudiar cómo afectaría considerar el patio como un conjunto de posiciones en las cuales hay que poner los contenedores en lugar de como un ente donde almacenar contenedores.
- Estudiar la posibilidad de abordar el Problema de Asignación de Atraques dinámico, donde eventos imprevistos (aparición y desaparición de barcos, retraso o adelanto en los tiempos de llegada, etc.) aparecen a lo largo del horizonte de planificación.
- Desarrollar una herramienta de ayuda a la toma de decisiones en las terminales marítimas de contenedores utilizando las técnicas abordadas para la resolución del problema planteado.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por el Ministerio de Economía y Competitividad (proyectos TIN2012-32608 y TIN2015-70226-R). Christopher Expósito-Izquierdo agradece al Gobierno de Canarias por el apoyo financiero recibido a través de su beca de posgraduado.

Referencias

1. Peter Brucker and Sigrid Knust. Complex job-shop scheduling. In *Complex Scheduling*, GOR-Publications, pages 239–317. Springer Berlin Heidelberg, 2012.
2. Attila A. Kovacs, Sophie N. Parragh, Karl F. Doerner, and Richard F. Hartl. Adaptive large neighborhood search for service technician routing and scheduling problems. *Journal of Scheduling*, 15(5):579–600, 2012.
3. Jie Li, Yi Pan, and Hong Shen. More efficient topological sort using reconfigurable optical buses. *The Journal of Supercomputing*, 24(3):251–258, 2003.
4. Shi Qiang Liu and Erhan Kozan. New graph-based algorithms to efficiently solve large scale open pit mining optimisation problems. *Expert Systems with Applications*, pages–, 2015.
5. R. Timothy Marler and Jasbir S. Arora. The weighted sum method for multi-objective optimization: new insights. *Structural and Multidisciplinary Optimization*, 41(6):853–862, 2009.
6. L.F. Muller. An adaptive large neighborhood search algorithm for the resource-constrained project scheduling problem. In *MIC 2009: The VIII Metaheuristics International Conference*. 2009.
7. Glaydston Mattos Ribeiro and Gilbert Laporte. An adaptive large neighborhood search heuristic for the cumulative capacitated vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, 39(3):728 – 735, 2012.
8. Stefan Ropke and David Pisinger. An adaptive large neighborhood search heuristic for the pickup and delivery problem with time windows. *Transportation Science*, 40(4):455–472, 2006.
9. Nitish Umang, Michel Bierlaire, and Ilaria Vacca. Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 54:14 – 31, 2013.