

Asignación de muelles y grúas de muelle en terminales portuarias

Luis Remberto Mercado Vergara

Corporación Universitaria del Caribe – CECAR  
Facultad de Ciencias Básicas, Ingenierías y Arquitectura  
Ingeniería Industrial  
Diplomado en Logística de Puertos  
Sincelejo  
2017

Asignación de muelles y grúas de muelle en terminales portuarias

Luis Remberto Mercado Vergara

Artículo de revisión presentado como requisito final para el cumplimiento del Diplomado en  
logística de puertos para optar al título de  
Ingeniero Industrial

Asesores

Cesar José Vergara Rodríguez  
Ing. Industrial - Especialización en logística integral

Pablo César Pérez Buelvas  
Ing. Industrial - M.Sc. Marketing Magement

Corporación Universitaria del Caribe – CECAR  
Facultad de Ciencias Básicas, Ingenierías y Arquitectura  
Ingeniería Industrial  
Diplomado en Logística de Puertos  
Sincelejo  
2017

**Nota de Aceptación**

El estudiante  
ha aprobado el proyecto  
final con nota 3.6  
(Tres-Seis)



Director

Evaluador 1

Evaluador 2

## Tabla de Contenido

Resumen.....	5
Abstract.....	6
Introducción.....	7
Metodología.....	9
Estado del Arte.....	11
Conclusión.....	14
Referencias Bibliográficas.....	15

### Resumen

En las últimas décadas se ha venido presentado un incremento en el tráfico de buques a nivel mundial, situación que ha ubicado a las terminales portuarias como eslabones fundamentales dentro de la cadena logística internacional, pues los puertos facilitan el intercambio de bienes y servicios de un país a otro. Esto conduce a que las operaciones realizadas en las terminales portuarias se optimicen para que así sean más eficientes y productivas; de este modo los encargados de la planificación y gestión portuaria deben dar respuesta a los problemas más críticos encontrados en los puertos, dentro de estos aparecen la asignación de muelles y la asignación de grúas de muelle. La optimización de estas actividades críticas permite reducir costos ya que se logra asignar posiciones de atraque y una cantidad idónea de grúas que minimizan el tiempo de servicio sobre el buque al menor posible, logrando que se puedan atender más buques con los recursos con que cuentan las terminales. En este artículo se hizo una revisión bibliográfica del problema de asignación de muelles y grúas de muelle en las terminales portuarias determinando el propósito de los enfoques y metodologías propuestas por diversos autores que dieron solución al problema en forma conjunta.

*Palabras clave:* terminales portuarias, grúas de muelle, muelles, asignación, buques.

---

### **Abstract**

In recent decades, an increase in vessel traffic has been sold worldwide, a situation that has placed port terminals as key links within the international logistics chain, as ports facilitate the exchange of goods and services of a country to another. This means that the operations carried out at the port terminals are optimized to make them more efficient and productive; Thus, those responsible for port planning and management must respond to the most critical problems encountered in ports, including the berth allocation and quay crane assignment problems. The optimization of these critical activities allows to reduce costs since it is possible to allocate docking positions and an adequate amount of cranes that minimize the time of service on the ship to the smallest possible, allowing more vessels to be served with the resources available to them. Terminals. In this article, a bibliographical review was made of the berth allocation and quay crane assignment in port terminals, determining the purpose of the approaches and methodologies proposed by various authors who solved the problem together.

*Keywords:* ports terminals, quay crane, berth, assignment, vessel.

## Introducción

Con el fenómeno de la globalización y desarrollo económico de los países, se ha generado un crecimiento en forma acelerada del transporte marítimo (incremento de los volúmenes de mercancías transportadas) generando mayores exigencias en la gestión de operaciones portuarias (Cuberos Gallardo, 2015). Esto ha creado la necesidad de formular o diseñar modelos de optimización sobre todas las operaciones de los puertos para mejorar las productividades, eficiencias y demás problemáticas que día a día se presentan en estos (Diabat & Theodorou, 2014).

Los puertos son infraestructuras que se construyen con la finalidad de responder a las necesidades que se derivan del crecimiento del volumen de mercancías transportadas dentro de la cadena logística internacional (Lalla-Ruiz, Expósito-Izquierdo, Melián-Batista, & Moreno-Vega, 2015). Gracias a la funcionalidad de los puertos los cuales permiten el almacenamiento y transferencias de mercancías para exportar e importar desde una región determinada, los encargados de la programación y planificación de las operaciones dentro de los puertos deben considerar y gestionar factores que ayuden a reducir los tiempos de servicios sobre los buques (disponibilidad de atraque, cantidad equipos o recurso a utilizar y el tiempo de manejo del buque) debido a que son las medidas más críticas en la gestión de operaciones portuarias y que determinan la de efectividad, eficiencias y productividades de los puertos (Emde & Boysen, 2016).

En las terminales portuarias existen recursos que son críticos y limitados, dentro de los más importantes se encuentran el espacio y cantidad de muelles y el equipo para manejo de cargas; lo que ocasiona un gran desafío en la programación de los buques que arriban a los puertos, debido a que todos estos manejan diferentes volúmenes y tipos de mercancías a cargar o descargar (Peng, Zhou, & Li, 2015). Los grandes costos en que incurren las terminales portuarias por el tiempo en que los buques se encuentran en el puerto, obligan a que se minimicen el tiempo total de servicios sobre el buque (tiempo de espera + tiempo de operaciones) mejorando las eficiencias

y así mismo evitar penalizaciones por parte de las navieras (Pratap, Nayak, Kumar, Cheikhrouhou, & Tiwari, 2017).

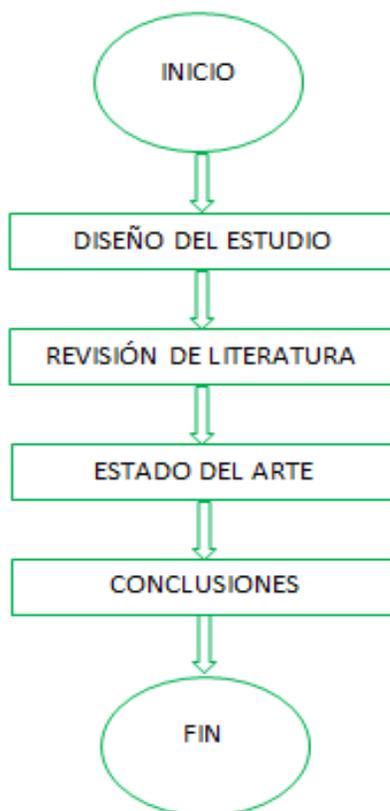
La reducción del tiempo de servicio de un buque en puerto para el mejoramiento de sus eficiencias y productividades conduce a la definición de dos problemas principales encontrados en la literatura los cuales son la asignación de muelles y la asignación de grúas de muelles. El primero consiste en la asignación de posiciones de atraque en el muelle a cada buque que arriba al puerto considerando los siguientes criterios: el volumen de carga que maneja el buque, las condiciones en que se encuentran las mareas, las ventanas de tiempos de los buques y por último la profundidad del agua en el muelle buscando con esto determinar la mejor posición en muelle para que el buque reduzca el tiempo total de operaciones y de espera (Bierwirth & Meisel, 2015; Peng et al., 2015). Por otra parte, el segundo problema busca determinar la secuencia más óptima en las actividades de cargar y descargar contenedores de los buques de manera en que un grupo específico de grúas realice estas actividades reduciendo el tiempo de operación al mínimo posible (Al-Dhaheeri & Diabat, 2015). Par dar solución a este problema al momento de asignar las grúas de muelle se hace necesario considerar los siguientes criterios: número de grúas que cargaran y descargarán los contenedores, el tiempo de asignación de la grúa el respectivo buque, distribución de las grúas sobre el buque y la secuencia de las actividades a desarrollar por las grúas (Arango, Cortes, Ruiz, & Navascues, 2012; Porto, 2014).

Estas características que se suministran en cada uno de los problemas descritos (asignación de muelles y grúas de muelle) suministran la información necesaria para planificar, programar y gestionar la asignación de estos recursos críticos eficientemente para que se logre garantizar el cumplimiento de las actividades desarrolladas en las terminales portuarias en el mínimo tiempo posible (Fu & Diabat, 2015).

A continuación, se realizó una revisión bibliográfica sobre el tema de asignación de muelles y grúas de muelle por la interrelación de estos dos problemas los cuales comparten un objetivo en común y es el de reducir el tiempo total de servicio del buque en puerto incrementando las eficiencias y productividades del mismo.

## Metodología

Este estudio se realizó bajo las siguientes fases metodológicas (ver figura 1):



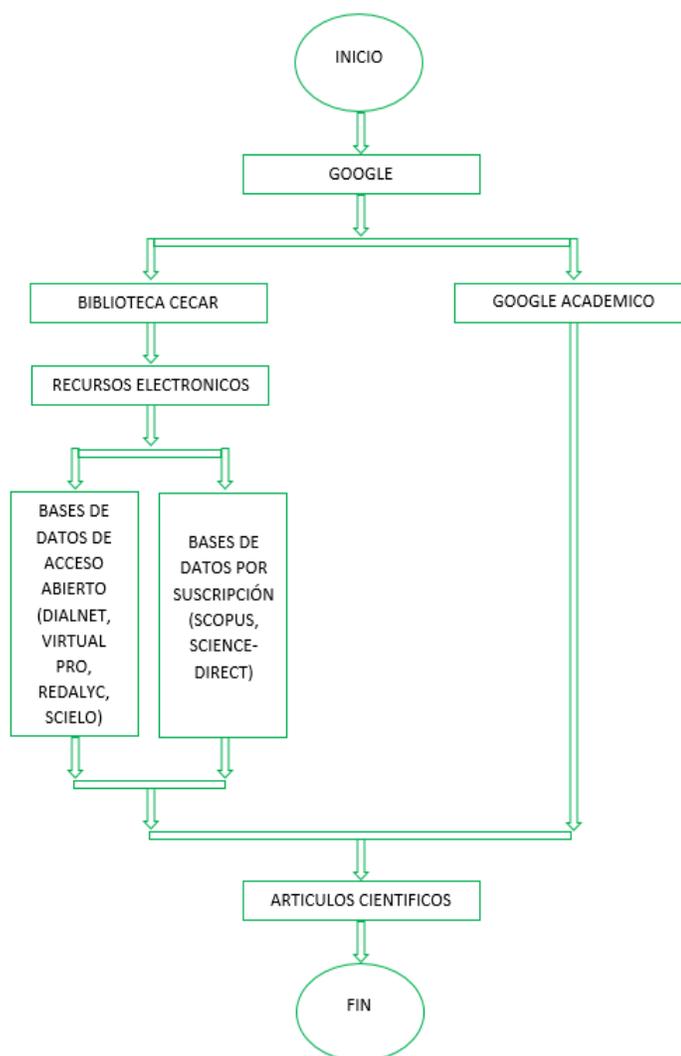
*Figura 1.* Ruta metodológica

Fuente: Elaboración propia

- 1) Fase 1: Diseño del estudio (Se escoge el tema a trabajar, en este caso asignación de muelles y grúas de muelle en terminales portuarias).
- 2) Fase 2: Revisión de literatura o fuentes bibliográficas de trabajos que han propuesto o formulado metodologías para dar solución a la problemática estudiada.
- 3) Fase 3: Construcción del estado del arte y análisis de la información encontrada en las referencias bibliográficas.

- 4) Fase 4: Determinar conclusiones sobre el tema abordado, dejando explícito el objetivo del estudio y que buscaron los diferentes autores al solucionar esta problemática de asignación de muelles y grúas de muelle.

Las referencias bibliográficas se obtuvieron bajo la siguiente ruta de investigación (Ver figura 2).



*Figura 2.* Ruta de investigación

Fuente: Elaboración propia

### Estado del arte

El desarrollo constante de los puertos se ha presentado como un resultado del incremento de los volúmenes de carga transportados, la globalización de los mercados, etc. Llevando a que las terminales portuarias sean más competitivas día a día, aumenten sus eficiencias reduciendo el tiempo de servicio sobre el buque, costos de manipulación o manejo de la carga y costos de fletes para ser más atractivas a las navieras (Arango et al., 2012; Al-Dhaheiri & Diabat, 2015; Pratap et al., 2017).

El arribo de un buque a puerto obliga a realizar una planificación y programación de las operaciones portuarias en forma eficiente lo que conduce a que los gestores portuarios satisfagan principalmente los problemas más esenciales que se presentan en los puertos los cuales son: asignación de muelle y asignación de recursos o equipos para cargar y descargar mercancías. Estas dos problemáticas comparten un objetivo y es que buscan minimizar el tiempo de permanencia del buque en puerto hasta el mínimo posible, considerando ciertas características como lo son: el tamaño del buque, el lugar destinado para almacenar y transferir las mercancías, y el volumen de carga a manipular (Barros, Costa, Oliveira, & Lorena, 2011; Bierwirth & Meisel, 2015; Han, Gong, & Jo, 2015a; He, 2016a). Todo esto ayuda a planificar las operaciones dentro del puerto para asignar muelles y equipos de manejo de carga (grúas de muelle) en forma eficaz y eficiente ( Yan, Lu, Hsieh, & Lin, 2015; Zhen, 2015; Shang, Cao, & Ren, 2016; Zhang, Zhang, Chen, Chen, & Chen, 2017).

Antes de asignar muelles y grúas de muelle, los gestores o planificadores de operaciones portuarias deben tener en cuenta estas situaciones (Arango et al., 2012; Bierwirth & Meisel, 2015; He, 2016a):

- 1) Posición de atraque de cada buque, esta se debe de asignar considerando las zonas de almacenamiento de las mercancías a descargar y 2) Asignar grúas de muelle de forma en que se puedan atender a todos los buques atracados en los muelles del puerto reduciendo los tiempos de operación. 3) Programar el tiempo de atraque total de cada buque y sincronizarlo con el tiempo

de arribo de los demás buques planificados en la jornada de trabajo para reducir los tiempos de espera.

Diversos estudios muestran que los autores con el pasar del tiempo han buscado dar solución a estas problemáticas encontradas en las terminales portuarias, para el caso de la asignación de muelles encontramos que ( Umang, Bierlaire, & Vacca, 2013; Robenek, Umang, Bierlaire, & Ropke, 2014; Ting, Wu, & Chou, 2014; Frojan, Correcher, Alvarez-Valdes, Koulouris, & Tamarit, 2015; Han, Gong, & Jo, 2015b; Yan et al., 2015; Zhen, 2015) realizaron adaptaciones a este problema proponiendo metodologías de resolución (Programación entera mixta, algoritmos genéticos, modelos matemáticos, etc.) con el objetivo de minimizar el tiempo total de permanencia de los buques en la terminal portuaria, para disminuir los costos en cada una de las operaciones efectuadas en el buque y de este modo poder atender al mayor número de buques durante un horizonte de tiempo establecido.

Por otra parte, encontramos que en el caso de la asignación de grúas de muelles también se han realizado adaptaciones al problema con metodologías de resolución similares, es decir, basas en Programación entera mixta, algoritmos genéticos, modelos matemáticos, etc. Encontrando que ( Chen, Lee, & Goh, 2014; De Oliveira, David Barbosa, & Lamprou, 2016; Luo, Wu, & Mendes, 2016; Shang et al., 2016; Chen & Bierlaire, 2017; Wu & Ma, 2017) dieron solución al problema de asignación de muelles compartiendo el objetivo común de minimizar el tiempo total de las operaciones de cargar y descargar contenedores de los grandes buques portacontenedores incrementando las eficiencias y productividades de las terminales portuarias, convirtiéndose en más atractivas para las navieras.

Los problemas encontrados en la operaciones en los buques (operativa de buque) en los puerto está fuertemente relacionado, es decir, estos problemas están interconectados llevando a otro grupo de autores a trabajar estos problemas de asignación de muelles y grúas de muelle en forma conjunta, como lo es el caso de (Iris, Pacino, Ropke, & Larsen, 2015) quienes estudiaron el problema de asignación de muelles integrado con la asignación de grúas de muelles; esta integración la resolvieron a través del desarrollo de un modelo de partición de conjuntos, en

donde los experimentos computacionales arrojaron soluciones factibles con mejores eficiencias que las otras técnicas estudiadas en la literatura. También aparece el estudio realizado por (Han et al., 2015a) quienes en respuesta al crecimiento en los volúmenes de carga que se transportan en la actualidad y en la mejora constante de la eficiencias de los puertos integraron los dos problemas (asignación de muelles y grúas de muelle), estos dan solución a esta integración a través de un algoritmo genético con la metodología de enjambre de partículas, lo que les permitió determinar una asignación continua de posiciones de atraque considerando no sólo las restricciones más habituales de los muelles (el volumen de carga que maneja el buque, las condiciones en que se encuentran las mareas, las ventanas de tiempos de los buques, la profundidad del agua en el muelle) sino también el área que pueden cubrir las grúas de muelle, logrando así mejorar las productividades del puerto.

El problema de asignación de muelles y de grúas de muelle presentado en las terminales de contenedores llevo a (Hu, 2015) a investigar esos problemas a través de la aplicación de una heurística, pero con un horizonte de tiempo rodante, es decir, no se reinicia el sistema con la llegada y salida de los buques del puerto, sino que se trabaja en un horario de corrido, esta metodología permitió incrementar el rendimiento total del puerto, y minimizar los tiempos y costos de operaciones sobre los buques. Del mismo modo y con el propósito de minimizar el retraso total en los tiempos de salida de los buques y su consumo energético como consecuencia del manejo de grandes volúmenes de carga (He, 2016b) con ayuda de la programación entera mixta integraron la simulación con la optimización, para así evaluar el problema en diferentes escenarios mediante la simulación y a través de la optimización determinar el área de solución el cual incremente las eficiencias de la terminal portuaria para el problema de asignación de muelles y grúas de muelles.

En la planificación de las llamadas operaciones costeras (Hsu, 2016) trabajo sus dos problemas más esenciales la asignación de muelles y asignación de grúas de muelle; este autor cambia el enfoque o metodología de trabajo tradicional ya que a un buque que se le asigna un muelle determinado y una cantidad de grúas específicas, pueden sufrir variaciones con el transcurrir de la operación de cargue y descargue, es decir, las grúas con este nuevo enfoque no

se consideran invariantes en el tiempo, lo que lleva a mejorar el rendimiento sobre el trabajo realizado en un buque. Esta metodología fue trabajada mediante una heurística por eventos la cual permite hacer la modificación del número de grúas asignadas a los buques a diferencia de otras investigaciones que trabajan en algoritmos genéticos. Por otro lado, (Türkoğulları, Taşkın, Aras, & Altinel, 2014) estudiaron la asignación integrada de muelles y grúa de muelle, a través de la programación lineal con enteros binarios así los autores determinaron la posición idónea de cada buque en muelle y la cantidad total de grúas disponible para que operen el buque, así minimizan el tiempo de espera y de operaciones en el puerto.

El estudio integrado de los temas más cruciales de la operativa de buque en las terminales portuarias (asignación de muelles y grúas de muelle) han generado mucha atención en los últimos años en la literatura, debido a que permiten aumentar las eficiencias, eficacia y productividades del puerto con la minimización del tiempo total de servicio de los buques (Karam & Eltawil, 2016; Liu, Zheng, & Zhang, 2016). Todos estos estudios se han trabajado con diferentes enfoques como el propuesto por (Liu et al., 2016) que abordaron el problema con programación entera mixta, así lograron optimizar los recursos del puerto (grúas de muelle y posiciones de atraque). Por otra parte, (Karam & Eltawil, 2016) plantearon un algoritmo genético para optimizar los recursos críticos con lo que cuentan las terminales portuarias (muelles y grúas de muelle) que son los que restringen la atención sobre los buques y a través de la optimización de estos se logra reducir el tiempo de espera de los buques y el de operaciones sobre este, aumentando las eficiencias del puerto y convirtiéndolos en atractivos para cada uno de los actores de la cadena logística internacional.

## Conclusiones

Al optimizar los recursos disponibles en los puertos y que limitan la atención sobre los buques como lo son los muelles y grúas de muelle se logra optimizar las operaciones realizadas en este, ya que todas las actividades se deben de realizar en forma eficiente para que estos recursos considerados como cuellos de botellas incrementen la productividad del puerto debido a los muelles y las grúas de muelle determinan el tiempo en que los buques están en la terminal portuaria.

Como los muelles son un recurso escaso y las grúas de muelles son el más valioso, se consideran prioritarios al momento de gestionar las terminales portuarias porque los muelles determinan la capacidad o el número de buque que se pueden atender durante un horizonte de tiempo planificado y las grúas de muelle son las únicas que pueden realizar las operaciones de cargue y descargue de contenedores de los grandes buques portacontenedores, por tal motivo, es necesario hacer una planificación, programación y gestión eficiente en la asignación de muelles y grúas de muelle para así incrementar las productividades y eficiencias de todo el terminal a través de la operativa de los buques, porque se logra reducir el tiempo en que estos permanecen en puerto hasta alcanzar el mínimo posible.

Con la revisión bibliográfica que se realizó se encontró que el objetivo principal de dar solución al problema integrado de asignación de muelles y grúas de muelles es reducir el tiempo de servicio sobre el buque, sin olvidar que se debe de realizar pero con una reducción de los costos y consumo energético de la terminal portuaria y que al mismo tiempo esta se convierta en más atractivas para las navieras con el mejoramiento de sus productividades y eficiencias.

### Referencias Bibliográficas

- Al-Dhaheri, N., & Diabat, A. (2015). The Quay Crane Scheduling Problem. *Journal of Manufacturing Systems*, 36, 87–94. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2015.02.010>
- Arango, C., Cortes, P., Ruiz, P., & Navascues, J. (2012). Operativa de transferencia en las terminales de contenedores portuarias : estado del arte. *6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management XVI Congreso de Ingeniería de Organización*, (2004), 781–788.
- Barros, V. H., Costa, T. S., Oliveira, A. C. M., & Lorena, L. A. N. (2011). Model and heuristic for berth allocation in tidal bulk ports with stock level constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 60(4), 606–613. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.12.018>
- Bierwirth, C., & Meisel, F. (2015). A follow-up survey of berth allocation and quay crane scheduling problems in container terminals. *European Journal of Operational Research*, 244(3), 675–689. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2014.12.030>
- Chen, J. H., & Bierlaire, M. (2017). The study of the unidirectional quay crane scheduling problem: complexity and risk-aversion. *European Journal of Operational Research*, 260(2), 613–624. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.01.007>
- Chen, J. H., Lee, D.-H., & Goh, M. (2014). An effective mathematical formulation for the unidirectional cluster-based quay crane scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 232(1), 198–208. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.06.051>
- Cuberos Gallardo, M. (2015). *Algoritmo de recocido simulado para la mejora de la eficiencia de una terminal intermodal*.
- De Oliveira, J. P. R., David Barbosa, J., & Lamprou, M. (2016). Multi-objective optimization of the quay crane assignment and scheduling problem: Time and movement optimization. In

- IISA 2016 - 7th International Conference on Information, Intelligence, Systems and Applications*. Recuperado de: <https://doi.org/10.1109/IISA.2016.7785350>
- Diabat, A., & Theodorou, E. (2014). An Integrated Quay Crane Assignment and Scheduling Problem. *Computers & Industrial Engineering*, 73, 115–123. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2013.12.012>
- Emde, S., & Boysen, N. (2016). Berth allocation in container terminals that service feeder ships and deep-sea vessels. *The Journal of the Operational Research Society; Basingstoke*, 67(4), 551–563.
- Frojan, P., Correcher, J. F., Alvarez-Valdes, R., Koulouris, G., & Tamarit, J. M. (2015). The continuous Berth Allocation Problem in a container terminal with multiple quays. *Expert Systems with Applications*, 42(21), 7356–7366. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2015.05.018>
- Fu, Y.-M., & Diabat, A. (2015). A Lagrangian relaxation approach for solving the integrated quay crane assignment and scheduling problem. *Applied Mathematical Modelling*, 39(3), 1194–1201. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2014.07.006>
- Han, X., Gong, X., & Jo, J. (2015a). A new continuous berth allocation and quay crane assignment model in container terminal. *Computers & Industrial Engineering*, 89, 15–22. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.04.033>
- He, J. (2016a). Berth allocation and quay crane assignment in a container terminal for the trade-off between time-saving and energy-saving. *Advanced Engineering Informatics*, 30(3), 390–405. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.aei.2016.04.006>
- Hsu, H.-P. (2016). A HPSO for solving dynamic and discrete berth allocation problem and dynamic quay crane assignment problem simultaneously. *Swarm and Evolutionary Computation*, 27, 156–168. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.swevo.2015.11.002>

- Hu, Z.-H. (2015). Multi-objective genetic algorithm for berth allocation problem considering daytime preference. *Computers & Industrial Engineering*, 89, 2–14. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2015.04.035>
- Iris, Ç., Pacino, D., Ropke, S., & Larsen, A. (2015). Integrated Berth Allocation and Quay Crane Assignment Problem: Set partitioning models and computational results. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 81, 75–97. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2015.06.008>
- Karam, A., & Eltawil, A. B. (2016). Functional integration approach for the berth allocation, quay crane assignment and specific quay crane assignment problems. *Computers & Industrial Engineering*, 102, 458–466. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.04.006>
- Lalla-Ruiz, E., Expósito-Izquierdo, C., Melián-Batista, B., & Moreno-Vega, J. M. (2015). Decentralized cooperative metaheuristic for the dynamic berth allocation problem. *Inteligencia Artificial*, 18(55), 1–11. Recuperado de: <https://doi.org/10.4114/ia.v18i55.1097>
- Liu, C., Zheng, L., & Zhang, C. (2016). Behavior perception-based disruption models for berth allocation and quay crane assignment problems. *Computers & Industrial Engineering*, 97, 258–275. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.04.008>
- Luo, J., Wu, Y., & Mendes, A. B. (2016). Modelling of integrated vehicle scheduling and container storage problems in unloading process at an automated container terminal. *Computers & Industrial Engineering*, 94, 32–44. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.01.010>
- Peng, J., Zhou, Z., & Li, R. (2015). A Collaborative Berth Allocation Problem with Multiple Ports Based on Genetic Algorithm. *Journal of Coastal Research; Fort Lauderdale*, (73), 290–297.

- Porto, A. (2014). Diseño de un Modelo de Programación de Grúas Pórticos teniendo en cuenta Mantenimientos Preventivos. *ResearchGate*.
- Pratap, S., Nayak, A., Kumar, A., Cheikhrouhou, N., & Tiwari, M. K. (2017). An integrated decision support system for berth and ship unloader allocation in bulk material handling port. *Computers & Industrial Engineering*, *106*, 386–399. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2016.12.009>
- Robenek, T., Umang, N., Bierlaire, M., & Ropke, S. (2014). A branch-and-price algorithm to solve the integrated berth allocation and yard assignment problem in bulk ports. *European Journal of Operational Research*, *235*(2), 399–411. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.08.015>
- Shang, X. T., Cao, J. X., & Ren, J. (2016). A robust optimization approach to the integrated berth allocation and quay crane assignment problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *94*, 44–65. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.06.011>
- Ting, C.-J., Wu, K.-C., & Chou, H. (2014). Particle swarm optimization algorithm for the berth allocation problem. *Expert Systems with Applications*, *41*(4), 1543–1550. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2013.08.051>
- Türkoğulları, Y. B., Taşkın, Z. C., Aras, N., & Altınel, İ. K. (2014). Optimal berth allocation and time-invariant quay crane assignment in container terminals. *European Journal of Operational Research*, *235*(1), 88–101. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2013.10.015>
- Umang, N., Bierlaire, M., & Vacca, I. (2013). Exact and heuristic methods to solve the berth allocation problem in bulk ports. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, *54*, 14–31. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2013.03.003>

- Wu, L., & Ma, W. (2017). Quay crane scheduling with draft and trim constraints. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 97, 38–68. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2016.10.011>
- Yan, S., Lu, C.-C., Hsieh, J.-H., & Lin, H.-C. (2015). A network flow model for the dynamic and flexible berth allocation problem. *Computers & Industrial Engineering*, 81, 65–77. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2014.12.028>
- Zhang, A., Zhang, W., Chen, Y., Chen, G., & Chen, X. (2017). Approximate the scheduling of quay cranes with non-crossing constraints. *European Journal of Operational Research*, 258(3), 820–828. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2016.10.021>
- Zhen, L. (2015). Tactical berth allocation under uncertainty. *European Journal of Operational Research*, 247(3), 928–944. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2015.05.079>