

Operativa de transferencia en las terminales de contenedores portuarias: estado del arte

Transport operations in the container terminals: literature review

Carlos Arango¹, Pablo Cortes, Pablo Ruiz, Javier Navascues

Abstract: In this paper we analyze the transport operations in the container terminals; we describe and classify the main works in logistics processes and methodologies in this operation. Consider to the main papers we defined three sub-operations inside transport operations and present a survey of methods for their optimization.

Resumen: En éste trabajo se realiza el análisis de la operativa de transferencia en las terminales de contenedores portuarias, identificando y analizado los principales trabajos que abordan desde diferentes enfoques esta operativa. De acuerdo con los trabajos encontrados se definen los tres sub-sistemas más importantes que consideran los autores, así como sus objetivos, criterios y características.

Keywords: Ports, Container, Planning, Systems, Operations. **Palabras clave:** Puerto, Contenedor, Planificación, Sistemas, Operativas

1.1 Introducción

Diferentes autores han realizado una división de la operativa de las terminales de contenedores portuarias (TCP) en sub-sistemas, con el objetivo de simplificar la gestión y optimización global de estas. Autores como Steenken et al (2004) y Steenken D y Voß S. (2008) afirman que es casi imposible obtener buenos resultados si se optimiza una TCP como conjunto debido a la diversidad en la maquinaria de manipulación. Ambrosino et al (2004) afirma que todas las operaciones de una

¹ Dpto. de Organización Industrial y Gestión de Empresas II. Grupo de Ingeniería de Organización. Escuela Técnica Superior de Ingenieros. Universidad de Sevilla. Camino de los Descubrimientos, s/n, Isla de la Cartuja, 41092 Sevilla. cap@esi.us.es

TCP deben ser optimizadas con el fin de lograr la máxima productividad global. Las tres principales operativas en una TCP son:

- Operativa de Buque
- Operativa de almacenaje y apilado
- Operativa de transferencia

En este trabajo se realiza una clasificación de los diferentes artículos relacionados con la operativa de transferencia en las TCP, los artículos son clasificados según los tres sub-sistemas identificados en esta operativa. De igual forma se realiza un análisis de cada sub-sistema. Por último son expuestas las principales conclusiones del trabajo.

1.2 Operativa de transferencia

Una terminal de contenedores tiene dos principales tipos de transporte; el transporte horizontal que moviliza los contenedores a través de toda la terminal y el transporte vertical para apilar los contenedores. Debido a la complejidad de esta operativa se ha dividido en las siguientes sub-sistemas.

- Gestión del transporte en los muelles
- Gestión del transporte terrestre
- Gestión y programación de las grúas

El transporte horizontal se subdivide en dos según la zona de la TCP donde se realicen los desplazamientos dando lugar al transporte en muelles y transporte terrestre. El primero encargado de los desplazamientos de contenedores entre la zona de almacenaje (ZA) y la zona de muelles. El segundo encargado de los desplazamientos entre la ZA y la zona de llegada de trenes y camiones.

1.2.1 Gestión del transporte en muelles “*The quayside transport*”

Para realizar las operaciones de carga y descarga de los contenedores en los buques, es necesario transportar los contenedores desde los diferentes bloques de contenedores en la ZA hasta las grúas que estén asignadas a cada buque (*Quayside Transport Planning - QTP*). Esta zona de la terminal es conocida como *buffer* y es necesario optimizar el transporte en esta por motivos tales como:

- La sincronización de los vehículos de transporte horizontal con las grúas pórtico evita la generación de tiempos muertos y cuellos de botella.
- El diseño de rutas puede eliminar posibles atascos en la zona de muelles.

- Los vehículos de transporte horizontal son utilizados constantemente en toda la TCP por lo cual su óptima asignación permite un buen funcionamiento global.
- La eficiencia de la operación de carga y descarga de contenedores que realizan las grúas pórtico depende directamente de la eficiencia del transporte en muelles.

En los últimos tiempos el transporte entre la zona de muelles y la ZA, está siendo realizado por vehículos auto-guiados más conocidos como AGVs *Automated Guided Vehicles*. Estos vehículos son más eficientes que los equipos tradicionales pero menos flexibles ante la aparición de un acontecimiento no esperado. En la literatura se encuentran trabajos como Ying-Chin y Ping-Fong (2004), Ho y Chien (2006), Grunow et al (2004) y Duinkerken et al (2006a) que evalúan los beneficios de la automatización de las TCP con este tipo de vehículos y concluyen que en muchos casos para lograr grandes beneficios con estos vehículos es necesario una buena programación y sincronización con las grúas que realizan los movimientos verticales.

Existe otro tipo de vehículo auto-guiado conocido como ALV (*automated lifting vehicle*) el cual puede cargar y descargar un contenedor sin la ayuda de otro equipo de manipulación. En trabajos como Nguyen y Kim (2009), Vis y Harika (2004), Yang et al (2004), Duinkerken et al (2006b) realizan comparaciones entre los AGVs y los ALVs en terminales de contenedores automatizadas.

En muchos trabajos el principal objetivo es minimizar los tiempos de espera de las grúas pórtico y las *Rubber Tired Gantry-RTG* o las *Rail Mounted Gantry-RMG*, por encima de la minimización de los tiempos de viaje de los AGVs, ya que por lo general las TCP cuentan con menos grúas pórtico y RTG que con AGVs.

En la tabla 1 se realiza una clasificación de algunas de las referencias más relevantes en la gestión del transporte en muelles que se encuentran en la literatura. El objetivo predominante en estos trabajos es minimizar el tiempo de desplazamiento y la pérdida de tiempos por posibles cuellos de botella.

En la figura 1 se puede ver el *Layout* de una TCP en la cual el transporte en muelles es realizado por AGVs, los puntos negros representan los lugares en los que los AGVs entregarán o recibirán cada contenedor por la respectiva grúa.

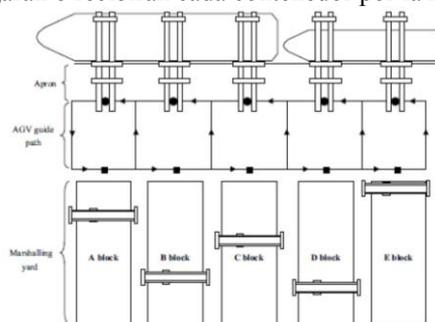


Figura 1 Terminal de contenedores automatizada con AGV

Fuente: Kim et al (2004)

Tabla 1 Clasificación de las referencias más relevantes en la gestión del transporte en muelles.

| Trabajo | Modelo | Metodología de resolución | objetivo |
|-------------------------|----------------------|---------------------------|----------------------|
| Vis et al (2005) | Proceso algorítmico | Modelos | Minimizar recursos |
| Nguyen y Kim (2009) | MIP | Heurística | Minimizar tiempos |
| Kim y Bae (2004) | MIP | Heurística | Minimizar tiempos |
| Ho y Hsieh (2004) | LP | Simulación | Minimizar distancias |
| Ho y Chien (2006) | Modelo de simulación | Simulación | Evaluar estrategias |
| Duinkerken et al (2006) | Modelo de simulación | Simulación | Evaluar estrategias |
| Grunow et al (2004) | MIP | Heurística | Minimizar costos |
| Bish et al (2005) | Proceso algorítmico | Heurística | Minimizar tiempos |
| Briskorn et al (2006) | Modelo de simulación | Simulación | Evaluar estrategias |
| Grunow et al (2006) | Modelo de simulación | Simulación | Evaluar estrategias |
| Duinkerken et al (2006) | Modelo de simulación | Simulación | Evaluar equipos |
| Lehmann et al (2006) | Proceso algorítmico | Heurística | Min. tiempos muertos |
| Kim et al (2006) | Proceso algorítmico | Heurística | Min. tiempos muertos |

1.2.2 Gestión del transporte terrestre “The landside transport”

En esta operativa se planifican todos los movimientos de contenedores que se realizan en una TCP. A pesar de que su principal objetivo es el transporte de contenedores entre la ZA y la zona de llegada de camiones y trenes, también aquí son tenidos en cuenta el resto de desplazamientos necesarios para el desarrollo de otras actividades como: inspecciones en aduanas, desembalaje de la carga, reubicación de contenedores vacíos, etc.

La gestión del transporte terrestre es enfocada desde diferentes puntos de vista en la literatura. Trabajos como Chao (2002) y Scheuerer (2006) proponen una variación del “*Vehicle Routing Problem*” (VRP) a rutas de camiones, lo que genera el “*Trailer Routing Problem*” (TRP). El objetivo es minimizar las distancias dentro de la terminal. Esta propuesta ha servido de base para el desarrollo de trabajos como los de Jula et al (2005), Mattfeld y Orth (2006), Namboothiri y Elera (2008), y Caris y Janssens (2008) que modelan el acarreo de los contenedores dentro de la terminal con el objetivo de minimizar costes y distancias.

Otros trabajos se enfocan en la gestión de sólo ciertas maquinarias de transporte terrestre como en Corry y Kozan (2006) y Hansen (2004) que gestionan el transporte terrestre realizado por camiones con más de una plataforma (tren-camión), y Das y Spasovic (2003) que proponen un procedimiento para la asigna-

ción de *straddle carriers* a camiones para realizar la operación de carga y descarga de contenedores.

En el trabajo de Nishimura et al (2005) abordan los movimientos internos de una TCP como un problema de rutas de camiones en la explanada, basándose en que la optimización de estas rutas reduce la distancia de los trayectos realizados por los camiones de un punto a otro en la terminal. Realizan una variación del VRP en el VRPB (*The vehicle routing problem backhauls*), este es el problema de rutas de vehículos con recorridos de regreso.

Los autores proponen un modelo para optimizar las rutas de los camiones que realizan movimientos de contenedores en las TCP considerando flujos no proporcionales como por ejemplo pocos puntos de origen y muchos de destinos. Este modelo permite optimizar las rutas de ida y regreso entre diferentes punto ubicados en cualquier parte de la TCP. Como escenario los autores plantean una situación donde se tienen 3 puntos de recibo de contenedores y 9 localizaciones donde estos están almacenados. Al solucionar el problema se obtiene una secuencia de rutas que conectaran los puntos de almacenaje y entrega. La figura 2 muestra el escenario utilizado.

La función objetivo del modelo es minimizar las distancias de todos los recorridos necesarios para movilizar todos los contenedores. En la tabla 2 se realiza una clasificación de las referencias más relevantes en la gestión del transporte terrestre que se encuentran en la literatura. El principal objetivo de esta sub-operativa es minimizar las distancias que recorren cada vehículo miradas así o también como tiempos o costos.

Tabla 2 Clasificación de los trabajos enfocados en la optimización del transporte terrestre

| Trabajo | Modelo | Metodología de resolución | objetivo |
|----------------------------|-------------|---------------------------|------------------------------|
| Jula et al (2005) | Algorítmico | Heurística | Minimizar distancias |
| Mattfeld y Orth (2006) | MIP | Heurística | Mín. utilización del recurso |
| Jinxin et al (2008) | IP | Algoritmo Genético | Mín. tiempo de espera |
| Scheuerer (2006) | Algorítmico | Heurística | Minimizar distancias |
| Chao (2002) | Algorítmico | Heurística | Minimizar distancias |
| Corry y Kozan (2006) | MIP | Modelos analíticos | Mín. tiempo y manipulaciones |
| Hansen (2004) | Review | Review | |
| Namboothiri y Erera (2008) | IP | Heurística | Minimizar costos |
| Das y Spasovic (2003) | Algorítmico | Simulación + heurística | Mín. tiempo y manipulaciones |
| Nishimura et al (2005) | IP | Heurística | Minimizar distancias |
| Caris y Janssens (2008) | MIP | Heurística | Minimizar costes |

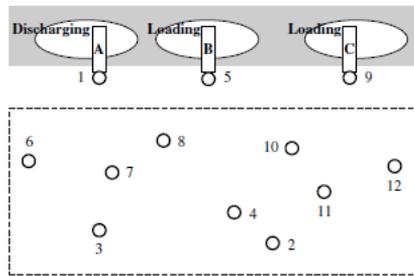


Figura 2. Localización de los contenedores a movilizar dentro de la terminal
Fuente: Nishimura et al (2005)

1.2.3 Gestión y programación de las grúas “The yard crane scheduling problem”

Es de gran importancia aplicar métodos de optimización para planificar el trabajo de las grúas de explanada. Entre los equipos más utilizados para cargar y descargar contenedores en la ZA están las RTG y las RMG. En las TCP se hace uso de las grúas de explanada constantemente para soportar tareas como:

- Relocalización de contenedores entre los bloques de contenedores de la ZA
- Descargar y cargar contenedores que llegan a la TCP en camiones o trenes
- Recepción y entrega de contenedores a maquinaria de manipulación terrestre

El principal objetivo de la programación de las grúas de explanada (*Yard Crane Scheduling Problem - YCSP*) es reducir los tiempos de espera en las diferentes maquinarias de la terminal que éstas puedan ocasionar, como por ejemplo los vehículos que realizan los movimientos entre la zona de muelles y la explanada. Como objetivos complementarios tiene en cuenta:

- Minimizar el tiempo de operaciones de buque
- Incrementar el flujo total de contenedores manipulados en la terminal.

Varias grúas RTG pueden operar en un mismo bloque de contenedores por lo cual en Jung y Kim (2006b) tienen en cuenta la interferencia entre las grúas como una restricción al desplazarse sobre el mismo bloque y línea. En muchos trabajos los autores coinciden que las grúas RTG son el cuello de botella de las TCP tales como; Lee et al (2007b) y Ng. y Mac. (2005a) se dan cuenta que una de las principales causas de los cuellos de botella en la ZA es la lentitud con que operan las RTG, por lo cual proponen un modelo para programar la secuencias de tareas que deben de realizar estos equipos de manera que se minimice el tiempo de operación. Nuevas propuestas de maquinaria se tiene en cuenta en trabajos como Zyngi-

ridis (2005) y Soriguera et al (2006) en el cual considera los *straddle carriers* para la realización de todos los movimientos en la ZA.

Ng. (2005b) estudia el problema de programación de múltiples grúas RTG considerando interferencia en la ZA, además de considerar el tiempo necesario para cada tarea, consideran los tiempos de desplazamiento entre los bloques, de manera que, si se completa una tarea pero la grúa no esta lista a la llegada del vehículo, se ocasionara una demora adicional. En la tabla 3 se realiza una clasificación de las referencias más relevantes en la gestión y optimización de grúas que se encuentran en la literatura. El principal objetivo en esta sub-operativa es minimizar el tiempo de espera.

Tabla 3 Clasificación de los trabajos enfocados a la programación y optimización de las grúas de explanada

| Trabajo | Modelo | Metodología de resolución | objetivo |
|-------------------------|----------------------|---------------------------|-----------------------------------|
| Alessandri et al (2008) | Proceso algorítmico | Metaheurística | Minimizar utilización del recurso |
| Soriguera et al (2006) | Modelo de simulación | Simulación | Evaluar estrategias |
| Ng y Mak (2005a) | IP | Heurística | Minimizar tiempo de espera |
| Ng (2005) | IP | Heurística | Minimizar tiempo de espera |
| Matthew et al (2009) | Modelo de simulación | Simulación | Evaluación de soluciones |
| Jung y Kim (2006) | LP | Heurística | Minimizar tiempo de espera |
| Zyngiridis (2005) | IP | Heurística | Minimizar distancias |
| Lee et al (2007) | MIP | Heurística | Minimizar tiempo de espera |
| Ng y Mak (2005b) | IP | Heurística | Minimizar tiempo de espera |
| Zhang et al (2002) | MIP | Heurística | Minimizar tiempos |

1.3 Conclusiones

La complejidad de la operativa de transferencia hace prácticamente inviable abordarla de forma conjunta. De hecho, como hemos visto anteriormente, en la mayoría de los casos, suele subdividirse el funcionamiento en subsistemas. A pesar de ello los autores tienen en cuenta que los subsistemas interactúan unos con otros, por lo cual existe una dependencia entre ellos.

En cada uno de los trabajos los autores utilizan diferentes herramientas tanto analíticas como informáticas para gestionar estos sub sistemas, tales como modelos heurísticos, matemáticos, meta-heurísticos, software de simulación, etc. Aún teniendo en cuenta todas estas variables y parámetros, el modelo nunca será un fiel

reflejo de esta realidad compleja, aunque sí se pueden sentar las bases para una toma de decisiones más objetiva y sistematizada que mejore la eficiencia.

Los autores coinciden en que esta operativa es una de las más importantes en las terminales de contenedores portuarias ya que las grúas RTG es uno de los equipos de manipulación más costosos de la TCP. La óptima gestión de estas permite que el resto de operaciones de la terminal puedan ser eficientes. Las grúas RTG en muchos casos son los puntos críticos donde más tiempo puede llegar a perderse en una TCP. Es por esto que los dos objetivos más importantes en la operativa de transferencia son minimizar los desplazamientos tanto en distancia como en tiempo de recorrido y las pérdidas de tiempo o también llamados como tiempos muertos.

1.4 Referencias

- Ambrosino, D. Sciomachen, A. Tanfani, E. (2004) Stowing a containership: the master bay plan problem. *Transportation Research Part A* 38: 81–99.
- Chao, IM. (2002) A tabu search method for the truck and trailer routing problem. *Computers and Operation Research* 29: 33–51.
- Duinkerken, MB. Dekker, R. Kurstjens, ST. Ottjes, JA. Dellaert, NP. (2006a) Comparing transportation systems for inter-terminal transport at the Maasvlakte container terminals. *OR Spectrum* 28: 469–493.
- Duinkerken, MB. Ottjes, JA. Lodewijks, G. (2006b) Comparison of routing strategies for AGV systems using simulation. The 2006 winter simulation conference (WSC 2006), Monterey, December 3–6.
- Grunow, M. Günther, H-O. Lehmann, M. (2004) Dispatching multi-load AGVs in highly automated seaport container terminals. *OR Spectrum* 26: 211–235.
- Ho, YC. Chien, SH. (2006) A simulation study on the performance of task-determination rules and delivery-dispatching rules for multiple-load AGVs. *International Journal of Production Research* 44: 4193–4222.
- Kim, K-H. Bae, J. W. (2004) A Look-Ahead Dispatching Method for Automated Guided Vehicles in Automated Port Container Terminals. *Transportation Science* 38: 224-234.
- Nguyen, VD. Kim, KH. (2009) A dispatching method for automated lifting vehicles in automated port container terminals. *Computers & Industrial Engineering* 56: 1002-1020.
- Nishimura, E. Imai, A. Papadimitriou, S. (2005) Yard trailer routing at a maritime container terminal. *Transportation Research Part E* 41: 53-76.
- Steenken, D. Voß, S. (2008) Operations research at container terminals: a literature update. *OR Spectrum* 30: 1–52.
- Steenken, D. Voß, S. Stahlbock, R. (2004) Container terminal operations and operations research - a classification and literature review. *OR Spectrum* 26: 3–49.
- Vis, I. Harika, I. (2004) Comparison of vehicle types at an automated container terminal. *OR Spectrum* 26: 117–143.
- Ying-Chin, H. Ping-Fong, H. (2004) A machine-to-loop assignment and layout design methodology for tandem AGV systems with multiple-load vehicles. *International Journal of Production Research* 42: 801-832.
- Yang, CH. Choi, YS. Ha, TY. (2004) Simulation-based performance evaluation of transport vehicles at automated container terminals. *OR Spectrum* 26: 149–170.
- Scheuerer, S. (2006) A tabu search heuristic for the truck and trailer routing problem. *Computers and Operation Research* 33: 894–909.