

6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management.  
XVI Congreso de Ingeniería de Organización. Vigo, July 18-20, 2012

## Modelo de simulación y optimización para la gestión de muelles del puerto de Algeciras

Optimization by simulation for the berth management in the Algeciras port

Carlos Arango<sup>1</sup>, Pablo Cortes, Luis Onieva, Alejandro Escudero

**Abstract:** In this paper we study the berth allocations problems in the Algeciras container terminal. We proposal simulation and optimization models with arena software, and develop a heuristic procedure based on genetic algorithm for solved the problems. We conduct a large amount of computational experiments with three different scenarios to validate the models proposals.

**Resumen:** En este trabajo es propuesto un modelo de optimización que busca minimizar el tiempo de trabajo para cada buque, se desarrolla una heurística basada en algoritmo genético para resolver el modelo de optimización entero mixto y se plantea un modelo de simulación con tres escenarios distintos para validar las decisiones que toma el modelo. Se toma como caso de estudio el puerto de Algeciras, el cual es el de mayor tráfico de contenedores de España.

**Keywords:** Optimization, Simulation, Berths, Port, Allocation. **Palabras clave:** Optimización, Simulación, Muelles, Puerto, Asignación

### 1.1 Introducción

Las terminales de contenedores portuarias han diseñando sus muelles de forma que puedan adaptarse fácilmente a los continuos cambios en el tamaño de los buques portacontenedores, conocido como gigantismo. Un muelle de línea continua de atraque es la solución para que los puertos puedan recibir a estos grandes barcos ya que con este tipo de muelle pueden recibir tanto un buque muy grande como dos pequeños.

---

<sup>1</sup> 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](mailto:cap@esi.us.es)

Los buques son uno de los principales protagonistas en la evolución de los puertos Notteboom (2007), Los primeros buques que transportaron contenedores eran conocidos como *feeder* o barcazas, los cuales tenían una capacidad de 250 TEUs y fueron remplazados por la primera generación de portacontenedores que podían transportar más del triple de contenedores con capacidades alrededor de los 800 TEUs.

En la actualidad el mayor buque portacontenedores del mundo perteneciente a la naviera Maersk. Llamado El Emma Maersk que tiene capacidad para transportar 12.508 TEUs. En Polo y Díaz (2006) se concluye que en la actualidad se está viviendo un nuevo fenómeno que lo han llamado gigantismo y que pone en grandes dificultades a las terminales de contenedores portuarias (TCP).

En este trabajo se propone un modelo de optimización integrado a un modelo de simulación para la gestión de muelles de localización continua, el objetivo de los modelos es minimizar el tiempo de operaciones de cada buque. Para la validación de los modelos se toma como escenario el puerto de Algeciras principal puerto de España en el tráfico de contenedores y el cual posee un muelle de este tipo. En los próximos apartados se explican los modelos de forma detallada, se analizan los resultados obtenidos y finalmente se concluye con las líneas de mejora y futuros trabajos.

## 1.2 Problema de asignación de muelles dinámico

Muchos autores han realizado diferentes adaptaciones del *Berth Allocation Problem* (BAP) para proponer métodos de solución, por ejemplo Imai et al (2001), Imai et al (2005) y Nishimura et al. (2001), determinan el BAP como un problema de asignación de muelle dinámico (DBAP) el cual es una generalización del problema de asignación de muelle estocástico (SBAP). Ellos proponen un algoritmo genético en sistemas de muelles públicos que pueden ser adaptados a una aplicación real.

Liu et al (2006) y Lim (1998), consideran que el BAP y el problema de programación de grúas pórtico (QCSP) son un único problema ya que el tiempo que un buque estará atracado en un muelle dependerá del número de grúas que le sea asignadas. Park y Kim (2003).

En Imai et al (2005) los autores definen dos tipos de muelles según su diseño y esquema, el primero de localización discreta con puntos fijos de atraque y el segundo de localización continua el cual no tiene puntos fijos de atraque ya que los buques pueden tomar un segmento de muelle según su tamaño. Este tipo de muelles permite que la TCP tenga flexibilidad en el tipo de buques que puede recibir.

### 1.3 Modelos propuestos

En este apartado se explican los dos modelos propuestos para resolver el DBAP; uno es un modelo de optimización para gestionar la asignación de muelles en una TCP con muelle de localización continua. El otro es el modelo de simulación desarrollado en el software Arena que toma como escenario el puerto de Algeciras principal puerto de España en el tráfico de contenedores y el cual posee un muelle de este tipo.

Se incorpora en el modelo de simulación una heurística basada en algoritmo genético que resuelve el modelo de optimización entero mixto cada que un buque llega al sistema, el algoritmo busca la mejor posición del muelle donde debe atracar cada buque para realizar las operaciones de carga y descarga además de decidir la cantidad de grúas pórtico que deben ser asignadas a este. Se tiene en cuenta la localización de los contenedores a cargar y descargar en la zona de almacenaje y la disponibilidad de recursos. Para resolver el modelo se tiene en cuenta las siguientes asunciones:

- El muelle se divide en 82 localizaciones cada una de 24m.
- Los buques más grandes que llegan al puerto tienen 397m.
- Se consideran tres tipos de buques: buques pequeños, cuya longitud menor a 8 secciones, buques medianos, con longitud entre 8 y 14 secciones y buques grandes con más de 14 secciones.
- Las grúas pórtico se mueven por una única vía por lo cual se considera interferencia entre los desplazamientos
- Solo se consideran contenedores de 40' tipo estándar
- Cada contenedor tiene un tiempo medio de cargue o descargue con lo cual la suma de estos da el tiempo medio de operación.
- El máximo número de secciones de trabajo en cada buque será de tres.
- El plan de estiba es conocido
- Como mínimo se dejara libre una localización de muelle entre dos buques.
- El modelo decidirá en qué bloque de la ZA se descargaran el conjunto de contenedores, la localización precisa no es propósito de este trabajo

A continuación se describe la notación empleada para describir los diversos parámetros y datos, así como para las variables utilizadas en el modelo:

#### Parámetros:

***B*** Número total de buques tal que  $b \in B$ .

***M*** Número total secciones en el muelle.

***T*** Número total de segmentos de tiempo tal que  $t \in T$ .

***S*** Número máximo de secciones para buques.  $s \in S$

***G*** Número total de grúas pórtico disponibles tal que  $j \in G$ .

***C*** Número total de bloques en la explanada tal que  $c \in C$

***I,E*** Índices para distinguir entre contenedores de importación y de exportación.

**Datos:**

- $h_b$  Horas de trabajo de grúa necesarios para buque  $b$ .  
 $L_b$  Longitud del buque  $b$ .  
 $A_{bs}$  Vector de tamaño  $s$  para cada buque  $b$ , que indica con un número entero si una sección es de trabajo y con un cero si no lo es. Cada número será igual a la sección que está señalando.  
 $m_b$  Número máximo de grúas que se debe asignar al buque  $b$ .  
 $g_{jt}$  Posición de la grúa  $j$  en el instante  $t$ .  
 $CI_{bs}$  Número de contenedores de importación de la sección  $s$  del buque  $b$ .  
 $CE_{bs}$  Número de contenedores de exportación de la sección  $s$  del buque  $b$ .  
 $d_{mc}$  Valor de la distancia entre el bloque  $c$  y la posición  $m$  del muelle.  
 $PE_{bc}$  Vector de tamaño  $c$  para cada buque  $b$  en el cual se representa con 1 el bloque  $c$  donde están localizados los contenedores de exportación de ese buque  $b$ .  
 $K_c$  Huecos libres para contenedores en el bloque  $c$ .

**Variables:**

- $X_b$  Sección del muelle asignada al buque  $b$ , correspondiente a la sección donde se localizará la sección de proa del buque (sección inicial).  
 $T_b$  Instante de tiempo de atraque del buque  $b$  en el muelle.  
 $B_{bmt}$  Variable binaria que toma valor 1 si el buque  $b$  ocupa el muelle  $m$  en el instante  $t$  y 0 En otro caso.  
 $G_{bsjt}$  Variable binaria que toma valor 1 si la sección  $s$  del buque  $b$  está siendo atendida por la grúa  $j$  en el instante  $t$  y 0 En otro caso.  
 $PI_{bc}$  Variable binaria, cuyos elementos toman valor 1 si los contenedores de importación del buque  $b$  se sitúan en el bloque  $c$  y 0 En otro caso.

**Modelo matemático****Minimizar**

$$\sum_{b=1}^B \sum_{m=1}^M \sum_{t=1}^T \sum_{s=1}^S \sum_{c=1}^C (B_{bmt} * CE_{bs} * d_{mc} * PE_{bc}) + (B_{bmt} * CI_{bs} * d_{mc} * PI_{bc}) + (G_{bsjt} * |g_{jt} - [X_b + (A_{bs} - 1)]|) \quad (1)$$

**Sujeto a:**

$$\sum_{b=1}^B B_{bmt} \leq 1 \quad \forall m = 1 \dots M, \forall t = 1 \dots T \quad (2)$$

$$\sum_{m=1}^M B_{bmt} = L_b \quad \forall b = 1 \dots B, \forall t = 1 \dots T \quad (3)$$

$$B_{bmt} \leq B_{b(m+1)t} \quad \forall m = 1 \dots (X_b + L_b - 1), \forall t = 1 \dots T, \forall b = 1, \dots, B \quad (4)$$

$$\sum_{b=1}^B \sum_{s=1}^S \sum_{j=1}^G G_{bsjt} \leq G \quad \forall t = 1 \dots T \quad (5)$$

$$X_b + l_b \leq M \quad \forall b = 1 \dots B \quad (6)$$

$$K_c \geq (\sum_{s=1}^3 CI_{bs}) * PI_{bc} - (\sum_{s=1}^3 CE_{bs}) * PE_{bc} \quad \forall b = 1 \dots B, \forall c = 1 \dots C \quad (7)$$

$$\sum_{j=1}^G \sum_{s=1}^S G_{bsjt} \geq 1 \quad \forall b = 1 \dots B, \forall t = 1 \dots T \quad (8)$$

$$\sum_{j=1}^G \sum_{s=1}^S G_{bsjt} \leq m_b \quad \forall b = 1 \dots B, \forall t = 1 \dots T \quad (9)$$

$$\sum_{j=1}^G \sum_{t=0}^T G_{bjt} * 1/W \geq h_b \quad \forall b = 1 \dots B \quad (10)$$

$$G_{bsjt} - G_{bs(j+1)t} \leq M (G_{bs(j+1)t} - G_{bs(j+2)t}) \quad \forall b = 1 \dots B, \forall j = 1 \dots G, \forall s = 1 \dots S, \forall t = 1 \dots T \quad (11)$$

$$B_{bmt} = \{0,1\} \quad \forall b = 1 \dots B, \forall m = 1 \dots M, \forall t = 1 \dots T \quad (12)$$

$$PI_{bc} = \{0,1\} \quad \forall b = 1 \dots B, \forall c = 1 \dots C \quad (13)$$

$$PE_{bc} = \{0,1\} \quad \forall b = 1 \dots B, \forall c = 1 \dots C \quad (14)$$

$$X_b \geq 0 \text{ entero} \quad \forall b = 1 \dots B \quad (15)$$

$$G_{bsjt} = \{0,1\} \quad \forall b = 1 \dots B, \forall s = 1 \dots S, \forall j = 1 \dots G \quad \forall t = 1 \dots T \quad (16)$$

$$K_c \geq 0 \text{ entero} \quad \forall c = 1 \dots C \quad (17)$$

$$T_b \geq 0 \text{ entero} \quad \forall b = 1 \dots B \quad (18)$$

La función objetivo (1) minimiza las distancias recorridas (desplazamientos) por las carretillas y las grúas pórtico para realizar las operaciones de carga y descarga de contenedores. Estas distancias están directamente relacionadas al tiempo de operaciones de cada buque que llega a la TCP. Se minimizan tres aspectos: a) distancias recorridas por las carretillas para el transporte de contenedores de exportación entre la zona de almacenaje y el muelle, b) distancias recorridas por las carretillas para el transporte de contenedores de importación entre el muelle y la ZA, y c) desplazamiento de las grúas pórtico según su localización a la sección de trabajo asignada.

La restricción (2) controla que cada sección de muelle  $m$  sólo pueda estar asignada a un buque  $b$  en cada instante de tiempo  $t$ . La restricción (3) garantiza que el número de secciones de muelle ocupadas por cada buque sea igual a la longitud del mismo en todo instante de tiempo. La restricción (4) obliga a tomar las secciones de muelle de forma consecutiva

La restricción (5) limita la cantidad máxima de grúas a asignar, la restricción (6) impide que un buque pueda quedar parcialmente fuera del muelle. Con la restricción (7) garantiza que la capacidad disponible en el bloque  $c$  sea mayor que el número de contenedores que va a recibir del buque  $b$ .

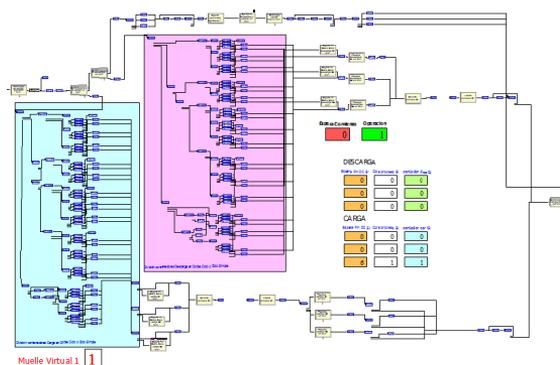
Las restricciones (8 y 9) obligan a asignar un mínimo de 1 y un máximo de  $m_b$  grúas a cada buque. La restricción (10) asegura que las grúas estén asignadas al menos el tiempo necesario para realizar la carga y descarga de contenedores, la restricción (11) impide la elección de grúas no consecutivas, y por último se utilizan 7 restricciones de integridad (12 – 18).

## Modelo de simulación

En el modelo de simulación propuesto se tienen en cuenta los principales procesos y operaciones realizadas en las TCP pero solo se profundiza en las que estas directamente relacionadas con la operaciones de carga y descarga de contenedores en la zona de muelles. Las partes del modelo de simulación más relevantes son:

- Lectura de datos
- Integración con el modelo de optimización
- Muelle Virtual.

Se ha denominado como muelle virtual al bloque de módulos que represente las operaciones de carga y descarga de contenedores, debido a que no representa un punto fijo de la línea de muelle. En la figura 1 se muestra los módulos del muelle virtual.



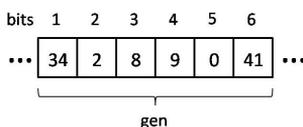
**Figura 1** Muelle virtual

### 1.4 Heurística basada en algoritmo genético

El módulo VBA de Arena permite introducir un código en lenguaje Visual Basic para implementar el algoritmo que resolverá el problema de determinar qué

secciones de muelle ocupará un buque, y qué grúas se ocuparán de trabajar en él, en función de las circunstancias de cada caso. Este código se ejecutará cada vez que una entidad buque, que llega al puerto, entre en módulo. De esta forma, para calcular la solución, el algoritmo solo tendrá en cuenta las circunstancias actuales de la terminal, es decir, recursos disponibles (grúas y muelles), la capacidad presente de los bloques de la explanada y la información de trabajo de cada buque.

La estructura del individuo, vendrá representado por 60 bits. Los bits o alelos, se agrupan en genes formados por 6 alelos. El bit 1 del gen representa la localización de muelle donde se ubicara la proa de ese buque, el bit 2 muestra la cantidad de grúas asignadas lo cual se complementa con los bits 3, 4 y 5 que dicen la grúas concretas que son asignadas. Por último el bit 6 determina el número de bloque de la explanada donde si almacenarán los contenedores descargados. Figura 2



**Figura 2** Solución admisible para un buque

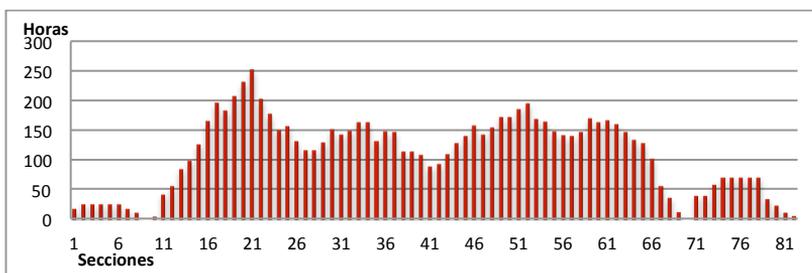
## 1.5 Resultados y Análisis

Para comprobar la robustez del modelo ante futuros escenarios de crecimiento de la terminal, se han generado 3 escenarios distintos. En el escenario inicial, los datos de entrada han sido tomados del histórico de llegadas registrado por la terminal en el mes de Octubre de 2010 a través de su página web.

En el segundo de los escenarios, se mantiene constante tanto la hora de llegada de los buques, como su número y longitud, respecto del escenario inicial. Pero se incrementa la cantidad de contenedores que transportan. A diferencia del escenario 3, se mantienen los mismos parámetros que determinan el número de contenedores y secciones de trabajo del escenario 1, pero se aumenta en 20 el número de buques que llega a la terminal, lo que supone un incremento del 12,5%. La hora de llegada de estos buques se ha tomado aleatoria dentro del horizonte temporal fijado en un mes, al igual que su longitud.

Se han fijado 3 replicaciones por cada uno de los escenarios descritos, resultando un total de 9 replicaciones. Todas las simulaciones han sido realizadas con un equipo con 3 GB de memoria RAM y un procesador de 2,1 GHz.

En la figura 3 se muestra el total de horas de operación que ha tenido cada sección de muelle, en el cual se puede apreciar que las secciones con mas cantidad de horas trabajadas se agrupan en el centro de la línea de muelle esto es debido al diseño del puerto de Algeciras solo permite atracar buques con un tamaño inferior a 8 secciones en el extremo inicial y menor a 12 en el final.



**Figura 3** Horas de trabajo en cada sección del muelle en el escenario 1

## 1.6 Conclusiones

Se han tenido en cuenta datos reales de tráfico de buques portacontenedores correspondientes al mes de Octubre de 2010. Se han modelado además, dos escenarios de crecimiento del tráfico distintos para validar el modelo, el cual ha demostrado que es válido y al mismo tiempo robusto ante crecimientos futuros del tráfico de la terminal y por ende de los datos de entrada.

Los resultados obtenidos suponen una reducción del 8,73%. Del tiempo promedio de operaciones ante un incremento del tráfico de aproximadamente un 21%. Una reducción que apreciarán directamente las líneas marítimas ya que sus buques quedarán libres para seguir con su recorrido en un tiempo menor. La utilización del algoritmo genético para optimizar la asignación de muelle, grúas y bloque a los buques ha resultado una herramienta eficaz, ya que el algoritmo encuentra una buena solución en menos de 3 segundos

## 1.7 Referencias

- Notteboom ,T. (2007) Strategic Challenges to Container ports in a changing market environment. *Research in Transportation Economics* 17: 29-52
- Polo, G. Díaz, D. (2006) A new generation of containerships: cause or effect of the economic development?. *Journal of Maritime Research* 3: 3–18.
- Imai, A. Sun, X. Nishimura, E. Papadimitriou, S. (2005) Berth allocation in a container port: using a continuous location space approach. *Transportation Research Part B* 39: 199–221.
- Imai, A. Nishimura, E. Papadimitriou, S. (2001) The dynamic berth allocation problem for a container port. *Transportation Research Part B* 35: 401–417.
- Nishimura, E. Imai, A. Papadimitriou, S. (2001) Berth allocation planning in the public berth system by genetic algorithms. *European Journal of Operational Research* 131: 282–292.
- Liu, J. Wan, Y-w. Wang, L. (2006) Quay crane scheduling at container terminals to minimize the maximum relative tardiness of vessel departures. *Naval Research and Logistics* 53: 60–74.
- Lim, A. (1998) The berth planning problem. *Operations research letters* 22: 105-110.
- Park, Y-M. Kim, KH. (2003) A scheduling method for Berth and Quay cranes. *OR Spectrum* 25: 1–23.