



Revue Paralia, Volume 7 (2014) pp n02.13-n02.24

Palabras clave: Capacidad de terminales, Contenedores, Muelle, Simulación.

© Editions Paralia CFL

Modelización continua del atraque de buques para el cálculo de la capacidad de los muelles. Aplicación a las grandes terminales de contenedores españolas

Roser OBRER-MARCO¹, José AGUILAR²

1. Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, Camino de Vera s/n, 46.022 Valencia, España.

roobmar@gmail.com ; jaguilar@upv.es

Resumen:

El Sistema Portuario Español (SPE) se compone de 46 puertos de interés general, gestionados por 28 Autoridades Portuarias. El clima entre estas Autoridades Portuarias es de máxima competencia, de ahí que la planificación sea una herramienta indispensable para que éstas sean competitivas. Gracias a la planificación los gestores de los puertos son capaces de ajustar la capacidad y las condiciones físicas de las infraestructuras portuarias a las previsiones de crecimiento del tráfico.

En este cometido es por tanto indispensable que los departamentos de planificación de las Autoridades Portuarias españolas dispongan de una herramienta capaz de estimar la capacidad de las infraestructuras, y en concreto de los muelles. Hasta el momento, para estimar dicha capacidad ha sido habitual la aplicación de una formulación que asume el muelle compuesto de un número determinado de atraques iguales: formulación discreta. Sin embargo, la explotación de los muelles en las terminales de contenedores se lleva a cabo de manera continua. Por ello es necesario dar un paso adelante y utilizar una formulación que refleje la explotación real de los muelles: formulación continua.

En este artículo se presenta una formulación continua y se compara con la discreta, haciendo ver los posibles errores que se pueden estar cometiendo al tener que asumir que un muelle está compuesto por un conjunto de atraques idénticos. Para ello, se han aplicado ambas formulaciones en la terminal de contenedores MSC Terminal Valencia, S.A. del puerto de Valencia (España) antes y después de su ampliación en 2010.

*Sometido el 20 de enero de 2012, aceptado el 16 de junio de 2014,
disponible en línea el 15 de diciembre de 2014.*

Versión traducida no certificada publicada bajo responsabilidad de los autores del artículo.

Para citar el artículo original:

OBRER-MARCO R., AGUILAR J. (2014). *Modélisation continue de l'accostage des navires pour le calcul de la capacité des quais. Application aux grands terminaux à conteneurs espagnols*. Revue Paralia, Vol. 7, pp n02.1–n02.12.

DOI: <http://dx.doi.org/10.5150/revue-paralia.2014.n02>

1. Introducción y objetivos

La capacidad de un muelle es el tráfico límite que puede ser admitido por el muelle durante un periodo de tiempo, normalmente un año, pero, como la definición del tráfico límite no es consensual, el concepto de capacidad no puede ser único. Por ejemplo, se puede citar tres definiciones de tráfico límite (RODRIGUEZ, 1977): el *tráfico de congestión*, tráfico a partir del cual las esperas de los buques empiezan a aumentar rápidamente; el *tráfico económico*, tráfico para el cual la suma de los costes de los buques más los costes del muelle es mínima; y el *tráfico de saturación*, tráfico a partir del cual todos los puestos de atraque están permanentemente ocupados.

Sin embargo, y como consecuencia de la elevada competencia existente entre las terminales, este tráfico ha de estar necesariamente ligado al nivel de servicio ofrecido a los clientes de la terminal, en este caso, a las compañías navieras.

Hasta ahora, la formulación empleada para calcular el tráfico en las terminales de contenedores, considera que los muelles están compuestos por un número determinado de puestos de atraque idénticos (formulación discreta).

No obstante, en la realidad los muelles de las grandes terminales de contenedores no se explotan de manera discreta, sino de manera continua, y como consecuencia la formulación anterior implica haber realizado una traslación conceptual del muelle: de una línea continua a un número de puestos de atraque (N).

El principal objetivo de este artículo es presentar una formulación continua para el cálculo de la capacidad de los muelles, con el fin de constatar como la estimación de esta capacidad puede cambiar cuando el muelle se modeliza como un número determinado de puestos de atraque o como una línea continua. El caso estudiado para ilustrar este objetivo es la terminal MSC Terminal Valencia, S.A. (MSCTV).

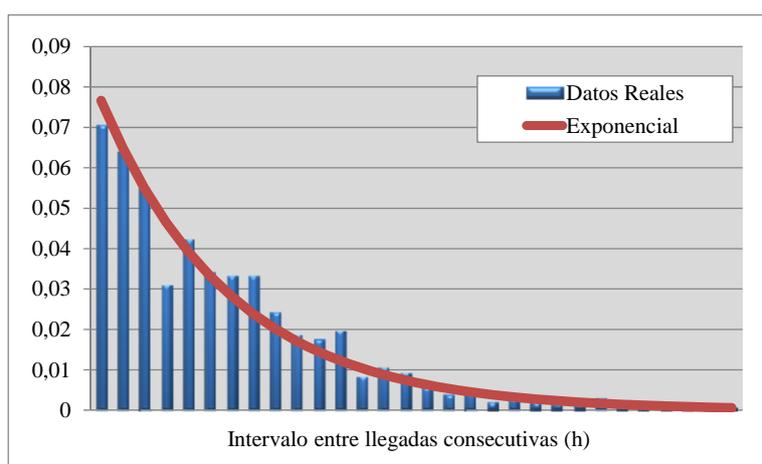


Fig. 1. Densidad de probabilidad de las llegadas de los buques a la terminal MSCTV.

La terminal MSCTV empezó a operar en el Puerto de Valencia en 2007, y de los 656 m operativos iniciales, en 2010 pasó a disponer de 756 m. En esta terminal, con datos de

entre enero de 2008 y junio de 2009, la función de densidad de probabilidad de las llegadas de los buques es exponencial (ver la figure 1) y la de duración del servicio es Erlang 5 (ver la figure 2). La eslora media de los buques portacontenedores es de alrededor 225 m.

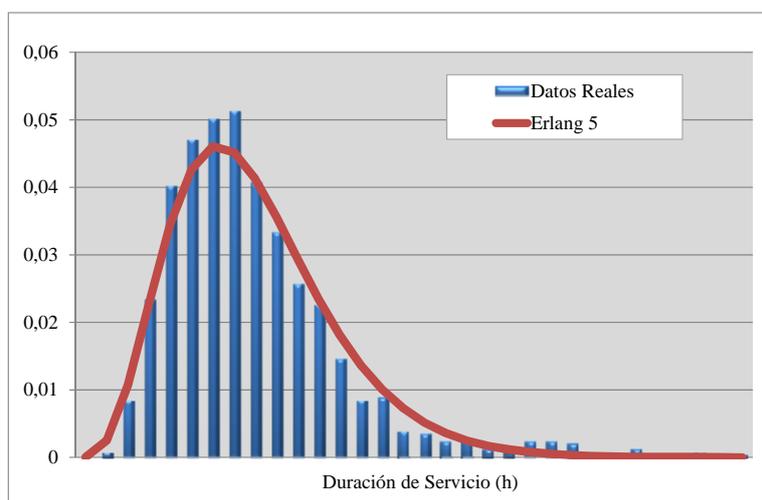


Figura 2. Función de densidad de probabilidad de la duración de servicio en la terminal MSCTV.

2. La formulación discreta

Una formulación posible y habitualmente empleada es la siguiente:

$$T = N \times \rho \times P \times H_{\text{año}} \quad (1)$$

donde :

T =tráfico anual del muelle (TEUs/año o movimientos /año)

N =número de puestos de atraque (en función de la eslora de los buques, N puede ser un número decimal)

ρ =tasa de ocupación del muelle (o de un puesto de atraque, pues coinciden)

P =productividad del puesto de atraque (TEUs/h o movimientos/h)

$H_{\text{año}}$ =horas operativas de la terminal por año (h/año)

La tasa de ocupación (ρ) se define como la proporción entre el periodo de tiempo en el que los puestos de atraque están ocupados y la totalidad del periodo de tiempo en el que los puestos de atraque están disponibles para albergar un buque (ver la ecuación (5)).

En la formulación representada por la ecuación (1), queda reflejado implícitamente el nivel de servicio ofrecido a la compañía naviera a través de las variables P y ρ . En lo que concierne a la capacidad, el interés del naviero reside en que el tiempo de escala en proporción al número de contenedores a manipular sea reducido. Para lograr este tiempo de escala reducido es preciso que la productividad de los puestos de atraque (P) sea elevada, y que las esperas en el fondeadero debidas a la congestión sean reducidas, sino inexistentes. En realidad, tanto la productividad del puesto de atraque, como la espera

aparecen en la formulación representada por la ecuación (1): la primera directamente y la segunda indirectamente a través de ρ . Intuitivamente, cuando ρ tiende a uno (ocupación permanente de los puestos de atraque), las esperas de los buques tienden a infinito, y de manera análoga, cuando ρ tiende a cero, las esperas de los buques son prácticamente inexistentes.

Además, parece razonable que las esperas de los buques sean proporcionales a la duración del servicio. La relación entre la espera media de los buques (D_a) y la duración de servicio (durante la cual el buque está amarrado) media (D_s) es conocida como espera relativa (ε_r):

$$\varepsilon_r = \frac{D_a}{D_s} \tag{2}$$

Conociendo el valor de N , la función de densidad de probabilidad del intervalo entre llegadas consecutivas de buques a la terminal (A) y la función de densidad de probabilidad de la duración de servicio (B), es posible conocer la relación entre ρ y ε_r gracias a la teoría de colas o gracias a la simulación.

La teoría de colas solamente proporciona estrictamente soluciones en algunos casos (RODRIGUEZ, 1977):

- 1) Cuando A y B son funciones de densidad exponenciales, independientemente de N .
- 2) Cuando A o B son funciones de densidad exponenciales y $N=1$.

En todas las grandes terminales de contenedores españolas, se ha constatado que aunque las llegadas de los buques son aleatorias, las duraciones de servicio se distribuyen según una función de densidad de probabilidad de Erlang K , donde K varía entre 4 y 7 (AGUILAR & OBRER-MARCO, 2009). Como consecuencia, para conocer la relación entre ε_r y ρ es preciso utilizar herramientas de simulación. La figure 3 muestra una representación de esta relación cuando A, B y N están determinadas.

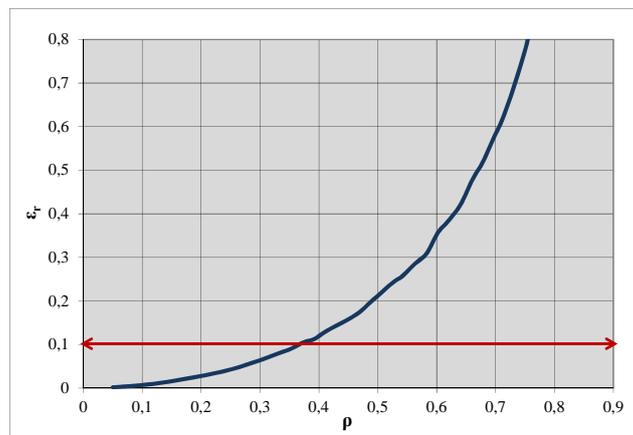


Figura 3. Ejemplo de representación de la relación entre ε_r y ρ obtenida por simulación.

Suponiendo que la productividad del puesto de atraque (P) es elevada, el nivel de servicio ofrecido a los navieros queda representado por ε_r . Cuando este nivel de servicio se fija en una situación límite admisible para los navieros, es decir, cuando la relación entre las esperas y la duración del servicio alcanza un valor máximo que los navieros están dispuestos a soportar, el tráfico dado por la formulación equivale a la capacidad. Ese valor máximo representa el límite a partir del cual los navieros abandonarían el puerto para solicitar escala en otras terminales.

Una vez la relación entre ε_r y ρ es conocida, ya no queda más que establecer un valor máximo de ε_r para conocer ρ . En el caso de las terminales de contenedores, no se recomienda que ε_r sea superior a 0,1 (AGERSCHOU, 2004).

3. Metodología

La metodología seguida para llevar a cabo los objetivos fue la siguiente. Inicialmente se desarrolló una nueva formulación del tráfico en el muelle. A continuación, se aplicaron a la terminal MSCTV las dos formulaciones existentes, la que supone que el muelle está compuesto por un número de puestos de atraque N (formulación discreta) y la que supone que el muelle es una línea continua (formulación continua), antes y después de la ampliación del muelle de MSCTV en 2010. Finalmente, los resultados de los cuatro cálculos se compararon y se extrajeron conclusiones.

Para poder aplicar la formulación discreta sur un muelle explotado de manera continua, N puede ser obtenido dividiendo la longitud del muelle por la eslora media de los buques, la cual debe considerar la distancia de seguridad entre buques, ver ecuación (3). En la práctica, esta distancia se puede estimar como el 10% de la eslora media de los buques. La traslación conceptual del muelle puede suponer errores en la estimación de la capacidad.

$$N = \frac{L}{1,10 \times L_{buques}} \quad (3)$$

donde:

L =longitud del muelle

L_{buques} =eslora media de los buques que hacen escala en la terminal

4. Formulación continua

La capacidad de un muelle conceptualmente explotado de manera continua puede ser obtenida mediante la siguiente expresión:

$$T = L \times \rho_L \times P_L \times H_{año} \quad (4)$$

donde:

T =tráfico anual del muelle (TEUs/año o movimientos/año)

L =longitud del muelle (m)

ρ_L =tasa de ocupación del muelle explotado de manera continua

P_L =productividad del muelle (TEU/(h·m) o movimientos/(h·m))

$H_{año}$ =horas operativas de la terminal por año (h/año)

Comparando las formulaciones representadas por las expresiones (1) y (4), se puede constatar la similitud y equivalencia entre sus variables. Así, N et L representan la dimensión del muelle, N de forma discreta y L de forma continua. P y P_L representan la rapidez de manipulación de los contenedores entre el muelle y los buques por puesto de atraque (P) o por metro de muelle (P_L); y $H_{año}$ no presenta ninguna variación. Contrariamente, aunque aparentemente ρ y ρ_L sean equivalentes, existe una diferencia fundamental en su definición y en la manera de estimarlas. Como consecuencia, la comparación entre ρ y ρ_L ha de hacerse con extrema cautela (ver la sección siguiente).

5. Diferencia de cálculo entre ρ y ρ_L

Con el fin de calcular el valor de ρ durante un periodo de tiempo T , es necesario conocer la proporción entre el periodo de tiempo en el que los puestos de atraque están ocupados por los buques y el periodo de tiempo en el que los puestos están disponibles para que los buques puedan atracar. Así, para calcular ρ no se tiene en cuenta el hecho de que los buques ocupen los puestos enteramente o no. Para ilustrar este hecho, compárense las dos situaciones presentadas en la figura 4. Asumiendo que los dos navíos quedan atracados el mismo periodo T con unos días de diferencia entre las dos situaciones (derecha e izquierda), el valor de ρ sería idéntico en las dos situaciones e igual a uno, puesto que los dos buques han ocupado los puestos durante todo el periodo T . Sin embargo, la realidad es que en la situación de la derecha los buques ocupan los puestos de atraque completamente, mientras que en la situación de la izquierda, los buques ocupan solamente una pequeña parte. Este fenómeno no tiene ningún impacto en los resultados de ρ .



Figura 4. Dos situaciones diferentes donde el valor de ρ es el mismo.

Una formulación posible para estimar ρ es la siguiente:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{t_i}{T_i}}{N} \quad (5)$$

donde:

ρ =tasa de ocupación del muelle

i =contador de los puestos de atraque

N =número de puestos de atraque

t_i =periodo de tiempo en el que el puesto i está ocupado

T_i =periodo de tiempo en el que el puesto i está disponible para ser ocupado



Figura 5. Dos situaciones diferentes donde ρ_L tiene un valor diferente.

La figura 5 muestra dos situaciones en las que las esloras de los buques son exactamente las mismas que en la figura 4. La diferencia con esta última es que el muelle está conceptualizado como una línea continua, no como dos puestos de atraque.

Para calcular el valor de ρ_L es necesario considerar la eslora de los buques. Por lo tanto, aunque los dos buques permanezcan atracados durante un mismo periodo T en las dos situaciones de la figura 5, el valor de ρ_L será mayor en la situación de la derecha. En efecto, el número de metros de muelle realmente ocupados en esta situación es mayor.

El valor de ρ_L se puede calcular a partir de la expresión (6).

$$\rho_L = \frac{\sum_{j=1}^v 1,10 \times L_{Buque\ j} \times D_{S\ j}}{L \times T} \quad (6)$$

donde:

j =contador de buques

B =número de buques que hacen escala en la terminal

$L_{Buque\ j}$ =eslora del buque j

$D_{S\ j}$ =duración de servicio del buque j

L =longitud del muelle

T =periodo de tiempo en el que el muelle está disponible

Entonces, la relación $\varepsilon_r - \rho$ (discreta) se calcula independientemente de las esloras de los buques atracados, mientras que, la relación $\varepsilon_r - \rho_L$ (continua) únicamente considera los metros ocupados por los buques y un margen de seguridad (10% de la eslora).

En otras palabras, ρ_L simboliza una relación entre los metros-horas ocupados y los metros-horas totales, de ahí la diferencia esencial en la manera de calcular ρ y ρ_L .

Con el fin de conocer ρ_L , se ha desarrollado un programa de simulación basado en el método de Montecarlo, que proporciona la relación $\varepsilon_r - \rho_L$ a partir de los datos de la terminal y de los navíos que hacen escala.

6. Escenarios estudiados

Para conseguir los objetivos propuestos, la capacidad se ha calculado en cuatro escenarios diferentes. Los dos primeros se corresponden con el muelle de MSCTV antes de su ampliación y los dos segundos después de ésta. Los cuatro escenarios son:

- 1) muelle de 656 m y formulación discreta;
- 2) muelle de 656 m y formulación continua;
- 3) muelle de 756 m y formulación discreta;
- 4) muelle de 756 m y formulación continua.

En todos los escenarios, la función de densidad de probabilidad de la eslora de los buques es constante e igual a 225 m (L_{buques}). La distancia de seguridad entre buques se ha estimado como el 10% de este valor.

En los escenarios 2 y 4, donde el muelle funciona de manera continua, existen otras variables a considerar y que condicionan los resultados de la relación entre ε_r y ρ_L . En efecto, cuando los buques llegan a un puerto, en función de la disposición de los buques atracados en el muelle, se pueden llegar a ubicar en diferentes huecos. Según el espacio elegido y la posición del buque en este espacio, los resultados pueden diferir.



Figura 6. Rutina de asignación del puesto de atraque para la formulación continua.

En este estudio, se ha supuesto que cuando un navío sale del muelle, todos los navíos que quedan atracados son desplazados hacia un extremo del muelle. De esta manera, cuando un buque llega al puerto, solamente existe un hueco posible. Además, se ha supuesto que en este espacio, los buques se atracan al lado del resto de buques.

Es evidente que en las terminales, los buques no son desplazados cada vez que uno de ellos abandona la terminal (situación ideal). Sin embargo, los resultados de esta simulación son valores máximos que sirven como referencia para comparar con otras soluciones. Además, como se ha supuesto una función de densidad de probabilidad de la eslora constante, los resultados serán exactamente los mismos en esta situación ideal que suponiendo la siguiente rutina de asignación de puesto de atraque: cuando el primer buque llega a la terminal, se dispone en un extremo del muelle; cuando el resto de buques van llegando, se disponen bien al lado de los buques que ya están atracados (siempre considerando la distancia de seguridad), bien en hueco que otros buques van dejando al salir (ver la figura 6).

Es importante remarcar que aunque las dos formulaciones propuestas son diferentes, se aplican a una misma realidad. Es decir, aunque una formulación considere que el muelle está compuesto por un número determinado de puestos de atraque, y la otra formulación considere que el muelle es como una línea continua, los muelles de las terminales de contenedores se explotan normalmente de manera continua. Es por ello que para poder aplicar la formulación discreta es preciso hacer una traslación. Para conocer N se ha de aplicar la ecuación (3). El resultado de esta formulación puede ser un número no entero.

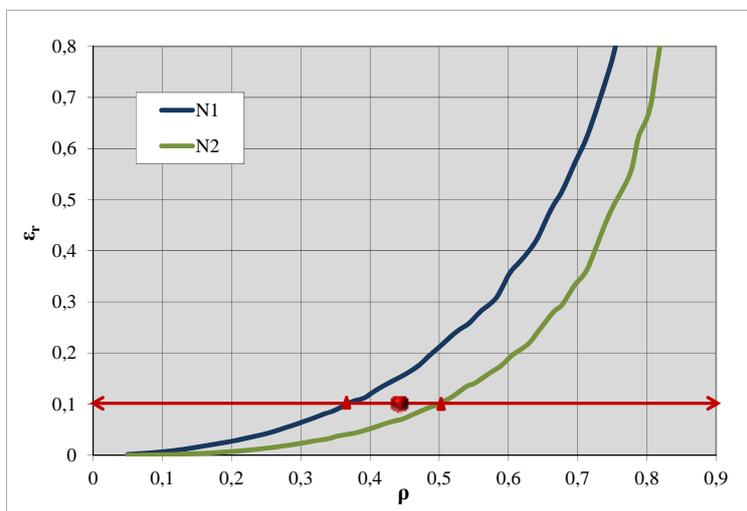


Figura 7. Interpolación de ρ entre dos curvas de N entero para obtener el valor de ρ cuando N es no entero.

El hecho de que N pueda no ser entero supone un problema pues la relación $\varepsilon_r - \rho$ se estudia solamente cuando N es entero. En este estudio, este problema se ha solucionado

interpolando los valores de ρ entre los números enteros inferior y superior de N (ver la figura 7).

Si bien las funciones de distribución A y B empleadas en este estudio se corresponden con la realidad de la terminal MSCTV, por razones de confidencialidad, los valores de la productividad (P o P_L) se han supuesto por los autores. Para los escenarios 1 y 3, la productividad supuesta por grúa es de 23 movimientos por hora. Suponiendo dos grúas por buque y escalas de 24h, de cuales 3h son improductivas, P (productividad por puesto de atraque) alcanza un valor de 60,38 TEUs/(h·puesto) (TEU/movimiento=1,5). Para los escenarios 2 y 4, P_L (productividad por metro de muelle) se ha calculado como P veces el número de puestos de atraque y entre L .

7. Resultados

Los resultados de la capacidad para cada uno de los cuatro escenarios estudiados se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados.

	<i>Escen. 1</i>	<i>Escen. 2</i>	<i>Escen. 3</i>	<i>Escen. 4</i>
<i>Formulación</i>	<i>Discreta</i>	<i>Continua</i>	<i>Discreta</i>	<i>Continua</i>
<i>L (m)</i>	656	656	756	756
<i>L_{buques} (m)</i>	225	225	225	225
<i>N</i>	2,65	2,65	3,05	3,05
ρ	0,453	-	0,504	-
ρ_L	-	0,275	-	0,494
<i>P(TEUs/(h·puesto))</i>	60,38	-	60,38	-
<i>P_L (TEU/(h·m))</i>	-	0,24	-	0,24
<i>H_{año} (h/año)</i>	360×24	360×24	360×24	360×24
<i>Capacidad (TEU/año)</i>	626 062	379 978	802 379	786 346

Los números en gris no se han utilizado directamente para calcular la capacidad del escenario correspondiente, pero son vitales para entender mejor los resultados.

Comparando los resultados del escenario 1 y 2, se aprecia como la estimación de la capacidad puede diferir enormemente para la misma longitud del muelle según la formulación empleada. En efecto, la capacidad aplicando la formulación continua es de alrededor de un 40% inferior a la obtenida aplicando la formulación discreta. La variable responsable de esta diferencia es la tasa de ocupación, la cual pasa de 0,453 a 0,275. La explicación reside en la proporción entre L y L_{buques} , que hace que una gran parte del muelle está desocupada permanentemente (la parte decimal de N , aquí vale 0,65) cuando se aplica la formulación continua. Como muestra la figura 8, cuando $L=656$ m y $L_{buques}=225$ m, $N=2,65$, es decir, solamente dos buques pueden estar

atracados a la vez y una parte del muelle está permanentemente desocupada (0,65). Este hecho solamente se considera cuando se aplica la formulación continua, y por lo tanto ρ_L es muy inferior ρ .



Figura 8. Muelle de MSCTV antes de su ampliación conceptualizado como una línea continua.

Si se comparan los resultados de las dos formulaciones después de la ampliación, es decir los escenarios 3 y 4, se puede comprobar que aunque existe una diferencia en el resultado de la capacidad, esta es muy inferior (2%). De hecho, ampliando el muelle la proporción entre L y L_{buque} (N en la formulación discreta) no es tan desfavorable puesto que caben tres buques (ver la figura 8) y solamente una pequeña parte del muelle está desocupada permanentemente (la parte decimal de N es igual a 0,05). Esto se traduce en un valor muy superior de ρ_L , que tiende además al valor de ρ del escenario 3, de ahí la pequeña diferencia de capacidad entre los escenarios 3 y 4.



Figura 9. Muelle de MSCTV después de su ampliación conceptualizado como una línea continua.

Finalmente, la comparación de los escenarios 2 y 4 permite deducir que ampliando el muelle 100 m, es decir aproximadamente un 15%, la capacidad estimada utilizando la formulación continua (que representa más fielmente la realidad) es multiplicada por dos.

8. Conclusiones

La principal conclusión que se puede extraer de este estudio es que cuando se planifican terminales, es necesario, en la medida de lo posible, emplear la formulación continua.

Para ello, es preciso recurrir a herramientas de simulación, pues de otra manera, no se podría conocer el valor de la variable ρ_L .

En los casos en los que no se puedan emplear herramientas de simulación, y como consecuencia se utilice la formulación discreta, es preciso ser consciente de que los resultados pueden sobrestimar la capacidad real. Esta sobrestimación será función de la proporción entre la longitud del muelle y la eslora de los buques (que se puede considerar como la media afectada por una distancia de seguridad). Así, cuanto mayor sea la parte decimal de este cociente, mayor será la sobrestimación de la capacidad.

De lo anterior, se puede concluir que, cuando se planifican terminales, es muy importante conocer la eslora de los buques que van a hacer escala. En este estudio, para poder calcular la tasa de ocupación, se ha supuesto que las funciones de distribución de las esloras son constantes, pues los planificadores habitualmente dimensionan los muelles para una generación determinada de buques: Panamax, post-Panamax, superpost-Panamax. Sin embargo, la explotación de los muelles ha de hacer frente a buques de esloras diferentes y es evidente que esto tiene una influencia en el cálculo de la tasa de ocupación (para la misma longitud del muelle y las mismas funciones de distribución de las llegadas y de los servicios). De esto se deduce que es necesario desarrollar otros estudios sobre este tema para determinar mejor esta influencia, pero es evidente que para poder continuar, las conclusiones presentadas en este artículo son fundamentales.

9. Referencias bibliográficas

AGERSCHOU H. (2004). *Chapter 1 : Facilities Requirements. Planning and design of ports and marine terminals*. Thomas Telford, 446 p.

AGUILAR J., OBRER-MARCO R. (2009). *Consideraciones sobre la oferta y la demanda del servicio de atraque, en relación con la capacidad de las terminales de contenedores*. X Jornadas Españolas de Costas y Puertos, Santander, pp 769-778.

DREWRY (2002). *Global container terminals – Profit, performance and prospects*. Drewry Shipping Consultants, Ltd. Royaume-Uni.

RODRIGUEZ F. (1977). *Capacidad de los muelles*. Ministerio de Obras Públicas, Madrid, 156 p.