A INFLUENCIA DA VARIABILIDADE DOS COMPRIMENTOS DOS NAVIOS NO CÁLCULO DE CAPACIDADE DOS CAIS DE CONTAINERS

Roser Obrer-Marco[1] e José Aguilar[2]

[1] Técnico de pesquisa. Dpto. de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia (España). roobmar@upv.es

[2] Professor universitário. Dpto. de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, Universitat Politècnica de València. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia (España). jaguilar@upv.es

Resumo

De forma geral, a estimativa da capacidade dos cais pode ser motivada por dois objetivos: a valorização de uma infraestrutura existente e o projeto de uma nova infraestrutura. Até o momento, a formulação mais utilizada para estimar a capacidade supõe que o cais está formado por um número de postos de atracação. Entretanto, a maioria dos cais dos terminais de containers é explorada como uma linha contínua, o que pode levar a erros na estimativa. Por isso, e para permitir que se modele o cais de maneira continua foi desenvolvida uma ferramenta de simulação que relaciona todas as variáveis do cais e dos navios. Através dessa ferramenta de simulação é possível conhecer a influencia dessas variáveis na capacidade do cais explorado de forma contínua.

Entre todas estas variáveis existe uma de vital importância: a função de densidade do comprimento dos navios - {E}. Nessa comunicação se apresentam os resultados do estudo realizado com a finalidade de conhecer como {E} pode influenciar na capacidade de um cais. Para isso, foram estudadas as {E} dos grandes terminais de containers espanhóis e definidos diferentes cenários que foram simulados através da ferramenta desenvolvida.

1. Introducción

La capacidad de un muelle se define como el tráfico límite al que puede servir durante un periodo de tiempo, normalmente un año. Ese tráfico límite puede definirse de varias maneras. Sin embargo, la fuerte competencia entre terminales obliga a que la calidad del servicio prestada a sus clientes sea elevada, y por ello, la definición del tráfico límite ha de estar necesariamente relacionada con un nivel de servicio admisible ofrecido a los navieros (los principales clientes de los muelles).

Hasta el momento y en el caso de las terminales de contenedores, la formulación empleada para estimar el tráfico considera que los muelles están compuestos por un conjunto de atraques idénticos, y viene dada por la expresión:

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

Donde:

T es el tráfico que pasa por un muelle durante un año (TEUs/año o movimientos/año)

N es el número de puestos de atraque

ρ es la tasa de ocupación del muelle (o de un puesto de atraque pues coinciden)

P es la productividad del atraque (TEU/h o movimientos/h)

$H_{año}$ es el número de horas operativas de la terminal al año

Siendo estrictos y en lo que a capacidad se refiere, el interés del naviero radica en que el tiempo total de estancia en el puerto sea relativamente bajo en proporción al número de contenedores que allí vaya a desembarcar y/o embarcar. Para conseguir ese reducido tiempo de estancia es preciso que la productividad del atraque sea elevada y que además, en caso de que haya congestión, la espera en fondeo sea reducida cuando no inexistente. En realidad tanto la productividad del atraque como la espera quedan reflejadas en la formulación propuesta (1); la primera directamente y la segunda indirectamente a través de ρ. Intuitivamente, cuando ρ tiende a uno, las esperas de los buques tienden a infinito, y de manera análoga, cuando la ρ tiende a cero, las esperas de los buques son prácticamente inexistentes.

Resulta razonable además, que estas esperas se estimen en proporción a la duración del servicio. A la relación entre la espera media de una conjunto de buques y la duración del servicio media de esos mismos buques se le conoce como espera relativa (ε_r). Asumiendo que la productividad del muelle es elevada, el nivel de servicio ofrecido a los navieros queda representado por ε_r.

Si se asume que el muelle está compuesto por N atraques iguales y conociendo las funciones de distribución de las llegadas de los buques a la terminal y de las duraciones de servicio en muelle, es posible conocer la relación entre ρ y ε_r. La teoría de colas proporciona soluciones analíticas exactas en dos casos: cuando el muelle está formado por un único atraque y las llegadas o los servicios se distribuyen según una función exponencial (suceso Poisson); y cuando tanto las llegadas, como los servicios se distribuyen según una función exponencial independientemente del número de atraques que componen el muelle (Rodríguez, 1977). Cuando la teoría de colas no se puede aplicar, entonces es necesario recurrir a la simulación.

Conocida la relación entre ρ y ε_r, el siguiente paso es fijar el valor de ε_r que los navieros consideran aceptable. Normalmente se entiende que en las terminales de contenedores ese valor es 0,1 (Agerschou et al., 2004). Fijado el valor límite de ε_r es posible conocer el valor de ρ asociado que se introduce en la formulación (1). Así, dicha formulación proporciona el tráfico límite al que puede servir un muelle durante un año, es decir, su capacidad.

2. Características de las grandes terminales de contenedores españolas

Los muelles de todas las grandes terminales de contenedores españolas (TCE) están compuestos de más de un puesto de atraque. Por eso y como se ha visto en el apartado anterior, la teoría de colas solamente podría ser aplicable si el intervalo entre llegadas consecutivas y las duraciones de servicio fueran sucesos Poisson. Sin embargo, aunque según las observaciones que se han realizado, el intervalo entre llegadas consecutivas sí que se distribuye según una función exponencial con medias comprendidas entre 5,59h y 23,62h (ver Figura 1), la duración del servicio no se distribuye según la misma función. De hecho (ver Figura 2), los análisis realizados indican en todas las TCEs las duraciones del servicio se distribuyen según una función Erlang K donde K Є [4,7] (Aguilar y Obrer-Marco, 2009). Por tanto, la teoría de colas no es aplicable y resulta necesario recurrir a la simulación para conocer la relación entre ρ y ε_r. Algunas monografías sobre desarrollo portuario proporcionan la relación entre estas dos variables cuando las duraciones de servicio se distribuyen según una función Erlang 2. Sin embargo, dado que éste no es el caso de las TCEs, se ha desarrollado un programa de simulación en el que se pueden simular todas las funciones que se presentan en las TCEs.

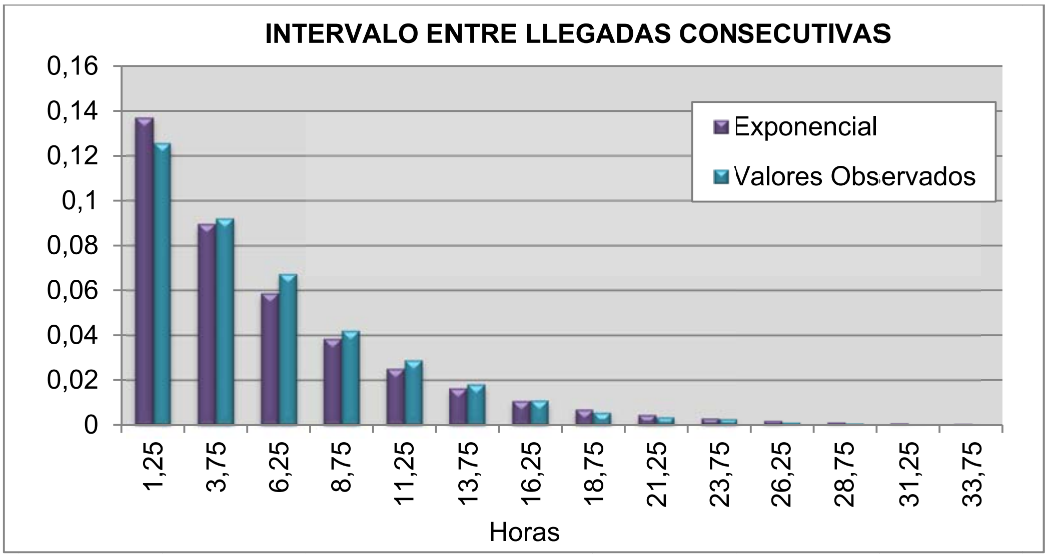

Figura 1: Función de densidad del intervalo entre llegadas consecutivas a una terminal de contenedores española.

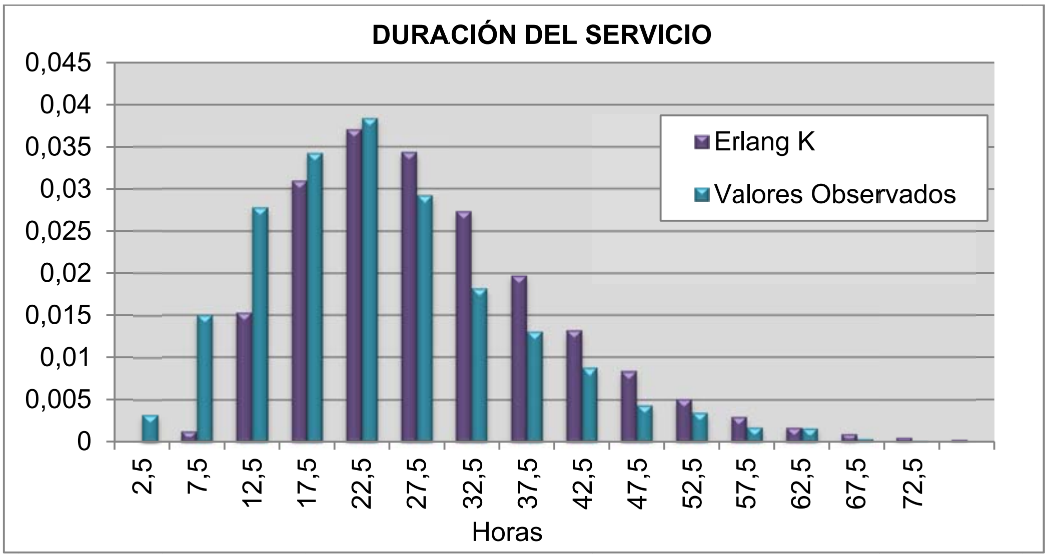

Figura 2: Función de densidad de la duración del servicio en una terminal de contenedores española.

3. Presentación de los ábacos ρ - ε_r

Tradicionalmente la relación entre las dos variables ρ y ε_r se ha representado en forma de ábaco (UNCTAD, 1984), donde en el eje de abscisas se representa ρ y en el ordenadas ε_r.

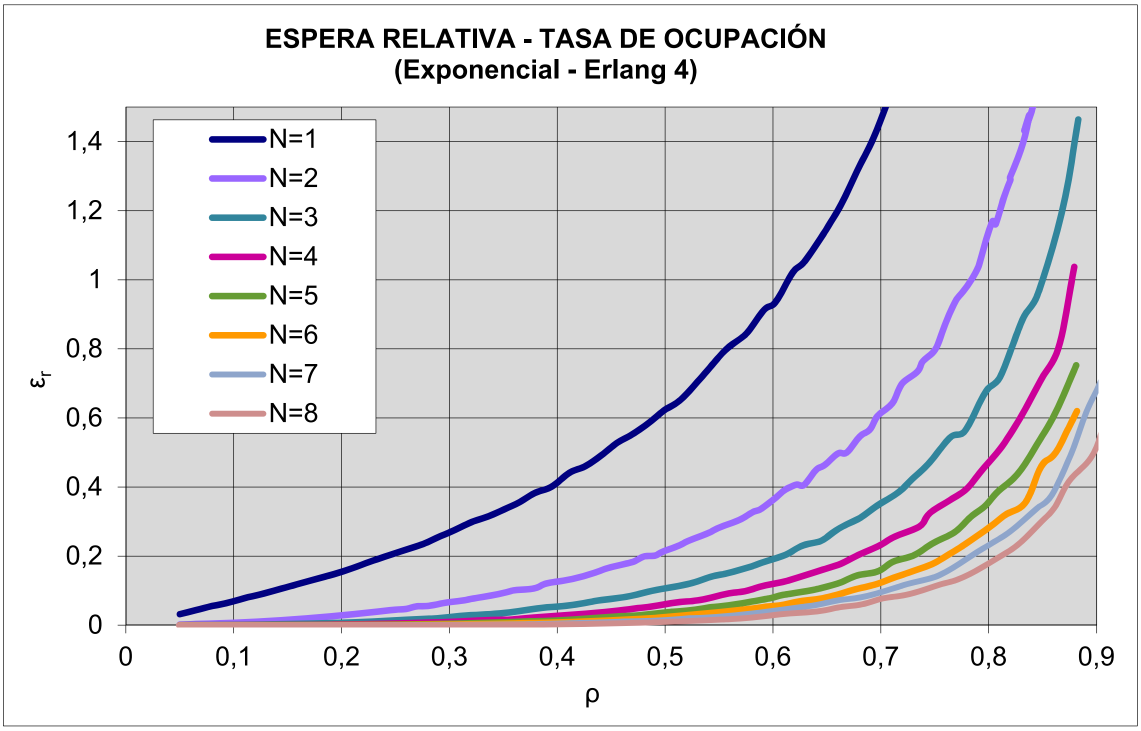

Figura 3: Ábaco ρ – ε_r cuando las llegadas se distribuyen según una función exponencial y las duraciones de servicio según una función Erlang 4, cuando el muelle está compuesto de entre 1 y 8 atraques.

En la Figura 3 quedan representados los resultados del programa de simulación desarrollado cuando las llegadas de los buques son exponenciales y la duración del servicio se distribuye según una función Erlang 4. Las curvas se corresponden con muelles compuestos de entre uno y ocho atraques.

De la Figura 3 se deduce que para el mismo nivel de servicio (misma ε_r) se pueden conseguir mayores tasas de ocupación cuantos más atraques existan en un muelle. Por consiguiente, resultaría más recomendable construir un único muelle con dos atraques que dos muelles independientes con un único atraque, puesto que el aprovechamiento (ρ) de cada uno de los atraques podría ser mayor.

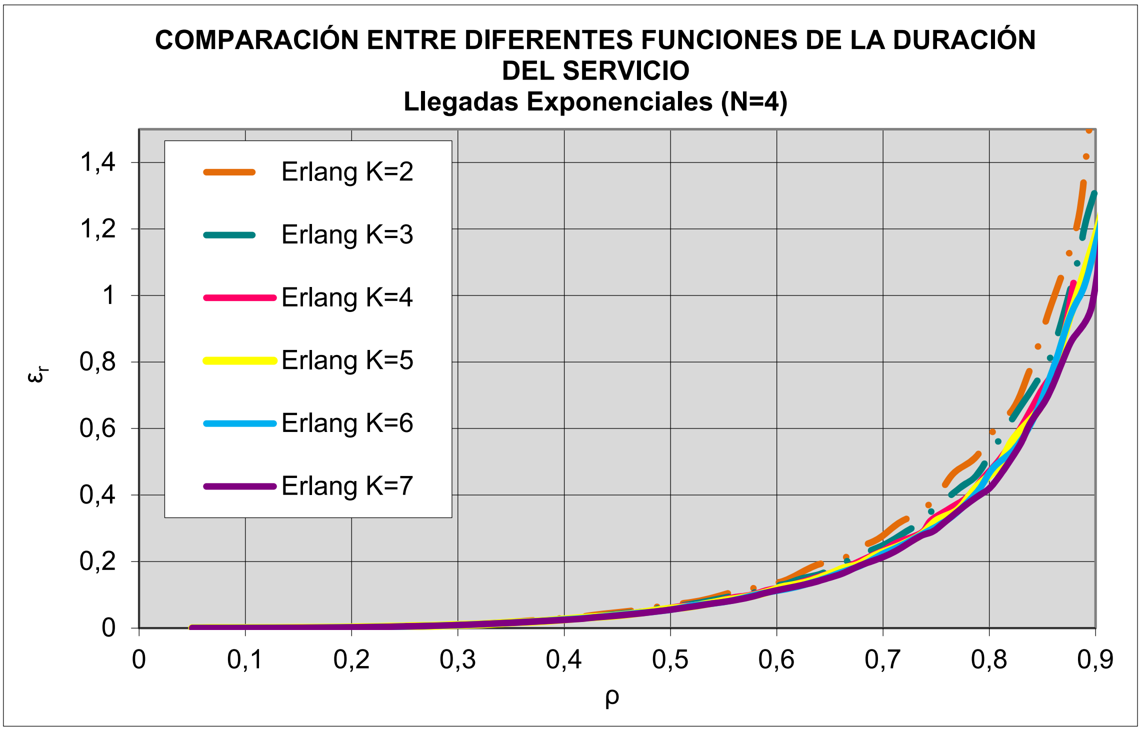

Figura 4: Comparación entre diferentes valores del parámetro K de la función de densidad de la duración del servicio Erlang K. Caso de 4 atraques.

En la Figura 4 se representan las curvas ρ - ε_r cuando el muelle está compuesto por cuatro atraques idénticos, las llegadas son exponenciales y los servicios son Erlang K donde K Є [2,7]. Como se puede ver, las curvas se superponen casi a la perfección cuando K Є [4,7], que, casualmente, se corresponde con los resultados de las TCEs. Por ello, en realidad la variabilidad del valor de K entre las TCEs no tiene influencia en los resultados obtenidos.

Como ya se ha comentado, para generar los ábacos ρ - ε_r es preciso desarrollar un programa de simulación. El resultado de ese programa son las curvas ρ - ε_r dados una función de llegadas, una función de servicios y un número de atraques. Cada una de las curvas está compuesta por 50 puntos. A su vez y para que cada punto proporcione unos valores lo más reales posibles, se simulan 25 años de la realidad. De cada año se obtiene un valor de ρ y otro de ε_r, y el valor medio de esos 25 es el que se presenta en el ábaco. De esta manera se está disminuyendo notablemente el efecto de la propia variabilidad de las funciones de llegadas y servicios. Con todo, esos 25 años a veces no son suficientes como para dar una curva nítida, lo que explica las irregularidades que se pueden ver a simple vista.

4. Aplicación de la formulación discreta a muelles explotados de manera continua

Hasta el momento, para calcular la capacidad de un muelle se ha asumido que el muelle está formado por un número de atraques iguales. Sin embargo, la realidad de las TCEs es que, en función de las esloras de los buques que en cada momento están atracados, el número de atraques varía. Esto es, los muelles no se explotan como si estuvieran formados por un número de atraques fijo, sino como una línea continua. A veces esta línea continua se discretiza asignando a cada buque un número entero de norays.

Por ello y para poder aplicar la formulación (1) es necesario hacer una traslación de un muelle explotado de manera continua a un muelle discreto, para lo que es necesario asumir una eslora tipo con la que obtener el número de atraques equivalentes. La realidad es que no existe consenso a la hora de definir la eslora tipo. Algunos autores recomiendan tomar una eslora extremal, como por ejemplo la eslora del buque cuyo tamaño es excedido por el 15% de las llegadas (EROM, 2006). Otros proponen valores medios, ya sea la media de las esloras de los buques que hacen escala en la terminal (Rodríguez, 1977) o la media de las esloras ponderadas a la duración del servicio. Lógicamente, en función de la eslora tipo el número de atraques equivalentes cambiará.

Dada la manera empleada para obtener el número de atraques equivalentes, el valor resultante suele ser un número fraccionario. Por ello, la aplicación de la formulación (1) puede ser conflictiva, no tanto por el valor de N que directamente se convertirá en un número no entero, sino por el valor de ρ. En efecto, tal y como se ha mencionado, para obtener ρ es preciso fijar un valor de ε_r y conocido N obtener ρ de una curva similar a la presentada en Figura 3. Sin embargo, en el caso de la formulación (1) los ábacos generados son únicamente para N entero. Por ello, cuando N es fraccionario, lo que se ha venido haciendo es interpolar entre las curvas de N entero.

Obsérvese que cuando las esloras de los buques que hacen escala en la terminal cambien, el valor de N también cambiará y por lo tanto la capacidad del muelle también puede cambiar.

Nótese también que, en el caso de explotación discreta, una vez determinado el número de atraques equivalentes, la rutina de atraque de los buques en el programa de simulación no discrimina los buques según su eslora, de manera que si existe un atraque vacío, se atraca directamente el buque con independencia de su longitud.

5. Formulación continua

Dado que los muelles de las TECs no se explotan de manera discreta, sino de manera continua, parece razonable que la formulación de la capacidad también lo considere así. De esta manera, se conseguirá acercarse más a la realidad en la estimación de la capacidad y alejarse de las abstracciones que de otro modo se han de realizar.

Así, la formulación (1) se puede reescribir de la siguiente manera:

$$T = L \cdot \rho_L \cdot P_L \cdot H_{año} \qquad (2)$$

Donde:

T es el tráfico que pasa por un muelle durante un año (TEUs/año o movimientos/año)

L es la longitud del muelle, compuesto por una única alineación

ρ_L es la tasa de ocupación del muelle explotado de manera continua

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

$H_{año}$ es el número de horas operativas de la terminal al año

Para conocer ρ_L es necesario que el programa de simulación simule el muelle de manera continua y así proporcionar la relación entre ε_r y ρ_L. Nótese que en el momento en el que el muelle se simula de forma continua aparecen nuevas variables de explotación como pueden ser la elección del hueco donde se va a emplazar el buque (cuando haya varios huecos) o el posicionamiento dentro del mismo. En realidad, la mejor o peor utilización del muelle depende de los valores que tomen estas variables, y debido a la gran influencia que pueden tener, se suelen implementar en los programas de simulación algoritmos de optimización que buscan minimizar las esperas o maximizar la tasa de ocupación, entre otros objetivos. Sin embargo, dado que la solución adoptada puede depender del algoritmo o la técnica de optimización empleada, el programa de simulación desarrollado para esta ponencia se ha diseñado de manera que se llevan a cabo enmendadas. Es decir, en el momento en el que un buque abandona el muelle y genera un hueco, todos los buques restantes se desplazan hacia un extremo del muelle, unos contiguos a otros, haciendo no haya huecos entre ellos. Al hacer enmendadas y considerar que el tiempo necesario para hacerlas es nulo, se tiene toda certeza de que los resultados son los mejores que se podrían haber obtenido, siempre que la gestión de la cola sea FIFO. En el caso de que exista otro tipo de gestión de la cola, sería en principio posible mejorar los resultados, ya que el proceso de optimización afectaría tanto al espacio como al tiempo. Pero en todo caso, se puede intuir que la solución que proporciona el realizar enmendadas sería un valor relativamente extremo de lo que se podría llegar a conseguir.

Además de las variables de la explotación, cuando el muelle se simula de manera continua aparece una variable de máxima importancia en el procedimiento de atraque de los buques. Esta variable es la eslora, que a su vez se mayora para permitir los resguardos de seguridad entre buques. Estos resguardos permiten una correcta operación, y evitan que los buques colisionen unos con otros.

El valor de P_L es una productividad por unidad de longitud y se puede obtener a partir de la productividad de elementos discretos como pueden ser las grúas o los buques (caracterizados por su eslora) y repartiendo ese valor a lo largo de la línea de atraque.

6. Objetivos de la ponencia

El principal objetivo de esta ponencia es estudiar cómo afecta la distribución de esloras {E} a la capacidad del muelle a través de la relación entre ρ_L y ε_r, cuando el muelle se explota de manera continua. Esto es, conocer cómo puede variar ρ_L fijada ε_r cuando en un muelle la media o la forma de {E} cambia. Otro objetivo secundario es comparar los resultados de la relación entre éstas variables con los resultados de la relación entre ρ y ε_r. Es decir, ver cómo puede variar la relación entre la espera relativa y la tasa de ocupación cuando se va aplica la formulación discreta o la formulación continua sobre un muelle explotado de manera continua.

7. Diferencia en el cálculo de ρ y ρ_L

Tradicionalmente, cuando se ha estudiado la relación entre ε_r y ρ mediante la teoría de colas, poco ha importado la eslora de los buques dispuestos en los diferentes atraques. Posiblemente esto haya sido así porque en el campo en el que empezó a estudiarse la teoría de colas (las TIC) no tenía sentido pensar en la ocupación física de los elementos que llegaban al sistema. Como consecuencia de ello, cuando el muelle se simula de manera discreta, se considera que el atraque está ocupado cuando en él se posiciona un buque, y no se refleja si ese buque ocupa el atraque completo o no. En este caso ρ se puede obtener según la siguiente expresión:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^{N} \frac{t_i}{T_i}}{N} \qquad (3)$$

Donde:

i es el contador de los atraques

N es el número de atraques

t_i es el tiempo durante el cual el atraque i está ocupado

T_i es el tiempo durante el cual el atraque i está operativo (que suele coincidir con el periodo de tiempo para el cual se calcula ρ).

Sin embargo, cuando el muelle se explota de manera continua, se consideran ocupados solamente los metros en los que el buque está situado además de los metros de resguardo, que se pueden estimar en el 15% de la eslora del buque. En este caso ρ_L se puede obtener según la siguiente expresión:

$$\rho_L = \sum_{j=1}^{B} \frac{E_j \cdot 1'15 \cdot t_j}{L \cdot T} \qquad (4)$$

Donde:

B es el número de buques que hacen escala en la terminal durante un periodo de tiempo en el cual el muelle está operativo

j es el contador de los buques

E_j es la eslora del buque j

t_j es el tiempo durante el cual el buque j está atracado en el muelle

L es la longitud del muelle

T es el periodo de tiempo durante el cual el muelle está operativo (que suele coincidir con el periodo de tiempo para el cual se calcula ρ_L).

En las figuras que siguen se muestra de una manera intuitiva la diferencia entre el cálculo de ρ y de ρ_L. Para ello se ha tomado como ejemplo el muelle de la terminal de contenedores TCV Stevedoring Company, S.A. (TCV) localizada en el puerto de Valencia (España). Esta terminal ha ido creciendo con el tiempo y adquiriendo terrenos contiguos a la terminal original, lo que hace que su configuración sea un tanto irregular tanto en lo que se refiere a la planta, como en lo que se refiere al calado. Dejando de lado el calado, la terminal posee en el muelle de levante del puerto de Valencia dos alineaciones (ver Figura 5).

Figura 5: Muelle de la terminal TCV en el puerto de Valencia. Presentación de sus dos alineaciones. Fuente: Visor SigPac y elaboración propia.

La Figura 6 y la Figura 7 representan el muelle explotado de manera discreta, mientras que la Figura 8 y Figura 9 lo representan de manera continua. En la Figura 6 se muestra una situación en la que todos los atraques de la terminal están atracados, al igual que en la Figura 7. Sin embargo, las esloras de los buques atracados en la situación representada en la Figura 6 son muy inferiores a las de los buques que están atracados en la situación representada en la Figura 7. Si se asume que el tiempo transcurrido en ambas situaciones es el mismo y se calcula ρ para ese tiempo, el resultado va a ser el mismo en ambas situaciones pues según (3), la eslora de los buques no tiene ningún impacto en el cálculo. Solamente tiene importancia que el atraque esté lleno o vacío.

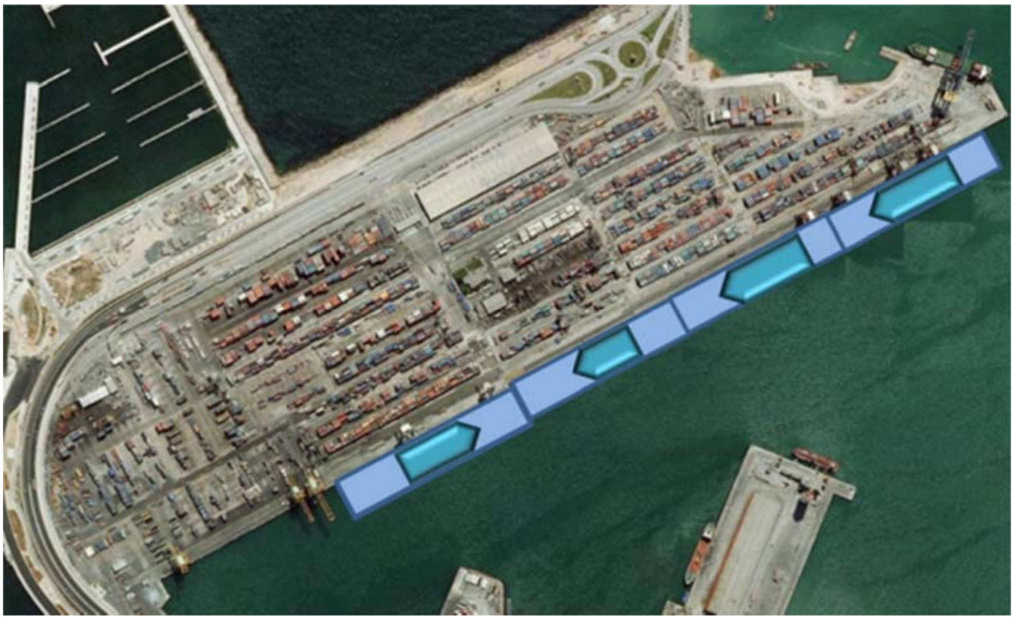

Figura 6: Muelle de la terminal TCV explotado como un muelle discreto. Situación 1. Fuente: Visor SigPac y elaboración propia.

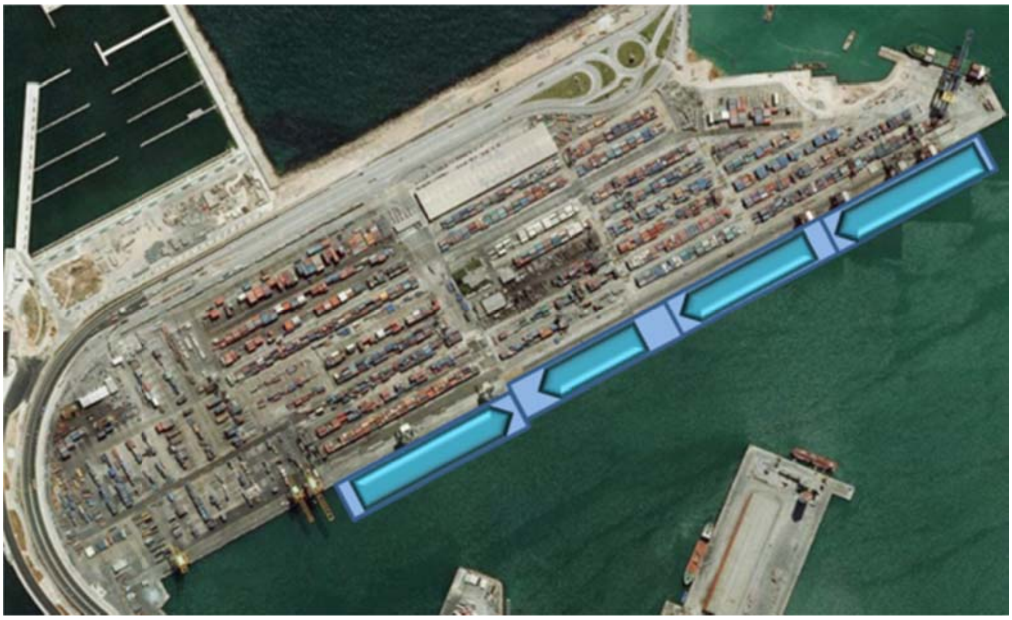

Figura 7: Muelle de la terminal TCV explotado como un muelle discreto. Situación 2. Fuente: Visor SigPac y elaboración propia.

En la Figura 8 y la Figura 9 se han representado los mismos tamaños de buques que en la Figura 6 y la Figura 7 respectivamente, sin embargo en la Figura 8 y la Figura 9, el muelle está explotado de manera continua, y por lo tanto se ha de calcular ρ_L (según (4)). En este caso las esloras de los buques sí que son importantes y por lo tanto el valor de la tasa de ocupación sí que va a cambiar. En efecto, si se observa (4) se puede intuir que ρ_L será superior en la situación de la Figura 9 que en la de la Figura 8

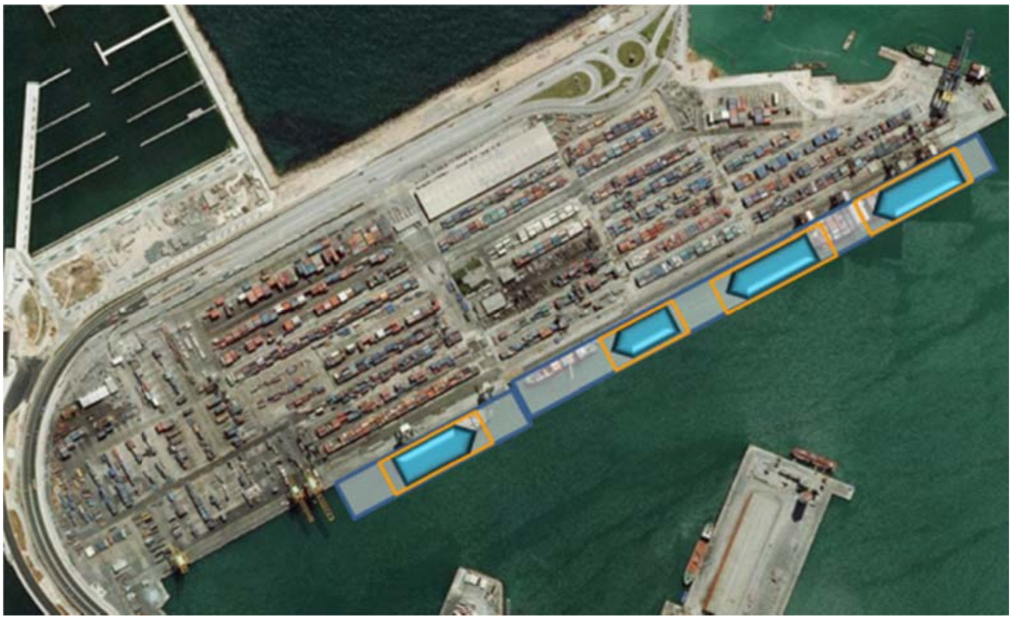

Figura 8: Muelle de la terminal TCV explotado como un muelle continuo. Situación 1. Fuente: Visor SigPac y elaboración propia.

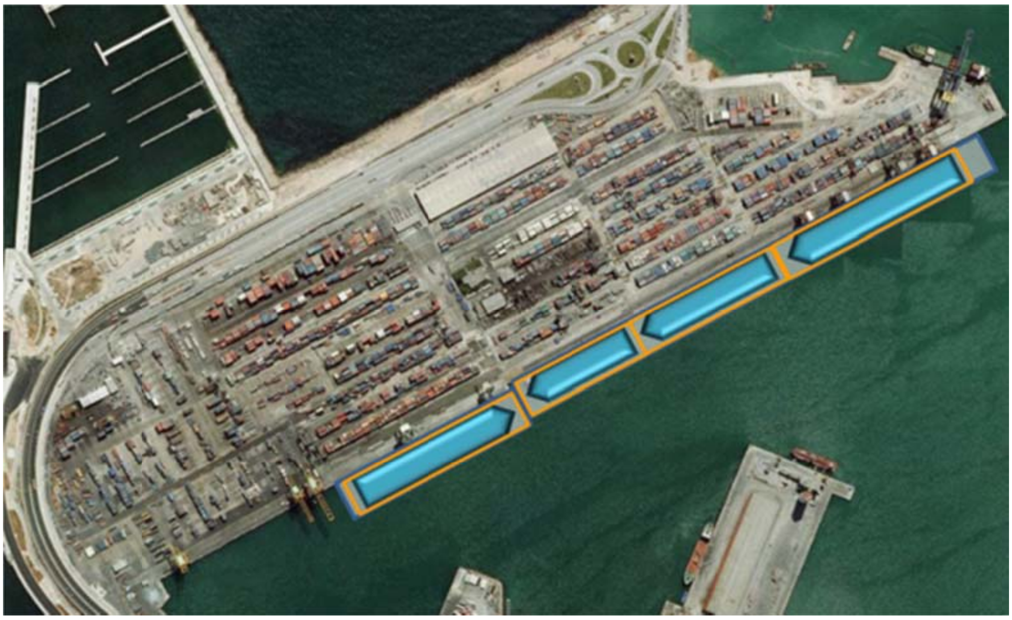

Figura 9: Muelle de la terminal TCV explotado como un muelle continuo. Situación 2. Fuente: Visor SigPac y elaboración propia.

Como se verá posteriormente, la diferencia conceptual entre ρ y ρ_L puede tener un elevado impacto en el cálculo de la capacidad de los muelles.

8. Escenarios estudiados

Como se ha visto en el apartado 6, el objetivo principal de esta ponencia es mostrar cómo puede influir {E} en la capacidad de los muelles a través del valor de ρ_L. Debido a la gran cantidad de variables que influyen en la gestión de los muelles y la asignación de atraque a los buques, para llevar a cabo los objetivos propuestos resulta necesario plantear escenarios concretos.

Las variables a definir en cada uno de los escenarios posibles son:

- La función de densidad de las llegadas de los buques a la terminal.
- La función de densidad de las duraciones de servicio.
- La longitud del muelle.
- La función de densidad de las esloras de los buques que hacen escala en la terminal.

Como se ha comentado en el apartado 5 de este documento, se ha asumido que en el muelle se llevan a cabo enmendadas. Por ello carece de sentido plantear las variables de explotación del muelle relativas a la elección del hueco (en el caso de que exista más de un hueco donde atracar el buque) o la elección del posicionamiento dentro del mismo.

Para diseñar los escenarios se han analizado las características de las grandes TCEs, y en base a estas características se han fijado los valores a reflejar por cada variable.

En relación con la función de densidad de las llegadas, y tal y como se ha visto en el apartado 2, en todos todas las TCEs previamente estudiadas dicha función es una exponencial. Por ello, en todos los escenarios planteados se ha asumido esta misma distribución.

En cuanto a la función de densidad de la duración del servicio, como en todas las TCEs previamente estudiadas se trata de una función Erlang K donde K Є [4,7], y puesto que apenas existe variación en los resultados entre K=4 y K=7 (ver apartado 3) cuando el muelle se simula de manera discreta y asumiendo que en el caso continuo va a ocurrir lo mismo, en todos los escenarios se ha planteado una función Erlang 4.

En las siguientes tablas se muestran los valores adoptados por el resto de variables. Las combinaciones de todas ellas generan los 30 escenarios simulados y estudiados.

LONGITUD DEL MUELLE	1000m
	1500m
	2000m

Tabla 1: Valores posibles de la variable longitud de muelle en los escenarios estudiados.

		Eslora Media
RANGO DE ESLORAS	150m	150m
	100 – 200m	
	75 – 225m	
	250m	250m
	200 – 300m	
	150 – 350m	

Tabla 2: Valores posibles para el rango de esloras en los escenarios estudiados.

TIPO DE DISTRIBUCIÓN DE ESLORAS	CONSTANTE
	UNIFORME
	TRIANGULAR

Tabla 3: Posibles funciones de distribución de esloras en los escenarios estudiados.

Al diseñar estos 30 escenarios se ha pretendido crear para cada longitud de muelle dos grandes grupos de esloras, uno de 150m y otro de 250m. Además, para cada uno de los dos grupos se han estudiado diferentes tipos de distribuciones (ver Tabla 3), y, cuando éstas lo permiten, se han incluido diferentes dispersiones, empleando una distribución más estrecha y otra más ancha.

9. Resultados obtenidos

En las figuras que siguen se representan los resultados obtenidos de simular cada uno de los 30 escenarios planteados. Los resultados se presentan en forma de ábaco, pues como se mencionó anteriormente, es la forma más común de representar la relación $\varepsilon_r - \rho$, o $\varepsilon_r - \rho_L$.

Cada una de las figuras contiene, para una determinada longitud de muelle y una eslora media, todas las posibles funciones de distribución propuestas (ver Tabla 3) y todas las dispersiones posibles (ver Tabla 2). Además, las figuras también presentan el número de atraques equivalentes en el muelle, obtenido de la siguiente manera:

$$Nequiv = \frac{L}{1{,}15 \cdot E_{media}} \qquad (5)$$

Como N_{equiv} es normalmente fraccionario, en las figuras se han incluido las curvas obtenidas para atraques discretos correspondientes a los números de atraques enteros superior e inferior a ese valor. Así, es posible comparar los resultados de $\varepsilon_r - \rho_L$ con aquellos que se obtendrían de interpolar entre las curvas obtenidas para atraques discretos.

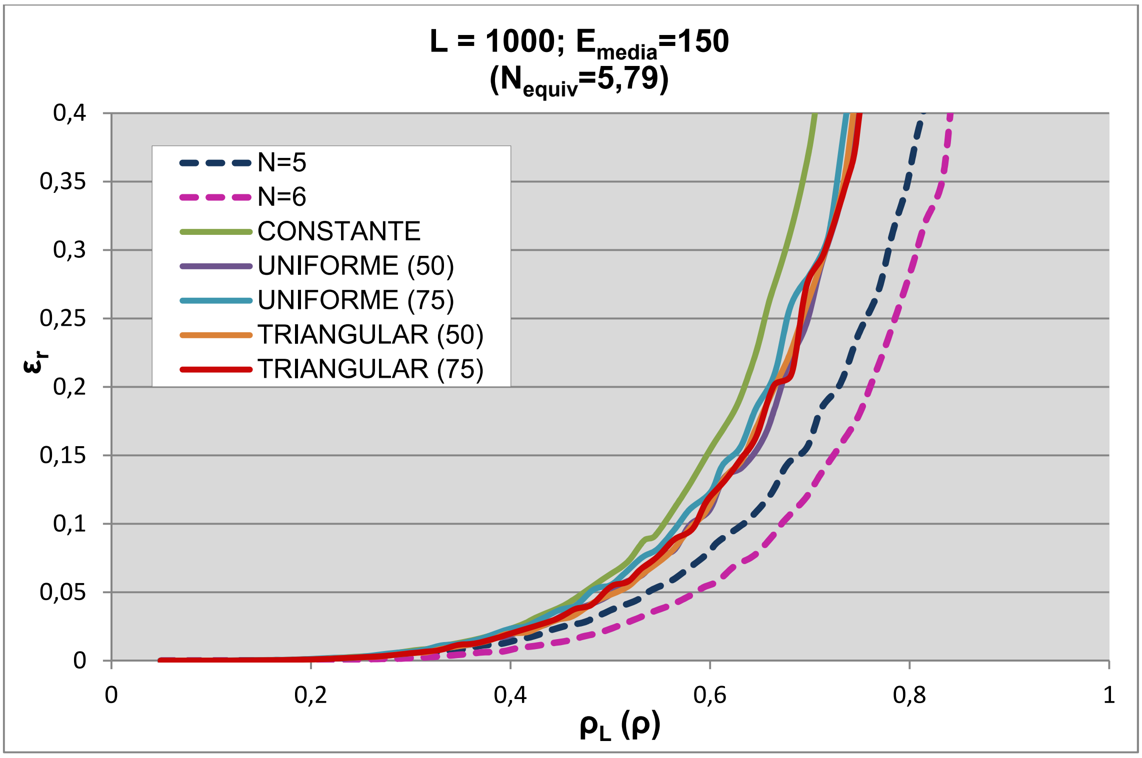

Figura 10: Relación $\varepsilon_r - \rho$ y $\varepsilon_r - \rho_L$ para el caso de L=1000m y E_{media}=150m.

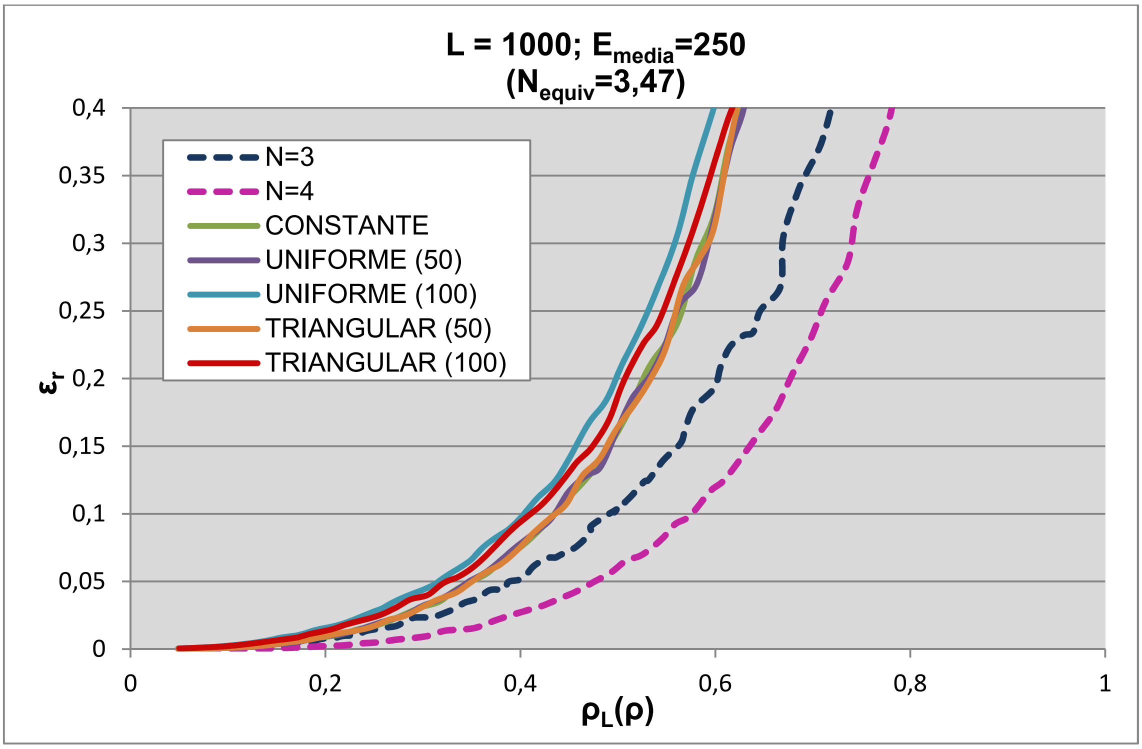

Figura 11: Relación $\varepsilon_r - \rho$ y $\varepsilon_r - \rho_L$ para el caso de L=1000m y $E_{media=}$250m.

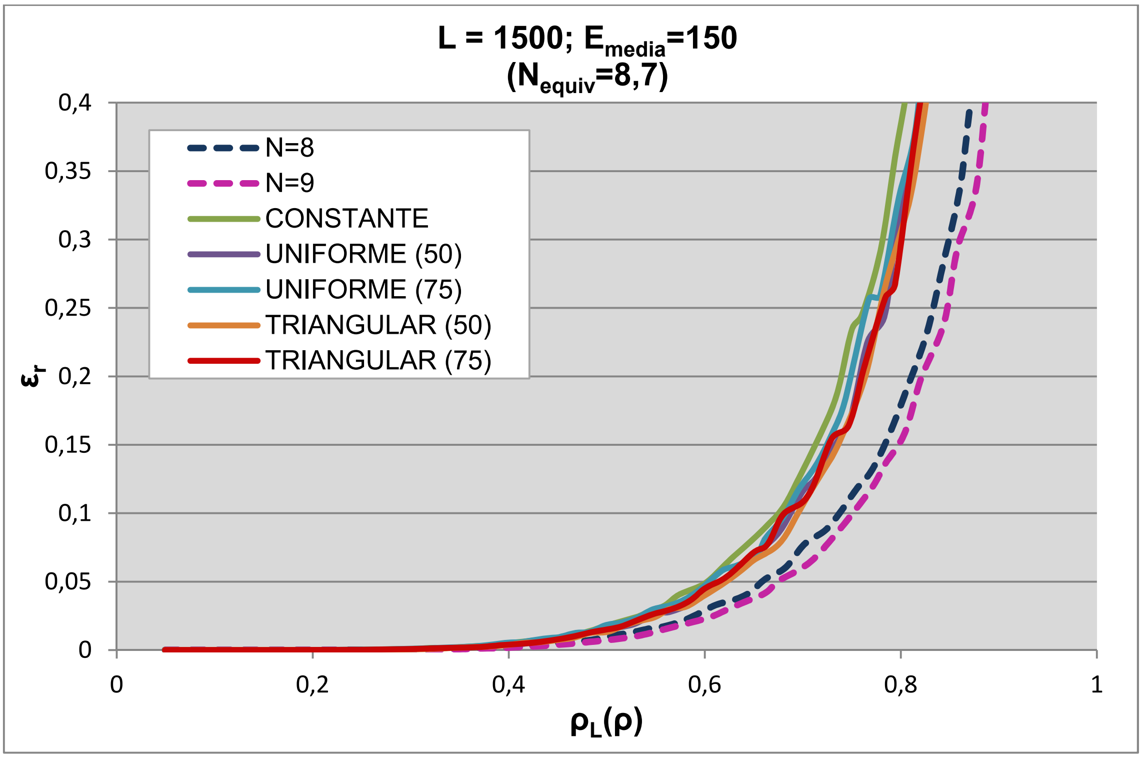

Figura 12: Relación $\varepsilon_r - \rho$ y $\varepsilon_r - \rho_L$ para el caso de L=1500m y $E_{media=}$150m.

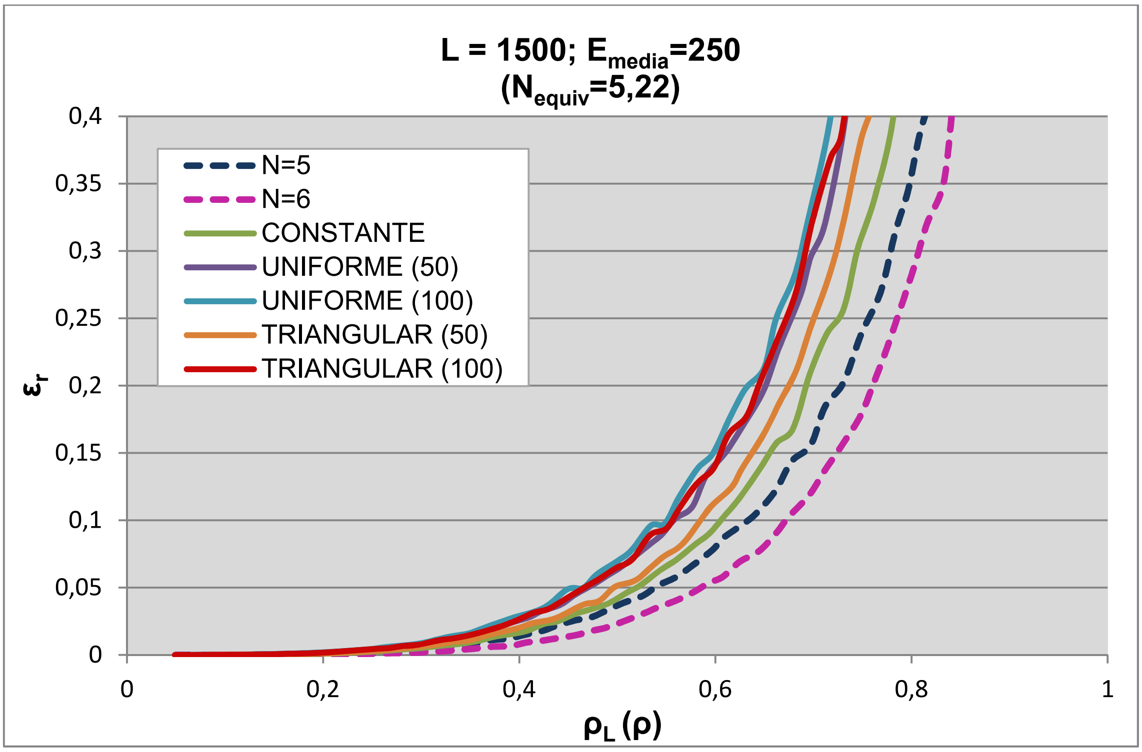

Figura 13: Relación $\varepsilon_r - \rho$ y $\varepsilon_r - \rho_L$ para el caso de L=1500m y $E_{media=}$250m.

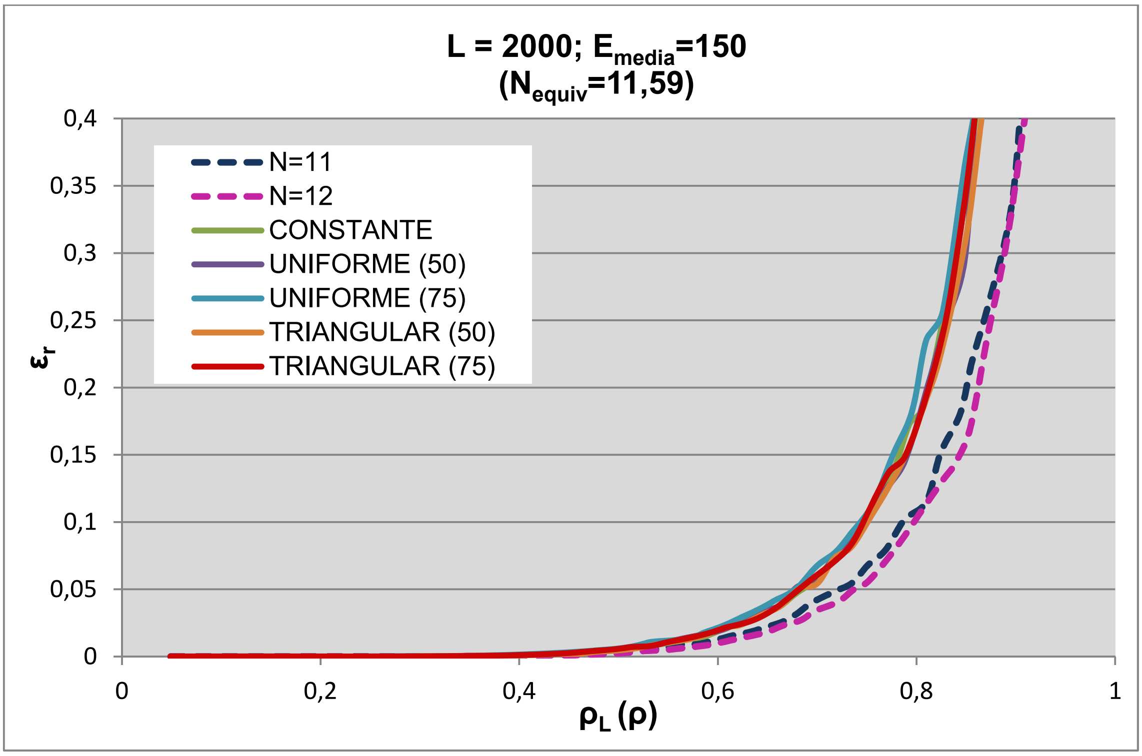

Figura 14: Relación $\varepsilon_r - \rho$ y $\varepsilon_r - \rho_L$ para el caso de L=2000m y $E_{media=}$150m.

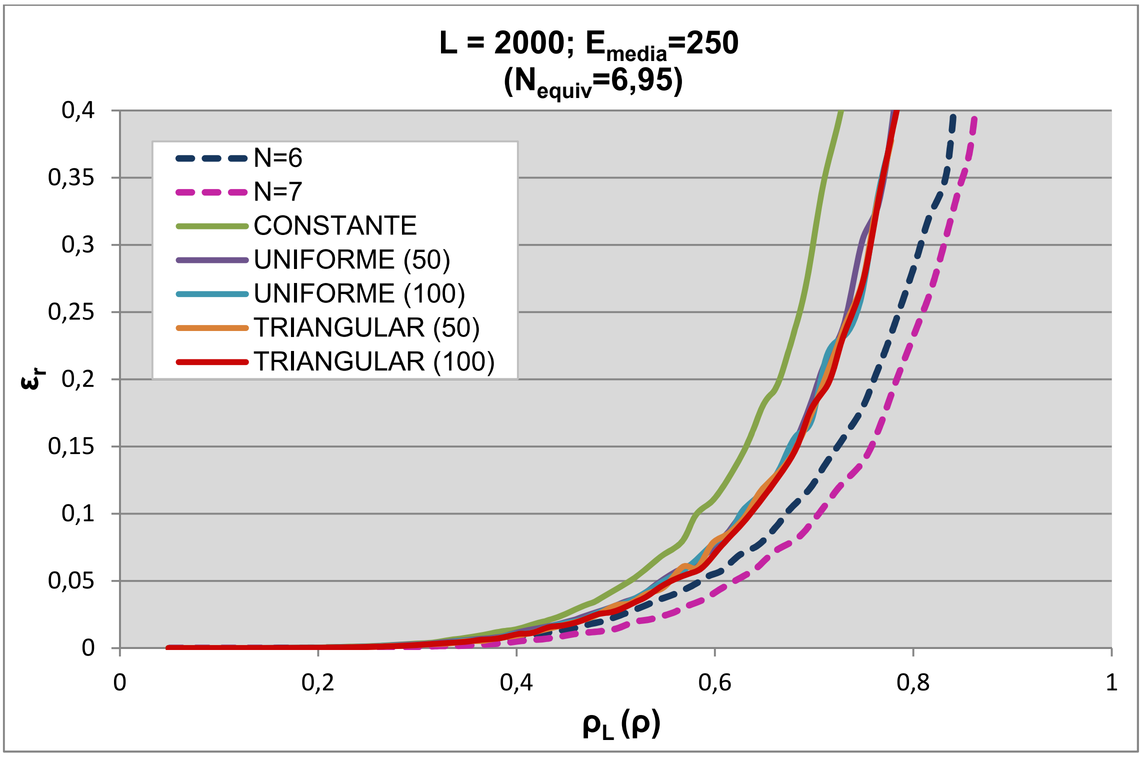

Figura 15: Relación $\varepsilon_r - \rho$ y $\varepsilon_r - \rho_L$ para el caso de L=2000m y $E_{media=}$250m.

A la vista de las figuras, la primera conclusión que se puede extraer es que al simular el muelle de manera continua, las curvas resultado siempre están más próximas al eje de ordenadas que cuando las curvas obtienen de simular el muelle de manera discreta. Esto significa que para el mismo valor de $\varepsilon_{r,}$ en la concepción continua del muelle la tasa de ocupación siempre será menor que la obtenida de la interpolación de las curvas discretas y por lo tanto la capacidad del muelle también será siempre menor (ver las formulaciones (1) y (2)).

Antes de continuar con los resultados obtenidos y con el objetivo de clarificar las ideas que a continuación se van a presentar, véase el siguiente ejemplo. Imagínese un muelle de 400m al que llegan buques de 87m, todos iguales. Dado que cada buque ocupa su eslora además del resguardo necesario equivalente al 15% de su eslora, cada buque ocupa 100m. Imagínese también que la cola de buques para atracar en ese muelle es infinita y por lo tanto cuando un buque abandona el muelle siempre hay otro esperando para atracar. Así, en el muelle existen 4 buques atracados permanentemente (se desprecia el tiempo de maniobra de desatraque del buque que abandona el muelle y el de atraque del buque que entra). En este caso el valor de ρ_L será prácticamente 1.

Ahora imagínese que el muelle de 400m es ampliado 50m y que las características de los buques que llegan al muelle siguen siendo las mismas que antes de la ampliación. Como se puede ver, debido a que en esos 50m no cabe un buque más, en el muelle habrá 50m permanentemente desocupados, lo que hará que el valor de ρ_L sea inferior al caso en el que el muelle medía 400m. De hecho, si la ampliación del muelle fuera siendo progresiva hasta el momento en el que el muelle midiera 500m de longitud, la tasa de ocupación sería inferior a cuando medía 400m. Es decir, si se asumen colas infinitas y buques de igual eslora, la tasa de ocupación es máxima cuando Nequiv es entero. Si a partir de esa situación el muelle se prolonga de manera que Nequiv sea fraccionario y superior al Nequiv inicial, la tasa de ocupación disminuirá hasta que la longitud sea tal que Nequiv sea de nuevo entero y una unidad más que el valor inicial. Este efecto se puede ver amortiguado por la variabilidad de esloras como más adelante se verá, pero su efecto de una u otra manera siempre está presente.

Centrándose en las curvas correspondientes a las distribuciones constantes de las esloras se aprecia como la mayor o menor distancia a las curvas obtenidas de manera discreta depende fundamentalmente de la parte decimal del número de atraques equivalentes. Cuanto menor es la parte decimal, más se aproxima la curva de esloras constantes a la curva de simulación discreta. Compárese la Figura 13 con la Figura 15:

	Nequiv	**Parte Decimal Nequiv**
Figura 13	5,22	22
Figura 15	6,95	95

Tabla 4: Comparación entre la Figura 13 y la Figura 15 en relación a Nequiv.

En efecto, la parte decimal de Nequiv en el escenario representado en la Figura 13 es muy inferior al de la Figura 15 y como se aprecia en dichas figuras, en el primer caso la curva de esloras constantes está mucho más aproximada a las curvas discretas. Esto es así porque cuando la parte decimal es mayor, existe más parte del muelle que nunca será ocupada por buque alguno (debido a la proporción entre la longitud del muelle y las esloras de los buques que en este caso siempre son iguales), y como el cálculo de ρ_L solamente considera la parte de muelle que realmente está ocupada por los buques más sus resguardos, una parte del muelle penaliza permanentemente al valor de ρ_L. Dicho de otra manera, hay un exceso de muelle inaprovechable para la distribución de esloras que lo usa.

De esto se deduce que, cuando se asume una {E} constante (todos los barcos iguales) para estimar la capacidad de un muelle a partir de la formulación continua, el resultado de la capacidad puede ser un valor muy inferior al resultante de la formulación discreta, o prácticamente el mismo en función de la parte decimal del valor de Nequiv. Éste último caso se dará cuando el Nequiv se aproxime por exceso a un valor entero.

Un paso más para acercarse a la realidad en la determinación de la capacidad de un muelle es generar esloras variables. Viendo las figuras anteriores se deduce que la variabilidad de esloras puede suponer cambios significativos en la estimación de la capacidad. En efecto, si se observa la Figura 10, Figura 13, o la Figura 15 se ve que la curva correspondiente a {E} constante no coincide con las curvas correspondientes a {E} uniforme o triangular. De esta manera, para la misma ε_r el valor de ρ_L cambia y por lo tanto la capacidad estimada también cambia.

Ahora bien, el resultado es bien diferentes si las curvas correspondientes a {E} con variabilidad quedan a la derecha o a la izquierda de las de {E} constantes. Si quedan a la derecha significa que para la misma ε_r el valor de ρ_L es mayor y por lo tanto la capacidad del muelle también es mayor. Si por el contrario las curvas quedan a la izquierda el significado es el opuesto.

Analizando las figuras anteriores es posible detectar que la parte decimal de Nequiv es clave para saber si la variabilidad de {E} introduce mejoras o desmejoras en la capacidad. Nótese que cuando esa parte decimal es mayor de 0,5, la variabilidad de {E} proporciona mejores resultados pues en todos los casos las curvas de {E} constante quedan a su izquierda (ver Figura 10, Figura 12, Figura 15). Por el contrario, cuando la parte decimal es menor de 0,5, la variabilidad de {E} proporciona peores resultados (ver Figura 13). Y cuando se encuentra alrededor de 0,5 las curvas de {E} constante, uniforme o triangular prácticamente se superponen.

Otra cuestión que surge cuando se simula variabilidad en {E} es saber si existen grandes diferencias entre una función uniforme y una triangular. En general la respuesta a esta cuestión es que no (ver Figura 10, Figura 12, Figura 14 y Figura 15). Sin embargo en algunos casos se han detectado ligeras diferencias (ver Figura 13).

Finalmente cabe plantearse si la mayor o menor variabilidad en las esloras puede proporcionar mejores o peores resultados en la capacidad. En general se puede ver que no, aunque algún caso no cumple esta afirmación. Si se analiza la Figura 11, se puede ver que, en efecto, las curvas correspondientes a dispersiones mayores (desviaciones máximas de 100m respecto del valor medio) se alejan más del resto de curvas, presentando resultados peores.

10.Conclusiones

El desarrollo de esta ponencia ha podido hacer ver que cuando se intenta estimar la capacidad de los muelles de contenedores, es necesario aplicar una formulación continua para acercarse al máximo a la realidad. En efecto, se ha podido comprobar que los resultados proporcionados por una formulación discreta pueden ser muy diferentes a los proporcionados por una formulación continua aplicada al mismo caso. Un factor clave en esa diferencia es el número de atraques equivalentes del muelle, es decir, la relación entre la longitud de la línea de atraque y el espacio ocupado por un buque tipo, que incluye su eslora más los resguardos necesarios entre buques para evitar daños. Se ha podido demostrar que al asumir que todos los buques que hacen escala en la terminal son iguales, la parte fraccionaria del número de atraques equivalentes es decisiva en la diferencia entre la formulación discreta y la formulación continua. Así, cuanto mayor es esa parte fraccionaria, mayor diferencia existe. Cuando existe variabilidad en las esloras de los buques que escalan en la terminal, este efecto se ve amortiguado.

Sea como sea, la tasa de ocupación obtenida considerando el muelle como una línea continua siempre es igual o inferior a la obtenida considerando el muelle como un conjunto de atraques iguales. Será igual cuando el número de atraques equivalentes se aproxime por exceso a un valor entero. De aquí se deduce que, en algunas ocasiones se puede estar sobrestimando la capacidad de los muelles si se aplica una formulación discreta.

Además, también se ha podido probar que, cuando se considera variabilidad en la distribución de esloras, la función de distribución exacta que se emplea tiene poca importancia en los resultados obtenidos, al menos para los rangos y funciones que se han empleado para esta ponencia, que por otra parte son los más habituales. De hecho, en la mayoría de casos simulados, los resultados son prácticamente los mismos tanto para funciones uniformes como para funciones triangulares, y para desviaciones máximas de 50m, 75m o 100m.

Téngase en cuenta que para el desarrollo de esta ponencia, para poder fijar un límite y a efectos de comparación, se ha supuesto que en el muelle se llevan a cabo enmendadas. El hecho de hacer esta suposición hace que los resultados de la simulación continua sean óptimos, por lo que si no se asumiera así, la diferencia entre los resultados de una simulación continua y una simulación discreta podrían ser aún más diferentes.

Por último, es importante resaltar que cuando se intenta estimar la capacidad de un muelle es necesario simular su funcionamiento para poder obtener los valores de las variables que influyen en la capacidad adaptados a ese muelle en concreto. Para ello se han de considerar las propias características del muelle y de los buques que allí hacen escala. De otra manera se pueden estar cometiendo errores en la estimación de la capacidad. Esto hace reforzar la idea de que un muelle es una línea continua sobre la cual se atracan buques, y que en cada momento el número de buques atracados en ella puede variar en función de las características de los mismos. Esta idea se aleja de la concepción discreta de los muelles donde, independientemente de las esloras de los buques que en cada momento están atracados, el número de puestos de atraque es el mismo.

11.Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo del proyecto de investigación "Metodologías de automatización y simulación para la evaluación y mejora de la capacidad, rendimiento y nivel de servicio de terminales portuarias de contenedores – MASPORT" financiado por el Ministerio de Fomento en la convocatoria del año 2008.

12.Referencias

Agerschou, H. (2004). "*Facilities Requirements*." *Planning and design of ports and* *marine terminals*, Thomas Telford, London, UK, 5-20.

Aguilar, J. y 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, España.

EROM (2006). "Capítulo 3: criterios de proyecto." Recomendaciones en obras de atraque y amarre – ROM 2.1, EROM 02, Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España.

Rodríguez, F. (1977). "*Capacidad de los Muelles*", MOPU, Madrid, España.

UNCTAD (1984). "*Desarrollo portuario. Manual de planificación para los países en desarrollo*", United Nations Publications, Geneva, Switzerland.