



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

ESCUELA DE DOCTORADO

TESIS DOCTORAL

NUEVA DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE MUELLES
EN TERMINALES DE CONTENEDORES MEDIANTE TÉCNICAS
DE SIMULACIÓN

AUTORA

Roser OBRER MARCO

DIRECTOR

Doctor José AGUILAR HERRANDO

Valencia, Octubre 2015

Ciencia es todo aquello sobre lo cual siempre cabe discusión.

José Ortega y Gasset (Madrid, 1883 – 1955)

Agradecimientos

Muchas son las personas que me vienen a la mente cuando echo la vista atrás y repaso el camino seguido desde el inicio de esta tesis. Todas y cada una de ellas me ha brindado de manera desinteresada su ayuda y quiero expresarles mi gratitud.

A mis padres, ellos fueron quienes me impulsaron a iniciar este proyecto casi antes de cerrar otro. *Moltes gràcies per animar-me a continuar quan creia perdre la direcció i ensenyar-me a posar tanta il·lusió en els meus propòsits.*

Debo especial reconocimiento a mis compañeros y amigos del departamento: Esther, Ángela, Eva, Rafa, Miguel, César, Pepe, Ana, Rosa, Juliana, Roberta, Mar, Ramón, Carlos, Ana Tsui... por tantas experiencias y todo vuestro apoyo.

Y como no podía ser de otra manera, a aquel compañero francés que una beca de Puertos me permitió conocer. Gracias a las horas dedicadas a esta tesis surgió algo muy especial entre nosotros...aunque por ella también le robé otras tantas...*c'est à toi Romain que je dédie ce travail...parce que quand nous fermons une porte, une fenêtre s'ouvre.*

No puedo olvidar a mi hermana, aunque en estos momentos no pueda compartir con ella todo el tiempo que me gustaría, siempre está conmigo. La animo a que continúe con su tesis en cuanto la situación se lo permita.

Mi más sincero agradecimiento a mi director de tesis, Pepe Aguilar, con quien durante estos ocho años he aprendido mucho más que gestión portuaria. Gracias por darme la oportunidad de participar en este proyecto, por tus ideas y consejos, y cómo no, por tu confianza.

Resumen

En el ejercicio de la planificación de puertos es fundamental buscar el equilibrio entre los tráficos esperados en un determinado horizonte de tiempo y la capacidad de las infraestructuras. Dada la especialización que han sufrido los puertos, resulta lógico analizar dichos equilibrios para cada tipo de mercancía. Esta tesis se centra en el estudio de la capacidad de las terminales de contenedores y en concreto de sus muelles, la cual es cambiante en el tiempo, quedando supeditada a unas condiciones concretas de explotación y de aceptación de la calidad del servicio ofrecido a los clientes.

Las formulaciones que se han empleado hasta el momento en el cálculo de la capacidad de los muelles se desarrollaron en los años 70, cuando la situación de los puertos, las cargas e incluso los buques era totalmente diferente a la realidad de las terminales actuales. Estas formulaciones llevaban implícita la concepción del muelle como un sistema de esperas, caracterizado por la distribución de las llegadas de los buques a la terminal, la distribución de los servicios en el muelle, y un número de atraques. La resolución del sistema se llevaba a cabo mediante teoría de colas, la cual solamente es aplicable en limitados casos.

En esta tesis se ha llevado a cabo un estudio de las terminales de contenedores españolas con el fin de determinar si la teoría de colas podría resolver el sistema de esperas, y analizar si resulta aceptable aplicar una formulación que asume un muelle explotado de manera discreta (compuesto por un número de atraques constante y determinado), en unos muelles cuya realidad es bien distinta: los muelles están formados por una línea continua, siendo el número de buques atracados función de las esloras de aquellos que en cada momento están atracados en la terminal.

Este estudio ha sido revelador, las llegadas de los buques a las terminales se distribuyen de manera aleatoria, mientras que las duraciones de los servicios se distribuyen según funciones Erlang K, donde K varía entre 3 y 6 según la terminal. En base a estos datos, la teoría de colas no es aplicable, de manera que para poder estimar la capacidad ha sido necesario recurrir a herramientas de simulación. Para ello, se han analizado diversas herramientas existentes en el mercado, las cuales están preparadas para simular sistemas discretos. Sin embargo, dada la necesidad de simular también sistemas continuos se han tenido que descartar las herramientas comerciales y en esta tesis se ha desarrollado una herramienta capaz de simular muelles tanto discretos como continuos. En este último caso el muelle ya no sólo es caracterizado por tres variables, sino por una gran cantidad de ellas, por lo que para analizar la afección de cada una se han llevado a cabo análisis de sensibilidad.

Los resultados han sido claros: se pueden estar cometiendo graves errores aplicando formulaciones discretas sobre muelles explotados de manera continua, incluso haciendo traslaciones entre muelles continuos y discretos.

Con el programa de simulación desarrollado se ha analizado la afección que tienen ciertas variables sobre la tasa de ocupación de los muelles. Una de estas ha sido la distribución de esloras, para lo cual se han analizado esloras de distribuciones constantes, uniformes y triangulares de diferentes medias y desviaciones típicas. Otra variable estudiada ha sido el criterio de asignación de atraque, diferenciando el caso de realizarse enmendadas del caso en el que los buques se posicionan en unos huecos determinados, al igual que el posicionamiento del buque dentro del hueco. El objetivo con todo ello era establecer una regla práctica de manera que los planificadores pudieran aplicarla sin necesidad de recurrir en cada caso a herramientas de simulación.

A la vista de los resultados se ha podido concluir que no es posible establecer una regla práctica para hacer la traslación entre un muelle explotado de manera continua y un muelle conceptualizado de manera discreta. Por tanto, se aconseja en todo momento acudir a herramientas de simulación que permitan aproximarse a la realidad de la explotación de cada muelle, simulando diversos escenarios con el fin de que los expertos puedan tomar una determinación.

Resum

En l'exercici de la planificació de ports és fonamental buscar l'equilibri entre els tràfics esperats en un determinat horitzó de temps i la capacitat de les infraestructures. Donada l'especialització que han sofert els ports, resulta lògic analitzar aquests equilibris per a cadascun dels tipus de mercaderia. Aquesta tesi es centra en l'estudi de la capacitat de les terminals de contenidors i en concret dels seus molls, la qual és canviant en el temps, quedant supeditada a unes condicions concretes d'exploració i d'acceptació de la qualitat del servei ofert als clients.

Les formulacions emprades fins al moment en el càlcul de la capacitat dels molls es desenvoluparen en els anys 70, quan la situació dels ports, les càrregues i també els bucs era totalment distinta a la realitat de les terminals actuals. Aquestes formulacions portaven implícita la concepció del moll com un sistema d'esperes, caracteritzat per la distribució de les arribades dels bucs a la terminal, la distribució dels serveis al moll, i el nombre de llocs d'atraca. La resolució del sistema es porta a cap mitjançant la teoria de cues, la qual solament és aplicable en uns casos limitats.

En aquesta tesi s'ha portat a terme un estudi de les terminals de contenidors espanyoles amb la fi de determinar si la teoria de cues podria resoldre el sistema d'esperes, i analitzar si resulta acceptable aplicar una formulació que assumeix un moll explotat de forma discreta (composat d'un nombre d'atracades constant i determinat), en uns molls amb una realitat ben diferent: els molls estan formats per una línia continua i el nombre d'atracades depèn de les eslores d'aquells que en cada moment estan atracats a la terminal.

Aquest estudi ha sigut revelador, les arribades dels bucs a les terminals es distribueixen de forma aleatòria, mentre que les duracions dels serveis es distribueixen segons funcions Erlang K, on K varia entre 3 i 6 segons la terminal. En base a aquestes dades, la teoria de cues no és aplicable, de forma que per poder estimar la capacitat ha sigut necessari recórrer a les eines de simulació. Per a això, s'han analitzat diverses eines existents al mercat, les quals estan preparades per simular sistemes discrets. Tanmateix, donada la necessitat de simular també sistemes continus s'han hagut de descartar les eines comercials i en aquesta tesi s'ha desenvolupat una eina capaç de simular tant molls discrets com continus. En aquest darrer cas, el moll ja no sols és caracteritzat per tres variables, sinó per una gran quantitat d'elles, pel que per analitzar l'afecció de cadascuna s'ha realitzat una anàlisi de sensibilitat.

Els resultats han sigut clars: es poden estar cometent errors ben greus aplicant formulacions discretes sobre molls explotats de forma continua, fins i tot fent translacions entre molls continus i discrets.

Amb el programa de simulació desenvolupat s'ha analitzat l'afecció que tenen certes variables sobre la tasa d'ocupació dels molls. Una d'aquestes ha sigut la distribució d'eslores, per al que s'han analitzat eslores de distribucions constants, uniformes i triangulars de diferents mitges i desviacions típiques. Una altra variable estudiada ha sigut el criteri d'assignació d'atraca, diferenciant el cas de realitzar-se esmenades del cas en el que els bucs es posicionen en uns buits determinats, al igual que el posicionament del buc a dintre del buit. L'objectiu amb tot açò era establir una regla pràctica de manera que els planificadors pogueren aplicar-la sense necessitat de recórrer en cada cas a les eines de simulació.

A la vista dels resultats s'ha pogut concloure que no és possible establir una regla pràctica per fer la translació entre un moll explotat de forma continua i un moll conceptualitzat de manera discreta. Per tant, s'aconsella en tot moment acudir a eines de simulació que permeten aproximar-se a la realitat de l'explotació de cada moll, simulant diversos escenaris amb la fi de que els experts puguen prendre una determinació.

Abstract

In port planning it is essential to find a balance between the expected traffic in a given time horizon and the infrastructure capacity. Given the specialization suffered by ports, it makes sense to analyze these balances for each type of merchandise. This thesis focuses on the study of the capacity of container terminals and in particular of its quays, which is changing over time, being subject to specific conditions of use and acceptance of the quality of service offered to customers.

The formulations that have been used so far to estimate the capacity of the quays were developed in the 70s, when ports, their cargos, even the ships were totally different from the reality of the current terminals. These formulations implied the conception of the quay as a queuing system, characterized by the distribution of ship arrivals to the terminal, the distribution of services at the berth, and a number of berths. The resolution of the system was carried out using queuing theory, which is applicable only in limited cases.

In this thesis a study of the Spanish container terminals has been conducted to determine if queuing theory could solve the queuing systems, and analyze whether it is acceptable to apply a formulation assuming quays exploited in a discrete way (composed of a constant and determined number of berths) in quays where reality is quite different: the quays are formed by a continuous line, and the number of ships at berth is based on the lengths of those ships that are docked at the terminal in each moment.

This study has been revealing, arrivals of ships to the terminals are distributed as random functions, while the durations of the services are distributed

according to Erlang K functions, where K varies between 3 and 6 depending on the terminal. Based on these data, queuing theory does not apply, therefore to estimate the capacity it has been necessary to resort to simulation tools. To this end, various tools available on the market have been analyzed, which are prepared to simulate discrete systems. However, given the need to simulate both discrete and continuous systems, the tools available on the market have been discarded and for this thesis the PhD student has developed a tool that can simulate both, discrete and continuous quays. In the latter case the quay is characterized not only by three variables, but by a lot of them, so to analyze each variable sensitivity analyses have been carried out.

The results are clear: planners can be making serious mistakes using discrete formulations in quays exploited continuously, even doing translations between continuous and discrete quays.

With the developed simulation program the impact of certain variables on the occupation rate of the quay has been analyzed. One of these variables has been the distribution of ship lengths, for which different distributions have been analysed: constant, uniform and triangular, with different means and standard deviations. Another variable studied has been the berth allocation criteria, differentiating the case of performing amends and the case where vessels are positioned at specific space, as well as the position of the vessel within the space. With all this, the goal was to establish a rule of thumb in a way that planners would apply it without the need of simulation tools for each case.

In view of the results, it has been concluded that it is not possible to establish a rule of thumb for making a translation between a continuously operated quay and a conceptualized discretely quay. Therefore, for any case, it is advice to use simulation tools that allow approaching the reality of the exploitation of each quay, simulating various scenarios in order to enable experts to make a determination.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	i
Resumen	iii
Resum	v
Abstract	vii
I Introducción	1
II Motivación, objetivos y metodología de la tesis doctoral	9
III Estado del arte	13
IV Estudio de la situación actual de las terminales de contenedores españolas	41
V Adaptación de la definición de capacidad al caso continuo	69
VI Aplicación de las herramientas de simulación	77
VII Simulaciones realizadas y resultados obtenidos	105
VIII Síntesis, conclusiones y futuras líneas de investigación	137
Referencias	147
Anejo 1. Publicaciones relacionadas con la tesis.	
Anejo 2. Resultados de los análisis de las terminales de contenedores visitadas.	
Anejo 3. Definiciones e hipótesis.	

ÍNDICE

I Introducción	1
I.1. Estructura de la tesis.....	8
II Motivación, objetivos y metodología de la tesis doctoral	9
II.1. Motivación de la investigación	9
II.2. Objetivos de la tesis	11
II.3. Metodología.....	12
III Estado del arte	13
III.1. Introducción.....	13
III.2. El muelle como un sistema de espera.....	15
III.3. Perspectivas de medición.....	18
III.4. El concepto de la capacidad del muelle.....	23
III.5. La calidad del servicio.....	31
III.6. Formulación de la capacidad.....	34
III.7. Aplicación de la formulación de la capacidad a muelles explotados de manera continua.....	38
IV Estudio de la situación actual de las terminales de contenedores españolas.....	41
IV.1. Introducción.....	41

IV.2. Problemas generales detectados.....	45
IV.3. Resultados obtenidos.	47
IV.3.1. Parámetros de la demanda de servicios.	48
IV.3.2. Parámetros de la oferta de servicios.	52
IV.4. Conclusiones.	59
IV.5. Relaciones entre parámetros.....	60
IV.5.1. Volumen de Carga – Esloras.....	60
IV.5.2. Duración del Servicio – Eslora.....	62
IV.5.3. Duración del Servicio – Volumen de carga movida.....	63
IV.5.4. Productividad – Volumen de carga movida.	65
IV.5.5. Relación TEUs – Contenedores.	66
V Adaptación de la definición de capacidad al caso continuo	69
V.1. Introducción.....	69
V.2. Nueva formulación de la capacidad – muelle continuo.....	71
V.3. Diferencia conceptual entre ϕ y ϕ_L	72
VI Aplicación de las herramientas de simulación.....	77
VI.1. Descripción de la herramienta desarrollada.....	78
VI.1.1. Datos relacionados con la oferta del servicio	79
VI.1.2. Datos relacionados con la demanda del servicio.....	86
VI.1.3. Datos de ejecución de simulación.....	98
VII Simulaciones realizadas y resultados obtenidos.....	105

VII.1. El muelle explotado de manera discreta.....	105
VII.1.1. Escenarios.	105
VII.1.2. Resultados.....	107
VII.1.3. Observaciones sobre los ábacos.	112
VII.2. El muelle explotado de manera continua	115
VII.2.1. Escenarios	115
VII.2.2. Resultados.....	117
VIII Síntesis, conclusiones y futuras líneas de investigación	137
VIII.1. Estudio de las terminales de contenedores españolas	138
VIII.2. Definición de capacidad de muelle	139
VIII.3. Resultados de las simulaciones realizadas en un muelle explotado de manera discreta	141
VIII.4. Resultados de las simulaciones realizadas en un muelle explotado de manera continua.....	142
VIII.5. Líneas futuras de investigación	145

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I-1: Subsistemas en una terminal de contenedores. Fuente: Monfort et al. 2001.....	5
Figura I-2: Método de los cuellos de botella. Fuente: Henesey 2004.....	6
Figura III-1: Sistema de esperas.	15
Figura III-2: Las cuatro perspectivas de medición. Fuente: Aguilar y Oberrer-Marco 2010.....	23
Figura III-3: Definición de capacidad económica. Fuente: Rodríguez, 1977.....	25
Figura III-4: Capacidad de congestión. Fuente: Rodríguez, 1977.....	27
Figura III-5: Ejemplo de representación de la relación Φ - ϵ_r (llegadas y servicios Exponenciales). Fuente: Agerschou et al. 2004.	36
Figura III-6: Relación entre las variables que inciden en la capacidad del muelle. Fuente: Monfort et al. 2011.....	37
Figura IV-1: Llegadas: aproximación a función de densidad exponencial (Terminal D). Nº Escalas: 3.185.....	49
Figura IV-2: Esloras: distribuciones triangulares superpuestas (Terminal H). Nº Escalas: 1.115.....	50
Figura IV-3: Esloras: distribuciones uniformes. Terminal A. Nº Escalas: 1.186..	50
Figura IV-4: Carga: Tendencia a funciones de densidad Erlang K (Terminal G). Nº Escalas: 6.102. Carga Total: 3.390 M movimientos	51
Figura IV-5: Carga: Tendencia a funciones de densidad triangulares (Terminal H). Nº Escalas: 1.120. Carga Total: 422.259 movimientos.....	52
Figura IV-6: Ajuste de los datos observados de la duración del servicio a la función de densidad Erlang para K = 4 (Terminal G).....	53
Figura IV-7: Ajuste de los datos observados de la duración del servicio a la función de densidad Erlang para K = 7 (Terminal G).....	54

Figura IV-8: Ajuste de los datos observados de la duración de tiempos muertos a la función de densidad Erlang 2 (Terminal C).	55
Figura IV-9: Relación entre los tiempos muertos y la longitud de muelle ocupada en el momento del atraque de cada buque (Terminal H).	57
Figura IV-10: Relación entre los tiempos muertos y la longitud de muelle ocupada en el momento del atraque de cada buque (Terminal A).....	57
Figura IV-11: Planchas unitarias: tendencia a distribución Erlang K (Terminal H).	58
Figura IV-12: Planchas unitarias: tendencia a distribución Erlang K (Terminal B).	59
Figura IV-13: Relación entre la eslora de cada buque y el volumen de carga movido (Terminal E).	61
Figura IV-14: Relación entre la eslora de cada buque y el volumen de carga movido (Terminal I).	62
Figura IV-15: Relación entre la eslora de cada buque y el volumen de carga movido (Terminal B).	62
Figura IV-16: Relación entre la duración del servicio y la eslora (Terminal B). ..	63
Figura IV-17: Relación entre la duración del servicio y el volumen de carga movido (Terminal B).	64
Figura IV-18: Relación entre la duración de servicio y el volumen de carga movido (Terminal E).	65
Figura IV-19: Relación entre la productividad y el volumen de carga movido (Terminal E).....	66
Figura V-1: Representación de dos situaciones diferentes cuyo valor de ϕ es idéntico.	73
Figura V-2: Representación de dos situaciones diferentes donde ϕ_L tiene un valor diferente.	74
Figura VI-1: Pantalla de inicio del programa de simulación desarrollado.	78

Figura VI-2: Pantalla de introducción de datos relacionados con la oferta del servicio (explotación discreta).	79
Figura VI-3: Pantalla de introducción de datos relacionados con la oferta del servicio (explotación continua).....	83
Figura VI-4: Resguardos necesarios en la línea de atraque entre buques y en los extremos y en los extremos de la obra de atraque. Fuente: ROM 2.0-11.....	85
Figura VI-5: Pantalla de introducción de datos relacionados con la oferta del servicio (explotación continua y resguardo de seguridad ROM 2.0-11).....	86
Figura VI-6: Pantalla de introducción de datos relacionados con la demanda del servicio. Existencia de diversas líneas navieras.	87
Figura VI-7: Pantalla de introducción de datos relacionados con la demanda del servicio. Distribución de llegadas.....	88
Figura VI-8: Representación de la relación unívoca entre esloras (E) y duración de servicio (Ds).....	89
Figura VI-9: Ajuste entre las duraciones de servicio y las esloras a una función logarítmica. Terminal dedicada en el Mediterráneo.	90
Figura VI-10: Representación de la relación no unívoca entre esloras (E) y duración de servicio (Ds). Caso 1.	90
Figura VI-11: Relación entre las duraciones de servicio mínimas y las esloras. Terminal dedicada en el Mediterráneo	91
Figura VI-12: Relación entre las duraciones de servicio máximas y las esloras. Terminal dedicada en el Mediterráneo.	91
Figura VI-13: Relación entre las duraciones de servicio mínimas y las esloras agrupando los buques en conjuntos de esloras de 50 m en 50 m. Terminal dedicada en el Mediterráneo.	92
Figura VI-14: Relación entre las duraciones de servicio máximas y las esloras agrupando los buques en conjuntos de esloras de 50 m en 50 m. Terminal dedicada en el Mediterráneo.	92
Figura VI-15: Porcentaje de la duración de servicio en proporción a la diferencia entre el valor máximo y mínimo para el conjunto de buques al que pertenece	

(grupos según esloras de 50 m en 50 m). Terminal dedicada en el Mediterráneo.....	93
Figura VI-16: Ajuste a una Erlang 2 de los datos observados del porcentaje de la duración de servicio en proporción a la diferencia entre el valor máximo y mínimo para el conjunto de buques al que pertenece (grupos según esloras de 50 m en 50 m) Terminal dedicada en el Mediterráneo.....	93
Figura VI-17: Representación de la relación no unívoca entre esloras (E) y duración de servicio (Ds). Caso 2.....	94
Figura VI-18: Representación de la relación no unívoca entre esloras (E) y duración de servicio (Ds). Caso 3.....	94
Figura VI-19: Representación de la relación entre el volumen máximo manipulable ($2*Q$) en función de la eslora (E).	95
Figura VI-20: Relación entre la eslora y el volumen máximo manipulable. Terminal dedicada en el Mediterráneo.	96
Figura VI-21: Porcentaje del volumen de carga manipulado en proporción al volumen máximo. Terminal dedicada en el Mediterráneo.	96
Figura VI-22: Ajuste a una Erlang 2 de los datos observados del porcentaje del volumen de carga en proporción al volumen máximo de carga dada la eslora del buque. Terminal dedicada en el Mediterráneo.....	97
Figura VI-23: Pantalla de introducción de datos relacionados con la demanda del servicio. Distribución de servicio.	98
Figura VI-24: Precisión obtenida mediante el programa de simulación para la relación $\Phi-\epsilon_r$ para 10 ciclos de repetición.	99
Figura VI-25: Precisión obtenida mediante el programa de simulación para la relación $\Phi-\epsilon_r$ para 25 ciclos de repetición.	100
Figura VI-26: Pantalla de introducción de datos relacionados con la ejecución de la simulación para el modo de punto único.	100
Figura VI-27: Pantalla de introducción de datos relacionados con la ejecución de la simulación para el modo barrido.	103

Figura VII-1: Ábaco espera relativa – tasa de ocupación para el caso de llegadas y servicios exponenciales.....	108
Figura VII-2: Ábaco espera relativa – tasa de ocupación para el caso de llegadas y servicios exponenciales (Agerschou et al. 2004).....	109
Figura VII-3: Ábaco espera relativa – tasa de ocupación para el caso de llegadas exponenciales y servicios Erlang 5.....	110
Figura VII-4: Invariabilidad de las curvas espera relativa – tasa de ocupación para diferentes K de la función Erlang de servicios. Caso N=1.	111
Figura VII-5: Invariabilidad de las curvas espera relativa – tasa de ocupación para diferentes K de la función Erlang de servicios. Caso N=4.	111
Figura VII-6: Variabilidad de la tasa de ocupación frente a variaciones de la espera relativa dado el número de atraques.....	113
Figura VII-7: Variabilidad de la tasa de ocupación frente a variaciones de la espera relativa dado el número de atraques.....	114
Figura VII-8: Variabilidad de la tasa de ocupación frente a variaciones de la espera relativa dado el número de atraques.....	114
Figura VII-9: Influencia del criterio de resguardo cuando las esloras son constantes y se llevan a cabo enmendadas. Muelle de 1000m y esloras de 150m.....	118
Figura VII-10: Influencia del criterio de resguardo cuando las esloras son constantes y se llevan a cabo enmendadas. Muelle de 2000 y esloras de 250m.	119
Figura VII-11: Evolución incorrecta de la tasa de ocupación con la longitud de atraque para esloras constantes. Fuente: Aguilar y Obrer-Marco (2013).....	120
Figura VII-12: Evolución correcta de la tasa de ocupación con la longitud de atraque para esloras constantes. Fuente: Aguilar y Obrer-Marco (2013).....	121
Figura VII-13: Influencia de la variabilidad de esloras cuando se llevan a cabo enmendadas. Muelle de 1000m, eslora media 150m y resguardo de 1,15. ...	122
Figura VII-14: Influencia de la variabilidad de esloras cuando se llevan a cabo enmendadas. Muelle de 1000m, eslora media 150m y resguardo ROM.	123

Figura VII-15: Influencia de la variabilidad de esloras cuando se llevan a cabo enmendadas. Muelle de 1000m, eslora media 250m y resguardo ROM.	124
Figura VII-16: Influencia de la variabilidad de esloras cuando se llevan a cabo enmendadas. Muelle de 1000m y eslora media 150m. Comparación con distintos resguardos.	125
Figura VII-17: Comparación entre la asignación de buques en los huecos más pequeños y los huecos más grandes. Muelle de 1500m, esloras triangulares [200,300].....	127
Figura VII-18: Comparación entre la asignación de buques en los huecos más pequeños y los huecos más grandes. Muelle de 2000m, esloras triangulares [200,300].....	127
Figura VII-19: Comparación entre la asignación de buques en el centro y en el extremo de los huecos. Muelle de 1500m, esloras triangulares [200,300].	128
Figura VII-20: Comparación entre la asignación de buques en el centro y en el extremo de los huecos. Muelle de 2000m, esloras triangulares [150,350].	128
Figura VII-21: Comparación de escenarios con y sin enmendadas (hueco pequeño y posicionamiento en un extremo) con esloras constantes. Muelle de 1000m y eslora 250m.	129
Figura VII-22: Comparación de escenarios con y sin enmendadas (hueco pequeño y posicionamiento en un extremo) con esloras constantes. Muelle de 1000m y eslora 250m.	130
Figura VII-23: Comparación de escenarios con y sin enmendadas (hueco pequeño y posicionamiento en un extremo) con esloras uniformes [200,300] y criterio de resguardo ROM. Muelle de 1000m y eslora media 250m.	131
Figura VII-24: Comparación de escenarios con y sin enmendadas (hueco pequeño y posicionamiento en un extremo) con esloras uniformes [200,300] y criterio de resguardo del 15%. Muelle de 1500m y eslora media 250m.....	131
Figura VII-25: Influencia de la variabilidad de esloras cuando no se llevan a cabo enmendadas. Muelle de 1000m y eslora media 150m. Resguardos del 15%. $N_{equiv}=5,797$	132

Figura VII-26: Influencia de la variabilidad de esloras cuando no se llevan a cabo enmendadas. Muelle de 1000m y eslora media 250m. Resguardos del 15%. $N_{equiv}=3,478$ 133

Figura VII-27: Comparación entre duración de servicio Erlang 4 y Erlang 5 para un muelle de 1500m, esloras uniformes [150, 350], resguardo del 15%. Asignación del buque en el hueco más pequeño y en un extremo. 134

Figura VII-28: Comparación entre duración de servicio Erlang 4 y Erlang 6 para un muelle de 1000m, esloras uniformes [100, 200], resguardo del 10%. Enmendadas. 135

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla III-1: Capacidad operacional (Fuente: Drewry 2014).	29
Tabla IV-1: Terminales de contenedores analizadas	42
Tabla IV-2: Identificación de las terminales analizadas.	45
Tabla IV-3: Estadística. Llegadas: aproximación a función de densidad exponencial.....	49
Tabla IV-4: Estadística. Esloras: distribuciones triangulares superpuestas.	50
Tabla IV-5: Estadística. Esloras: distribuciones uniformes.....	51
Tabla IV-6: Estadística. Carga: Tendencia a funciones de densidad Erlang K. ...	52
Tabla IV-7: Estadística. Carga: Tendencia a funciones de densidad triangulares.	52
Tabla IV-8: Estadística del ajuste a la función Erlang $K = 4$	54
Tabla IV-9: Estadística del ajuste a la función Erlang $K = 7$	54
Tabla IV-10: Valores de la variable K en los ajustes de las duraciones de servicio a funciones Erlang K para las distintas terminales estudiadas.	55
Tabla IV-11: Estadística del ajuste a la función Erlang $K = 2$	56
Tabla IV-12: Estadística. Planchas unitarias: tendencia a distribución Erlang k (Terminal H).	59
Tabla IV-13: Estadística. Planchas unitarias: tendencia a distribución Erlang k (Terminal B).....	59
Tabla IV-14: Relación entre TEUs y contenedores movidos.	67
Tabla VII-1: Comparación entre los resultados del programa de simulación y los datos publicados por Agerschou et al. (2004).	109
Tabla VII-2: Variabilidad de la tasa de ocupación frente a variaciones de la espera relativa dado el número de atraques.....	112

Tabla VII-3: Comparación del número de atraques equivalente entre la eslora media y la eslora del 85% para diferentes distribuciones de esloras. Muelle de 1000m y resguardos del 15%.....125

CAPÍTULO I

Introducción

Desde mitades del siglo pasado hasta nuestros días los procesos productivos han sufrido una feroz transformación asociada a los procesos de deslocalización. Junto con estos cambios se ha desarrollado toda una logística basada en la contenerización de las mercancías, la cual ha permitido la estandarización de los elementos a manipular, aumentando la eficiencia en el transporte y el cambio de modo en los nodos logísticos (reduciendo así los costes del transporte de puerta a puerta). Este nuevo elemento de transporte, el contenedor, ha requerido pues que tanto los vehículos como los nodos logísticos se adapten a él. Esta adaptación ha sido paulatina y gradual. En el caso de los buques es evidente la evolución que han sufrido, desde pequeñas unidades de pocos miles de TEUs hasta los grandes portacontenedores de 18.000 TEUs que no todos los puertos pueden acoger. En el caso de las terminales marítimas la evolución no ha sido menor. En sus inicios los buques portacontenedores se trataban en terminales de mercancía general (no contenerizada) y eran manipulados con grúas para izar cualquier tipo de bulto, mientras que ahora los puertos se han especializado en este tipo de mercancía dedicando terminales enteras a la manipulación de contenedores.

Dentro de los puertos que acogen buques portacontenedores la especialización ha sido tal que se diferencian los tipo hub y los tipo feeder. Los primeros son puertos con terminales con capacidad de acoger a los mayores buques portacontenedores, los cuales escalan en pocas terminales y hacen movimientos masivos de carga y descarga (también llamados buques hub). Los puertos feeder son aquellos donde acuden los pequeños buques (buques feeder) para entregar o recoger la mercancía que es concentrada en los puertos hub. Estos buques feeder hacen escala en muchos más puertos. Así, ahora mismo la flota se compone de diferentes tipos de buques, con esloras, mangas y calados muy diferentes.

Paralelamente a esta evolución, los modelos de gestión de estos puertos también han ido cambiando en España y en Europa desde los “Public Service Port”, hasta los “Landlord Port”, pasando por los “Tool Port”. En los “Public Service Port” la propiedad y la gestión de la infraestructura y de la superestructura¹ recaían sobre el sector público, el cual gestionaba también el personal de estiba. El modelo “Tool Port” se diferenciaba del anterior porque el personal estibador dependía del sector privado. Finalmente, en el modelo “Landlord Port” la infraestructura portuaria es propiedad del sector público y la superestructura pertenece al sector privado, quien además gestiona el personal de estiba (World Bank 2007).

En la actualidad, el Sistema Portuario Español se compone de 46 puertos de interés general, gestionados por 28 autoridades portuarias bajo un modelo de gestión tipo Landlord. Estas autoridades son responsables de la financiación de los accesos e infraestructura básica externa e interna que se encuentran en su dominio, en tanto que la superestructura es financiada por las empresas estibadoras, concesionarias de la infraestructura. Estas últimas disponen también del personal de estiba.

La normativa portuaria estatal establece como principio básico de cada autoridad portuaria la autosuficiencia económica y como objetivo empresarial una razonable rentabilidad. Así, cada autoridad portuaria es responsable de la

¹ Se entiende por superestructura todos los medios materiales de manipulación, como son las grúas de muelle, las grúas de patio, etc.

gestión de la misma de manera individualizada (siempre supervisada por el Organismo Público Puertos del Estado) y de ella depende que exista un equilibrio entre los ingresos que percibe y los gastos que ocasiona. Los ingresos son motivados por las tasas del puerto y las rentas de las concesiones de sus infraestructuras al sector privado, entre otros. En lo que a gastos se refiere, una parte importante se corresponde con las obras marítimas que acomete como parte de la infraestructura básica interna. El gran desafío de los departamentos de planificación de las autoridades portuarias consiste en anticiparse a la realidad de los años siguientes y adaptar las infraestructuras a las necesidades reales de tráfico, siempre considerando las políticas comerciales y teniendo en cuenta el tiempo necesario para diseñar y construir dichas obras.

Tal y como se deriva del modelo Landlord, si bien son las autoridades portuarias las encargadas de financiar las obras marítimas, las empresas estibadoras adjudicatarias de las terminales ya existentes son las encargadas de manipular los tráficos reales disponiendo de los medios materiales y personales necesarios. Esto evidencia el conflicto de intereses al que puede abocar este modelo: las empresas estibadoras pueden reclamar a las autoridades portuarias mayores espacios mientras que las autoridades portuarias pueden reclamar a las empresas estibadoras mayores rendimientos, maximizando así la utilización de las infraestructuras.

Esta idea ya la recogía la Comisión de las Comunidades Europeas en la Comunicación sobre una Política Portuaria Europea en el año 2007 (Comisión 2007): *“las primeras opciones para hacer frente a una mayor demanda de capacidad portuaria es la de aumentar la eficiencia y la productividad de los puertos, en términos de rendimiento o desplazamientos por hectárea de terminal ya existente y a través de itinerarios de acceso; se resolvería sin duda una serie de problemas a través de nuevos equipamientos portuarios y un sistema de cita en las terminales para los camiones, trenes y gabarras, así como una gestión integrada de la cadena de transporte, al menos desde el puerto marítimo hasta el transporte interior; los sistemas y programas de gestión de las operaciones y los cargamentos contribuirían sin duda alguna a facilitar las interfaces entre los modos de transporte y los operadores y a incrementar el rendimiento.”*

En los últimos 10 años el Sistema Portuario Español ha visto crecer enormemente sus infraestructuras, sin embargo la planificación y el desarrollo de la oferta deben realizarse desde una visión de sostenibilidad.

El objetivo en materia de infraestructuras portuarias de la Política de I+D+i para el Sistema Portuario y su Encaje en la Política Nacional de I+D+i del Organismo Público Puertos del Estado es reforzar la eficiencia de la planificación y gestión de la infraestructura en el nodo portuario de la cadena de transporte, contribuyendo adicionalmente a la optimización del desarrollo futuro de la capacidad infraestructural, a la internacionalización del sector español de la construcción y de consultoría marítimo-portuaria, a la sostenibilidad y eficiencia en el uso de los recursos materiales y energéticos, y al decremento de emisiones contaminantes. En concreto una de sus actuaciones es la planificación y diseño de infraestructura portuaria con un horizonte de gestión eficiente de su vida útil.

Un paso fundamental en la consecución del objetivo mencionado es disponer de herramientas precisas de cálculo de la capacidad de terminales con dos perspectivas diferentes:

1. evaluar la capacidad de las infraestructuras existentes con el fin de determinar la necesidad de posibles ampliaciones de las mismas siempre considerando las estimaciones de tráfico esperado;
2. diseñar las infraestructuras de nueva creación o ampliaciones en base a unas estimaciones de tráfico futuro.

Sin embargo el propio modelo landlord hace que, mientras que son las AAPP las que han de planificar la construcción de nuevos espacios, los datos reales de explotación están en manos de las empresas concesionarias, los cuales están enfocados, además, a sus objetivos de producción, no de planificación. Estos datos son esenciales para poder evaluar el tráfico real y las condiciones en las que éste se está dando, información vital para optimizar la capacidad futura de la infraestructura.

Una terminal portuaria es un intercambiador modal que suele disponer de un cierto nivel de almacenamiento en tierra para coordinar los diferentes ritmos de llegadas de los modos de transporte terrestre y marítimo. Su misión es la de proporcionar los medios y la organización necesarios para que el intercambio

de las cargas entre los modos de transporte terrestre y marítimo tenga lugar en las mejores condiciones de rapidez, eficiencia, seguridad, respeto al medioambiente y economía (Monfort et al. 2001).

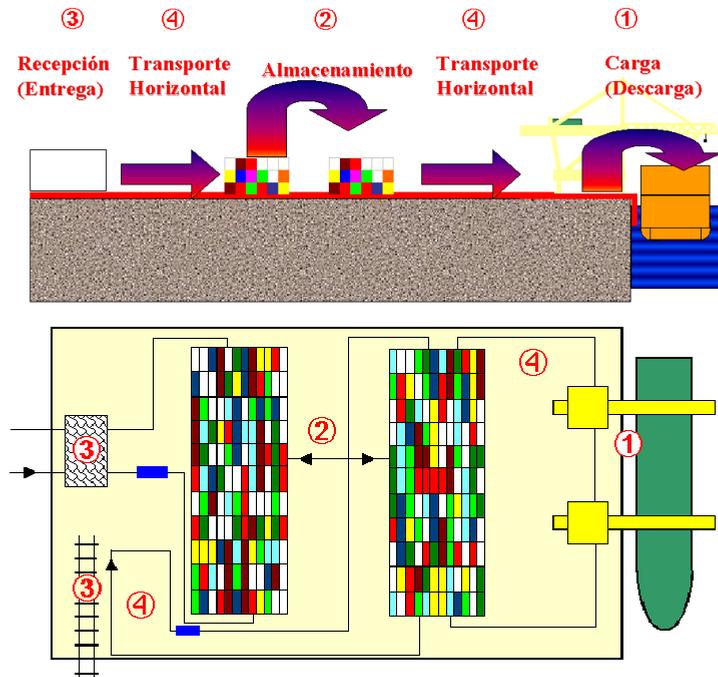


Figura I-1: Subsistemas en una terminal de contenedores. Fuente: Monfort et al. 2001.

Entendida como un sistema integrado con conexión física y de información con las redes de transporte terrestres y marítimas, una terminal portuaria se compone a su vez de cuatro subsistemas: la línea de atraque o subsistema de carga y descarga; el subsistema de almacenamiento; las puertas o subsistema de recepción y entrega; y el transporte horizontal o subsistema de interconexión (ver Figura I-1).

El primero de estos subsistemas es el encargado de resolver la interfaz entre mar y tierra con las infraestructuras y equipos que ello conlleva. La infraestructura básica de este subsistema en las terminales de contenedores es

el muelle², de ahí que se utilice este término para referirse al subsistema en general, y es en concreto la capacidad de este subsistema “muelle” de la que trata esta tesis.

Según el conocido método de los cuellos de botella, la capacidad de la terminal en su conjunto viene delimitada por la menor de las capacidades de los cuatro subsistemas entendidos de manera aislada. Así, a nivel global, queda reflejada la influencia del funcionamiento de un subsistema sobre el de los otros.

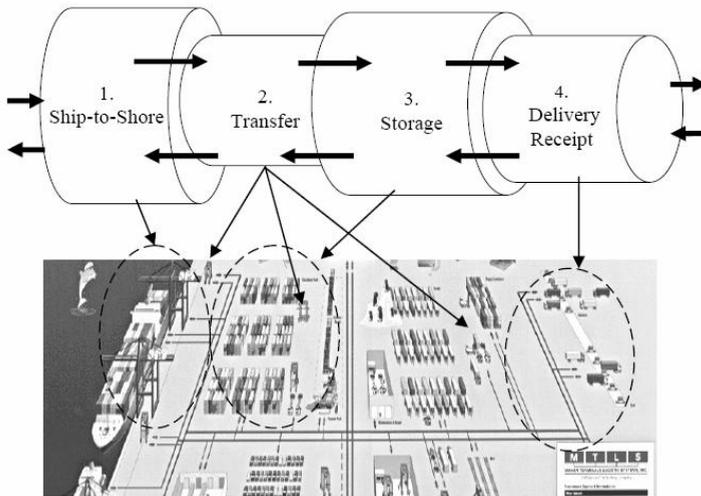


Figura I-2: Método de los cuellos de botella. Fuente: Henesey 2004.

Sin embargo, algunos autores afirman que desde un punto de vista económico y temporal, el subsistema que más limita la capacidad de una terminal es el de carga y descarga, pues en el caso de que uno de los otros sea el más limitante resulta menos costoso aumentar su capacidad en un corto periodo de tiempo:

- Subsistema de almacenamiento: al disminuir el periodo de estancia de los contenedores en la terminal se consigue mayor tráfico límite.
- Subsistema de interconexión: incluyendo nuevos equipos se consigue una mayor capacidad.

²Según la ROM 2.0-11 el muelle es la configuración del atraque que se adapta a todos los tipos de tráfico, y aunque no es la más adecuada para unos tipos de tráfico como pueda ser el granel líquido, sí lo es para el contenedor.

- Subsistema de recepción y entrega: con la disposición de nuevas puertas se puede conseguir fácilmente que el tráfico admitido crezca.

Sea como sea, la presente tesis doctoral se centra en el estudio de la capacidad del subsistema de línea de atraque buscando una nueva forma de determinarla de manera que se aproxime más a la explotación real del subsistema en las terminales de contenedores. Esta explotación está basada en una realidad de tipología de terminales y buques que dista mucho de la que existía en los años 60 y 70 del siglo pasado, donde se desarrollaron las metodologías que todavía se aplican en la actualidad.

En la actualidad, las grandes terminales de contenedores explotan sus muelles como una línea continua donde, en función de las esloras de los buques que en cada momento hacen escala, el número de buques atracados puede ser diferente (y por tanto el número de atraques, de alguna manera “equivalentes”, va cambiando). Sin embargo, la formulación más comúnmente empleada para calcular la capacidad de los muelles asume que éstos se componen de un número determinado y constante de atraques, es decir asume que el muelle se explota de manera discreta. Esta asunción se ajusta a la realidad solamente en algunos casos como por ejemplo cuando el embarque y desembarque de mercancías se realiza a través de duques de alba, o cuando se trata de terminales de graneles sólidos con instalación especial.

Como consecuencia, al calcular la capacidad de los muelles explotados de manera continua mediante la formulación existente, es preciso hacer una traslación entre una línea continua y un número determinado de atraques. En dicha traslación tienen un papel importantísimo las esloras de los buques que hacen (o está previsto que hagan) escala en la terminal. Es sabido que los planificadores asumen un buque tipo, cuya eslora servirá para hacer la mencionada la traslación, sin embargo no existe un consenso a la hora de determinar cuál es el buque tipo; mientras que unos textos recomiendan buques extremales (ROM 2.0-11), otros autores proponen esloras medias (Rodríguez 1977), o incluso esloras medias ponderadas por la duración del servicio. Y en un estadio anterior y más simplista, algunos planificadores llegan solamente a asumir la generación de los buques que harán escala en la terminal: Panamax, post-Panamax, super-post-Panamax, y a continuación

calculan la capacidad del muelle como si todos los buques en la terminal fueran iguales.

I. 1. Estructura de la tesis

Después de esta introducción, el Capítulo II contiene la motivación, los objetivos y la metodología que se ha seguido en esta tesis doctoral. En el Capítulo III se desarrolla el estado del arte, en el cual se ordena la terminología utilizada en esta tesis, se hace un repaso a los diferentes conceptos de capacidad existentes y se presenta la formulación de la capacidad asociada a la que se considera más ajustada. Esta asume que el muelle está formado por un número determinado y entero de atraques, de ahí que se haga una reflexión sobre la manera de hacer la traslación entre la realidad de un muelle explotado de manera continua y un muelle “entendido” de manera discreta.

El capítulo IV desarrolla todo un estudio de la situación actual de las terminales de contenedores españolas, estudio que sirve de base para la aplicación de la anterior formulación descrita. De este estudio se deduce, por un lado, la necesidad de adaptar la definición de capacidad y su formulación de manera que refleje la realidad de las terminales españolas y que asuma que la línea de atraque está compuesta por una línea continua, la cual se desarrolla en el Capítulo V. Por otro lado, se deduce la necesidad de desarrollar una herramienta de simulación capaz de reflejar la explotación de los muelles de manera continua y discreta. Esta herramienta es descrita con profundidad en el Capítulo VI.

El Capítulo VII presenta los resultados de las simulaciones realizadas tanto asumiendo muelles explotados de manera discreta, como muelles explotados de manera continua. La motivación de las simulaciones reflejando muelles explotados de manera discreta no es más que proporcionar soluciones en los casos en los que no es posible aplicar la teoría de colas y comparar los resultados con las simulaciones que reflejan muelles explotados de manera continua.

El Capítulo VIII contiene la síntesis y conclusiones de este trabajo, así como las futuras líneas de investigación motivadas por él.

CAPÍTULO II

Motivación, objetivos y metodología de la tesis doctoral

II. 1. Motivación de la investigación

Los trabajos iniciales de esta tesis se enmarcaron en el proyecto “*Optimización y estudio de la capacidad de terminales portuarias mediante modelos de simulación de la explotación. Determinación de los niveles de servicio*” financiado por el CEDEX en la convocatoria de ayudas de I+D+i en 2006 del Programa Nacional de Medios de Transporte Ligadas al PEIT. En este proyecto, el equipo de la Universitat Politècnica de València formado por el Director de la presente tesis y la doctoranda, trabajó en cooperación con la Universidad Politécnica de Madrid (Investigador Principal del Proyecto), el Centro de Investigación del Transporte (CENIT) y la Fundación Valenciaport.

El objetivo general de aquél proyecto era establecer una metodología que permitiera determinar la capacidad de una terminal portuaria en función del tipo de tráfico movido, para cada uno de los subsistemas que la integran, así

como en nivel de servicio de la misma, mediante un estudio detallado de las terminales portuarias desde un punto de vista sistémico, analizando cada uno de los subsistemas en función del tipo de tráfico a mover, y a través de un estudio por fachadas marítimas del mapa portuario español.

En el marco de aquél proyecto, se iniciaron los contactos con numerosas y diversas terminales españolas, gran parte de las cuales proporcionaron una enorme cantidad de datos que sirvieron de base para iniciar el desarrollo de la presente tesis.

Más adelante, en el año 2008, la línea de investigación iniciada en el año 2007 en la que se enmarca esta tesis, continuo vinculada con el proyecto “MASPORT: Metodologías de automatización y simulación para la evaluación y mejora de la capacidad, rendimiento y nivel de servicio de terminales portuarias de contenedores”. En este caso el proyecto formaba parte del Plan Nacional de I+D+i del Ministerio de Fomento y participaron la Universitat Politècnica de València, la Fundación Valenciaport, la empresa Open Kode, S.L. y las empresas estibadoras MSC Terminal y TCV Stevedoring Company (ambas del Puerto de Valencia).

Gracias a la participación en este proyecto se pudieron conseguir datos de estas dos terminales del enclave valenciano, cuyos análisis se incorporan a este trabajo.

Esta tesis se centra exclusivamente en el estudio de la capacidad del subsistema de línea de atraque de las terminales de contenedores, dado que, como consecuencia de los análisis llevados a cabo con los datos recopilados, se detectó la necesidad de adaptar las formulaciones existentes para calcular dicha capacidad a la realidad de los muelles. Así mismo, se desarrollan nuevas definiciones y formulaciones de la capacidad adaptadas a dicha realidad, esto es, muelles explotados como una línea continua y no como un número discreto de atraques.

Es importante matizar que las simulaciones que se desarrollaron en el marco del proyecto MASPORT tuvieron objetivos muy diferentes al de las simulaciones desarrolladas en el marco de esta tesis. Mientras que las primeras pretendían acercarse a la realidad de la explotación de una terminal en su conjunto, para lo cual fue necesario simular hasta un nivel de detalle muy

preciso, las segundas tienen una vocación más global de manera que pueda ser de aplicación a una gran cantidad de terminales y se centran exclusivamente en el muelle. Así, la influencia del resto de subsistemas en el subsistema muelle aparece a través de una de las variables definitorias del muelle: la duración de servicio.

II.2. Objetivos de la tesis

El objetivo inicial de esta tesis es analizar el concepto de capacidad de muelles que se está considerando en el sector portuario, siempre desde el punto de vista de la planificación de la línea de atraque. Se ha detectado que en el sector se trata la capacidad como un valor invariable en el tiempo e independiente de las condiciones de explotación. Con el desarrollo de esta tesis se pretende reflexionar sobre el concepto de capacidad como una situación límite asociada a unas condiciones concretas de explotación.

También se pretende analizar la aplicación de las formulaciones de capacidad tradicionales en unos muelles con características bien diferentes a las existentes en el momento en el que dichas formulaciones se plantearon. En particular se pretende comprobar las dificultades y los errores que se pueden estar cometiendo al aplicar una formulación de capacidad del muelle que asume una explotación discreta en muelles explotados de manera continua. Estos errores pueden tener consecuencias económicas importantes para las autoridades portuarias, ya no sólo en la fase de planificación de infraestructuras al haber un desajuste entre la oferta real y la oferta calculada, sino también a la hora de considerar las cláusulas de los contratos de concesión de terminales, pues estas hacen referencia a indicadores relacionados con la capacidad.

Otro objetivo de la tesis, es ampliar la formulación de la capacidad de los muelles de manera que refleje el comportamiento tanto de aquellos muelles explotados de manera discreta como de los explotados de manera continua (como es el caso de las modernas terminales de contenedores). Al considerar los muelles explotados de manera continua, aparecen muchos factores que pueden afectar a la capacidad, como pueden ser los criterios de asignación de atraque o las distribuciones de las esloras de los buques que hacen escala en la terminal. Por ello, otro objetivo de esta tesis es estudiar la afección de algunos

de estos factores en la capacidad, para lo que se analizarán los procedimientos reales de asignación de atraque. Es importante destacar que en esta tesis no se pretende resolver un problema concreto en una terminal concreta de un puerto concreto, como algunos autores han realizado (Dragovic 2006; Shabayek y Yeung 2002). Esta tesis tiene un enfoque más genérico y global, asociado al desarrollo de una herramienta más universal.

Paralelamente, otro objetivo de la tesis es el desarrollo de un programa de simulación que modelice el muelle explotado de manera discreta y continua, y que incluya los factores estudiados. Mediante la utilización del programa, se analizará la afectación de los diferentes factores en la capacidad del muelle. Basándose en los resultados del programa, se pretende poder proporcionar una nueva formulación más ajustada a la realidad de la explotación.

II.3. Metodología

Para poder llevar a cabo los objetivos propuestos en el punto anterior, la metodología a seguir parte del estudio inicial de los diferentes conceptos de capacidad planteados en la bibliografía existente, y la definición del concepto y formulación más ajustados a los objetivos de esta tesis, analizando las variables que afectan a dicha formulación.

Definido el concepto de capacidad, se ha realizado un análisis exhaustivo de las terminales de contenedores españolas para estudiar los factores que inciden en la capacidad del muelle a través de las variables de su formulación, y detectar así la aplicabilidad de la formulación existente en dichas terminales, así como los factores que una formulación más acertada tendría que considerar, como es la explotación continua de los muelles.

A continuación se ha desarrollado un programa de simulación capaz de considerar la realidad de los muelles de las terminales de contenedores españolas en lo que a las variables que afectan a la capacidad se refiere.

Finalmente se han simulado con el programa situaciones representativas del sistema portuario español con el fin de detectar los errores que se pueden estar cometiendo al aplicar formulaciones de los años 70 sobre terminales modernas, y plantear nuevas metodologías de cálculo.

CAPÍTULO III

Estado del arte

III. 1. Introducción.

La estimación de la capacidad de un muelle es una herramienta básica junto con la estimación de las previsiones de tráfico para conocer las necesidades de infraestructura (y superestructura) del subsistema de línea de atraque, ya sea un muelle en concepción o existente. Así, en función del tráfico esperado en un horizonte de tiempo y de la capacidad estimada en ese mismo momento, los departamentos de planificación de las autoridades portuarias analizan las necesidades de infraestructura en sus recintos³.

Sin embargo, resulta extremadamente sorprendente el estancamiento que han sufrido las herramientas de cálculo de la capacidad de los muelles, en comparación con el rabioso desarrollo tecnológico que ha sufrido el mundo portuario en las últimas décadas. En concreto, y en lo que a esta tesis afecta, resulta especialmente sorprendente la falta de avances para la adaptación de dichas herramientas a la explotación real de los muelles de terminales de contenedores, esto es, la explotación continua.

³ Más adelante se analizará cómo la capacidad de un muelle no solamente depende de la infraestructura del mismo, sino también de la superestructura.

Más sorprendente resulta aún la falta de consenso que existe todavía hoy entre los técnicos al referirse al término de capacidad. Y es que esta falta de consenso no es algo exclusivo de ésta. En general, en el mundo portuario, la terminología referente a los indicadores que forman parte de los sistemas de medición de las terminales o de los puertos, se utilizan con muy poca precisión: tráfico; productividad; rendimiento; etc. Tampoco existe un consenso en los indicadores que forman parte de estos sistemas. Parece poco razonable que se produzca esta situación cuando las terminales están sometidas a fuertes presiones por parte de los accionistas, siendo este sistema de medición básico para su gestión. Por no hablar de la importancia de estos sistemas cuando se trata de modelos de gestión tipo Landlord, donde la única manera que tienen las autoridades portuarias (concedentes de las instalaciones) de analizar el cumplimiento de las condiciones impuestas en las cláusulas de las concesiones es a través del diseño de un sistema de medición exhaustivo. Sin embargo, la feroz competencia entre las grandes terminales, controladas en muchos casos por las grandes navieras, hace que estos sistemas de medición sean totalmente opacos, lo que lleva, entre otras cosas a que la nomenclatura utilizada sea muy dispar.

Conscientes de la importancia de estos sistemas de medición para poder adoptar criterios de decisión, algunos autores están empezando a desarrollar metodologías para modelizar los procesos y calcular indicadores de rendimiento introduciendo softwares de simulación en los propios métodos de cálculo de los indicadores (Park y kim 2015).

Inicialmente en este estado del arte, se va a describir el muelle de una terminal de contenedores como un sistema de espera con el fin de establecer la nomenclatura que se va a utilizar en esta tesis (en el Anejo 3 se definen todos los conceptos de tiempo que afectan en este subsistema).

A continuación se va a tratar de ordenar los conceptos y estructurar lo que se conoce como **perspectivas de medición** (Aguilar y Obrer-Marco 2010) de manera que en la continuación de esta tesis queden definidos todos los indicadores del sistema de medición de una terminal y se facilite la comprensión. De esta forma, quedarán establecidas las definiciones que servirán de base para el desarrollo de esta tesis.

Sentadas las bases de la terminología empleada, se analizan las diferentes definiciones que los estudiosos han dado del **concepto de capacidad del muelle**. A continuación se verá la formulación más extendida para el cálculo de esta capacidad, **formulación** que asume muelles formados por un número discreto de atraques, así como las variables que definen la calidad del servicio ofrecida a los navieros, considerados los clientes de la línea de atraque.

III.2. El muelle como un sistema de espera.

Un sistema de espera (también conocido como sistema de colas) está compuesto por dos elementos fundamentales: una cola y una instalación de servicio. Cuando los elementos que demandan un servicio llegan al sistema entran en la cola (que puede no existir si no hay elementos esperando). Mientras unos elementos llegan a la cola, otros salen de ella y entran en la instalación del servicio, de manera que cuando termina el servicio los elementos salen del sistema.

El sistema de espera queda caracterizado cuando lo están las llegadas (distribución e intensidad), los servicios (distribución e intensidad) y la gestión de la cola u orden de salida de la cola.

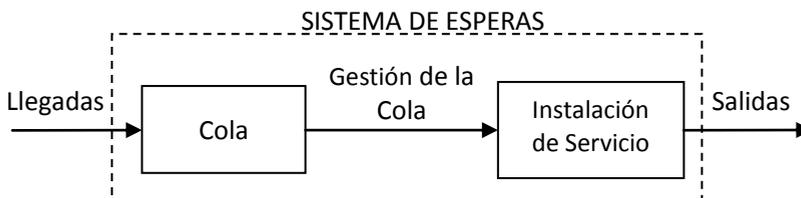


Figura III-1: Sistema de esperas.

A priori, la llegada de elementos al sistema puede ser a intervalos de tiempo regulares o irregulares, y al origen de los mismos se le denomina fuente. El sistema puede estar constituido por una o varias fuentes. Un ejemplo de ello podría ser el peaje de una autopista en el que una fuente generaría vehículos pesados y otra, vehículos ligeros.

Puede darse el caso de que el sistema de espera presente distintas líneas de espera o colas, como la separación en carriles para cada caseta de peaje, o diferentes colas para diferentes surtidores en una gasolinera.

La gestión de la cola puede llevarse a cabo de formas muy diferentes. Por ejemplo:

- FIFO: first in – first out. El primer elemento que entra en la cola es el primero que sale. También se le denomina FCFS, first come first served.
- LIFO: last in – last out. El último elemento que entra en la cola es el primero que sale.
- SIRO: service in random order. La salida de la cola se hace de manera aleatoria.
- G: cualquiera de las posibilidades que existen en la gestión de la cola.
- NPRP: servicio prioritario no abortivo.
- RPP: servicio prioritario abortivo.

Además, la instalación de servicio puede estar formada por varias estaciones de servicio como por ejemplo las diversas casetas de un peaje o los diferentes surtidores de una gasolinera.

Si se analiza el funcionamiento de un muelle puede verse que actúa como un sistema de espera. Así, los buques llegan a la terminal según una distribución de llegadas y con cierta intensidad. Inmediatamente entran en cola (fondeo) al llegar a la terminal (si hay sitio en el muelle el periodo de tiempo que el buque está en cola es nulo) y a medida que se va gestionando la cola, los buques van pasando al muelle (instalación de servicio) con “N” puestos de atraque (estaciones de servicio). Finalmente, cuando finaliza el servicio, los buques salen del sistema.

Un sistema de espera viene definido generalmente por la notación propuesta por Kendall (1953) y mejorada por Lee (1966). Esta es:

$$A / B / c / K / N / D$$

Donde:

- A: distribución del intervalo de tiempo entre llegadas consecutivas al sistema,
- B: distribución de la duración de servicio en la instalación de servicio,

- c : número de estaciones de servicio⁴
- K : máximo número de unidades que caben en el sistema
- N : fuentes de generación de unidades que llegan al sistema⁵
- D : disciplina de la cola

Si se asume que $K=\infty$, $N=\infty$ y $D=\text{FIFO}$ ⁶, se obtiene la notación más habitual: $A/B/c$.

Para designar las distribuciones, se utilizan las siguientes letras:

- U : distribución uniforme
- T : distribución triangular
- N : distribución normal
- D : distribución determinística o constante (delta de Dirac)
- E o M : distribución exponencial o suceso Poisson.
- E_k : distribución Erlang de orden k .
- H_k : distribución hiperexponencial de parámetro k .
- G : distribución cualquiera.

Con el objetivo de diferenciar aquellas variables que hacen referencia a un instante concreto de aquellas que hacen referencia a un periodo de tiempo, en esta tesis se ha utilizado intencionadamente el término “tiempo” de manera diferente al término “duración”. El primero hace referencia a aquellas variables que implican instantes concretos de tiempo, es decir momentos puntuales, mientras que el segundo a periodos de tiempo.

⁴ Aunque según la notación de Kendal el número de estaciones de servicio queda representado por la letra “ c ”, en esta tesis se utilizará la letra “ N ”.

⁵ Según a notación de Kendal la letra “ N ” designa el número de fuentes de generación de unidades que llegan al sistema, pero en el desarrollo de esta tesis designa el número de puestos de atraque de un muelle.

⁶ Más adelante se verá que en esta tesis se ha asumido una gestión de la cola FIFO.

Así, en el muelle como sistema de espera, la distribución del intervalo de tiempo entre llegadas consecutivas al sistema será realmente una función de densidad de la variable “intervalo entre **llegadas** de buques consecutivos **(A)**”⁷. De la misma manera, la distribución de la duración de servicio en la instalación de servicio será la función de densidad de la variable “**duración de servicio** de los buques en el puesto de atraque” **(B)**, entendida como el intervalo de tiempo en el que el atraque está a disposición de un barco en cuestión. Debieran incluirse en él las maniobras de atraque, los tiempos muertos o similares, de manera que en el resto del tiempo el puesto está a disposición del sistema para su oportuna cesión a otros barcos. Finalmente, el número de estaciones de servicio será el “**número de puestos de atraque**” **(N)**.

III.3. Perspectivas de medición.

De todos los indicadores que forman parte de los sistemas de medición de la actividad de las terminales portuarias (o incluso de los puertos), el equipo de trabajo del proyecto MASPORT los agrupó en cuatro perspectivas de medición (Aguilar y Obrer-Marco 2010):

1. **Rendimiento operacional**: trata de dar respuesta a cuestiones como cuántos contenedores pasan por la terminal en un periodo de tiempo o el grado de utilización de los recursos de la terminal, entre otros. A diferencia del resto de perspectivas, los indicadores del rendimiento operacional se pueden medir directamente, aunque al igual que no existe consenso sobre los indicadores a incluir en un sistema de medición de la actividad (ni a nivel nacional ni a nivel internacional), tampoco lo existe sobre los datos base necesarios para calcularlos, ni sobre el procedimiento preciso para la obtención de dichos datos en las terminales. Ni mucho menos sobre cómo asegurar la calidad del proceso de obtención de datos, habida cuenta de que se trata casi siempre de obtenerlos de forma repetida y constante, y sobre todo a lo largo de periodos extensos de tiempo (Aguilar y Obrer-Marco 2010).

⁷ También se hace referencia a esta variable simplemente con el término “llegadas”.

Dentro de los indicadores de rendimiento operacional se pueden distinguir tres categorías:

- a. **Producción:** está relacionada con el volumen de manipulación de la terminal o de un subsistema. Esto es, expresa el volumen de mercancías manipuladas en un periodo de tiempo (día, semana, mes, año, etc.), sin tener en cuenta los recursos asignados a ello.

Normalmente, para dar una idea de la actividad de la terminal se utiliza habitualmente un año. Cuando se refiere a la terminal en su conjunto, estos indicadores tienen un especial interés para los departamentos de comercial y marketing de la terminal, en cuanto a la divulgación de los resultados. También son interesantes para las autoridades, dado que con ellos son capaces de construir sus estadísticas comerciales (De Monie 1988). Ese volumen puede medirse de distintas maneras, y en concreto en las terminales de contenedores en número de contenedores, UTIs⁸, TEUs⁹ o toneladas.

Como ejemplo de indicadores de producción se podrían citar: toneladas/jornada; TEUs/año; o contenedores/hora.

Particularizando en el subsistema muelle, cabe diferenciar el concepto de tráfico del concepto de transferencia. El **tráfico** se puede definir como el número de contenedores (o UTIs) que pasan por el subsistema en una unidad de tiempo. Así, los contenedores que se contabilizan son (Aguilar y Obrer-Marco 2010):

- Los contenedores exportación cargados en los buques procedentes del muelle,

⁸ UTI: unidad de transporte intermodal.

⁹ TEU: twenty equivalent unit (contenedor de 20').

- Los contenedores de importación descargados desde los buques y depositados en el muelle (o sobre los equipos de interconexión),
- Los contenedores de trasbordo¹⁰ (contados una sola vez, bien en el momento de la descarga o bien en el momento de la carga, puesto que de una sola operación portuaria se trata).

El concepto de **transferencia** también es un indicador de producción, pero indicando el volumen total de contenedores movidos para lograr un determinado tráfico, esto es, en su cálculo se contabilizan todos los movimientos (Aguilar y Obrer-Marco 2010). Es por ello que son indicadores que dan una idea del esfuerzo total que supone la manipulación de un determinado tráfico (De Monie 1998). En particular, en el caso del muelle, la transferencia es el volumen bruto de contenedores que son cargados desde el muelle a los buques, o descargados desde los buques al muelle, así como los movimientos dentro del buque o entre buques. En este caso se tienen que contabilizar:

- Los contenedores de exportación cargados en los buques y procedentes del muelle,
- Los contenedores de importación descargados desde los buques hasta el muelle,

¹⁰ La ley 48/2003 de régimen económico y de prestación de servicios de los puertos de interés general define el **transbordo de mercancías** como “operación de transferencia directa de mercancías de un buque a otro (con el término transferencia la ley no se hace referencia a la transferencia como indicador de producción), sin depositarse en los muelles y con presencia simultánea de ambos buques durante la operación”, mientras que “**tránsito marítimo** es la “operación de transferencia de mercancías o elementos de transporte en el modo marítimo en que éstas son descargadas de un buque al muelle, y posteriormente vuelven a ser cargadas en otro buque, o en el mismo en distinta escala, sin haber salido de la zona de servicio del puerto”. Sin embargo, las comunidades portuarias y la literatura portuaria hacen referencia al tránsito marítimo como transbordo, puesto que con la palabra tránsito se hace referencia al régimen aduanero, de ahí que en esta tesis se utilice el término transbordo haciendo referencia al tránsito marítimo.

- Los contenedores de transbordo, tanto el movimiento de descarga hasta el muelle, como en movimiento de carga hasta el buque,
- Los contenedores que se cambian de posición. Se consideran aquellos cuya remoción viene impuesta por el naviero (y por lo tanto motiva la facturación del movimiento, como aquellos cuya remoción la realiza voluntariamente la terminal con el fin de facilitarse el trabajo. Las remociones bordo-bordo implicarían un movimiento y las bordo-tierra-bordo dos movimientos.
- Las tapas de escotilla. Se consideran dos veces, una correspondiente al movimiento de apertura de escotillas de las bodegas y otra al cierre de las mismas.

b. **Productividad:** da una idea del ritmo de trabajo de los diferentes recursos de la terminal, esto es del volumen manipulado por unidad de tiempo y de recurso empleado (puesto de atraque, mano, grúa de muelle, RTG¹¹, RS¹², etc.). Por un lado, a la vista de la definición de producción, la productividad se puede definir como una producción, ya sea tráfico o transferencia, por unidad de recurso. Sin embargo, dado que el objetivo de la productividad es dar una idea del ritmo de trabajo de los recursos, parece más razonable utilizar datos correspondientes a transferencias, aunque como se verá posteriormente, es en función de aquello que se pretende reflejar con el indicador de productividad que el indicador de producción implica un tráfico o una transferencia.

Por otro lado, cuando se habla de unidad de recurso se puede estar haciendo referencia al recurso de infraestructura (en el caso del muelle sería el atraque, ya sea “puesto de atraque” o “metro de atraque”), al recurso de equipamiento (en el caso

¹¹ RTG: Rubber Tyred Gantry

¹² RS: Reach Stacker

del muelle sería una grúa de muelle), o al recurso de personal (estibadores contratados para operar las grúas de muelle). En concreto en el caso del muelle, la productividad también puede hacer referencia al recurso buque, equivalente al recurso muelle cuando éste se explota de manera discreta (puesto de atraque).

- c. **Utilización:** está relacionada con la intensidad con la que se usan los recursos, esto es, la proporción de tiempo que un recurso está en uso frente al tiempo total disponible del mismo. Tradicionalmente los indicadores de utilización se han expresado en porcentaje. En concreto, en el caso de las líneas de atraque, cuando el recurso hace referencia a la infraestructura, esto es, al muelle, al indicador de utilización se le ha llamado tradicionalmente **tasa de ocupación** (más adelante en esta tesis se profundizará sobre este concepto).
2. **Eficiencia:** trata la relación entre los recursos empleados y el volumen de contenedores que pasan por la terminal, intentando conocer si dicha relación es óptima. De este modo, es un indicador que relaciona los recursos o inputs con los resultados u outputs.

En el análisis de dicha relación se han aplicado las técnicas de Análisis Envoltante de Datos (DEA¹³), las cuales se basan en la programación lineal y evalúan la eficiencia relativa de una terminal (unidad) en comparación con un conjunto de terminales homogéneas (conjunto de unidades). Así, la eficiencia de la terminal analizada es función de las terminales que forman el conjunto.

Como se ha comentado ya, la comparación entre terminales es muy dificultosa dada la falta de homogeneización de los indicadores que forman los sistemas de medición, lo que imposibilita la aplicación de estas técnicas a conjuntos de terminales diferentes. Por ello, las terminales han optado por compararse con ellas mismas en diferentes

¹³ *Data Envelopment Analysis* en inglés.

periodos de tiempo. Es lo que se conoce como eficiencia intra-centro (Wang et al. 2005) como alternativa a la eficiencia inter-centro.

3. **Capacidad:** el objetivo de la capacidad es conocer el tráfico límite que admite la terminal en su conjunto o en un subsistema, en un periodo de tiempo. Puesto que esta perspectiva de medición es la que motiva esta tesis, se profundizará en ella en los apartados siguientes.
4. **Nivel de Servicio:** está relacionado con la calidad de servicio ofrecida a los usuarios de la terminal. En particular, cuando se trata del subsistema de línea de atraque, hace referencia a la calidad de servicio ofrecida al naviero. Esta perspectiva de medición está relacionada con la capacidad como se verá más adelante, por lo que se profundizará en los siguientes apartados.

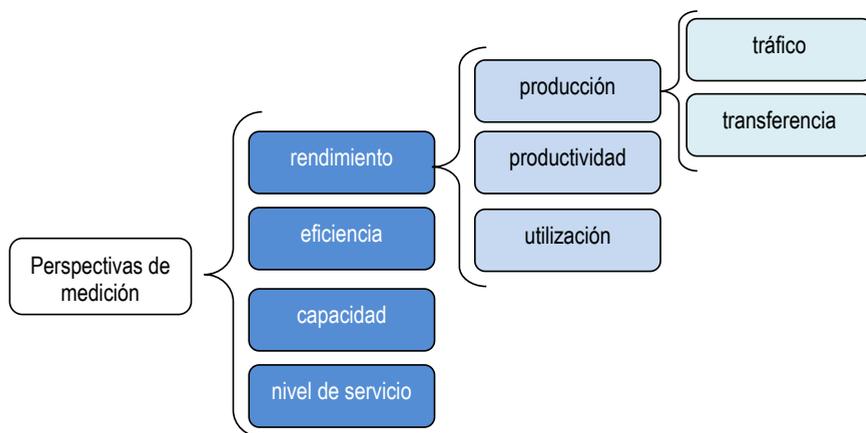


Figura III-2: Las cuatro perspectivas de medición. Fuente: Aguilar y Obrer-Marco 2010.

III.4. El concepto de la capacidad del muelle.

La capacidad del muelle se puede definir como el tráfico límite¹⁴ que éste es capaz de soportar en un periodo de tiempo, generalmente un año, de manera

¹⁴ En el desarrollo de esta tesis se ha optado por hablar de “tráfico” y no de “transferencia” puesto que si se asume que la capacidad de la terminal en su conjunto se mide como un tráfico y se aplica el método de los cuellos de botella (Henesey 2004), parece razonable pensar en un “tráfico”. Ahora bien, como se verá en el desarrollo de esta tesis (ver expresión

que es un concepto relacionado con la actividad del muelle en una situación extremal. Dado que el subsistema de la línea de atraque se caracteriza por numerosas variables, dicha situación extremal se consigue llevando al límite una combinación de estas mismas, o lo que es lo mismo, un determinado estimador. Ahora bien, dado que no hay un único estimador, como se verá más adelante, no hay una única manera de definir dicho límite.

La primera forma y posiblemente la más intuitiva de definir ese tráfico límite es aquel que implica que la infraestructura está permanentemente ocupada el 100% del tiempo y el 100% del espacio (tasa de ocupación de 1). A este tráfico se le podría llamar tráfico de **saturación**.

Fernando Rodríguez, en el año 1977 se planteó otras maneras de definir ese límite. Reconoció que, dado que en la terminal confluyen varios agentes, parece razonable pensar que también confluyen varios objetivos diferentes. De hecho, mientras que al concesionario de la terminal le interesa que la línea de atraque esté la mayor parte del tiempo ocupada, aunque los buques tengan que esperar a su llegada, al naviero le interesa que cuando llegue al puerto tenga un puesto de atraque libre para no tener que esperar. Llevados al límite, el concesionario preferiría trabajar con tasas de ocupación próximas al 100%, mientras que el naviero próximas al 0%. Se trata pues de dos curvas de interés invertidas. Si se tratan de representar, y para ello se trabaja en abscisas con la variable “tráfico movido”, y en ordenadas con el coste de mover una tonelada (o un TEU, u otra unidad de carga), se tendría:

(7)), dependerá de si a productividad del muelle se obtiene como un “tráfico” o como una “transferencia”.

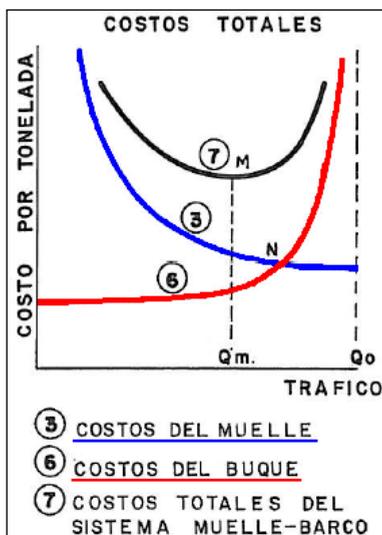


Figura III-3: Definición de capacidad económica. Fuente: Rodríguez, 1977.

Los costes totales del sistema muelle-barco se componen de dos bloques: los costes del concesionario y los costes del naviero. Los primeros son suma de dos componentes, una ligada a la amortización de la inversión, y otra ligada a la operación (mano de obra, grúas, etc.), que en cierta manera es proporcional a la tasa de ocupación del muelle. Al dividir estos costes por la actividad (por la carga manipulada) tenemos una curva decreciente que tiende a infinito cuando el porcentaje de ocupación del muelle lo hace a cero (esto es, nunca hay buques atracados). Cuando la actividad del muelle tiende a cero, el coste unitario se hace infinito por la imposibilidad de amortizar, y cuando la tasa de ocupación del muelle tiende a uno (el muelle está permanentemente ocupado) el coste unitario tiende hacia el coste unitario de manipulación, pues la componente de amortización se hace prácticamente nula.

Los costes del naviero en el puerto vienen derivados del periodo de tiempo que emplea en la escala (*estancia en puerto*), y son proporcionales a él. Si entendemos que éste puede ser la suma de las esperas y de servicio (el cual incluye según el autor los periodos de tiempo donde el buque está haciendo maniobras de atraque y desatraque), y a efectos de comparar las curvas, los dividimos por el volumen de mercancía a manipular, obtenemos una curva creciente que tiene a infinito cuando el porcentaje de ocupación del muelle tiende a uno debido al crecimiento hasta el infinito de los costes asociados al

tiempo de espera (el autor asume que el tiempo de servicio es independiente de la actividad del muelle).

En este escenario, si planteamos la existencia de un ente interesado en que este coste del transporte sea mínimo, podemos sumar ambas curvas y el tráfico en el que la curva conjunta tiene su mínimo, sería un posible tráfico límite, la **capacidad económica**. A las dudas sobre la existencia de dicho ente, se añade la de los pesos a dar a cada cual, e incluso la viabilidad de obtener una curva de costes de los navieros verosímil. Probablemente este concepto es el más apropiado para el naviero que sea también operador de terminal (terminales dedicadas¹⁵), pues es el que optimiza en conjunto su negocio.

Otro concepto de capacidad que plantea Rodríguez asociado a otra manera de establecer el límite es la **capacidad de congestión**, relacionado con las fluctuaciones accidentales del tráfico. Este concepto implica el estudio entre el tráfico y la estancia en puerto de los buques. Considerando que la estancia en puerto (D_p) es la suma del de la duración en el atraque (duración de servicio – D_s) y la duración¹⁶ de la espera (D_e), a medida que el tráfico aumenta, la duración de la espera también aumenta. Por lo tanto esta curva tiene dos extremos: en la abscisa de tráfico nulo, en el que al no haber esperas D_p es igual a D_s ; a medida que el muelle se acerque a altos niveles de tráfico, D_e (y consecuentemente D_p , aunque D_s se mantenga constante con independencia del tráfico) tiende a infinito.

¹⁵ Las terminales dedicadas son aquellas en las que escalan exclusivamente buques de una única naviera, la concesionaria de la terminal.

¹⁶ Nótese que aunque Rodríguez (1977) denominaba “tiempos” a todas estas variables, para ser consecuente con la nomenclatura acordada en esta tesis, se ha denominado “duraciones” a las variables.

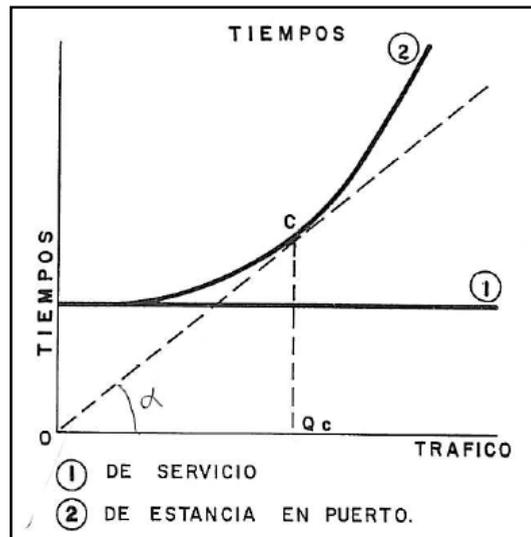


Figura III-4: Capacidad de congestión. Fuente: Rodríguez, 1977.

Se entiende como capacidad de congestión el tráfico que corresponde al punto de esa curva cuya tangente pasa por el origen. La definición es un tanto arbitraria (es decir, falta de justificación), y busca definir de forma precisa algo difícil de definir, como es el punto a partir del cual los tiempos de espera se hacen muy grandes.

Finalmente, Rodríguez estableció otro **concepto de capacidad asociado con el nivel de servicio** ofrecido a los clientes del muelle, esto es, las navieras, y lo hizo así porque desde el punto de vista del usuario considera que es más importante la comodidad o la eficacia que el coste (además de que la *duración del servicio* no depende, al menos exclusivamente, del sistema en sí, sino del usuario). Para ello asimiló el muelle a un sistema de esperas (Rodríguez 1977).

Rodríguez recomienda calcular la capacidad económica, la capacidad de congestión y la capacidad asociada a un determinado nivel de servicio, para quedarse con la menor de todas, haciendo hincapié en que en función del número de atraques, puede ser que no sea el orden lógico: capacidad económica, capacidad de congestión y capacidad asociada a una calidad del servicio.

Muchos autores han adoptado directamente la definición de capacidad asociada a una determinada calidad del servicio y han buscado la forma de

encontrar soluciones al sistema de esperas. Así, siempre que es posible han aplicado teoría de colas, un conjunto de modelos matemáticos que describen sistemas de espera particulares y en concreto, proporciona solución analítica exacta en dos casos: llegadas aleatorias y servicios aleatorios (para cualquier número de atraques); y llegadas o servicios aleatorios y un atraque. Cuando no es posible aplicar la teoría de colas puesto que el sistema no se comporta de manera que se puedan aplicar las **soluciones analíticas** (exactas o aproximadas), se ha de recurrir a la **simulación** (Ageschou et al. 2004).

Bien es sabido que muchos planificadores, ajenos a esta idea de capacidad asociada a una calidad de servicio, y argumentando no disponer de datos para la aplicación de otros métodos más complejos (Schreuder 2005), calculan la capacidad de una **manera empírica**. De esta forma, aplican índices obtenidos del benchmarking de terminales similares en cuanto al tamaño, tipo de tráfico y características para obtener sus tráficos límites. De esta manera, para conocer la capacidad del muelle proponen multiplicar una capacidad unitaria por el total de metros del muelle o el total de atraques.

Este concepto puede ser totalmente inadecuado si no se considera que la capacidad unitaria (la capacidad de un puesto de atraque) crece al aumentar el número de atraques (Rodríguez 1977).

Una variación de esta metodología que sí considera de alguna manera el efecto de la relación entre la tasa de ocupación y el tamaño del muelle para la misma calidad del servicio la plantea Drewry. Esta consultora define la capacidad como un volumen máximo que puede ser manipulado por una terminal dadas unas condiciones y parámetros específicos (Drewry 2014). Así, denomina **capacidad comercial u operacional** a aquella medida basada en resultados alcanzados en puertos similares y asociada con una situación de congestión totalmente aceptable por los navieros puesto que la espera es todavía razonable, aunque a partir de este valor los retrasos crecerían rápidamente (Drewry 2002). Según Drewry (2010), esta capacidad comercial u operacional refleja la realidad para los operadores de las terminales y los navieros. Distinto a este concepto de capacidad operacional es el **límite físico del muelle** que sería el tráfico asociado a una tasa de ocupación del 100%, esto es todos y cada uno de los puestos de atraque estarían permanentemente ocupados, aunque ello supusiera esperas infinitas (es lo que anteriormente se había denominado tráfico de saturación).

A diferencia de los dos anteriores, Drewry (2010) define **la capacidad de diseño o teórica** como el valor estimado asumiendo que el equipamiento está utilizado al límite (técnico), esto es, descontando únicamente las paralizaciones para hacer el mantenimiento. Sus valores se obtienen derivados de modelos o incluso son valores generales (Drewry 2002).

La Tabla III-1 muestra la capacidad comercial u operacional de los muelles en función del tamaño de la terminal y del tipo de tráfico:

CAPACIDAD OPERACIONAL (TEUs por metro de muelle y por año)			
Tipo de Tráfico	TAMAÑO DE LA TERMINAL		
	Terminal Grande: > 1.000 m	Terminal Mediana: > 500m y < 1.000 m	Terminal Pequeña: > 250 my < 500 m
Terminal Pública. Transbordo < 33%. Mucha competencia.	1.200	1.000	800
Terminal Pública. Transbordo < 33%. Alta tasa de ocupación del muelle.	1.500	1.200	1.000
Terminal dedicada. Escalas muy programadas. Transbordo > 50%.	1.700	1.600	1.300

Tabla III-1: Capacidad operacional (Fuente: Drewry 2014).

Estos valores incluyen intrínsecamente que la capacidad unitaria es superior cuanto mayor es el muelle y cuanto más programadas sean las escalas, lo que se consigue en terminales dedicadas. También es más alta si se consiguen altas tasas de ocupación, lo que lógicamente irá asociado a una calidad del servicio ofrecida inferior, lo que no podría ocurrir en terminales de altísima competencia.

Véase que estos autores no proporcionan el valor de la capacidad unitaria por número de atraques, sino por metros, lo significa que implícitamente están asumiendo que los muelles sobre los que se va a aplicar la metodología que proponen serán concebidos como líneas de atraque continuas. Asumen pues, que a mayor longitud de muelle, mayor capacidad unitaria. Esta cuestión quedará discutida a lo largo de esta tesis sobre la base de que en ningún caso se plantea cómo son las esloras de los buques que hacen escala en esa terminal.

Otro estudioso de la capacidad del muelle asociada a la calidad ofrecida al naviero ha sido Hans Agerschou. Según éste, la determinación del número de atraques (más allá de estudios de viabilidad financiera que sobrepasan el objetivo de esta tesis) ha de estar basada en una capacidad óptima asumida y expresada como la tasa de ocupación del muelle (Agerschou et al. 2004). Así, un número de atraques que implicara una ocupación no adecuada de los mismos como podría ser del 100% correspondería a una espera media de los buques infinita, lo que implicaría la búsqueda de terminales alternativas por parte de los navieros. Esa tasa de ocupación óptima (vinculada con lo que Agerschou ha denominado **capacidad óptima**) relacionada con la calidad del servicio ofrecida al naviero, aumenta a medida que aumenta el número de atraques, como ya se ha comentado. Las Naciones Unidas sugirieron unas tasas de ocupación óptimas basándose en que la proporción entre los costes del buque y los costes del muelle es 4 a 1.

Agerschou, como muchos otros autores, consideran que el indicador representativo de la calidad de servicio es el ratio entre la media de la espera de los buques que hacen escala en el sistema y la media de la duración del servicio de los mismos¹⁷. A este indicador se le denomina: **espera relativa** (ϵ_r - más adelante, en el apartado sobre calidad del servicio de este estado del arte, se discutirá sobre la idoneidad de este indicador por sí solo).

En base a esas tasas de ocupación óptimas, y para el caso de terminales de contenedores donde el autor indica que las funciones de densidad de las

¹⁷ No da los mismos resultados que la media de los ratios de la espera entre la duración de servicio de todos los buques.

duraciones de servicio son Erlang K (donde K está entre 4 e infinito), la ϵ_r se encuentra entre 0,1 y 0,14 si el número de atraques es superior a 3 según esos estudios desarrollados por la UNCTAD. Sin embargo, el autor acaba concluyendo que los estudios económicos conducen a asumir que en caso de terminales de contenedores esa ϵ_r es 0,1 (Agerschou et al. 2004). Que el valor límite de ϵ_r es 0,1 para las terminales de contenedores es una afirmación que ningún experto ha desmentido ni cuestionado, pero que tampoco ha argumentado exhaustivamente.

Así, a partir de este valor y en función del número de atraques del muelle, la tasa de ocupación óptima (o límite) varía, creciendo a medida que crece el número de atraques que componen el muelle.

Con todo esto, para conocer el tráfico asociado a una determinada calidad del servicio es necesario conocer la tasa de ocupación asociada a la ϵ_r que define esa calidad. Dado que se definió capacidad como un tráfico límite, la ϵ_r que proporcionará la capacidad a partir de la tasa de ocupación límite es $\epsilon_r = 0,1$. Ahora bien, las características de cada muelle (entendido como un sistema de espera), esto es, el número de atraques, la distribución de llegadas, y la distribución de servicios, harán que el sistema se pueda resolver analíticamente a partir de teoría de colas, o mediante técnicas de simulación. Es más, dado que esas características del sistema pueden cambiar en el tiempo, no sólo podrá cambiar la técnica a aplicar para su resolución, sino también el valor de la propia capacidad. Como se verá posteriormente en el desarrollo de esta tesis, la capacidad del muelle no es un valor invariable en el tiempo, sino que en función de las condiciones de explotación del mismo y de las características de los buques que en él hacen escala, el valor variará en el tiempo.

III.5. La calidad del servicio.

Ya en el sub-apartado dedicado a la capacidad de los muelles de este estado del arte se indicó que muchos autores consideran como indicador representativo de la calidad de servicio la *espera relativa* (ϵ_r), esto es el ratio entre la media de la espera de los buques que hacen escala en el sistema y la media de la duración del servicio de los mismos (ROM 2.0-11).

Es evidente que este indicador refleja una calidad global ofrecida al conjunto de navieros, de manera que podría darse el caso de que los episodios críticos

afectarán siempre a la misma naviera haciendo que ésta percibiera una calidad muy inferior al resto. Sin embargo, esta situación, si se diera, sería en una fase de explotación y como se ha indicado ya, en esta tesis no se pretende trabajar en el nivel de la explotación, sino en el de la planificación, aunque se necesiten conocer ciertas pautas de la explotación para poder definir la situación en la que se analiza la capacidad.

Así, el indicador ε_r trata de representar el hecho de que los navieros están dispuestos a esperar más cuanto mayor sea la duración del servicio. Sin embargo, este indicador puede ser engañoso desde el momento en el que mejora (disminuye) a medida que la duración de servicio aumenta, lo que para el mismo volumen implica un deterioro del servicio (Bassan 2007).

En realidad, los navieros perciben la calidad en función del periodo de tiempo total de la escala en relación con el volumen a manipular (Monfort et al. 2011):

$$\frac{D_p}{q} \tag{1}$$

Donde:

- D_p : es la estancia en puerto,
- q : es el volumen de mercancía a manipular en la escala.

Esa estancia en puerto se puede descomponer en tres componentes:

$$D_p = D_e + D_m + D_s \tag{2}$$

Donde:

- D_e : es la espera en fondeo,
- D_m : es la duración de las maniobras en el puerto,
- D_s : es la duración del servicio,

Obviando las maniobras¹⁸ y dado que los navieros perciben la calidad como la estancia en puerto relativa al volumen a manipular en la escala:

$$\frac{D_p}{q} = \frac{D_e}{q} + \frac{D_s}{q} = \frac{D_s}{q} \left(1 + \frac{D_e}{D_s} \right) \quad (3)$$

Puesto que la espera relativa se expresa como:

$$\varepsilon_r = \frac{D_e}{D_s} \quad (4)$$

Y la productividad del buque en el atraque (P)¹⁹:

$$P = \frac{q}{D_s} \quad (5)$$

La calidad del servicio apreciada por los navieros se puede expresar como:

$$\frac{D_p}{q} = \frac{1}{P} \cdot (1 + \varepsilon_r) \quad (6)$$

En efecto, esa calidad del servicio viene dada por dos factores, un factor básico representado por P, y un factor amplificador del primero que está relacionado con la congestión de la terminal a través del indicador ε_r (Monfort et al. 2011). Por tanto, queda evidenciado que la **calidad del servicio al naviero viene dado por dos indicadores fundamentales: la productividad del buque atracado (P) y la espera relativa (ε_r).**

Así, cuando tradicionalmente se ha utilizado el indicador ε_r como representativo de la calidad, se está asumiendo ya un valor de la P relativamente alto (o suficientemente alto para los navieros). De otro modo, podría darse el caso de que, aunque las esperas percibidas en relación con la

¹⁸ O incluyéndolas en la duración del servicio si ésta se define como se ha hecho en esta tesis, es decir el periodo de tiempo en el que el atraque está a disposición de un buque, con lo que estarán incluidas las maniobras de aproximación, atraque, desatraque, etc.

¹⁹ En el apartado de definiciones se hace referencia a todas las diferentes definiciones de productividad del buque en el atraque que se pueden dar en función del periodo de tiempo considerado. En este punto no es preciso hacer referencia a una concreta.

duración del servicio fueran reducidas (lo suficientemente reducidas en comparación con las expectativas de los usuarios), la productividad de los buques en el atraque fuera muy baja (lo suficientemente baja en relación con las expectativas de los usuarios), lo que supondría tiempos excesivos en el atraque para un determinado volumen de mercancía. Esto se traduciría en una percepción de la calidad deficiente, produciendo la salida de los clientes del sistema.

III.6. Formulación de la capacidad.

La formulación más comúnmente empleada para estimar el tráfico que discurre a través de un muelle a lo largo de un año es (Obrer-Marco y Aguilar, 2011):

$$T = N \cdot \Phi \cdot P \cdot H_{\text{año}} \quad (7)$$

Donde:

- T: es el tráfico que discurre por el muelle a lo largo de un año (TEUs/año, contenedores/año o movimientos/año)²⁰,
- N: es el número de atraques (o número de puestos de atraque) que componen el muelle,
- Φ : es la tasa de ocupación del muelle²¹ (o de un atraque, pues coinciden), y si E_{LL} es la media del intervalo entre llegadas consecutivas y E_{DS} es la media de la duración del servicio:

$$\Phi = \frac{E_{LL}}{N \cdot E_{DS}} \quad (8)$$

²⁰ Nótese que, aunque se ha indicado anteriormente que el volumen asociado con la capacidad suele hacer referencia a un "tráfico", en caso de haber un interés particular en que proporcionara un valor de transferencia, podría hacerlo siempre y cuando P también lo hiciera.

²¹ La tasa de ocupación se define como el periodo de tiempo durante el cual los atraques están ocupados en relación con el periodo durante el cual los atraques están disponibles para ser ocupados.

- P: es la productividad de un atraque (TEUs/(h·atraque), contenedores/(h·atraque) o movimientos/(h·atraque)),
- $H_{\text{año}}$: es el número de horas operativas del muelle al año (h/año).

La formulación del tráfico planteada (expresión (7)) implica una línea de atraque compuesta por un número constante de atraques y una relación entre el tráfico al que sirve el muelle y la calidad de servicio ofrecida a las compañías navieras. El interés de éstas es que el tiempo de la escala en la terminal sea relativamente reducido, aunque proporcional al número de contenedores que vayan a embarcar/desembarcar. Para ello es preciso que P sea relativamente elevada y que la espera en fondeo debida a la congestión de la terminal sea reducida o nula (tal y como se ha discutido en el apartado “la calidad del servicio” en este estado del arte, el indicador considerado es la espera relativa - ϵ_r). Al igual que P, este segundo indicador (ϵ_r) está considerado en la formulación del tráfico, aunque aparezca por medio de la tasa de ocupación (ϕ). Cuando la tasa de ocupación aumenta, las esperas también lo hacen llegando al límite en el que cuando todos los atraques están permanentemente ocupados, la cola de buques se hace infinita. Por el contrario, cuando la ocupación de los atraques tiende a cero, las esperas debidas a la congestión tienden a cero. Si se asume que P es relativamente elevada, la calidad del servicio de los buques queda representada por ϵ_r .

Así, fijando ϵ_r en 0,1 es posible obtener el valor de ϕ que proporcionará el valor de la capacidad del muelle al introducirlo en la formulación del tráfico (expresión (7)), por lo que una de las claves para conocer la capacidad del muelle es conocer la relación entre ϕ y ϵ_r . Dado que el muelle se puede asemejar a un sistema de esperas, esta relación depende de tres variables:

- el número de atraques del muelle (N)²²,
- la función de densidad de la variable intervalo entre llegadas de buques consecutivos – *llegadas*- (A),
- la función de densidad de la duración del servicio de los buques (B).

²² Nótese que N es un número entero desde que el muelle se explota de manera discreta (no es una línea de atraque continua donde en función de las esloras que en cada momento hacen escala en la terminal, el número de buques atracados es distinto).

En función de estas tres variables, para la obtención de la relación $\phi-\epsilon_r$ se puede emplear teoría de colas (ver apartado de “el muelle como sistema de esperas”), o simulación a través de técnicas de Montecarlo.

La relación $\phi-\epsilon_r$ dados unos valores concretos de N, A y B se puede representar como muestra la Figura III-6. En concreto se trata de un muelle donde las llegadas y los servicios se comportan como una función exponencial.

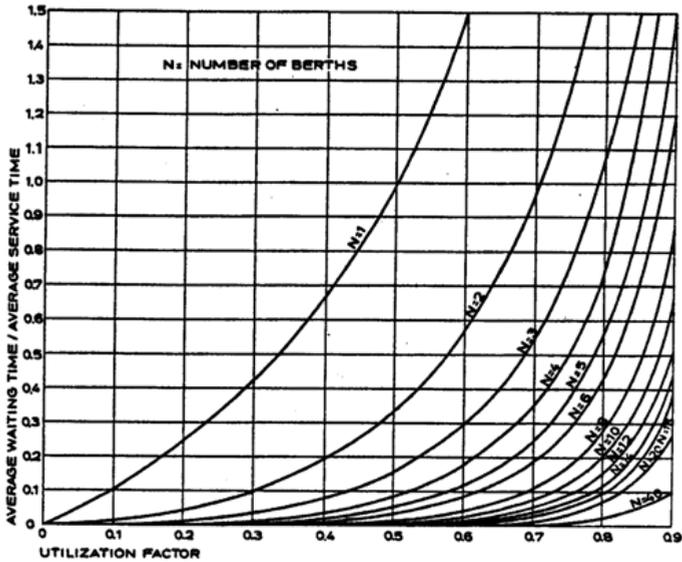


Figura III-5: Ejemplo de representación de la relación $\Phi-\epsilon_r$ (llegadas y servicios Exponenciales). Fuente: Agerschou et al. 2004.

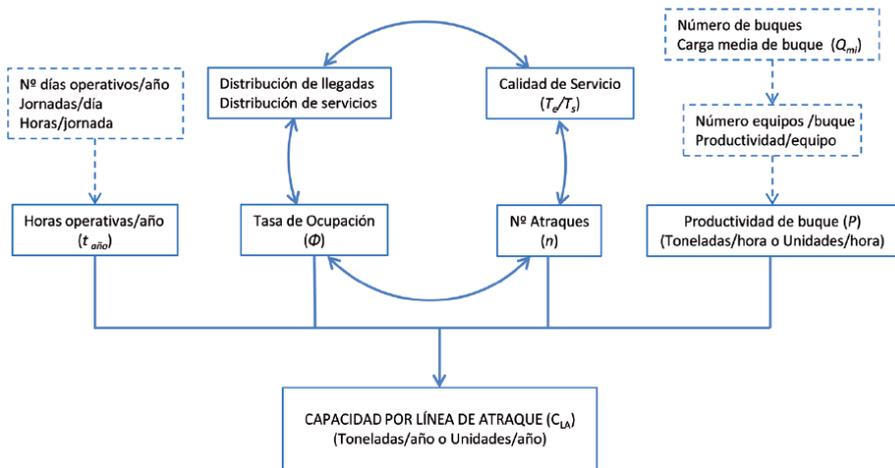


Figura III-6: Relación entre las variables que inciden en la capacidad del muelle. Fuente: Monfort et al. 2011.

Nótese que tal y como se ha definido y formulado la capacidad, queda evidenciado que para una misma instalación no se trata de un valor invariable en el tiempo. En función de N , $H_{\text{año}}$, A , B , P e incluso el valor de ϵ_r si en algún momento los navieros estuvieran dispuestos a asumir mayores o menores esperas relativas, el valor de la capacidad, se vería modificada. Así, en el caso de que se necesite aumentar la capacidad de un muelle, es necesario analizar, antes de ampliar su longitud, si es posible modificar otras características de explotación, como por ejemplo aumentar las horas operativas al año, o aumentar la productividad del buque cuando está atracado (ya sea aumentando el número de grúas o la productividad de las mismas), etc.

Este concepto viene totalmente recogido en la ROM 2.0-11: *“las obras de atraque y amarre en planta y alzado deberán ser aquellas que permitan manipular los tráficos previsibles, en condiciones de seguridad, con los niveles de servicio y operatividad considerados. A estos efectos, se define como capacidad de la línea de atraque, para unas condiciones locales y de operatividad determinadas, al máximo volumen anual de mercancías que la misma es capaz de manipular en dichas condiciones, en conjunto y por unidad de longitud.”*

Sin embargo no hay que olvidar que aunque la capacidad sea un tráfico límite dadas unas condiciones determinadas, llevado al extremo en el que esas

condiciones son las óptimas, no es ni el equipamiento ni el personal el que limita el máximo tráfico límite alcanzable, sino la infraestructura. Esto es, hay que diferenciar las terminales ya construidas donde el layout no es el óptimo de aquellas terminales de nueva creación donde la ventaja es que se pueden diseñar de cero. Sin embargo, incluso en las terminales mejor diseñadas existen limitaciones que vienen dadas por las circunstancias y el contexto que rodean la terminal. La clave para entender la capacidad está en comprender como de abierto está el sistema a las fuerzas de la gestión, el equipamiento, el personal y la infraestructura y centrarse en la red de interacciones más allá de los propios objetivos (Agerschou et al. 2004).

III.7. Aplicación de la formulación de la capacidad a muelles explotados de manera continua.

Si bien la formulación de la capacidad implica que el muelle está compuesto por N número de atraques iguales, esto es que el muelle se explota de manera discreta, la realidad de las grandes terminales de contenedores implica que el muelle es una línea continua donde, en función de las esloras de los buques que en cada momento hacen escala en la terminal, el número de buques atracados puede cambiar.

Por ello, para poder aplicar la formulación del tráfico (o de la capacidad), hasta el momento ha venido siendo habitual hacer una traslación de “muelle continuo” a “muelle discreto” obteniendo así lo que se podría denominar el “número de atraques equivalentes” (N_{equiv}) como el cociente entre la longitud del muelle y la eslora de un buque tipo afectada por el resguardo de seguridad entre buques (Obrer-Marco y Aguilar 2011). Con este N_{equiv} se venía aplicando la misma formulación (expresión (7)) a la hora de estimar la capacidad de un muelle explotado de manera continua.

Ahora bien, conocida la flota de buques que hacen escala en la terminal (en esta tesis buques portacontenedores) y por tanto la distribución de esloras, no hay un consenso a la hora de definir el buque tipo que determinará N_{equiv} . Mientras que algunos autores proponen valores medios de las esloras, como pueda ser la eslora media (Rodríguez 1977; UNCTAD 1984) o la eslora media ponderada a la duración del servicio, otros autores proponen valores extremales. En concreto el caso de la ROM 2.0-11 propone la eslora que

solamente es excedida por el 15% de los buques. Esta última propuesta está en la línea de lo que propone Agerschou, quien dice que la media del número de buques que están atracados en cada momento debería de ser mayor que N_{equiv} pues esto debería de tener como consecuencia menores valores de ε_r (Agerschou et al. 2004).

En concreto, según la ROM 2.0-11, la traslación entre longitud del muelle y número de atraques, viene dada por la siguiente expresión:

$$L_{min} = E_{max} + (N - 1) \cdot E_t + (N - 1) \cdot l_o + 2 \cdot l_s \quad (9)$$

Esto es, la longitud mínima de la línea de atraque (L_{min}) debe ser igual a la suma de la eslora correspondiente al buque de máxima eslora (E_{max}) más el número de atraques necesarios menos uno ($N-1$) multiplicado por la eslora tipo (E_t) más los resguardos necesarios entre buques (l_s) y en cada uno de los extremos de la obra de atraque (l_o).

Aunque esta expresión se plantea para calcular la longitud del muelle dado el número de atraques, se puede plantear en sentido inverso, dada la longitud, conocer el número de atraques (que seguirían siendo según la nomenclatura establecida número de atraques equivalentes N_{equiv} desde que el muelle se explota de manera continua y no de manera discreta).

Ahora bien, obtenido de esta manera N_{equiv} (ya sea a través de la expresión (9) o como hasta ahora muchos planificadores aplicaban, dividiendo la longitud del muelle entre la eslora tipo afectada por un resguardo), este indicador no tiene porqué ser un número entero, por lo que resulta complicado conocer la relación ϕ - ε_r . Algunos trabajos aconsejaban, fijada la espera relativa en 0,1, interpolar entre el valor de ϕ asociado al entero superior e inferior a N_{equiv} .

Sin embargo, tal y como va a quedar demostrado en esta tesis, esta práctica puede conducir a estimaciones de la capacidad superiores a las obtenidas mediante un modelo que asume el muelle explotado de manera continua (Obrer-Marco y Aguilar 2014). De ahí que se hayan planteado alternativas que proponen adoptar el valor de ϕ asociado con el número de atraques entero (N) inmediatamente inferior al número de atraques equivalentes (N_{equiv}) (Monfort et al. 2011), alternativas que también quedarán discutidas en esta tesis.

CAPÍTULO IV

Estudio de la situación actual de las terminales de contenedores españolas

IV.1. Introducción.

Con el fin de poder avanzar en el estudio de la capacidad de las terminales de contenedores, el primer paso a seguir fue analizar aquellas terminales que por su tamaño y características resultaban representativas del sistema portuario español.

Inicialmente se plantearon estudiar todas las terminales de contenedores de los puertos de: Algeciras, Barcelona, Bilbao, Castellón, Las Palmas y Valencia. Con el fin de llevar a cabo el primer contacto y la recopilación de la información de cada una de las terminales lo más uniformemente posible, se prepararon una serie de documentos:

- Una entrevista personal: destinada a comprender la propia terminal con el fin de poder explicar mejor los datos recopilados.
- Formulario: el objetivo de este era recopilar los datos básicos de la terminal.

- Documento Excel: se creó para que desde la terminal se implementaran todos aquellos datos sistemáticos y repetitivos relacionados con la línea de atraque. Por ejemplo, la fecha y la hora de la llegada de todos los buques que hacen escala en la terminal.

Toda la información requerida a las terminales se solicitó para los tres años anteriores a la solicitud, de manera que fuera ampliamente suficiente para caracterizar cada terminal. De esta manera, a las terminales entrevistadas en el marco del proyecto CEDEX-2006 se les solicitaron los datos de los años 2004, 2005 y 2006 puesto que cuando se inició el trabajo de campo era posible que las terminales no dispusieran todavía de los datos de 2007 completos. A las terminales entrevistadas en el marco del proyecto MASPORT se les solicitaron los datos de los años 2006, 2007 y 2008, siendo conscientes de la diferencia respecto de las terminales del proyecto anterior.

Puerto	Terminal
Algeciras	APM Terminals Algeciras
	Terminal de Contenedores de Algeciras
Barcelona	Terminal de Contenedors de Barcelona (TCB)
Bilbao	Abra Terminales Marítimas (ATM)
	Terminales Marítimas de Bilbao (TMB)
Las Palmas de Gran Canaria	Operaciones Portuarias de Canarias, S.A. (OPCSA)
Valencia	Marítima Valenciana, S.A. (MARVALSA)
	MSC Terminal Valencia
	TCV Stevedoring Company

Tabla IV-1: Terminales de contenedores analizadas

A pesar de haber conseguido contactar con la mayoría de las terminales propuestas, no fue posible conseguir la información de todas ellas. En algunos casos se negó la participación desde el principio y en otros casos, a pesar de haber empezado a elaborar los datos para posteriormente hacer su entrega,

ésta nunca se materializó. En cambio, a lo largo del trabajo de campo fue posible conseguir información de terminales que no se plantearon inicialmente.

Finalmente, las terminales que se pudieron estudiar fueron las indicadas en la Tabla IV-1. Nótese que gran parte de estas terminales se han visto afectadas por procesos de fusión y venta, por lo que ya no tienen las mismas denominaciones e incluso características que tenían en el momento del estudio. Sin embargo, esto no afecta al fin que tienen los resultados de su análisis en esta tesis.

A continuación se presentan las variables analizadas en base a los datos recopilados, separando aquellas que se pueden considerar como propias de la demanda de la terminal, de aquellas que se pueden considerar como propias de la oferta de la terminal.

VARIABLES PROPIAS DE LA DEMANDA DE LA TERMINAL:

1. Caracterización de las llegadas de los buques a la terminal, expresada como la función de densidad de la variable “intervalo de tiempo entre llegadas consecutivas” (horas). Es importante mencionar la falta de uniformidad existente entre los puertos a la hora de considerar el momento de llegada del buque al puerto. Mientras que en unos casos se considera la llegada en el momento en el que el buque pasa por una determinada sección de la bocana, en otros casos se considera la llegada en el momento en el que el práctico sube a la embarcación (u otros).
2. Caracterización de las esloras de los buques, expresada como la función de densidad de las esloras (metros) de los buques que hacen escala en el puerto.
3. Caracterización del volumen de carga movido por cada buque, para lo que se ha obtenido la función de densidad de la carga manipulada en cada buque (toneladas, TEUs, movimietos, UTIs).

VARIABLES PROPIAS DE LA OFERTA DE LA TERMINAL:

4. Caracterización de la duración del servicio de los buques en el muelle. En general las terminales consideran la duración del servicio como el periodo de tiempo entre el atraque y el desatraque, sin precisar la

definición exacta de estos dos instantes. En esta tesis se ha tratado de uniformizar al máximo a la hora de solicitar los datos, sin embargo sería poco acertado no reconocer la realidad. Como ya se ha indicado, se ha considerado que la duración del atraque es el periodo de tiempo que el atraque está disponible para un buque, es decir, desde que larga la primera amarra el buque que ocupaba anteriormente ese mismo espacio hasta que larga esa misma amarra el buque en cuestión (momento a partir del cual se considera que el atraque está a disposición del siguiente buque si es que lo hay, o en caso de que no lo haya se considera que el atraque está vacío). Por eso, de forma estricta, la duración del servicio que se introduzca en el programa de simulación desarrollado a la hora de simular un determinado muelle será la suma de esta duración del servicio más las maniobras de acceso, aproximación al amarre y desatraque.

Nótese que, aunque la duración del servicio se haya considerado como parte de la oferta, no está desvinculada de la demanda, pues el volumen de contenedores a manipular en cada embarcación es una cuestión de la demanda, aunque la “agilidad²³” con la que se trabaje dependa de la oferta.

5. Caracterización de los tiempos muertos, esto es, los tiempos inoperativos durante el periodo de atraque (anteriores y posteriores a la operación). Para ello, se ha obtenido la función de densidad de la duración de los tiempos muertos (horas).
6. Caracterización de las planchas unitarias, para lo que se ha obtenido la función de densidad del cociente entre la duración del atraque de un buque y la carga movida en ese periodo. Se ha obtenido la función de densidad de las planchas unitarias (min/TEU). Nótese que la plancha unitaria no es más que la inversa de la productividad.

Dado el recelo con el que las terminales tratan este tipo de datos pues su competitividad se refleja en algunos de ellos, y siendo que para los fines de esta tesis no es crucial vincular los resultados a cada terminal, se ha

²³ Esta “agilidad” es lo que se ha definido como productividad.

considerado necesario encubrir a qué terminal pertenece cada resultado. Solamente se ha indicado para cada terminal si se trata de una terminal pública o dedicada y el periodo de tiempo para el cual se han recogido datos (ver Tabla IV-2).

IDENTIFICACIÓN TERMINAL	TIPO DE TERMINAL	PERIODO DE RECOGIDA DE DATOS
A	Pública	Ene. 2006 – Jun. 2008
B	Dedicada	Sept. 2007 – Jun. 2009
C	Pública	Ene. 2005 – Dic. 2008
D	Pública	Ene. 2004 – Dic. 2006
E	Dedicada	Ene. 2007 – Dic. 2007
F	Pública	Ene. 2007 – Dic. 2007
G	Pública	Ene. 2001 – Jun. 2008
H	Pública	Ene. 2004 – Dic. 2006
I	Pública	Ene. 2004 – Dic. 2006

Tabla IV-2: Identificación de las terminales analizadas.

Como se puede apreciar, ha habido terminales de las que no se han conseguido datos de tres años consecutivos, sin embargo la cantidad de buques que han escalado en la terminal han sido suficientes como para que los datos conseguidos sean representativos.

IV.2. Problemas generales detectados.

Este apartado pretende poner de manifiesto todos los problemas encontrados tanto a la hora de recopilar la información, como a la hora de procesarla y dar conclusiones en base a ella.

En cuanto a la recopilación de datos, una de las barreras encontradas ha sido la reticencia inicial por parte de la mayoría de los gestores de las terminales a proporcionar los datos, pues no ven directamente las ventajas que podrían suponerles las conclusiones de este trabajo. Además, la competencia entre terminales hace que intenten evitar la salida a la luz de sus resultados.

Además, en muchos casos las terminales simplemente no disponían de la información requerida, o suponía un gran esfuerzo el procesado de datos. Un buen ejemplo de falta de información ha sido el caso de los datos de fondeo, que la mayoría de terminales desconocen. En la mayoría de los casos se ha intentado contactar con las Autoridades Portuarias para conseguir este dato, pero finalmente no se ha tenido éxito.

También es importante mencionar que algunas terminales no disponían de la información en el período de tiempo solicitado, por lo que finalmente se han conseguido datos de periodos dispares.

Otro problema encontrado ha sido que existen diferentes definiciones para un mismo concepto. Un ejemplo de ello es el concepto de “llegada”, cuyas posibles definiciones son:

- Momento en el que los prácticos toman el control del buque.
- Paso del buque por una determinada sección.
- Momento en el que se llega al atraque o al fondeadero, según si hay espera o no.

Otro ejemplo es el concepto de “atraque”, cuyas posibles definiciones son:

- Momento en el que empieza la maniobra de aproximación al atraque.
- Momento en el que acaba la maniobra de atraque y todos los cabos están atados.

En conexión con lo visto anteriormente, no sólo existen diversas definiciones para un mismo concepto, sino que también existen diversas unidades para medirlo. Por ejemplo, la carga acarreada por un buque puede medirse en movimientos, TEUs, contenedores, etc.

En cuanto al procesado de datos, cada terminal ha facilitado la información en unos formatos y soportes, lo que ha hecho que no se haya podido sistematizar

su tratamiento, sino que haya tenido que hacerse de manera diferenciada. En relación con la variabilidad de soportes, decir que en algunos casos la información se ha recogido en papel, por lo que su procesado ha resultado extremadamente tedioso.

Finalmente, en cuanto a los problemas detectados para obtener conclusiones, cabe decir que dado que los datos son pertenecientes a fechas e intervalos de tiempo diferentes, las comparaciones entre terminales se deben de tratar con cierta cautela. Además, los tamaños y características de las terminales son muy diversos, por lo que solamente pueden ser objeto de comparación aquellas terminales semejantes.

En algunos casos las terminales poseen muy pocas escalas al año y por lo tanto no se disponía de datos suficientes como para poder dar conclusiones.

Para finalizar con este apartado y en relación con la comparación entre las funciones de densidad resultantes y las funciones de densidad algebraicas, mencionar que la propia variabilidad natural de las funciones de distribución ha hecho que en algunos casos esa comparación no sea del todo clara.

IV.3. Resultados obtenidos.

En este apartado se presentan los resultados obtenidos para cada uno de los parámetros estudiados. Inicialmente se muestran los pertenecientes a la demanda por parte del buque y a continuación los pertenecientes a la oferta de la terminal. Mencionar que no se han incluido los resultados de todas las terminales en este punto, sino solamente las conclusiones obtenidas a partir de éstos. Los resultados completos se encuentran en el Anejo 2 del presente documento.

El procedimiento de análisis ha sido para todas las variables el mismo, se han obtenido los valores máximo, mínimo, así como el promedio y la desviación típica. Finalmente se ha obtenido un histograma con el fin de conocer la frecuencia de datos de cada clase. Una vez conseguido el histograma, se ha intentado asemejar a una función de densidad algebraica, siempre teniendo presente la propia variabilidad de los datos.

A la hora de obtener los histogramas, se ha intentado establecerse un criterio uniforme para determinar el número de clases, de manera que fuera el mismo

para cada terminal y cada variable. Sin embargo, se ha tenido que ajustar el criterio para cada caso, de otra manera resultaba complicado asemejar el histograma a una función de densidad algebraica.

Para intentar asemejar los histogramas a funciones de densidad algebraicas, inicialmente las mismas formas de los histograma han sido las que han sugerido la función a probar y finalmente los parámetros de la función han sido ajustados mediante la prueba chi-cuadrado.

IV.3.1. Parámetros de la demanda de servicios.

Como se ha citado anteriormente, las variables estudiadas para caracterizar la demanda de servicio son: las llegadas, las esloras y el volumen de mercancía movido por buque.

IV.3.1.1. Intervalo entre Llegadas.

En este punto se pretendía estudiar el intervalo de tiempo transcurrido entre dos llegadas consecutivas a puerto de aquellos buques que hacen escala en una determinada terminal. Para ello era imprescindible conocer los datos del momento de inicio de fondeo, en el caso de que este existiera, y del momento de entrada en puerto en el caso contrario.

La realidad ha sido que muy pocos puertos disponen de datos de fondeo y de llegada a puerto, de manera que en algunas terminales se ha tenido que recurrir al momento del atraque como aproximación a la llegada. Además, en los casos de existencia de datos de llegada a puerto, no existe una definición clara y uniforme para todos los puertos.

Los resultados de las 9 terminales analizadas han sido muy reveladores. Absolutamente en todos los casos los histogramas se asemejan a **funciones exponenciales** (Aguilar y Obrer-Marco 2008), eso sí, de muy diversos promedios (5,59h Terminal E; 23,62h Terminal H). A modo de ejemplo se muestra la Figura IV-1.

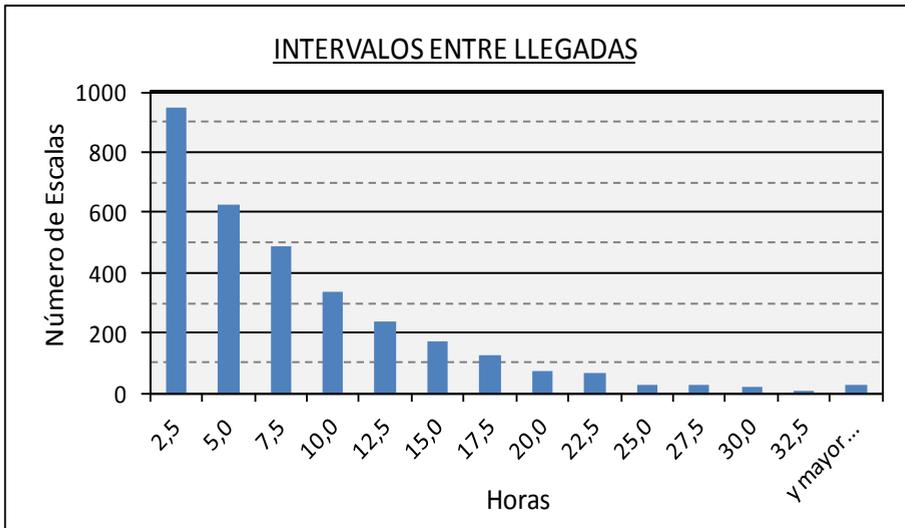


Figura IV-1: Llegadas: aproximación a función de densidad exponencial (Terminal D). Nº Escalas: 3.185

Mínimo	0,01 h
Máximo	69,33 h
Promedio	7,06 h
Desviación típica	6,85 h

Tabla IV-3: Estadística. Llegadas: aproximación a función de densidad exponencial.

IV.3.1.2. Esloras.

El estudio de las esloras en las terminales de contenedores mediante histogramas no ha permitido asemejar la forma a una función de densidad algebraica. En algunos casos parece que en los muelles atracan familias de buques de esloras similares, creando distribuciones triangulares superpuestas, como en la Figura IV-2. En otros casos se observan posibles distribuciones uniformes entre un valor mínimo y un valor máximo, como en la Figura IV-3.

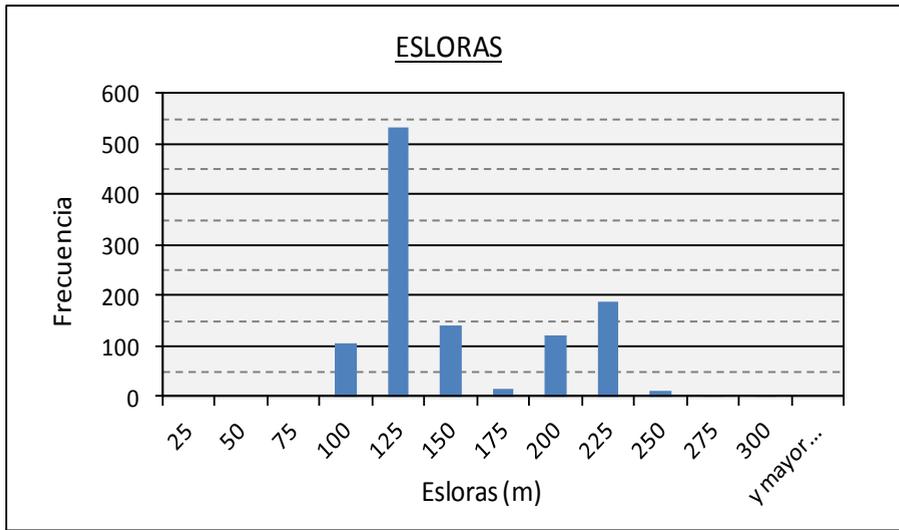


Figura IV-2: Esloras: distribuciones triangulares superpuestas (Terminal H). Nº Escalas: 1.115

Mínimo	85,00 m
Máximo	295,00 m
Promedio	138,85 m
Desviación típica	40,62 m

Tabla IV-4: Estadística. Esloras: distribuciones triangulares superpuestas.

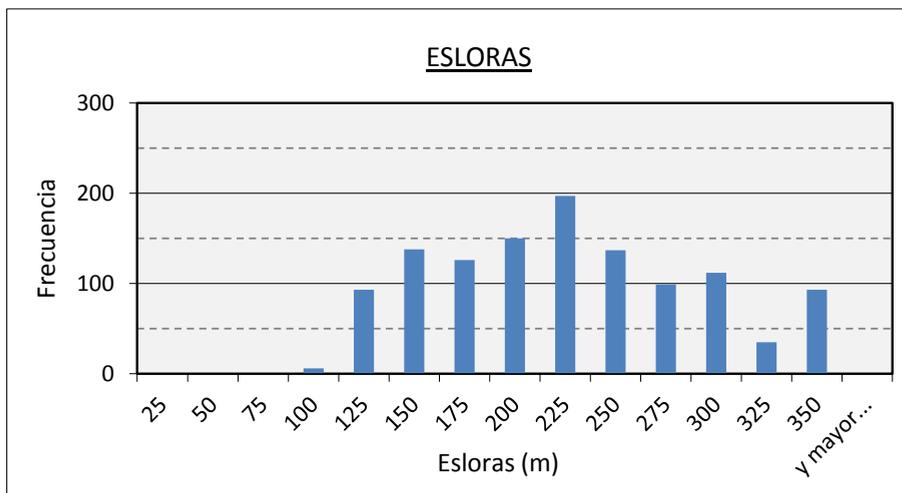


Figura IV-3: Esloras: distribuciones uniformes. Terminal A. Nº Escalas: 1.186

Mínimo	99,00 m
Máximo	349,00 m
Promedio	214,80 m
Desviación típica	64,77 m

Tabla IV-5: Estadística. Esloras: distribuciones uniformes.

IV.3.1.3. Volumen de carga.

La principal complicación para realizar el estudio del volumen de carga manipulado por buque ha sido que hay diferentes unidades de medida, como son los movimientos, los contenedores o los TEUs. Para uniformizar se ha analizado en cada terminal la relación entre estas unidades.

Así, se han obtenido histogramas semejantes a funciones de densidad Erlang K (ver Figura IV-4) y también funciones semejantes a funciones de densidad triangulares (ver Figura IV-5).

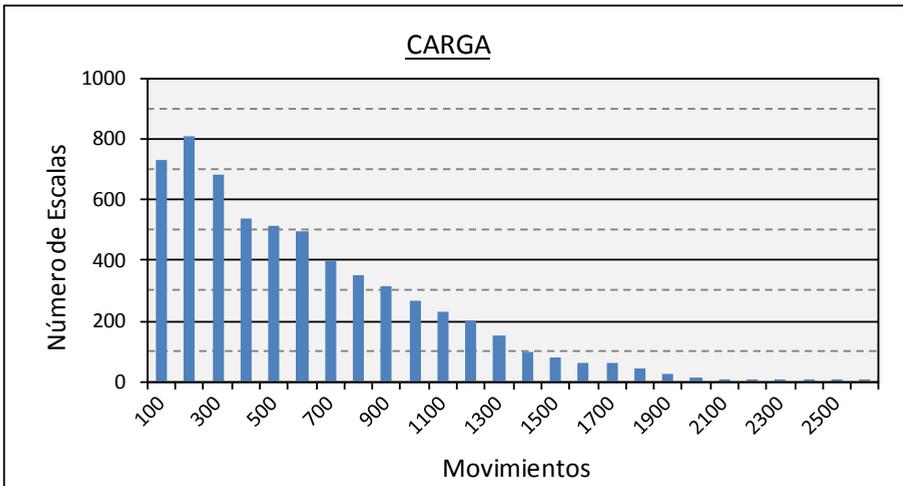


Figura IV-4: Carga: Tendencia a funciones de densidad Erlang K (Terminal G). N° Escalas: 6.102. Carga Total: 3.390 M movimientos

Mínimo	1 mov.
Máximo	3.401 mov.
Promedio	555 mov.
Desviación típica	443 mov.

Tabla IV-6: Estadística. Carga: Tendencia a funciones de densidad Erlang K.

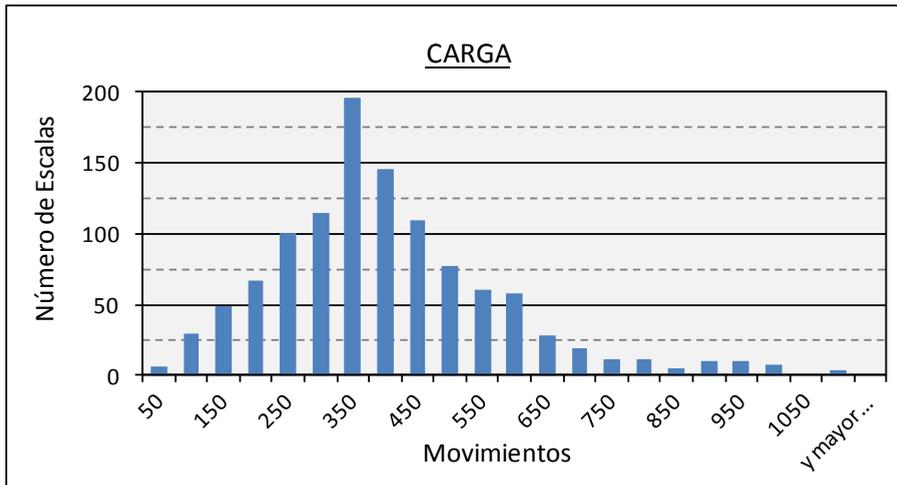


Figura IV-5: Carga: Tendencia a funciones de densidad triangulares (Terminal H). Nº Escalas: 1.120. Carga Total: 422.259 movimientos.

Mínimo	18 mov.
Máximo	1.098 mov.
Promedio	377 mov.
Desviación típica	178 mov.

Tabla IV-7: Estadística. Carga: Tendencia a funciones de densidad triangulares.

IV.3.2. Parámetros de la oferta de servicios.

Las variables estudiadas para caracterizar la oferta de servicio son: la duración del servicio; la duración de los tiempos muertos en puerto; y las planchas unitarias de los buques en cada escala.

IV.3.2.1. Duración de servicio.

A efectos de este análisis, se entiende como tal el periodo de tiempo transcurrido desde el momento del atraque hasta el momento del desatraque. A la hora de comparar los resultados entre las terminales, el problema que ha surgido ha sido que no existe un criterio único para definir el momento del atraque y/o del desatraque, sino que en unos casos es el momento en el que empieza la maniobra y en otros, es el momento en el que termina.

Todas las terminales han dado como resultado un histograma que se asemeja a una función de densidad Erlang k (Aguilar y Obrer-Marco 2008). Eso sí, el valor de la K de esas Erlang es diferente según el tipo de terminal. Se ha hecho un estudio basado en el test Chi-cuadrado para poder concluir cual es la K que mejor se ajusta a cada terminal. La Figura IV-6 y la Figura IV-7 muestran, a modo de ejemplo, un ajuste de los datos recogidos a una función de densidad Erlang para diferentes K y el valor residual obtenido después de aplicar el test Chi-cuadrado. Se ha representado el histograma de los valores observados junto con el histograma obtenido a partir de la función algebraica.

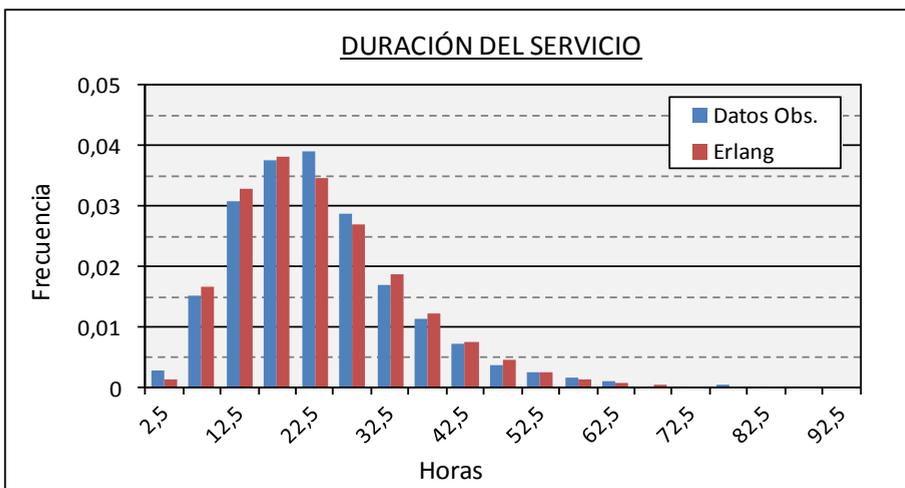


Figura IV-6: Ajuste de los datos observados de la duración del servicio a la función de densidad Erlang para $K = 4$ (Terminal G).

λ	0,042734
K	4
Chi2	0,002482

Tabla IV-8: Estadística del ajuste a la función Erlang K = 4.

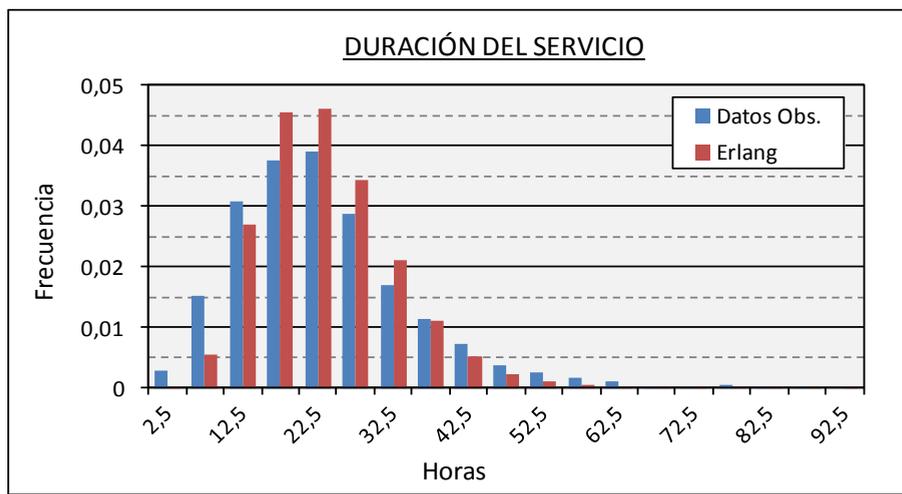


Figura IV-7: Ajuste de los datos observados de la duración del servicio a la función de densidad Erlang para K = 7 (Terminal G).

λ	0,042734
K	7
Chi2	0,240384

Tabla IV-9: Estadística del ajuste a la función Erlang K = 7.

La siguiente tabla recoge los valores de las K resultantes para cada terminal de contenedores después de haber aplicado el test Chi-cuadrado.

Terminal	Parámetro K
A	4
B	5
C	4
D	5
E	6
F	3

Terminal	Parámetro K
G	4
H	6
I	3

Tabla IV-10: Valores de la variable K en los ajustes de las duraciones de servicio a funciones Erlang K para las distintas terminales estudiadas.

IV.3.2.2. Duración de tiempos muertos.

Se define como la duración de tiempos muertos la suma de dos periodos: el periodo inoperativo entre que el buque está en disposición de ser operado (amarre del último cabo) y el inicio de las operaciones; y entre que se finalizan las operaciones y se desamarra el último cabo.

Solamente se ha podido realizar este estudio en algunas terminales, pues en la mayoría de ellas no ha sido posible recopilar la información necesaria. Así, las terminales estudiadas han sido: A, B, C, G y H.

En la mayoría de las terminales la función algebraica que más se adapta a los datos vuelve a ser la Erlang, aunque en este caso el valor de K coincide en 2. Es importante remarcar que, aunque en unas terminales el ajuste es bueno, en otras no lo es tanto (aun así, la función que más se ajusta es la Erlang).

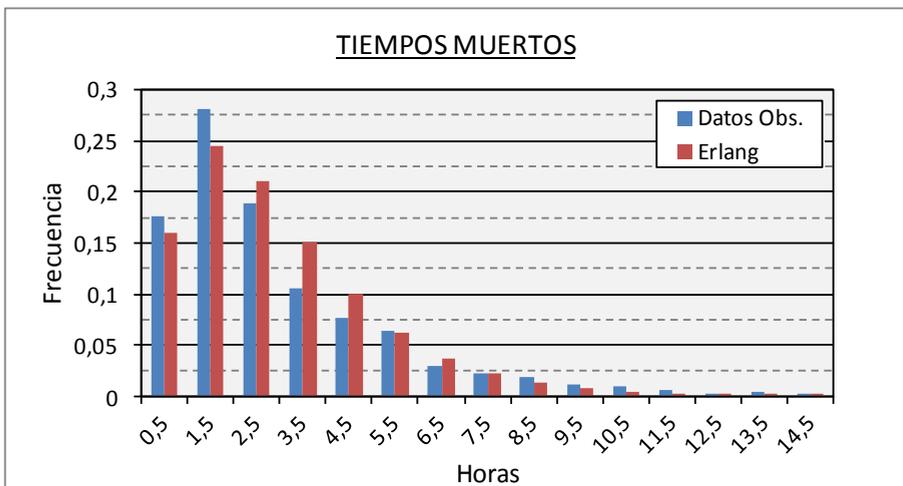


Figura IV-8: Ajuste de los datos observados de la duración de tiempos muertos a la función de densidad Erlang 2 (Terminal C).

Mínimo	0,25 h
Máximo	39,83 h
Promedio	3,43 h
Desv. Típica	3,87 h
Chi2	0,09267

Tabla IV-11: Estadística del ajuste a la función Erlang $K = 2$.

Es importante remarcar la amplitud de los datos, a diferencia de lo que se podría pensar al ser unos tiempos que en principio no deberían de depender ni del volumen de carga, ni de la eslora (por pensar en algunas variables).

Se podría pensar que hay una correlación entre la duración de tiempos muertos y la ocupación del muelle, de manera que esos tiempos muertos podrían ser menores cuando la ocupación es mayor con el fin de minimizar la estancia de los buques en el atraque cuando hay mucha demanda de servicio. Esto es, el inicio de las operaciones se aproximaría al momento del atraque y el fin de las operaciones al momento del desatraque.

A continuación se presentan dos gráficos en los que se demuestra que no es como a priori se podría pensar, y que los tiempos muertos son independientes de la ocupación del atraque. Para la realización de estos gráficos, se ha calculado para cada buque los metros de muelle ocupados por todos los buques que han coincidido atracados (considerando un resguardo del 15%) siempre en proporción al tiempo que ha durado esa ocupación, dado que puede cambiar durante la duración de atraque de cada buque (ocupación del muelle media ponderada).

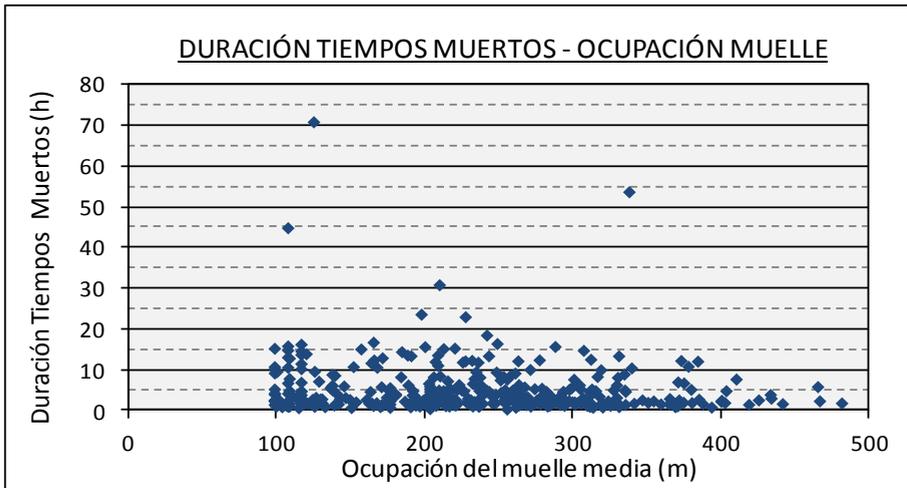


Figura IV-9: Relación entre los tiempos muertos y la longitud de muelle ocupada en el momento del atraque de cada buque (Terminal H).

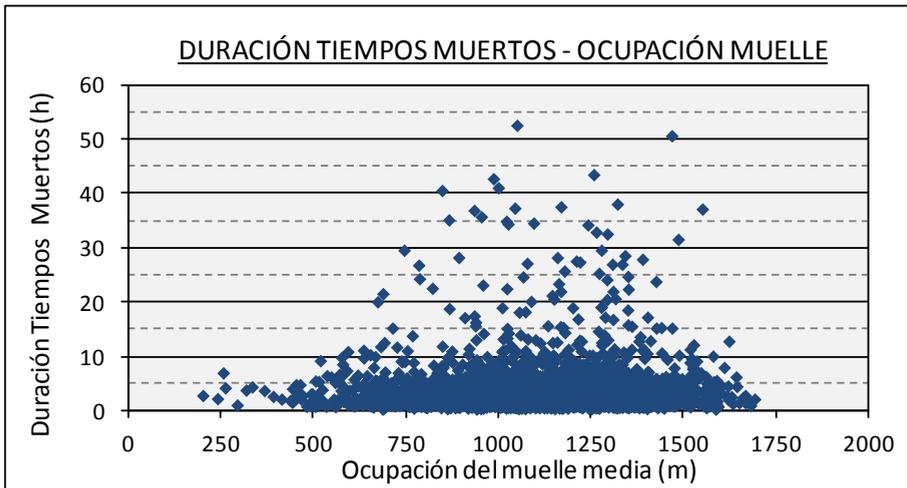


Figura IV-10: Relación entre los tiempos muertos y la longitud de muelle ocupada en el momento del atraque de cada buque (Terminal A).

IV.3.2.3. Planchas unitarias.

Se entiende por plancha unitaria el cociente entre la estancia en puerto de un buque y el volumen de carga que se va a manipular. El periodo de estancia en el puerto incluye un posible periodo de espera asociado a situaciones de crisis de la terminal y un periodo de actividad. Así, para tener una idea real de la

situación de la terminal se hubiera tenido que calcular por un lado el cociente de estancia en puerto de cada buque dividido por la carga, y por otro, el cociente de la duración de atraque y la carga.

Dado que no se dispone de los datos de espera en muchas terminales, solamente se ha decidido estudiar la duración de atraque en relación a la carga manipulada, un parámetro al que se le ha denominado *plancha efectiva unitaria*, aunque de aquí en adelante se hablará indistintamente de una o de otra, pero siempre haciendo referencia a la *plancha efectiva unitaria*.

Al igual que en el análisis de la carga, en algunos casos ha resultado difícil la comparación entre terminales de la misma tipología debido a la diversidad en las unidades de la información recopilada (se ha calculado bien como min/TEU, o bien como min/movimiento).

Los histogramas resultantes se distribuyen claramente como funciones de densidad Erlang en todos los casos estudiados. Estos resultados implican que el tiempo empleado en manipular una unidad de carga en cada barco no es puramente aleatorio, sino que tiene cierto grado de certidumbre (mayor o menor en función del valor de la K en cada caso). Como ejemplo se presenta el caso de la terminal H y la terminal B.

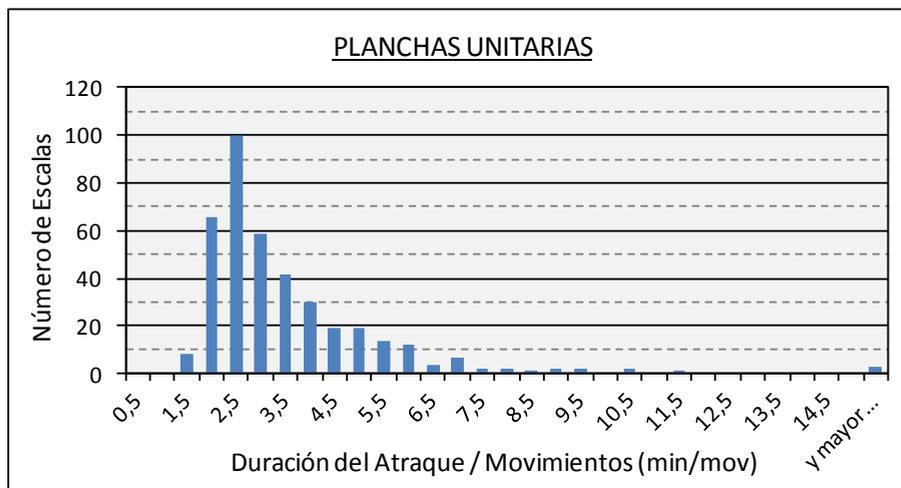


Figura IV-11: Planchas unitarias: tendencia a distribución Erlang K (Terminal H).

Mínimo	1,2 min/mov
Máximo	41,4 min/mov
Promedio	3,4 min/mov
Desviación típica	2,9 min/mov

Tabla IV-12: Estadística. Planchas unitarias: tendencia a distribución Erlang k (Terminal H).

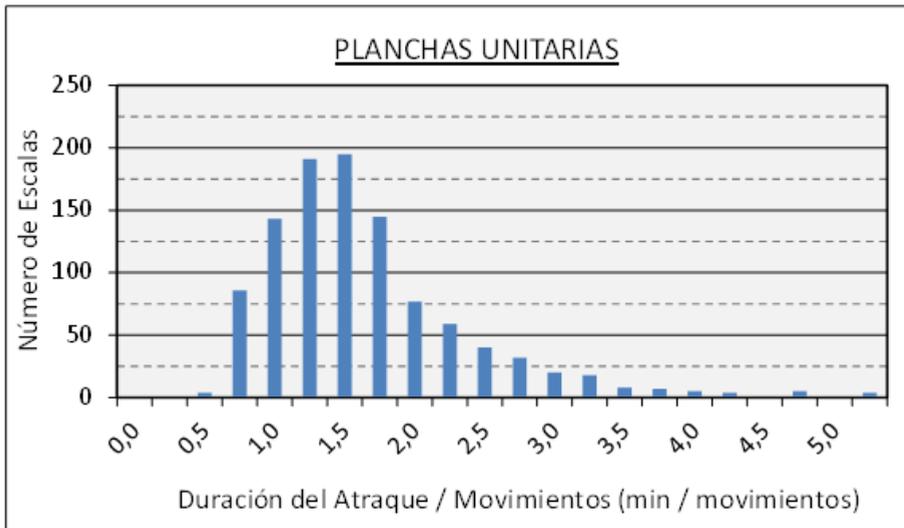


Figura IV-12: Planchas unitarias: tendencia a distribución Erlang K (Terminal B).

Mínimo	0,4 min/mov
Máximo	8,04 min/mov
Promedio	1,54 min/mov
Desviación típica	0,78 min/mov

Tabla IV-13: Estadística. Planchas unitarias: tendencia a distribución Erlang k (Terminal B).

IV.4. Conclusiones.

Para finalizar el estudio de la situación actual de las terminales de contenedores españolas y a la vista de todos los resultados presentados en los puntos precedentes, cabe destacar que el intervalo entre **llegadas** consecutivas a las terminales estudiadas se distribuye como una función de densidad **exponencial**.

En relación con las esloras de los buques que hacen escala, no se aprecia ninguna tendencia clara a una función de densidad algebraica, podrían intuirse tendencias hacia distribuciones uniformes o triangulares superpuestas. Tampoco se observa una tendencia clara en el caso del volumen de carga manipulado por los buques, aunque algunas pueden ser similares a funciones de densidad Erlang o triangulares.

En cuanto a la **duración del servicio** entendido como el tiempo total de atraque de los buques, se puede concluir con toda certeza que se distribuyen según una función de densidad **Erlang**.

Los tiempos muertos, tienen una variabilidad elevada en relación con los resultados que a priori se esperaban, ya que se podría pensar que dado que no dependen del volumen de mercancía manipulada en cada buque, la tendencia debiera ser que todas las escalas tuviesen valores similares. Los resultados no han sido estos. Además, los tiempos muertos son independientes de la ocupación del muelle en cada momento.

Finalmente, las planchas unitarias se distribuyen como funciones de densidad Erlang en las terminales españolas. Ello implica que existe cierta certidumbre en la productividad de carga/descarga de los buques, en mayor o menor medida dependiendo de la K de la función Erlang en cada caso.

IV.5. Relaciones entre parámetros.

En este apartado se pretenden analizar las relaciones existentes entre algunos de los parámetros estudiados anteriormente, y de estos con otros parámetros que resultan claves en las terminales, como es la productividad o la relación TEU-movimiento.

IV.5.1. Volumen de Carga – Esloras.

Con el fin de estudiar si existe alguna relación entre la carga movida por los buques y su eslora, se ha representado en ordenadas el volumen de carga y en abscisas la eslora de todos los buques que hacen escala en las terminales.

A modo de ejemplo se muestran en la Figura IV-13, la Figura IV-14 y la Figura IV-15 los resultados de las terminales B, E, e I respectivamente. Como se puede apreciar, para una eslora concreta, la variabilidad de cargamento es elevada,

pero como es lógico, dicha variabilidad aumenta a medida que la eslora (y por lo tanto el tamaño del buque) crece (en el caso de la terminal I como en otras, a partir de una eslora determinada, se produce una reducción de dicha variabilidad).

Así, a nivel global, se generan dos envoltentes, una de cargas máximas y otra de cargas mínimas. Se ha podido comprobar que la de cargas máximas, en la mayoría de casos tiene cierta tendencia a una recta, aunque de diferentes pendientes.

En ambas figuras se observa el hecho de que se presenten familias de buques de igual eslora, haciendo que no haya continuidad en estas.

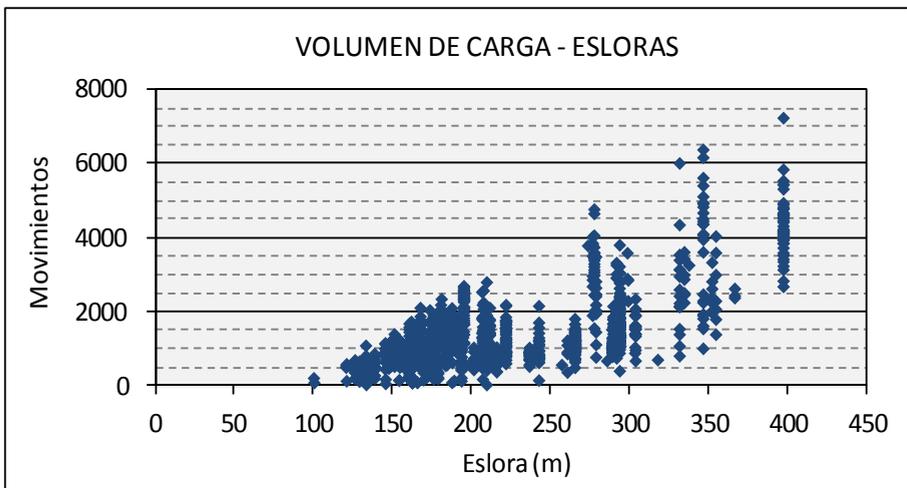


Figura IV-13: Relación entre la eslora de cada buque y el volumen de carga movido (Terminal E).

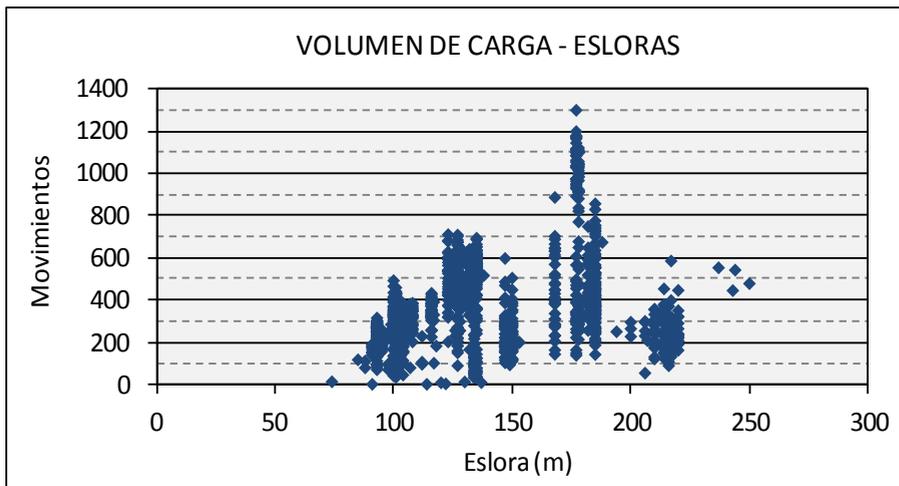


Figura IV-14: Relación entre la eslora de cada buque y el volumen de carga movido (Terminal I).

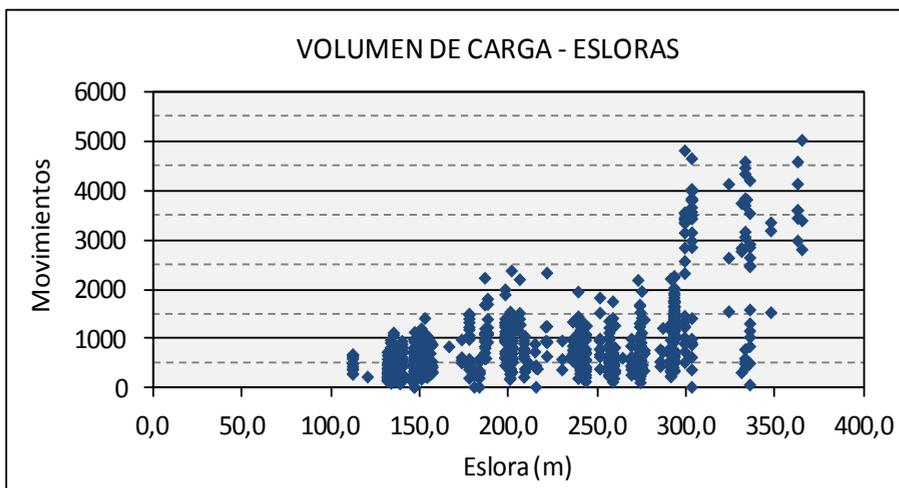


Figura IV-15: Relación entre la eslora de cada buque y el volumen de carga movido (Terminal B).

IV.5.2. Duración del Servicio – Eslora

Con este análisis se pretende ver cómo evolucionan las duraciones de servicio a medida que crecen las esloras de los buques.

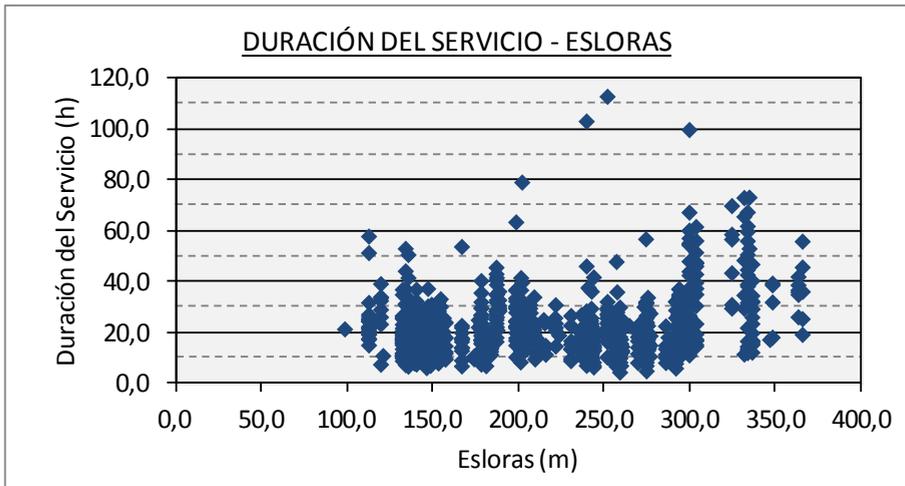


Figura IV-16: Relación entre la duración del servicio y la eslora (Terminal B).

Como se aprecia en la Figura IV-16, a medida que aumenta la eslora, la variabilidad de la duración del servicio crece dado que la duración del servicio máxima crece. Ahora bien, para duraciones de servicio entre 3h y 40h hay tanto esloras pequeñas (alrededor de 120m) hasta esloras grandes (más de 300m).

IV.5.3. Duración del Servicio – Volumen de carga movida.

El objetivo de este apartado es estudiar la relación existente entre la duración del servicio y el volumen de carga de la operación a realizar. Como ejemplo, se muestran los resultados de la terminal B y terminal E.

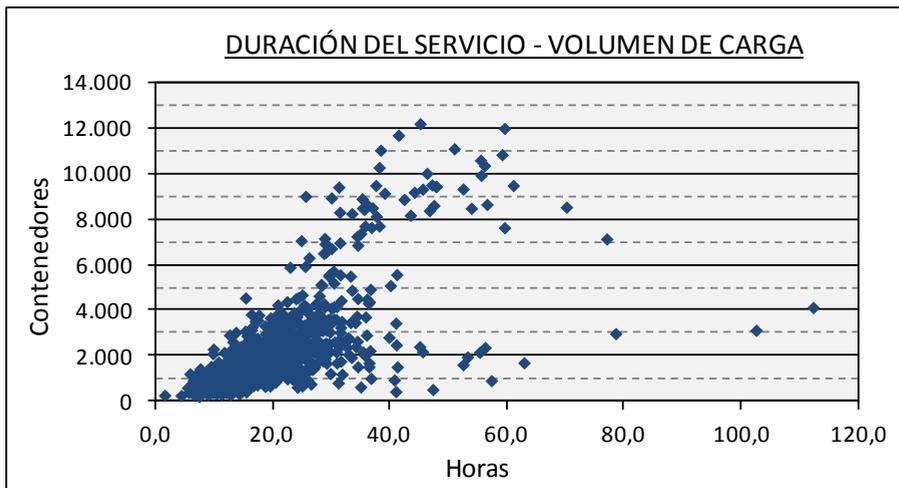


Figura IV-17: Relación entre la duración del servicio y el volumen de carga movido (Terminal B).

Como se puede apreciar, para una duración de servicio concreta, existe mucha variabilidad de carga movida. Inicialmente dicha variabilidad crece con la duración de servicio, pues es lógico que para duraciones muy pequeñas, la cantidad máxima a mover sea cercana a cero, y que poco a poco vaya creciendo. Sin embargo el valor mínimo no crece de igual forma y existen buques con carga nula, pero duración de atraque elevada. Esto significa que existen buques que quedan atracados en el muelle mucho tiempo para no hacer prácticamente ningún movimiento. Este puede ser el caso de buques que van a proveerse de vituallas o a realizar cualquier otro tipo de gestión y que dado que en el momento del atraque no existen necesidades de utilización del muelle por parte de otros buques (situación de no congestión), pueden permanecer atracados.

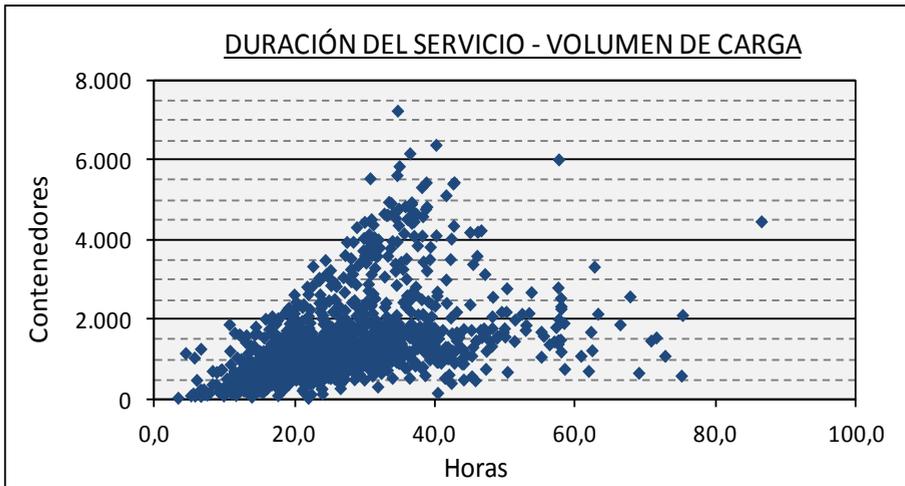


Figura IV-18: Relación entre la duración de servicio y el volumen de carga movido (Terminal E).

Nótese que ningún buque está atracado menos de 4 o 5 horas y que es a partir de ese momento cuando empieza a crecer la máxima carga movida para una duración concreta.

IV.5.4. Productividad – Volumen de carga movida.

El objetivo del estudio de esta relación no es más que conocer si la productividad de los buques en el atraque aumenta o disminuye con la carga a mover. A priori se puede intuir que en general los buques de mayor carga son los de mayor eslora, y es con estos buques donde será posible trabajar con mayor número de grúas. Así, se podría pensar que la productividad del puesto de atraque aumentará con la carga.

A modo de ejemplo, en la Figura IV-19 queda reflejada la productividad (relación de la carga movida dividida entre la duración del servicio) en función de la duración del atraque.

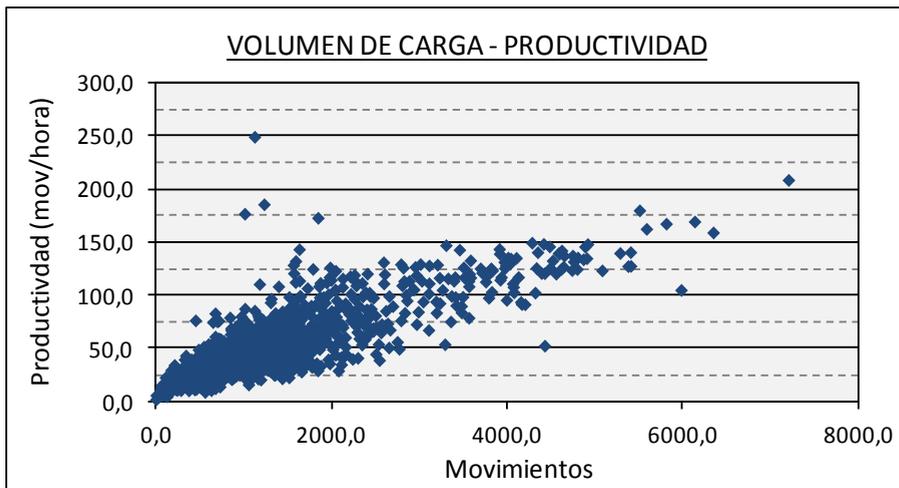


Figura IV-19: Relación entre la productividad y el volumen de carga movido (Terminal E).

Se aprecia como la productividad aumenta cuando lo hacen los movimientos, pero existe una gran variabilidad en ésta fijada la operativa (Aguilar y Obrer-Marco 2011).

IV.5.5. Relación TEUs – Contenedores.

Los tráfico marítimos, a diferencia de los continentales, se caracterizan por que la práctica totalidad de los contenedores son de 20' o de 40', esto es, de 1 o 2 TEUs respectivamente. Las grúas de muelle están preparadas para poder manipular ambos tipos de contenedores, incluso algunas de ellas permiten manipular dos contenedores de 20' simultáneamente (*spreader* tipo *twin-lift*). El objetivo de este análisis es conocer cuál es la relación entre la cantidad de contenedores y la cantidad de TEUs manipulados en los buques que hacen escala en las terminales.

Dado que no se dispone de la operación realizada por cada buque en TEUs y en contenedores en todas las terminales, solamente se ha podido analizar la relación buscada en las terminales: B, E, F, G, H e I.

Los resultados de la relación entre ambos se representan en la Tabla IV-14.

	E	F	H	I	G	B
TEUs / cont	1,508	1,481	1,571	1,535	1,402	1,394

Tabla IV-14: Relación entre TEUs y contenedores movidos.

Es importante tener cierta cautela a la hora de comparar los datos arrojados por el análisis puesto que los datos empleados para su obtención pertenecen a fechas diferentes como se puede deducir de la Tabla IV-2.

Por lo tanto, a la vista de los resultados, se puede concluir que en las terminales de contenedores españolas la relación **TEUs – Contenedores** manipulados en la línea de atraque se aproxima a **1,5 TEUs/contenedor**.

CAPÍTULO V

Adaptación de la definición de capacidad al caso continuo

V.1. Introducción.

En el apartado correspondiente a la definición de la capacidad del estado del arte se ha hecho un repaso a las diferentes definiciones que los estudiosos de este tema han dado a lo largo del tiempo. En este apartado se va establecer una definición de partida basada en las anteriores y se va a avanzar hacia una definición que considere que el muelle de las terminales de contenedores modernas se explota de manera continua.

Como se indicó en el estado del arte, la capacidad del muelle puede definirse como el tráfico límite que éste admite para una determinada calidad de servicio ofrecida a los clientes, esto es los navieros. Los navieros perciben la calidad del servicio a través del tiempo total de estancia en puerto en relación con el volumen a manipular en dicha terminal. Así, tal y como se dedujo en el estado del arte, esa calidad queda representada por dos indicadores fundamentales, la productividad del buque atracado (P) y la espera relativa (ϵ_r).

De entre estos dos parámetros, el que tradicionalmente se ha venido utilizando es ϵ_r , pero nótese que si la *duración del servicio* de los buques es muy elevada en relación con la carga que mueve, el indicador estaría reflejando un buen

funcionamiento de la terminal (al dar una espera relativa baja para ese caso), mientras que sería todo lo contrario. Por ello, se ha tomado como indicador la *espera relativa*, pero condicionada a que la *productividad del buque* sea elevada (o lo suficientemente elevada dadas las circunstancias de la terminal y de los clientes).

Nótese que, para que sea posible considerar que el tráfico límite define la capacidad, la productividad del subsistema de carga/descarga y la ocupación del muelle deben ser razonablemente elevadas. Esto es, en ninguna de las siguientes dos situaciones es lógico considerar el tráfico límite como la capacidad del muelle:

- el muelle se caracteriza por una ocupación elevada a causa de la improductividad del subsistema de carga y descarga.
- el subsistema de carga y descarga es productivo, pero el muelle está prácticamente vacío.

Por lo tanto, partiendo de que la ocupación del muelle es razonablemente elevada y que el subsistema de carga y descarga es eficiente, se entiende como capacidad de la línea de atraque el tráfico que ésta soporta cuando llevando al límite una combinación de las variables que la definen hasta que un determinado estimador alcance su valor límite ($\epsilon_r=0,1$).

La formulación tradicionalmente empleada para calcular el tráfico del muelle viene representada en la expresión (7), donde P aparece directamente y ϵ_r aparece a través de la tasa de ocupación (ϕ). La expresión (7) proporciona la capacidad del muelle cuando ϕ es la asociada a una espera relativa igual a 0,1. Esta formulación implica que el muelle está explotado de manera discreta y por tanto formado por un número de atraques determinado.

Como se vio en el estado del arte, la relación $\phi - \epsilon_r$ solamente se puede obtener mediante soluciones analíticas exactas en dos casos: llegadas y duraciones de servicios aleatorios (para cualquier número de atraques); y llegadas o duraciones de servicios aleatorios y un atraque.

Fruto de los análisis desarrollados en el trabajo de esta tesis, se ha concluido que en las terminales de contenedores españolas, aunque las llegadas sí se distribuyen según funciones exponenciales, las duraciones de servicios se

distribuyen según funciones Erlang K, donde K varía entre 3 (para terminales con pocas escalas) y 6 aunque en prácticamente el 80% de las terminales estudiadas K se encuentra entre 4 y 6.

Al no ser las duraciones de servicio aleatorias, solamente habría solución analítica exacta si el muelle estuviera compuesto de un atraque. Evidentemente, este no es el caso de las terminales estudiadas. Como conclusión, la única forma de conocer la relación $\phi - \varepsilon_r$ es aplicando técnicas de simulación de Montecarlo. Para ello, en esta investigación y bajo la dirección del Director de esta tesis, se desarrolló un programa de simulación capaz de desarrollar resolver el problema planteado (ver capítulo de aplicación de las herramientas de simulación).

Pero la gran limitación de esta formulación está en la asunción de que el muelle se explota de manera continua. Todas las terminales de contenedores estudiadas se explotan de manera continua, de manera que en función de las esloras de los buques que en cada momento escalan en la terminal, el número de buques atracados (y por tanto el “número de atraques del muelle”) varía. Como se vio en el estado del arte, ha venido siendo habitual hacer una traslación entre el muelle continuo y el discreto para poder aplicar la expresión (7), con los problemas que supone que el número de atraques equivalentes (N_{equiv}) no sea entero.

Por ello, en esta investigación se propone una nueva formulación más acercada a la explotación real de las terminales de contenedores actuales, esto es una formulación que conciba el muelle de manera continua.

V.2. Nueva formulación de la capacidad – muelle continuo.

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

$$T = L \cdot \Phi_L \cdot P_L \cdot H_{año} \quad (10)$$

Donde:

- T: es el *tráfico* que discurre por el muelle a lo largo de un año (TEUs/año, contenedores/año o movimientos/año),

- L: es la longitud del muelle (m),
- ϕ_L : es la *tasa de ocupación del muelle explotado de manera continua*,
- P_L : es la *productividad del muelle* (TEUs/(h·m), contenedores/(h·m) o movimientos/(h·m)),
- $H_{\text{año}}$: es el número de horas operativas del muelle al año (h/año).

Comparando las expresiones (7) y (10), se puede constatar la similitud y equivalencia entre sus variables. Así, el *número de atraques* (N) y la *longitud del muelle* (L) representan la dimensión del muelle, N de forma discreta y L de forma continua. La *productividad del atraque* (o del buque) (P) y la *productividad del muelle* (P_L) representan el volumen manipulado por unidad de tiempo y unidad de atraque o unidad de longitud de muelle respectivamente.

Contrariamente, aunque aparentemente la *tasa de ocupación del muelle explotado de manera discreta* (ϕ) y la *tasa de ocupación del muelle explotado de manera continua* (ϕ_L) sean equivalentes, existe una diferencia fundamental en su definición y en la manera de estimarlas. Como consecuencia, la comparación entre ϕ y ϕ_L ha de hacerse con extrema cautela.

V.3. Diferencia conceptual entre ϕ y ϕ_L .

En este apartado se hace una comparación entre la definición de la tasa de ocupación del muelle explotado de manera discreta (ϕ), o lo que es lo mismo, la tasa de ocupación de los puestos de atraque, y la tasa de ocupación del muelle explotado de manera continua (ϕ_L).

Para ello, se va a recurrir al muelle de la terminal de MSC del Puerto de Valencia. Si se pretendiera calcular el valor de ϕ durante un periodo de tiempo T, sería necesario conocer la proporción entre el periodo de tiempo en el que los puestos de atraque están ocupados y el periodo de tiempo en el que los puestos están disponibles para que los buques atraquen. Así, para calcular ϕ no se tiene en cuenta el hecho de que los buques ocupen enteramente los puestos de atraque o no, simplemente se considera si hay o no buques atracados en los puestos de atraque.

Para ilustrar este hecho, compárense las dos situaciones representadas en la Figura V-1. Partiendo de la hipótesis de que los buques quedan atracados un mismo periodo T , el valor de ϕ sería idéntico en las dos situaciones e igual a uno, puesto que los navíos han ocupado los puestos durante todo el periodo T . Sin embargo, la realidad de las dos situaciones es bien diferente. 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 ϕ . Una formulación posible para estimar ϕ es la representada en la ecuación (11).

$$\phi = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N \frac{t_i}{T_i} \quad (11)$$

Donde:

- ϕ : es la tasa de ocupación del muelle o de los puestos de atraque,
- i : es el contador de los puestos de atraque,
- N : es el número de puestos de atraque,
- t_i : es el periodo de tiempo en el que el puesto i está ocupado,
- T_i : es el periodo de tiempo en el que el puesto i está disponible para ser ocupado.



Figura V-1: Representación de dos situaciones diferentes cuyo valor de ϕ es idéntico.



Figura V-2: Representación de dos situaciones diferentes donde ϕ_L tiene un valor diferente.

La Figura V-2 muestra dos situaciones donde las esloras de los buques son exactamente las mismas que en la Figura V-1. Sin embargo, al estar el muelle conceptualizado como una línea continua en lugar de dos puestos de atraque, y calcular la tasa de ocupación de manera continua, es necesario considerar exclusivamente los metros ocupados por los buques, es decir, es necesario considerar exclusivamente las esloras de los buques.

Por tanto, aunque los dos buques permanecieran atracados durante el mismo periodo T en las dos situaciones de la Figura V-2, el valor de ϕ_L será mayor en la situación de la derecha. Esto es así porque el número de metros realmente ocupados en la situación de la derecha es mayor.

La formulación que se propone para calcular ϕ_L es la correspondiente a la expresión.

$$\phi_L = \frac{1}{L \cdot T} \cdot \sum_{j=1}^B L_{Buque,j} \cdot K_S \cdot D_{S,j} \quad (12)$$

Donde:

- ϕ_L : es la tasa de ocupación del muelle explotado de manera continua,
- j: es el contador de buques que son atracados en el muelle,
- B: es el número de buques que hacen escala en la terminal,
- $L_{Buque,j}$: eslora del buque j,
- K_S : es un coeficiente de seguridad que garantiza el resguardo entre buques,
- $D_{S,j}$: duración de servicio del buque j,

- L: es la longitud del muelle,
- T: es el periodo de tiempo en el que el muelle está disponible para albergar buques (se supone que es igual en toda su longitud).

Entonces, la relación $\varepsilon_r\phi$ se calcula independientemente de las esloras de los buques atracados, mientras que, la relación $\varepsilon_r\phi_L$ únicamente considera los metros ocupados por los buques aplicados por un coeficiente de seguridad (K_S). Este coeficiente de seguridad suele estar entre un 10% y un 15% de la eslora del buque²⁴.

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

Ahora bien, para poder conocer ϕ_L y aplicar la expresión (10) es igualmente necesario conocer la relación entre la espera relativa y la tasa de ocupación, en este caso $\varepsilon_r\phi_L$. Esta relación solamente es posible obtenerla mediante técnicas de simulación que representen el comportamiento del muelle a nivel general. No hay que olvidar que no se trata de resolver un problema concreto de una terminal concreta, sino que se pretende resolver un problema a nivel global. Sin embargo, como se verá en el apartado perteneciente a la aplicación de las herramientas de simulación, es necesario conocer el comportamiento global del muelle, pues hay ciertas pautas de explotación que van a afectar.

²⁴ La ROM 2.0-11 en su tabla 3.2.1.5 propone los resguardos en planta recomendados en la línea de atraque en función del diseño en planta del muelle, la tipología estructural del muelle y las esloras de los buques.

CAPÍTULO VI

Aplicación de las herramientas de simulación

Tal y como se ha introducido en el apartado de la definición de la capacidad, el desarrollo de herramientas de simulación ha sido necesario por dos motivos:

1. Cuando se ha tratado de estudiar los muelles de manera discreta, se ha visto que no es posible aplicar teoría de colas puesto que todas las terminales de contenedores españolas han arrojado unos resultados bien claros en cuanto a la función que mejor se ajusta a la duración del servicio: Erlang K. En este caso, para conocer la relación $\epsilon_r-\phi$ es necesario recurrir a herramientas de simulación
2. Para poder estudiar el comportamiento del muelle explotado de manera continua, y por lo tanto entre otros la relación $\epsilon_r-\phi_L$, es necesario recurrir a herramientas de simulación que sean capaces de reflejar ese comportamiento de los muelles.

Así, mediante la herramienta de Visual Studio se ha desarrollado una herramienta de simulación que es capaz de simular el muelle de manera discreta y continua. A continuación se profundiza en dicha herramienta.

VI. 1. Descripción de la herramienta desarrollada

Tanto en modo discreto como en modo continuo, el programa trabaja con fechas y hora reales. Así, inicialmente se elige una fecha de inicio de la simulación y un número de días de simulación. Los resultados, como pueden ser las llegadas y salidas al puerto, al atraque, y otros, se presentan siempre en formato fecha-hora.

La introducción de datos al programa está estructurada en 3 niveles:

1. Datos relacionados con la oferta del servicio: son los datos que tienen que ver con la forma en la que se explota el muelle y sus características.
2. Datos relacionados con la demanda del servicio: son los datos relacionados con los buques que hacen escala en la terminal. En función de si la oferta del servicio se plantea de forma discreta o continua, los datos introducidos en este nivel son utilizados por el programa o no (ejemplo, las esloras de los buques).
3. Datos de ejecución de la simulación: en este nivel se introducen los datos como pueden ser el número de iteraciones (o ciclos de repetición) solicitadas o el periodo de tiempo que reflejará la simulación.



Figura VI-1: Pantalla de inicio del programa de simulación desarrollado.

VI.1.1. Datos relacionados con la oferta del servicio

En cuanto a la oferta del servicio el programa de simulación se ha preparado para que considere los siguientes grados de libertad:

1. Disciplina de la cola
2. Forma de explotación del atraque:
 - a. Explotación discreta:
 - i. Número de atraques.
 - b. Explotación continua:
 - i. Longitud del muelle
 - ii. Lógica de asignación del muelle
 - iii. Resguardo de seguridad de los buques

Para cada simulación se puede indicar los nombres del puerto y del muelle (o terminal) que se está simulando.

The screenshot shows a configuration window titled "Puerto". It includes the following elements:

- Input fields for "Nombre del puerto:" (Valencia) and "Nombre del muelle:" (Noatum-2014).
- A section "Datos de explotación del muelle" with a dropdown for "Disciplina de cola:" (F.I.F.O.).
- Two radio buttons: "Explot. por atraques equivalentes (atraques discretos)" (selected) and "Explot. por ml de atraque (atraques continuos)".
- Two tabs: "Atraques discretos" (selected) and "Atraques continuos".
- Under the "Atraques discretos" tab, a label "Nº de atraques:" with a spinner box set to "4".
- A section "Precisión del reloj de llegadas" with a label "Precisión (min)" and a spinner box set to "0".
- Buttons for "Aceptar" and "Cancelar" at the bottom right.

Figura VI-2: Pantalla de introducción de datos relacionados con la oferta del servicio (explotación discreta).

A continuación se profundiza en cada uno de estos grados de libertad.

VI.1.1.1. Disciplina de cola.

Cuando un buque llegue a puerto y no pueda acceder al atraque por no haber en este, automáticamente se pondrá en cola (ver descripción del muelle como sistema de espera en estado del arte). Es muy importante remarcar que el hecho de que un buque no quepa en un muelle explotado de manera discreta es conceptualmente diferente de que no quepa en un muelle explotado de manera continua. En caso de que el muelle se explote de forma discreta, un buque entrará en cola cuando todos los puestos de atraque estén ocupados (con independencia del tamaño del buque que ocupa ese puesto). En caso contrario, un buque entrará en cola si no cabe en el espacio disponible de la línea de atraque (o porque ya haya buques en cola si la gestión es FIFO)). En cola los buques esperan a poder ser atendidos por la terminal, lo cual solamente podrá ocurrir cuando alguno de los buques atracados abandone el muelle (esta es condición necesaria, pero no suficiente, como se verá a continuación).

La disciplina de la cola hace referencia al orden en el que los elementos de la cola la abandonan para ser atendidos. Este orden puede ser muy diverso como se reflejó en el estado del arte (FIFO, LIFO, SIRO, etc).

Teniendo presente que el objetivo de esta tesis no es estudiar el caso concreto de una terminal, sino obtener conclusiones lo más globales posible, en el desarrollo de este trabajo se ha asumido que las colas se gestionan de manera FIFO. Se es consciente de que muchas de las terminales de contenedores tienen acuerdos con ciertas navieras de manera que se garantizan prioridades a la llegada de los buques. Sin embargo, se ha decidido no contemplar estas prioridades puesto que esta gestión de cola depende de los contratos establecidos, los cuales pueden ser muy diferentes en unas terminales a otras. Buen ejemplo de la necesidad de conocer la influencia que tienen las prioridades de ciertas líneas navieras o ciertos buques en el comportamiento del muelle es el estudio llevado a cabo por Dragovic et al. (2005). Sin embargo, este estudio se ha llevado a cabo, en el contexto de la explotación de una terminal en concreto, la Pusan East Container Terminal, lejos del objetivo perseguido en esta tesis.

Así, asumiendo una gestión de cola tipo FIFO, cuando el muelle está explotado de manera discreta, los elementos de la cola solamente pueden abandonarla si delante de ellos no hay otro elemento en cola y un buque termina las operaciones de carga/descarga, abandonando el puesto de atraque. Dado que se considera que los puestos de atraque están dimensionados de manera que en todos ellos quepan todos los buques con independencia de su tamaño, en el momento en el que se produce la salida de ese buque, se produce la entrada del primero que estaba en cola.

Cuando el muelle está explotado de manera continua, la gestión podría ser mucho más complicada, aunque el haber asumido una gestión FIFO simplifica el problema. En el momento en el que un buque abandona el muelle, se verifica si el primero que está en cola cabe en la línea de atraque. Si el resultado es afirmativo, automáticamente abandona la cola y accede al muelle. Si el resultado es negativo, se ha de esperar en cola a que otro buque abandone el muelle y probar de nuevo si cabe (nótese que al ser gestión de cola FIFO, aunque otro buque de los de cola cupiese en ese hueco, no se le dejaría abandonar la cola hasta que no lo hicieran los buques de delante).

Recalcar que, aunque en esta tesis se ha asumido una gestión tipo FIFO, el programa está preparado para poder desarrollar el código que simule otra disciplina de colas.

VI.1.1.2. Forma de explotación de la línea de atraque

La línea de atraque puede estar explotada de manera discreta o continua.

- EXPLOTACIÓN DISCRETA

Puesto que cuando la explotación es discreta se asume que la longitud de cada puesto de atraque es suficientemente larga como para albergar a todos los buques que vayan a hacer escala en la terminal, la única variable que hay que considerar es el **número de puestos de atraque** (ver Figura VI-2).

- EXPLOTACIÓN CONTINUA

El parámetro fundamental del muelle cuando la explotación es continua, es la **longitud**. Nótese que en el desarrollo de la aplicación se ha asumido que el muelle está formado por una única alineación, por lo que la longitud que se

introduce en el programa es la longitud total de esa única alineación²⁵. Además, se ha asumido que todos los buques pueden atracar en cualquier punto de esa alineación y que el calado es suficiente como para que cualquier buque pueda atracar en cualquier punto de la alineación.

El programa se ha desarrollado de manera que se puedan considerar varias lógicas de asignación de buques en el muelle. Estas lógicas se dividen en dos grandes grupos: se producen enmendadas en el muelle; no se producen enmendadas en el muelle.

Se entiende por enmendada el movimiento de un buque a lo largo del muelle, aunque ya se haya iniciado la carga/descarga. Así, en el programa desarrollado, si se opta porque la simulación realice enmendadas implica que cada vez que un buque termina sus operaciones y abandona el muelle, automáticamente todos los buques se desplazan hacia un lado del muelle. De esta manera, existe permanentemente un único espacio libre en el muelle. Éste será el mayor hueco posible que podría haber habido nunca.

Es importante hacer hincapié en que se ha considerado que ese desplazamiento de los buques se hace de manera inmediata, es decir en el mismo momento en que un buque termina el servicio, abandona el muelle, los buques que aún están atracados se desplazan hacia un lado del muelle todos juntos, y otro buque (en caso de que haya buques en cola) se dispone en el hueco que los otros buques han dejado y lo más pegado posible a ellos.

²⁵Según la ROM 2.0-11, en general, cuando la obra sea de un atraque múltiple, será conveniente que se disponga con una única alineación, si es posible en el emplazamiento, cuando el sistema de manipulación a utilizar sea un sistema discontinuo por elevación, al favorecerse de ese modo mayores flexibilidades operativas y una óptima utilización de los equipos de manipulación disponibles así como, en su caso, de la explanada aneja. La disposición en varias alineaciones en el caso de atraques múltiples puede dar lugar a la necesidad de mayores longitudes globales de atraque si la flota de buques esperable es muy heterogénea, con el objeto de mantener la flexibilidad operativa asociada a la asignación de atraque.

The screenshot shows a software window titled "Puerto" with the following configuration fields:

- Nombre del puerto: Valencia
- Nombre del muelle: Noatum-2014
- Datos de explotación del muelle:
 - Disciplina de cola: F.I.F.O.
 - Explot. por atraques equivalentes (atraques discretos):
 - Explot. por ml de atraque (atraques continuos):
- Atraques discretos / Atraques continuos (selected):
 - Longitud del muelle: 1700 m
 - Número de Norays: 25
 - Atraques homogéneos
 - Enmendadas
 - Selección de hueco para atraque: En el hueco menor
 - Posicionamiento dentro del hueco: A la izquierda del hueco
 - Ocupación de atraque por Coef. Factor: 1,1
 - Ocupación de atraque R.O.M.
- Precisión del reloj de llegadas: Precisión (min) 0
- Buttons: Aceptar, Cancelar

Figura VI-3: Pantalla de introducción de datos relacionados con la oferta del servicio (explotación continua).

Esta situación es totalmente irreal, puesto que en las terminales no se realizan enmendadas cuando un buque ha iniciado las operaciones de carga/descarga (o al menos con el objetivo que en esta tesis se ha buscado). Sin embargo, es una situación que proporcionará los mejores resultados posibles, es la mejor manera de obtener óptimos del muelle.

De todas maneras, como se ha indicado, el programa se ha preparado para que funcione con enmendadas o sin enmendadas. En el caso de que funcione sin enmendadas, aparecen dos variables clave: **la elección del hueco; el posicionamiento del buque en el hueco.**

Si el muelle no se explota con enmendadas, se pueden producir varios huecos a medida que los buques vayan accediendo y abandonando el muelle. Cuando un buque intenta acceder, la primera pregunta que se plantea el programa es si el buque cabe en algún hueco. En caso negativo, el buque sigue en cola (y como se trata de gestión de cola FIFO, ningún otro buque intenta acceder al muelle). En caso afirmativo, la siguiente cuestión es si cabe en más de un hueco. Lógicamente, se ha tenido que programar la lógica a seguir en este caso. Hasta

el momento el programa de simulación permite dos lógicas: en el hueco más grande; en el hueco más pequeño.

Elegido el hueco donde se va a amarrar el portacontenedores, la siguiente pregunta es dónde se va a ubicar dentro del hueco (posicionamiento del buque en el hueco). Hasta el momento se han desarrollado tres alternativas: en el extremo derecho; en el centro; en el extremo izquierdo. El programa se ha dejado preparado para que en futuras líneas de investigación se pueda ubicar: al lado del portacontenedores que va a terminar antes la duración de servicio; al lado del buque más grande, etc.

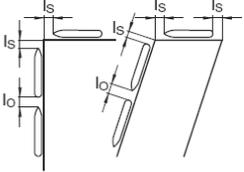
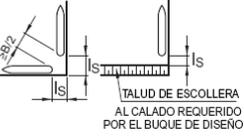
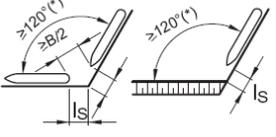
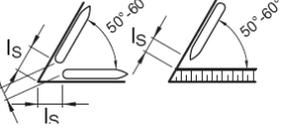
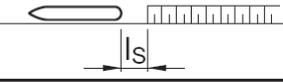
La razón por la cual se ha tenido que optar por este tipo de lógicas tanto para la elección del hueco, como para el posicionamiento del buque en el hueco, ha sido que no ha sido posible conocer exactamente cómo realizan las terminales españolas esa asignación de atraque. Entre los años 2007 y 2011 se han llevado a cabo diversas reuniones con distintas terminales de contenedores españolas con el fin de conocer si disponían de rutinas para asignar el atraque de manera que se llegara a alguna optimización. Aparentemente y por las respuestas recibidas, la realidad es que estas no existen y son los propios planificadores de las terminales quienes deciden cómo van a realizar esa asignación (con distintos periodos de anticipación en función de la terminal, desde un mes, hasta una semana, o incluso un día de adelanto). Es evidente que estos planificadores tendrán unos objetivos concretos, tanto si los conocen como si no, sin embargo no han sido transmitidos.

En este punto queda patente que, aunque el estudio de la capacidad de una terminal y el estudio de la explotación de la misma son diferentes, para poder estudiar la capacidad es necesario conocer ciertos patrones de comportamiento que se producen en la explotación.

Nótese que el programa se ha preparado para considerar la explotación por norays, aunque a fecha de la redacción de la presente tesis, este desarrollo no está terminado. La idea de este desarrollo es que a la hora de probar si un buque cabe en el muelle, la unidad mínima sea la ubicación del noray. En el desarrollo realizado considerando la línea de atraque continua y formada por una determinada longitud, la precisión que se ha considerado ha sido centimétrica, aunque el código del programa está preparado para modificarla en caso de que el usuario lo desee.

VI.1.1.3. Resguardo de seguridad de los buques

Tradicionalmente se ha considerado que para evitar daños entre buques amarrados en un muelle se ha de disponer de un resguardo entre buques equivalente a un 10% o 15% de la eslora de cada buque. Por ello, el programa de simulación se ha programado de manera que el resguardo pueda ser el equivalente a un porcentaje de las esloras de los buques (ver Figura VI-3).

ESQUEMA REPRESENTATIVO DEL MUELLE	Valores de las variables en función de la eslora total (L en m.) del barco mayor que afecta a la determinación de la dimensión analizada				
	Mayor de 300	300-201	200-151	150-100	Menor de 100 ⁽¹⁾
1. Distancia " l_o " entre barcos atracados en la misma alineación (m.) 	30	25	20	15	10
2. Separación " l_s " entre barco y cambios de alineación o de tipología estructural (m.) a) 	30	25	20	10	5
b) 	45/40	30	25	20	15
c) 	30/25	20	15	15	10
d) 	-/60	50	40	30	20
e) 	20	15	15	10	10

(1) Para buques con eslora total menor de 12 m. se tomará como valor de " l_o " el 20% de " L ", reajustándose los restantes valores proporcionalmente.
 (B) Manga del barco mayor que afecte a la determinación de la dimensión analizada.
 (*) El ángulo se entenderá limitado a 160°. Para ángulos mayores se aplicará el (1).

Figura VI-4: Resguardos necesarios en la línea de atraque entre buques y en los extremos y en los extremos de la obra de atraque. Fuente: ROM 2.0-11.

Sin embargo, dado que la ROM 2.0-11 plantea unos resguardos entre buques y unos resguardos en cada uno de los extremos de la obra de atraque en función de la eslora del buque, y de la configuración y tipología estructural de la dársena, estos resguardos se han considerado igualmente en el programa. Así, se presenta una pantalla donde se plantean las dos opciones de resguardos, según un porcentaje de la eslora de cada buque o según la propuesta de la ROM 2.0-11.

The screenshot shows a software window titled "Puerto" with a light beige background and a blue border. It contains several input fields and controls:

- Nombre del puerto:** Text box containing "Valencia".
- Nombre del muelle:** Text box containing "Noatum-2014".
- Datos de explotación del muelle:** A section with a blue header containing:
 - Disciplina de cola:** A dropdown menu with "F.I.F.O." selected.
 - Two radio buttons: "Explot. por atraques equivalentes (atraques discretos)" (unselected) and "Explot. por ml de atraque (atraques continuos)" (selected).
 - Two tabs: "Atraques discretos" (active) and "Atraques continuos".
 - Longitud del muelle:** Text box with "1700" and "m".
 - Número de Norays:** Text box with "25".
 - "Atraques homogéneos".
 - "Enmiendas".
 - Selección de hueco para atraque:** Dropdown menu with "En el hueco menor" selected.
 - Posicionamiento dentro del hueco:** Dropdown menu with "A la izquierda del hueco" selected.
 - Two radio buttons: "Ocupación de atraque por Coef." (unselected) and "Ocupación de atraque R.O.M." (selected).
 - ROM: Atraque tipo en O:** Dropdown menu with "Tipo 2-a)" selected.
 - ROM: Atraque tipo en L:** Dropdown menu with "Tipo 2-d)" selected.
- Precisión del reloj de llegadas:** A separate section with a dropdown menu set to "0".
- Two buttons at the bottom right: "Aceptar" and "Cancelar".

Figura VI-5: Pantalla de introducción de datos relacionados con la oferta del servicio (explotación continua y resguardo de seguridad ROM 2.0-11).

VI.1.2. Datos relacionados con la demanda del servicio

Los datos relacionados con la demanda del servicio tienen que ver con los parámetros de la flota que hace escala en la terminal. El programa se ha preparado para que considere los siguientes grados de libertad:

1. Esloras
2. Distribución de llegadas
3. Distribución de duraciones de servicio

Dado que en una terminal puede haber diversas líneas marítimas con características distintas, el programa se ha preparado para que puedan coexistir varias líneas. A cada una de ellas se le dará un peso y se definirá cada una de las siguientes variables (ver Figura VI-6).

Datos de la demanda: tipos, tamaños y llegadas de barcos

Tipos de líneas diferentes:

Activa	Id.	Tipo	Peso	% Fin
<input type="checkbox"/>	A	Mixto Ro-ro/Portaco...	10	-
<input type="checkbox"/>	B	Roll-on roll-off-Sem	30	-
<input checked="" type="checkbox"/>	C	General-Portaconten...	30	100,0
<input type="checkbox"/>	D	Roll-on roll-off Mens	10	-
<input type="checkbox"/>	E		10	-
<input type="checkbox"/>	F		10	-
<input type="checkbox"/>	G		10	-
<input type="checkbox"/>	H	MSC-Portacontened...	10	-
<input type="checkbox"/>	I		10	-
<input type="checkbox"/>	J		10	-

Para Borrar o Editar, primero selecciones una línea

100

Particularidades de la línea 'A'

Llegadas aleatorias | Llegadas de días fijos

Datos generales | Geometría de los barcos | Cargamentos

Activa: Identificador: A_

Tipo: Mixto Ro-ro/Portacontenedores

Peso de la línea en las llegadas, relativo a las demás: 10

Llegadas aleatorias Calendario fijo

Línea Prioritaria (no espera)

Borrar datos Editar Actualizar cambios Anular cambios

Ver datos actuales Aceptar Cancelar

Figura VI-6: Pantalla de introducción de datos relacionados con la demanda del servicio. Existencia de diversas líneas navieras.

VI.1.2.1. Esloras

Cuando el muelle se explota de manera discreta esta variable tiene poca importancia, pues como se ha indicado, se asume que todos los puestos de atraque son lo suficientemente largos como para albergar a cualquier buque. Ahora bien, cuando el muelle se explota de manera continua es una variable crucial.

El programa se ha preparado para poder introducir los datos de las esloras como una función de distribución o como un histograma. A continuación se citan las funciones de distribución que se han previsto en el programa:

- Constantes: definida por su único valor.

- Uniformes: definida por su mínimo y su máximo.
- Triangulares: definida por su mínimo, máximo y moda.

VI.1.2.2. Distribución de llegadas

Puesto que en el estudio inicial llevado a cabo en esta tesis se ha concluido que las llegadas de los buques a las terminales de contenedores se distribuyen según una función de distribución exponencial, se ha preparado el programa para que se pueda simular esta función, para lo cual hace falta introducir su valor medio. Ahora bien, con el objetivo de hacer otro tipo de pruebas, también se ha posibilitado simular funciones constantes, uniformes, triangulares y Erlang K.

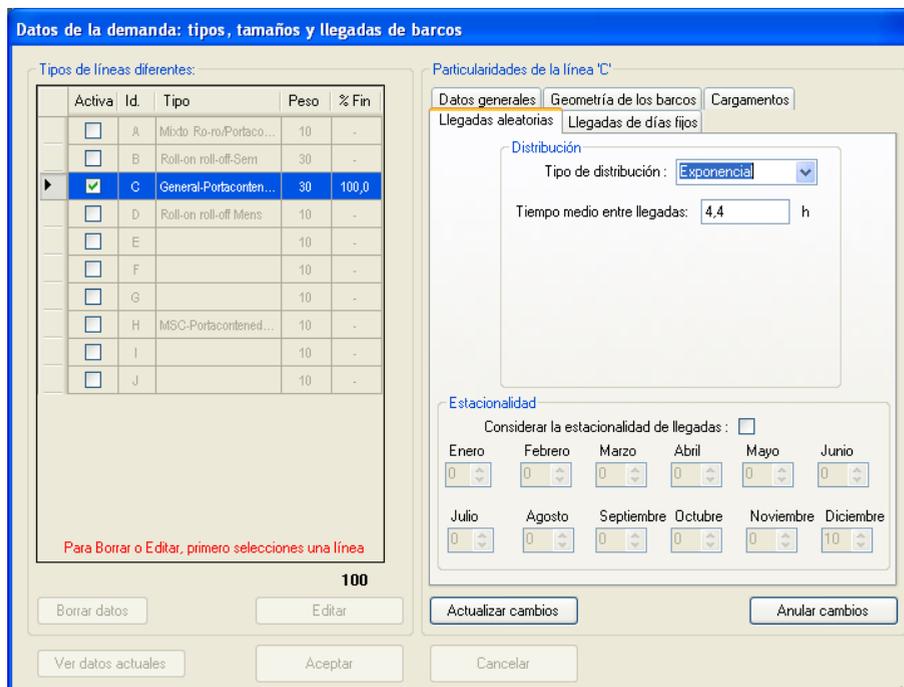


Figura VI-7: Pantalla de introducción de datos relacionados con la demanda del servicio. Distribución de llegadas.

VI.1.2.3. Distribución de duraciones de servicio

Al igual que la distribución de llegadas, la distribución de la duración de servicios es fundamental para que el comportamiento de un muelle quede

definido. Ahora bien, existen múltiples maneras de atribuir a un buque una determinada duración del servicio.

La primera y más sencilla sería programar un generador de duraciones de servicio según una determinada distribución e independiente del resto de variables de la flota. Así, cuando el generador de buques crea un buque, se le asocia una eslora siguiendo una determinada distribución y una duración del servicio siguiendo otra determinada distribución totalmente independiente de la anterior. De esta manera, pueden darse situaciones donde buques pequeños tienen asociadas duraciones de servicio largas y buques grandes que tienen duraciones de servicio más cortas. Si se observa la Figura IV-16.

Otra opción podría ser vincular unívocamente la eslora a la duración del servicio (ver Figura VI-8). Para ello se han realizado algunos estudios para saber cómo podría ser dicha relación. La Figura VI-9 muestra para el caso de una terminal dedicada del Mediterráneo donde, aunque la variabilidad de la duración el servicio aumenta con la eslora, se ve cómo existen buques pequeños con duraciones de servicio grandes y viceversa.

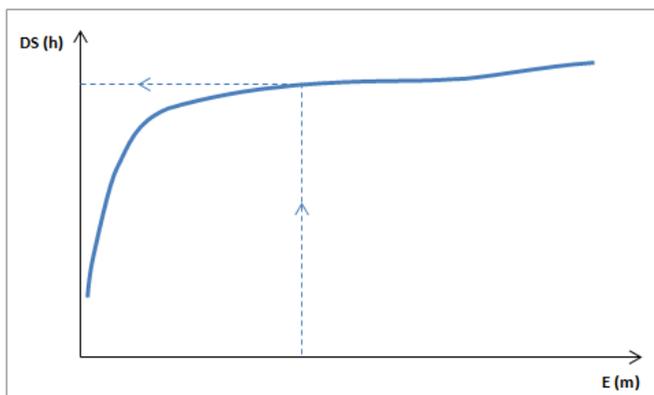


Figura VI-8: Representación de la relación unívoca entre esloras (E) y duración de servicio (Ds).

Se han probado diversos ajustes: exponencial; lineal; logarítmica; polinómica de grado 2,3 y 4; y potencial. La función que mejor se ajusta es la polinómica, sin embargo como puede apreciarse, el valor de R^2 muestra un ajuste poco satisfactorio.

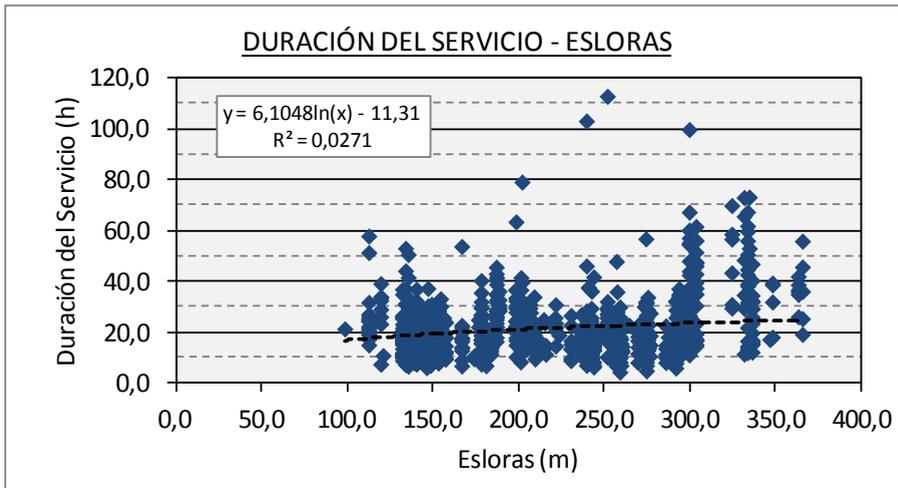


Figura VI-9: Ajuste entre las duraciones de servicio y las esloras a una función logarítmica. Terminal dedicada en el Mediterráneo.

Otra manera de relacionar la variable duración del servicio con la eslora podría ser definiendo una función de duración de servicio máxima en función de la eslora, una función de duración de servicio mínima en función de la eslora y entre el valor máximo y mínimo establecer una función de densidad.

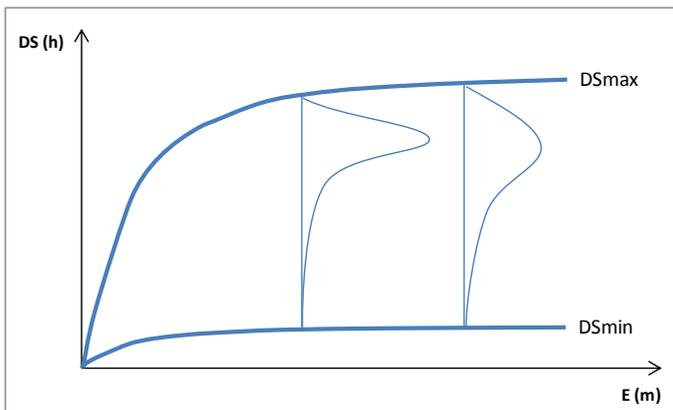


Figura VI-10: Representación de la relación no unívoca entre esloras (E) y duración de servicio (Ds). Caso 1.

Sin embargo, resulta extremadamente complicado relacionar la eslora con las duraciones de servicio mínimas y máximas cuando se considera la eslora como una función continua, dándose situaciones donde el valor mínimo de una

eslora es superior al valor máximo de una eslora muy similar (ver Figura VI-11 y Figura VI-12).

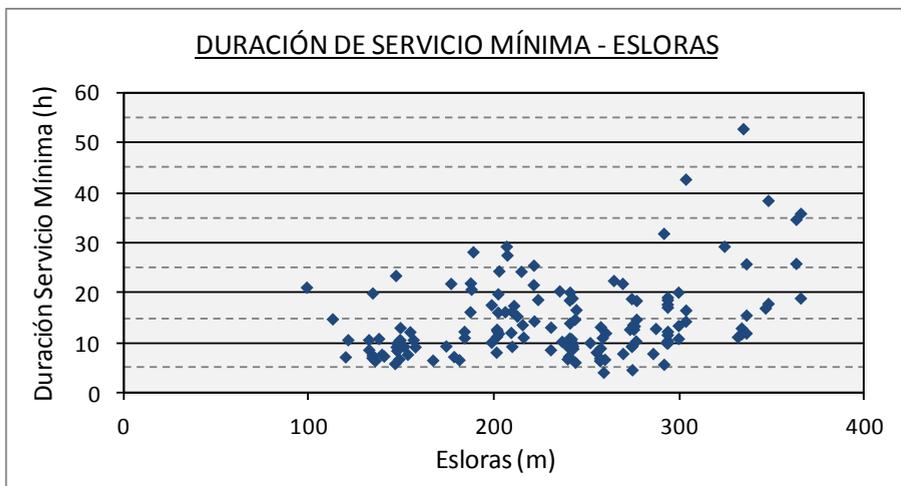


Figura VI-11: Relación entre las duraciones de servicio mínimas y las esloras. Terminal dedicada en el Mediterráneo

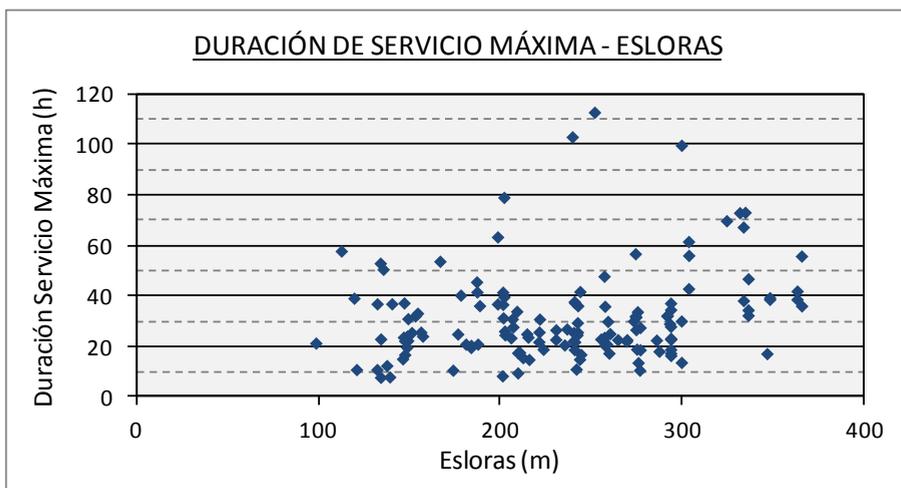


Figura VI-12: Relación entre las duraciones de servicio máximas y las esloras. Terminal dedicada en el Mediterráneo.

Como solución al problema planteado se ha decidido agrupar los buques en conjuntos de esloras de 50m en 50m y analizar el valor de la duración del servicio mínima y máxima para cada conjunto. Se ha visto así que la relación entre las variables se ajusta a una función polinómica de grado 2 (Aguilar y

Obrer-Marco 2011) cuyo valor de R^2 implica un ajuste suficientemente satisfactorio (ver Figura VI-13 y Figura VI-14).

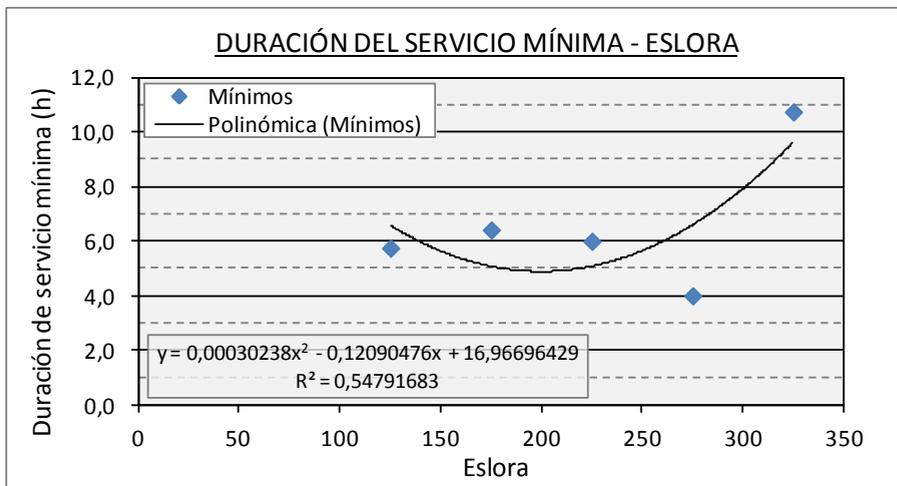


Figura VI-13: Relación entre las duraciones de servicio mínimas y las esloras agrupando los buques en conjuntos de esloras de 50 m en 50 m. Terminal dedicada en el Mediterráneo.

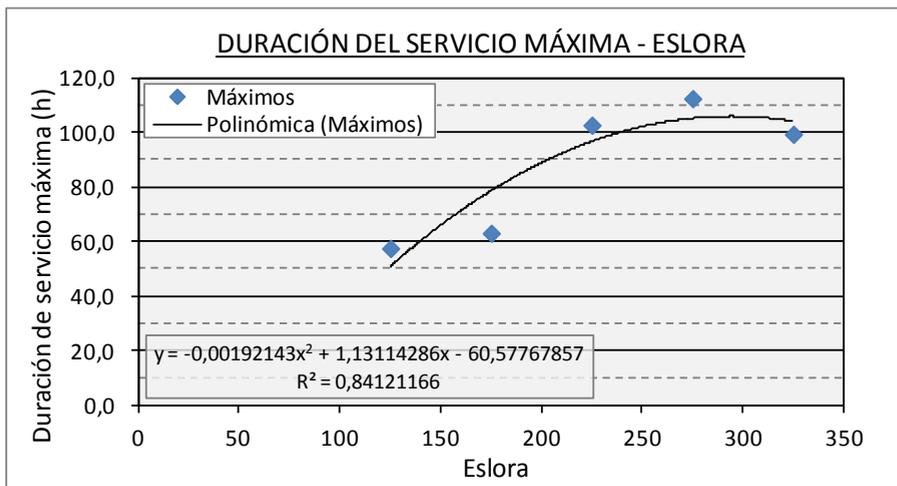


Figura VI-14: Relación entre las duraciones de servicio máximas y las esloras agrupando los buques en conjuntos de esloras de 50 m en 50 m. Terminal dedicada en el Mediterráneo.

A continuación, con el fin de estudiar cómo se distribuyen las duraciones de servicio para cada conjunto entre el valor mínimo y máximo de la duración del servicio, se ha analizado el porcentaje del valor real de la duración del servicio de cada escala en proporción a la diferencia entre el valor máximo y mínimo.

Así, los resultados han sido los representados en la Figura VI-15. Esta función se ajusta a una Erlang 2.

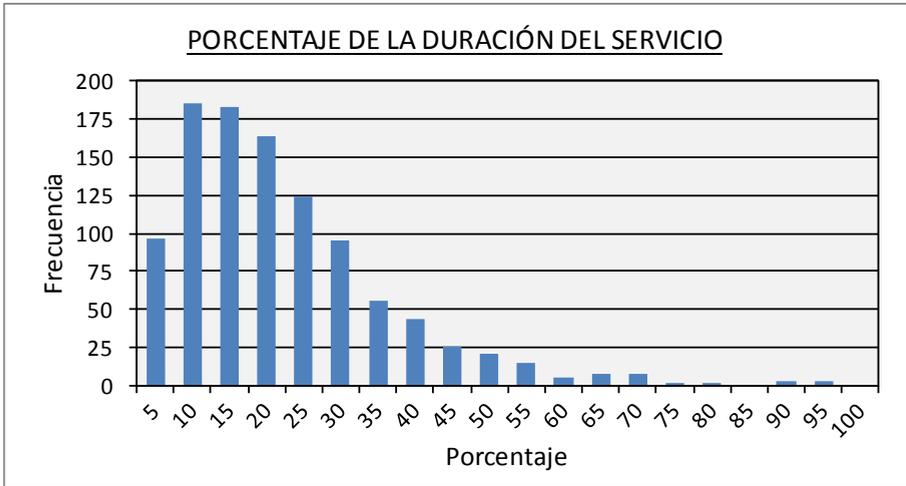


Figura VI-15: Porcentaje de la duración de servicio en proporción a la diferencia entre el valor máximo y mínimo para el conjunto de buques al que pertenece (grupos según esloras de 50 m en 50 m). Terminal dedicada en el Mediterráneo.

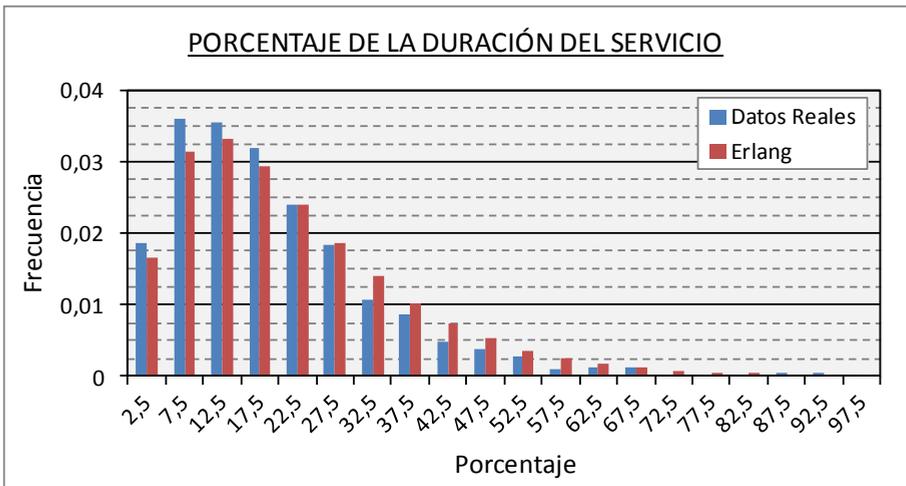


Figura VI-16: Ajuste a una Erlang 2 de los datos observados del porcentaje de la duración de servicio en proporción a la diferencia entre el valor máximo y mínimo para el conjunto de buques al que pertenece (grupos según esloras de 50 m en 50 m) Terminal dedicada en el Mediterráneo.

Finalmente se ha pensado también en que la duración del servicio máxima y mínima no dependa de la eslora, pudiendo hacer que la función de distribución entre ambos valores depende de las esloras (ver Figura IV-17) o no (ver Figura VI-18).

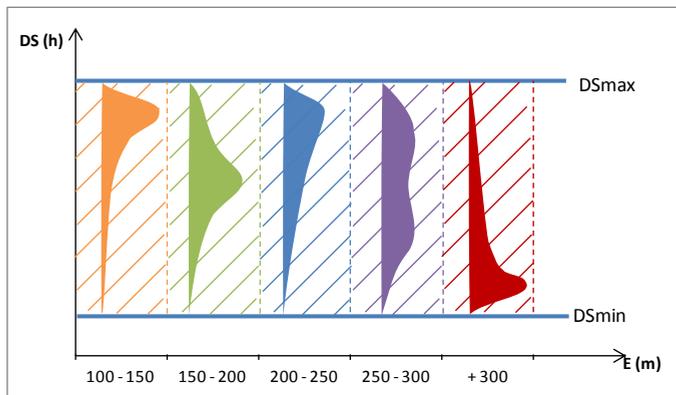


Figura VI-17: Representación de la relación no unívoca entre esloras (E) y duración de servicio (Ds). Caso 2.

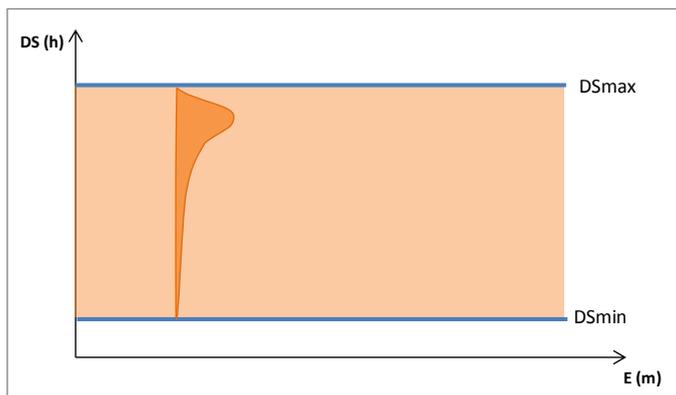


Figura VI-18: Representación de la relación no unívoca entre esloras (E) y duración de servicio (Ds). Caso 3.

Procediendo de esta manera se ha comprobado que el valor medio de los datos de la duración del servicio generados de esta manera no proporcionan una media de igual valor que los datos reales, de manera que se ha descartado.

Nótese que, podría haberse pensado en otro tipo de relación entre estos grados de libertad, como podría ser una relación entre la eslora y el volumen de carga a manipular, y posteriormente una relación entre ese volumen de

carga y la duración del servicio a partir de una productividad media de la terminal o incluso una productividad en función de la carga.

Al igual que se hizo con la relación entre la eslora y la duración del servicio, para relacionar la eslora con el volumen de carga se puede hacer una relación directa entre la eslora y el volumen máximo que se podría manipular en un buque (entendiendo como tal el doble de la capacidad del buque (Q)) y posteriormente estudiar la distribución del porcentaje respecto del volumen máximo para cada escala (ver Figura IV-19).

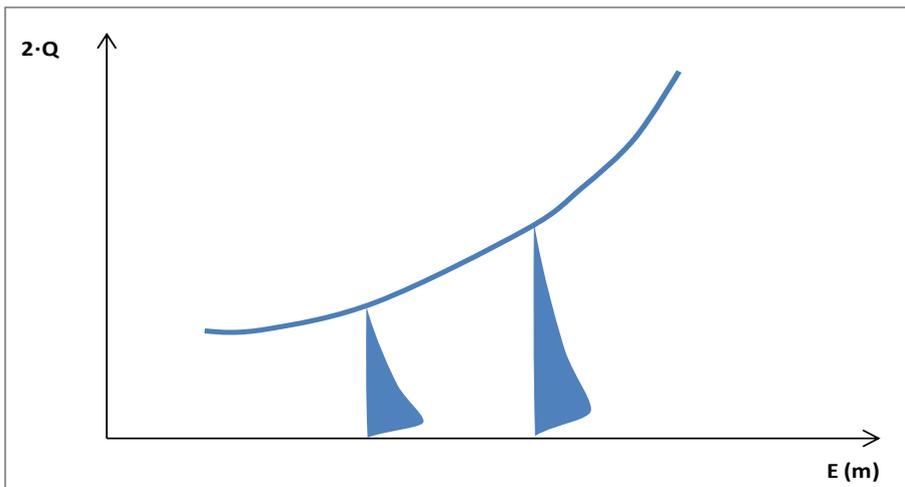


Figura VI-19: Representación de la relación entre el volumen máximo manipulable ($2 \cdot Q$) en función de la eslora (E).

La Figura VI-20 muestra cómo es la relación entre la eslora y el volumen máximo que se puede manipular según los datos de una terminal dedicada el Mediterráneo.

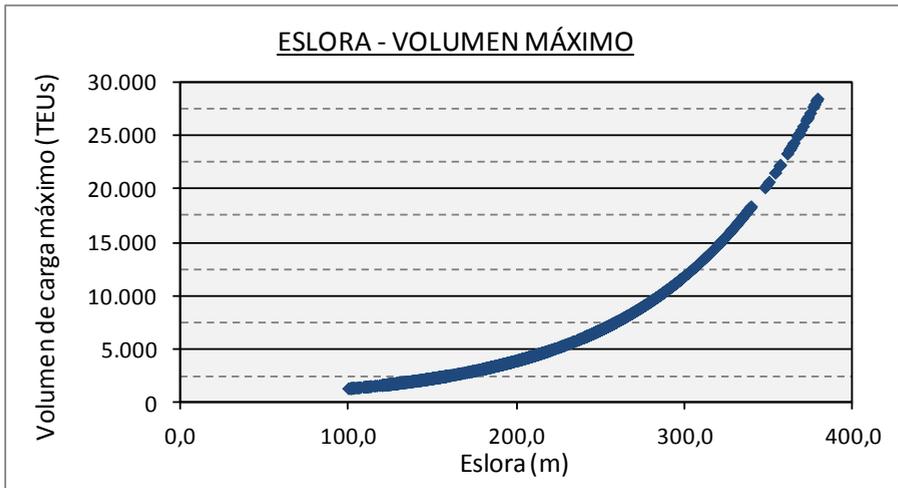


Figura VI-20: Relación entre la eslora y el volumen máximo manipulable. Terminal dedicada en el Mediterráneo.

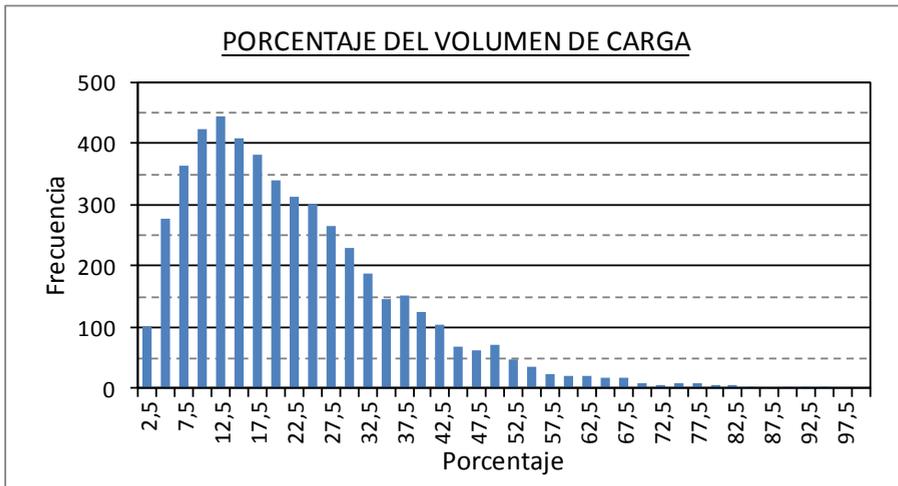


Figura VI-21: Porcentaje del volumen de carga manipulado en proporción al volumen máximo. Terminal dedicada en el Mediterráneo.

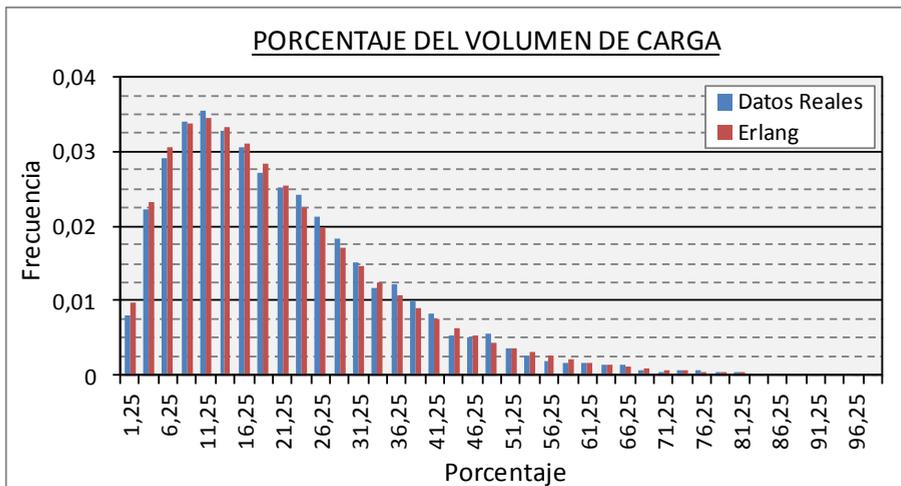


Figura VI-22: Ajuste a una Erlang 2 de los datos observados del porcentaje del volumen de carga en proporción al volumen máximo de carga dada la eslora del buque. Terminal dedicada en el Mediterráneo.

El resultado ha sido que el porcentaje del volumen real respecto del volumen máximo en función de la eslora del buque se distribuye en los dos casos analizados (dos terminales del Puerto de Valencia) como una Erlang 2 (Aguilar y Obrer-Marco 2011), con un alto grado de ajuste (ver Figura VI-22).

A partir del volumen de carga, dada la productividad media en la terminal se puede obtener la duración del servicio para el buque. Se ha comprobado que la duración del servicio de los datos obtenidos de esta manera se ajusta muy bien a la real en cuanto a la media y a la función de distribución.

Sin embargo, estas vinculaciones complicarían en gran medida la programación e implicaría un conocimiento más profundo de unas terminales que, en muchos casos todavía están en fase de diseño. Por ello, se ha optado por desarrollar el caso más sencillo posible, esto es generar duraciones de servicio totalmente independientes del resto de variables. La Figura VI-23 muestra la pantalla del programa de simulación donde se introducen los datos de la duración de servicio. Las funciones que se han introducido para poder ser seleccionadas son la constante, la uniforme, la triangular, la exponencial y la Erlang K (esta es la que se ha concluido que siguen las terminales de contenedores según los análisis llevados a cabo en esta tesis).

Servicios

Tiempo muerto adicional : 0 h

Distribución del tiempo restante:

Tipo de distribución de tiempos de servicio restante: Erlang de orden K

Tiempo de servicio medio: 20,27 h

Orden (K de Erlang): 4

Libre Tiempo mín.: h

Libre Tiempo máx.: h

Media real: 20,27 h

Aceptar Cancelar

Figura VI-23: Pantalla de introducción de datos relacionados con la demanda del servicio. Distribución de servicio.

También es interesante subrayar que no se ha entrado en el estudio particular de la asignación de grúas a los buques pues este es un problema puramente de explotación de la terminal, y por tanto está en un estadio bien distinto del de esta tesis.

VI.1.3. Datos de ejecución de simulación

El programa se ha preparado de manera que se puede ejecutar de dos modos diferentes:

1. Modo punto único: el programa ejecuta el caso en el que la duración del servicio tiene una media determinada.
2. Modo barrido: el programa ejecuta varios casos donde las duraciones del servicio pueden variar, de manera que genera los datos necesarios para representar directamente las líneas que componen los ábacos (Figura III-5).

VI.1.3.1. Modo punto único

Al ejecutar el programa con el modo punto único se va a obtener la relación $\phi - \epsilon_r$, fijadas todas las variables relacionadas con la demanda y la oferta de servicio.

Para configurar la ejecución es necesario introducir el día de inicio de la simulación, el tiempo de la simulación y el número de ciclos de repetición. Así, si se introduce un tiempo de simulación de 365 días y 25 ciclos de repetición, se simularán 25 años de iguales características en el muelle. Bien es sabido que, durante 25 años la situación de una terminal es cambiante, pero es sólo una forma de que se generen un número de barcos suficientes como para que los datos que arroje el programa tengan una precisión admisible como consecuencia de la propia variabilidad. En el fondo, sería lo mismo simular periodos de tiempo más largos y repetirlos menos ciclos de repetición, que simular periodos de tiempo más cortos y repetirlos más ciclos de repetición. Lo realmente importante es la cantidad de buques que se generan.



Figura VI-24: Precisión obtenida mediante el programa de simulación para la relación Φ - ϵ_r , para 10 ciclos de repetición.

Inicialmente se pensó en simular periodos de tiempo de 365 días y 10 ciclos de repetición, pero se comprobó que el número de buques no era suficiente y la precisión alcanzada no era asumible (ver la irregularidad de la Figura VI-24). Por ello se decidió aumentar a 25 el número de iteraciones a pesar de que se aumentara el tiempo de simulación (ver Figura VI-25).



Figura VI-25: Precisión obtenida mediante el programa de simulación para la relación Φ - ϵ_r para 25 ciclos de repetición.

Datos del ensayo

Duración del ensayo
 Fecha de inicio de la simulación: jueves , 27 de agosto de 2015
 Tiempo de simulación: 365 días
 Nº ciclos de repetición: 25

Precisión
 Dígitos de precisión de estoras: 3
 Solape permitido (GapX): 0,01 metros

Barrido
 Nº de elementos del barrido: 2
 Increm. de Tiempo medio de servicio: horas
 Barcos nuevos cada vez Siempre los mismos

Otros datos
 Hora de la última pleamar del día anterior: 0
 Formato de archivos: XLS

Datos de la animación:
 No animado Animado Intervalo animado

Animación general
 Intervalo de secuencia del PC: 50 ms
 Velocidad de secuencia visual: 24 h/s
 Tiempo visual de atraque/desatraque: 3,0 s

Intervalo animado
 Iteración a animar: 1
 Fecha de inicio de la animación: lunes , 31 de diciembre de 2012
 Fecha final de la animación: lunes , 31 de diciembre de 2012
 Animar toda la iteración

Aceptar Cancelar

Figura VI-26: Pantalla de introducción de datos relacionados con la ejecución de la simulación para el modo de punto único.

Es también en esta pantalla (Figura VI-26) donde se introducen los datos correspondientes a la precisión, tanto los dígitos de precisión de eslora como el solape de buques permitido.

Todos los resultados del programa, tanto ejecutado en modo punto único como en modo barrido se presentan en hojas Excel. Cuando el programa se ejecuta con el modo punto único los resultados son los siguientes:

1. Hoja 1 de los resultados. Se resumen los datos con los que se ha ejecutado el programa en lo referente a:
 - a. las características del puerto y el muelle,
 - b. el tipo de resguardo (sólo en caso de ejecutarse de forma continua),
 - c. la gestión de la cola (que a fecha de la redacción de la presente tesis es exclusivamente FIFO),
 - d. la forma de asignar los buques al muelle (sólo en caso de ejecutarse de forma continua),
 - e. la simulación en lo que a tiempo de simulación e iteraciones se refiere y el día de inicio,
 - f. la función de la duración de servicio,
 - g. dado que el programa permite introducir diversas líneas navieras con diferentes pesos, para cada línea:
 - i. el peso relativo al resto de líneas,
 - ii. la distribución de llegadas,
 - iii. la distribución de esloras (sólo se utiliza en caso de ejecutarse de forma continua).
2. Hoja 2 de los resultados. Para cada buque generado por el programa se presentan los siguientes valores:
 - a. Ciclo de repetición en la que se ha generado,
 - b. Número de buque del ciclo de repetición,
 - c. Línea naviera a la que pertenece,

- d. Eslora,
 - e. Atraque en el que se ha asignado o punto del muelle en el que se ha asignado,
 - f. Duración del servicio,
 - g. Tiempo de llegada a puerto,
 - h. Tiempo de llegada en cola,
 - i. Tiempo de salida de cola,
 - j. Tiempo de atraque,
 - k. Tiempo de desatraque,
 - l. Tiempo de salida.
3. Hoja 3 de los resultados. Se presentan los estimadores de la simulación:
- a. Número de ciclos de repetición,
 - b. Número medio de barcos por ciclo de repetición,
 - c. Espera media, este estimador calcula la media de las esperas de todos buques generados con independencia del ciclo de repetición al que pertenecen,
 - d. Espera media por iteración (o ciclo de repetición), esto es, para cada ciclo de repetición se obtiene la media de las esperas y a posteriori se proporciona la media de los ciclos de repetición y la desviación típica,
 - e. Espera relativa. Este estimador se calcula tal y como se ha definido tradicionalmente y también en esta tesis, es decir, se calcula la media de las esperas de todos los buques y se divide por la media de las duraciones de servicio de todos los buques (tanto de los que esperan, como de los que no),
 - f. Número de barcos que esperaron,
 - g. Tasa de ocupación,

- h. Tiempo de plancha medio. Para calcular este estimador se ha considerado la plancha de cada buque y se ha obtenido la media con independencia de la iteración a la que pertenece.

VI.1.3.2. Modo barrido

La diferencia entre el modo punto único y el modo barrido consiste en que con el modo barrido una vez que se han obtenido los resultados de una pareja de puntos ϕ - ϵ_r , automáticamente se incrementa el valor medio de la duración del servicio dejando el resto de parámetros iguales y por lo tanto se genera otra pareja de puntos ϕ - ϵ_r . Este modo barrido se programó así con la idea de que se generaran los puntos necesarios para generar los ábacos ϕ - ϵ_r (ver Figura III-5) de forma más eficiente. Así, en función del número de puntos que se desee formen cada curva, se introducirá en el programa un número de elementos del barrido (ver Figura VI-27). El incremento en la media de la duración de servicio entre una iteración y otra se introduce en el programa a través de “Increm. de Tiempo medio de servicio”.

Figura VI-27: Pantalla de introducción de datos relacionados con la ejecución de la simulación para el modo barrido.

Los resultados que proporciona el programa cuando se ejecuta en modo barrido también se presentan en un archivo Excel. En este caso, dado que la cantidad de buques que se generan hace que el tiempo de guardado de los datos sea excesivo, no se guardan los datos buque a buque, esto es la Hoja 2 de resultados descrita en el modo punto único. La Hoja 1 de resultados es exactamente la misma que en el caso de punto único y la gran diferencia está en la Hoja 3 de resultados. Aunque los campos que arroja el programa son los mismos, estos se presentan para cada par de valores ϕ - ϵ_r , es decir, para cada uno de los elementos del barrido, presentando su media y su desviación típica.

CAPÍTULO VII

Simulaciones realizadas y resultados obtenidos

VII.1. El muelle explotado de manera discreta

VII.1.1. Escenarios.

Como se ha visto anteriormente, la creación de este programa ha permitido, mediante herramientas de simulación, obtener la relación entre la tasa de ocupación (ϕ) y la espera relativa (ϵ_r) para los casos en que la teoría de colas no proporciona soluciones analíticas exactas. Más concretamente y dado que en el sistema portuario español se dan llegadas aleatorias y servicios Erlang k , se han simulado los siguientes casos:

- Llegadas Exponenciales / Servicios Exponenciales (solamente para comparar con los resultados ya publicados por otros autores.
- Llegadas Exponenciales / Servicios Erlang 3
- Llegadas Exponenciales / Servicios Erlang 4
- Llegadas Exponenciales / Servicios Erlang 5
- Llegadas Exponenciales / Servicios Erlang 6

- Llegadas Exponenciales / Servicios Erlang 7

Además, se han analizado todos estos casos desde 1 hasta 6 ataques.

Así, para realizar las simulaciones indicadas y desde 1 hasta 6 ataques, se han introducido al programa los siguientes datos.

1. La función de densidad de las llegadas de los buques y su valor medio: puesto que en todos los casos a simular las llegadas son Exponenciales, el único parámetro que se introduce es su valor medio. Inicialmente se decidió introducir un valor medio de 10 horas²⁶ entre dos llegadas consecutivas, pero dado que el número de buques generados en un año de simulación no proporcionaba suficientes datos para disponer de una precisión aceptable, se decidió por ello aumentar la frecuencia de llegada de buques y el periodo medio entre llegadas se redujo a 2 horas.
2. La función de densidad de la duración del servicio y su valor medio: en este caso las funciones que se han simulado son dos, la función Exponencial (solamente a efectos comparativos con resultados ya publicados) y la función Erlang K. Sea cual sea de las dos funciones, ha sido necesario introducir su valor medio (lógicamente en el caso de tratarse de la Erlang K ha sido necesario introducir además el valor de K). El valor medio ha venido condicionado por el valor medio introducido en la función de densidad del intervalo entre llegadas consecutivas y por el número de ataques, dado que se pretende que el programa simule 50 casos de tasas de ocupación comprendidas entre un valor próximo a 0 y un valor próximo a 1 (cada valor de la tasa de ocupación implica una simulación). Para estimar el valor medio de la función de la duración de servicio se ha aplicado la expresión de la tasa de ocupación de un muelle discreto.

²⁶ Nótese que a efectos de obtener la relación $\phi - \epsilon_r$, fijadas N y las funciones de densidad de las llegadas y los servicios lo que realmente importa es la proporción entre el valor medio del intervalo entre llegadas ($\overline{D_{LL}}$), el valor medio de la duración del servicio ($\overline{D_S}$), y N como muestra la ecuación (13), y no los valores independientemente.

$$\overline{D}_S = N \cdot \Phi \cdot \overline{D}_{LL} \quad (13)$$

Donde:

- \overline{D}_S : es el valor medio de la función de la duración del servicio,
- N: es el número de atraques,
- Φ : es la tasa de ocupación del muelle,
- \overline{D}_{LL} : es el valor medio de la función del intervalo entre llegadas.

3. El número de atraques.

4. El número de iteraciones para cada uno de los puntos que generan la curva $\phi-\varepsilon_r$ y la duración ficticia de cada una de ellas. En un principio se decidieron hacer 10 iteraciones de 365 días, pero dada la variabilidad de los datos, los resultados no eran suficientemente precisos (ver Figura VI-24). Era necesario pues adoptar una solución de compromiso y tras algún tanteo se decidió aumentar el número de iteraciones hasta 25 para generar más buques (ver Figura VI-25). De esta manera, los resultados eran suficientemente buenos y la duración de las simulaciones no era excesiva. En todo caso la pequeña irregularidad que presentan las curvas es atribuible a esta imprecisión.

Remarcar que el programa realiza una simulación para cada valor de la tasa de ocupación, para cada caso (orden K de la distribución Erlang) de los 5 expuestos anteriormente y para cada número de atraques (de 1 a 6). Como cada curva se ha representado con 50 puntos, se han realizado un total de $5 \cdot 6 \cdot 50 = 1.500$ puntos de 25 ciclos de repetición cada uno simulando 365 días de la realidad portuaria. Eso implica un total de 37.500 años simulados.

VII.1.2. Resultados.

El primer caso simulado ha sido el Exponencial – Exponencial (llegadas Exponenciales y servicios Exponenciales). Con la representación en forma de ábaco de los 50 puntos ($\phi-\varepsilon_r$) resultado de las simulaciones para cada N (entre 1 y 6), se han podido comparar los resultados arrojados por el programa desarrollado y los de las publicaciones existentes. Si se compara la Figura VII-1

y la Figura VII-2 (con N entre 1 y 6) se observa que la representación de la relación $\phi-\epsilon_r$ es exactamente la misma.

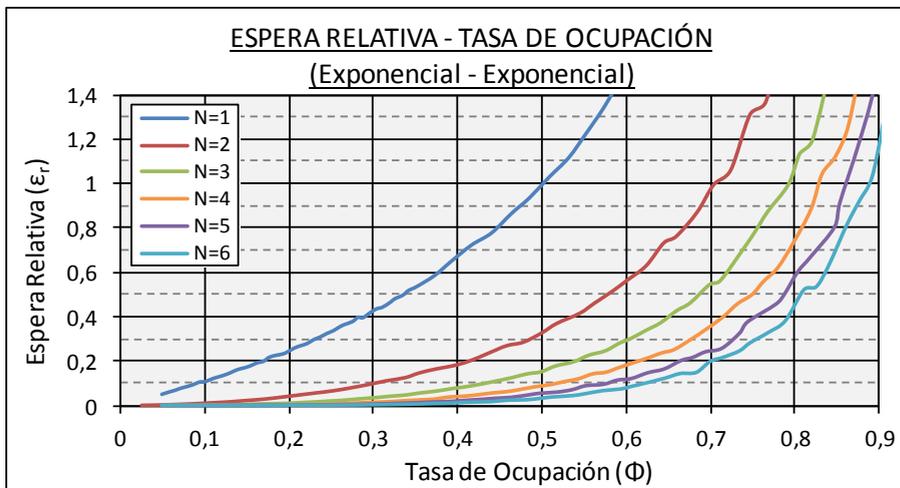


Figura VII-1: Ábaco espera relativa – tasa de ocupación para el caso de llegadas y servicios exponenciales.

También con la finalidad de corroborar que los datos arrojados por el programa son idénticos a aquellos que otros han simulado, se ha simulado el caso Exponencial – Erlang 4 puesto que Agerchou, en la misma publicación (Agerchou et al. 2004) facilita para este caso el valor de la tasa de ocupación (ϕ), dada una espera relativa de 0,1). Los valores a comparar se presentan en la Tabla VII-1.

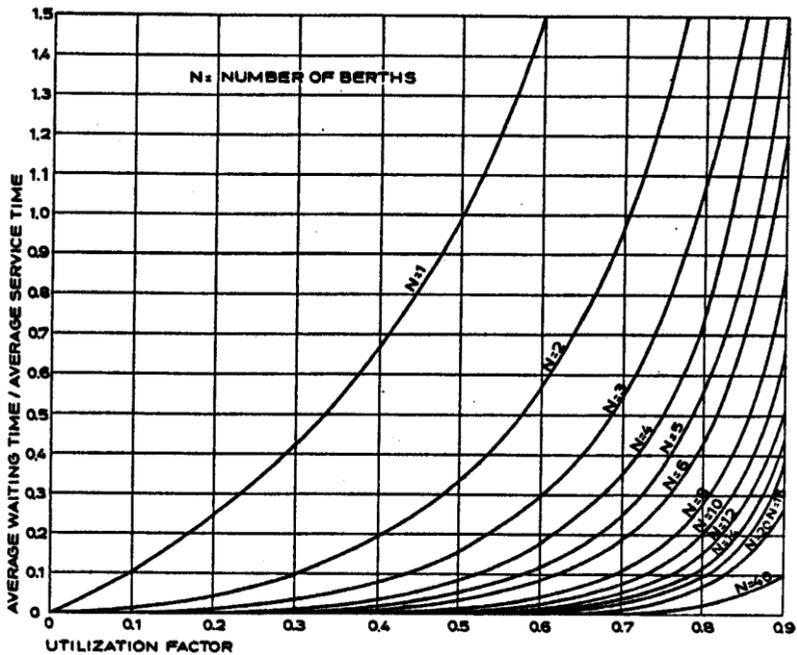


Figura VII-2: Ábaco espera relativa – tasa de ocupación para el caso de llegadas y servicios exponenciales (Agerschou et al. 2004).

Número de Atravesamientos (N)	Espera Relativa (ϵ_r)	Tasa de Ocupación (ϕ)	
		Agerschou, 2004	Programa Desarrollado
1	0,1	0,14	0,14
2	0,1	0,36	0,36
3	0,1	0,49	0,49
4	0,1	0,57	0,57
5	0,1	0,63	0,64
6	0,1	0,67	0,67

Tabla VII-1: Comparación entre los resultados del programa de simulación y los datos publicados por Agerschou et al. (2004).

Con estos resultados queda probado el buen funcionamiento de la herramienta de simulación desarrollada.

Como continuación se han simulado los casos Exponencial – Erlang K ($K \in [3, 7]$). A modo de ejemplo se presenta a continuación el caso Exponencial – Erlang 5.

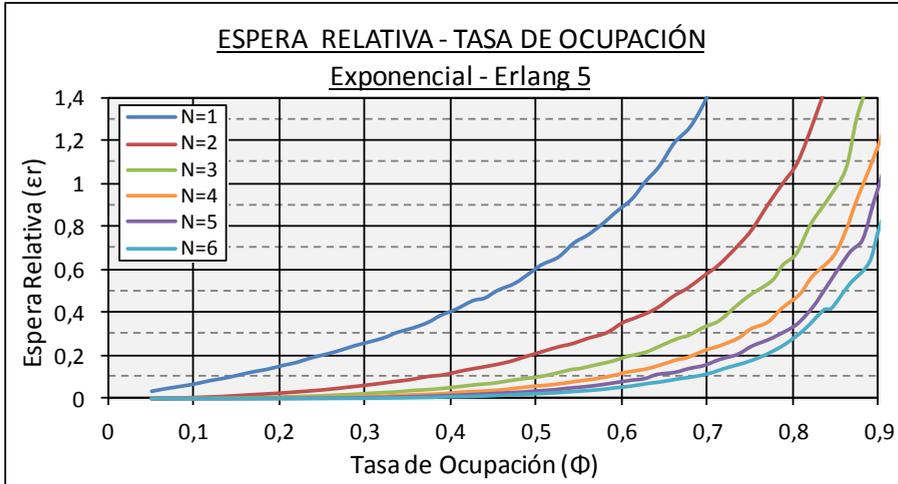


Figura VII-3: Ábaco espera relativa – tasa de ocupación para el caso de llegadas exponenciales y servicios Erlang 5.

Como se puede apreciar, dada una espera relativa, la tasa de ocupación asociada es mayor a medida que el número de atraques es mayor. Eso implica que si queda fijada la calidad del naviero, es posible conseguir mayores tasas de ocupación (de la terminal o del atraque, pues coinciden) cuando el número de atraques de la terminal es mayor. Por lo tanto, **a priori** (pues en el apartado siguiente se avanzará en esta idea) **resulta más interesante construir menos terminales con mayor número de atraques que más terminales con menor número de atraques.**

Una conclusión que se ha podido formular y que cabe destacar su importancia, ha sido que **para el caso Exponencial – Erlang y dado un número de atraques cualquiera, no existe prácticamente variación en los resultados cuando la K se mueve desde 3 hasta 7.** Eso implica que para relacionar la espera relativa con la tasa de ocupación no es imprescindible conocer la K de la función de densidad de la duración del servicio, sino que solamente interesa saber que se trata de una función Erlang. En la Figura VII-4 y la Figura VII-5 se representa este resultado para el caso de 1 y 4 atraques.

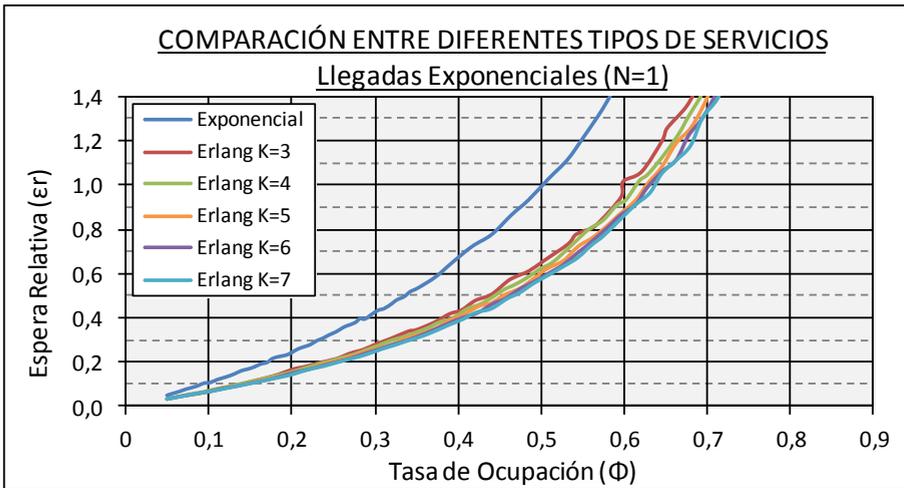


Figura VII-4: Invariabilidad de las curvas espera relativa – tasa de ocupación para diferentes K de la función Erlang de servicios. Caso N=1.

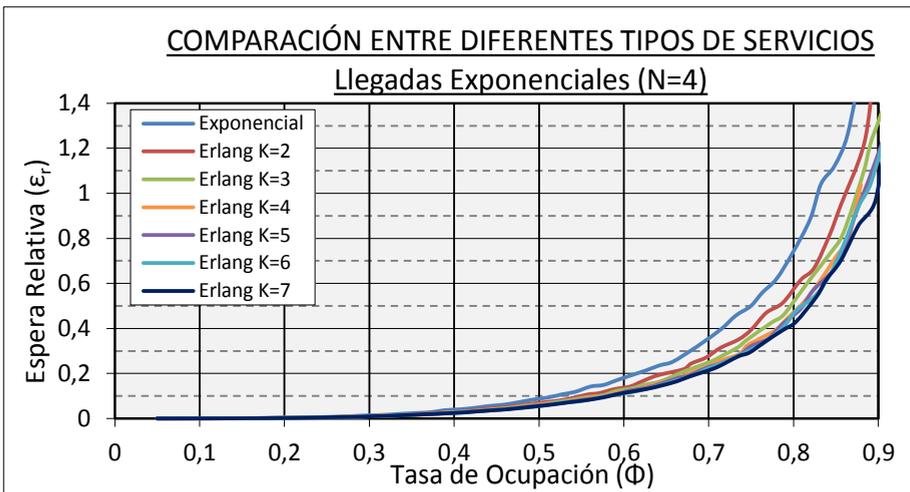


Figura VII-5: Invariabilidad de las curvas espera relativa – tasa de ocupación para diferentes K de la función Erlang de servicios. Caso N=4.

En la Figura VII-5 se han plasmado también los casos de servicios Erlang 2 para demostrar que entre el caso de servicios Exponenciales y Erlang 4 hay claramente una progresión en los resultados, pero que a partir de K=3 y hasta K=7, las curvas están prácticamente solapadas.

VII.1.3. Observaciones sobre los ábacos.

En este apartado se presentan algunos estudios relacionados con los ábacos generados a partir de los datos que arroja el programa de simulación.

VII.1.3.1. Variabilidad de la tasa de ocupación respecto de la espera relativa.

Por lo general, y como ya se ha dicho anteriormente, se considera como espera relativa máxima admisible por los navieros un valor de 0,1, para el caso de terminales de contenedores.

En este apartado se pretende hacer un análisis de la variabilidad de la tasa de ocupación cuando el valor de la espera relativa fluctúa ligeramente. El objetivo es conocer cómo podría verse afectado el valor de la tasa de ocupación en el caso de que los estándares de calidad de los navieros cambiaran.

Para ello se ha tomado la curva del caso Exponencial – Erlang 4, pero dado que no existen grandes variaciones con los casos de K iguales a 3, 4, 5, 6 y 7, como se ha visto en el punto anterior, los resultados son también válidos para el resto de K. En la tabla siguiente quedan reflejados los valores de las tasas de ocupación para valores de espera relativa que fluctúan respecto del valor máximo actual de las terminales de contenedores (0,1). Se ha considerado que el máximo podría llegar a ser 0.2, nunca superior.

Espera Relativa (ϵ_r)	Tasa de ocupación (ϕ)					
	N=1	N=2	N=3	N=4	N=5	N=6
0,05	0,079	0,26	0,38	0,48	0,54	0,58
0,1	0,14	0,36	0,49	0,57	0,64	0,67
0,15	0,19	0,43	0,56	0,63	0,68	0,72
0,2	0,24	0,48	0,61	0,68	0,73	0,76

Tabla VII-2: Variabilidad de la tasa de ocupación frente a variaciones de la espera relativa dado el número de atraques.

Esta misma información se ha representado en la Figura VII-6, donde se ve que el aumento de la tasa de ocupación es considerable (alrededor de 0,1) cuando el naviero está dispuesto a esperar el doble para la misma duración del servicio.

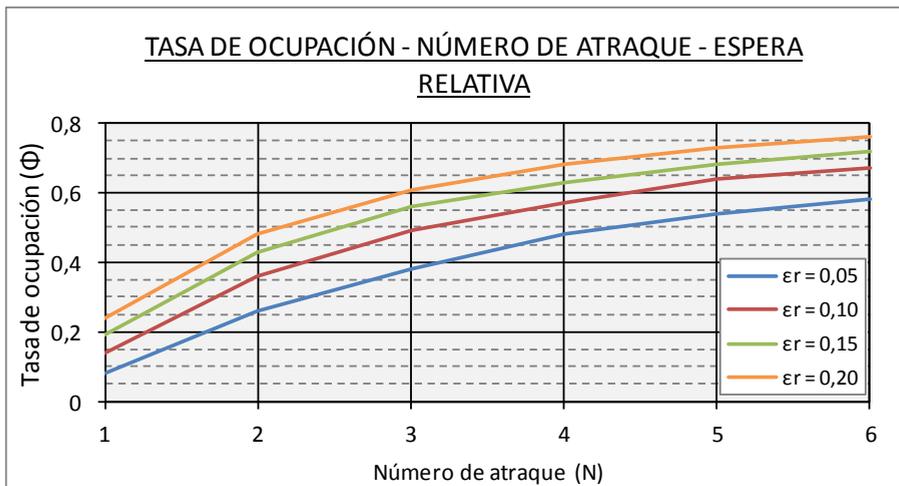


Figura VII-6: Variabilidad de la tasa de ocupación frente a variaciones de la espera relativa dado el número de ataques.

También se aprecia en dicho gráfico que la sensibilidad de la tasa de ocupación (Φ) frente al número de ataques (N) crece desde 1 hasta 3 ataques y que disminuye desde 3 hasta 6 ataques.

VII.1.3.2. Variabilidad natural de la espera relativa en función de la tasa de ocupación

Tal y como se ha indicado, con el fin de crear los ábacos se han generado 50 puntos de diferentes tasas de ocupación para cada curva mediante el programa de simulación. Cada uno de esos puntos se ha logrado simulando en 25 ciclos de repetición miles de buques que llegan a una terminal dado el número de ataques, la distribución de llegadas (forma y media), y la distribución de duraciones de servicio (forma y media). Como es lógico, de cada iteración se ha obtenido una espera media relativa a la duración de servicio medio (lo que hemos llamado hasta ahora espera relativa) de todos los buques, y la media de todas esas medias es la que se ha representado en los ábacos.

En este apartado se pretende mostrar la variabilidad de las esperas relativas entre diferentes iteraciones, para lo que se ha representado el valor medio de la espera relativa, el valor resultado de sumar la desviación típica a la media, y el valor de restar la desviación típica a la media en el caso Exponencial - Erlang 4 cuando la terminal tiene de 1 a 6 ataques.

Como ejemplo se muestran en la Figura VII-7 y Figura VII-8 los casos de 3 y 5 ataques.

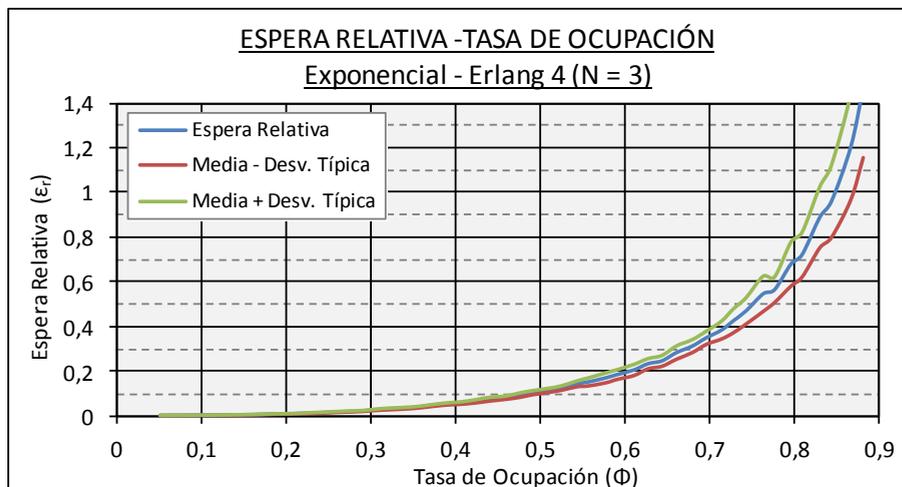


Figura VII-7: Variabilidad de la tasa de ocupación frente a variaciones de la espera relativa dado el número de ataques.

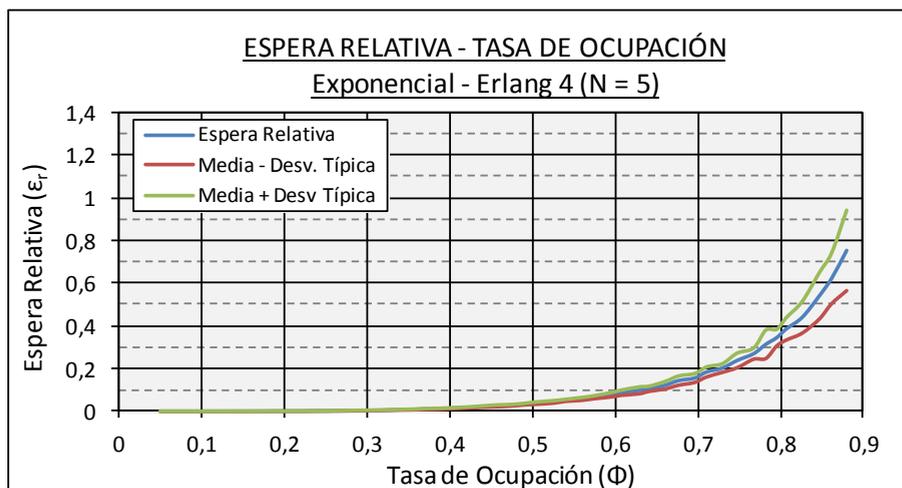


Figura VII-8: Variabilidad de la tasa de ocupación frente a variaciones de la espera relativa dado el número de ataques.

Como se puede apreciar, la variabilidad de la espera relativa crece a medida que lo hace la tasa de ocupación. Eso implica que para tasas de ocupación relativamente elevadas pueden darse situaciones de crisis con más facilidad que para tasas de ocupación menores. Por lo tanto, hemos de matizar la

afirmación anteriormente expuesta en cuanto a que, dado que se pueden obtener mayores tasas de ocupación para la misma espera relativa, es preferible tener pocas terminales grandes que muchas pequeñas. Ahora por el contrario vemos que aunque esta afirmación sea cierta, hay que considerar que la mayor variabilidad de las esperas relativas que se producen para tasas de ocupación elevadas, facilitaría la aparición de episodios de crisis.

Este asunto abre una nueva perspectiva de futuro que consiste en plantear la duda de si es más recomendable planificar sobre valores medios o sobre garantías de que cierto valor de la espera sea inferior a uno dado.

VII.2. El muelle explotado de manera continua

VII.2.1. Escenarios

Tal y como se ha indicado en el desarrollo de la presente tesis, la simulación es necesaria para conocer la relación entre la tasa de ocupación (ϕ) y la espera relativa (ϵ_r) siempre que el muelle se explote de manera continua.

A diferencia del caso discreto, son numerosas las variables que hay que definir para poder conocer la relación en cuestión. Tal y como se ha mencionado en el capítulo que describe el programa desarrollado (capítulo VI), las variables se distinguen entre las relacionadas con la oferta del servicio y las relacionadas con la demanda del servicio. A continuación se puntualizan los escenarios simulados describiendo los valores introducidos para cada variable:

1. Disciplina de Cola: FIFO
2. Longitud del muelle:
 - a. $L = 1.000$ m
 - b. $L = 1.500$ m
 - c. $L = 2.000$ m
3. Lógica de asignación de muelle:
 - a. Con enmendadas
 - b. Sin enmendadas

- i. Elección del hueco:
 1. Hueco más grande
 2. Hueco más pequeño
- ii. Posicionamiento dentro del hueco:
 1. En un extremo del hueco
 2. En el centro del hueco
4. Resguardo de seguridad entre buques:
 - a. 10% y 15% de la eslora del buque
 - b. Criterio ROM 2.0-11 (2a-2a)
5. Distribución de llegadas: función exponencial de media $2 h^{27}$.
6. Distribución de servicios: función Erlang K donde K está comprendido entre 3 y 7. Como en el caso discreto, el valor medio ha venido condicionado por el valor medio introducido en la función de densidad del intervalo entre llegadas consecutivas y por el número de atraques, dado que se pretende que el programa simule 50 casos de tasas de ocupación comprendidas entre un valor próximo a 0 y un valor próximo a 1 (cada valor de la tasa de ocupación implica una simulación). Para estimar el valor medio de la función de la duración de servicio se ha aplicado la expresión (13), siendo conscientes de que es una expresión que implica un muelle explotado de manera discreta, pero a efectos de dar una aproximación de los valores a introducir en el programa es suficiente.
7. Distribución de esloras:
 - a. Constate de media 150m y 250m
 - b. Uniforme de media 150m (con dos rangos asociados: [100, 200]; y [75, 225]) y 250m (con dos rangos asociados: [200, 300]; y [150, 350]).

²⁷ Ver la justificación en el apartado correspondiente a la simulación discreta.

- c. Triangular de media 150m (con dos rangos asociados: [100, 200]; y [75, 225]) y 250m (con dos rangos asociados: [200, 300]; y [150, 350]).

VII.2.2. Resultados

Dada la gran cantidad de resultados obtenidos al realizar las simulaciones de los escenarios planteados, en este apartado se presentan los resultados del análisis que se ha llevado a cabo con todas esas simulaciones.

VII.2.2.1. Estudio de los escenarios donde las esloras son constantes y se llevan a cabo enmendadas

El primer resultado observado se presenta cuando las esloras que llegan al muelle son constantes y se llevan a cabo enmendadas. Según los escenarios planteados, se han simulado varios casos combinando las tres posibles longitudes del muelle (1000m, 1500m y 2000m), las dos posibles esloras (150m y 250m), y los tres criterios de resguardo de seguridad (coeficiente de 10%, 15% y ROM 2.0-11). Se ha observado que en los resultados de este análisis juega un papel fundamental el valor que adopta la parte fraccionaria del número de atraques equivalentes (N_{equiv}^{28}).

A modo de ejemplo, la Figura VII-9 muestra las curvas de la relación entre la tasa de ocupación y la espera relativa para el caso de un muelle de 1.000m donde se producen enmendadas, y donde las esloras de los buques que hacen escala se distribuyen como una función constante de 150m. La curva denominada " $N_{equiv} = 5,79$ " se corresponde con un muelle donde se calculan los resguardos como un 15% de la eslora de los buques (en este caso el número de atraques equivalentes es igual a 5,79), la curva denominada " $N_{equiv} = 6,06$ " se corresponde con un muelle donde se calculan los resguardos como un 10% de la eslora de los buques (en este caso el número de atraques equivalentes es igual a 6,06), y la curva denominada " $N_{equiv} = 6,03$ " se corresponde con un

²⁸ A efectos de calcular el número de atraques equivalentes (N_{equiv}), se ha considerado que el buque tipo es aquel cuya eslora se corresponde con la eslora media.

muelle donde se calculan los resguardos según las recomendaciones de la ROM 2.0-11 (en este caso el número de atraques equivalentes es igual a 6,03).

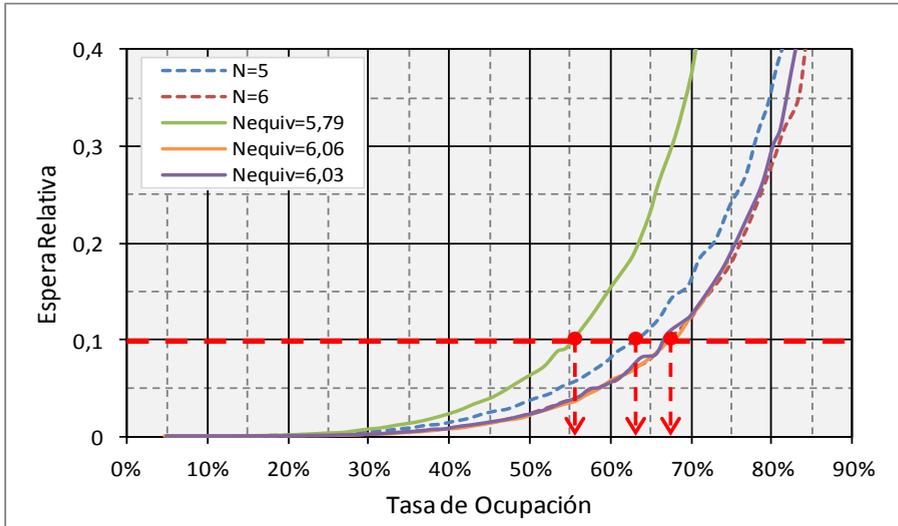


Figura VII-9: Influencia del criterio de resguardo cuando las esloras son constantes y se llevan a cabo enmendadas. Muelle de 1000m y esloras de 150m.

Tal y como muestra la Figura VII-9, aquellas curvas cuyo número de atraques equivalentes es prácticamente igual a un número entero (concretamente igual a 6), se superponen con la curva de $N=6$ (curva obtenida asumiendo una explotación discreta del muelle). Ahora bien, la curva " $N_{equiv} = 5,79$ ", lejos de lo que se podría pensar, no se encuentra entre las curvas $N=5$ y $N=6$, es más, se encuentra muy a la izquierda de $N=5$, lo que significa que para la misma espera relativa, la tasa de ocupación es muy inferior. Este hecho se explica por la diferencia en la definición de la tasa de ocupación calculada de forma discreta (ϕ) o calculada de forma continua (ϕ_c), expuesta en el capítulo de definición de la capacidad. Como es lógico, cuando la longitud del muelle no es un múltiplo de la eslora de los buques (afectada por el resguardo), siendo por tanto N_{equiv} un número entero, se produce un desaprovechamiento del muelle, haciendo que no se pueda alcanzar la asíntota de la curva en una tasa de ocupación igual a 1. En la Figura VII-21 se aprecia que la curva asociada a " $N_{equiv}=5,79$ " tiene la asíntota alrededor de una tasa de ocupación del 70% y las asociadas a " $N_{equiv}=6,03$ " y " $N_{equiv}=6,06$ " la tienen alrededor del 80%.

Otro ejemplo de ello se presenta en la Figura VII-10. En este caso se trata de un muelle de 2.000m donde también se producen enmendadas, y donde las esloras de los buques que hacen escala se distribuyen según una función constante de 250m. La curva denominada “ $N_{equiv} = 6,96$ ” se corresponde con un muelle donde se calculan los resguardos como un 15% de la eslora de los buques, la curva denominada “ $N_{equiv} = 7,27$ ” se corresponde con un muelle donde se calculan los resguardos como un 10% de la eslora de los buques, y la curva denominada “ $N_{equiv} = 7,18$ ” se corresponde con un muelle donde se calculan los resguardos se calculan según las recomendaciones de la ROM 2.0-11.

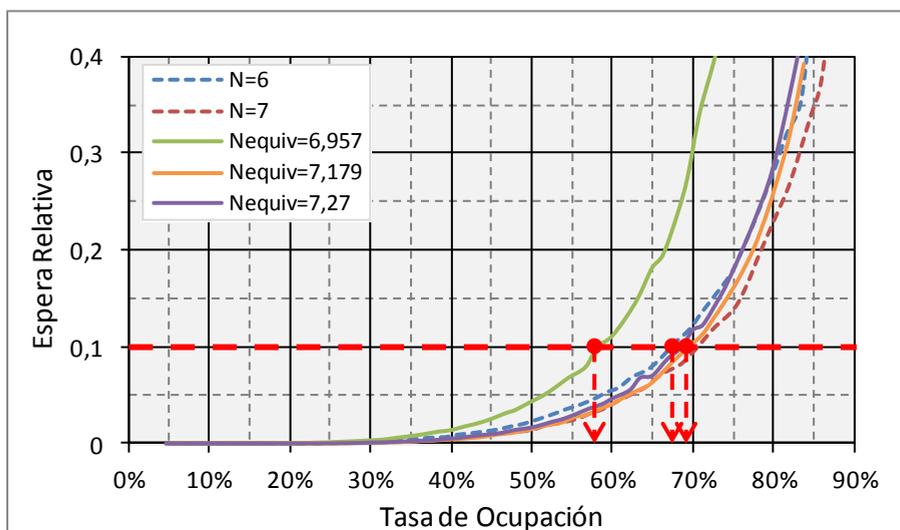


Figura VII-10: Influencia del criterio de resguardo cuando las esloras son constantes y se llevan a cabo enmendadas. Muelle de 2000 y esloras de 250m.

Como se puede ver en los dos casos presentados, cuando se consideran esloras constantes en muelles donde se trabaja con enmendadas, a medida que aumenta la parte fraccionaria del número de atraques equivalentes, la curva $\phi_{L-\varepsilon_r}$ se desplaza hacia la izquierda (hacia tasas de ocupación menores) respecto de la curva de número de atraques igual a la parte entera del número de atraques equivalentes. Por el contrario, a medida que la parte fraccionaria disminuye, la curva tiende (por la izquierda) hacia la curva de número de atraques igual a la parte entera del número de atraques equivalentes.

Esto es, la curva resultado de la simulación continua no se encuentra entre las dos curvas que se obtienen cuando el muelle se explota de manera discreta y está compuesto por un número de atraques igual al entero inmediatamente inferior y superior al valor de N_{equiv} , sino que proporciona siempre resultados iguales o peores al caso en el que el muelle está compuesto por un número de atraques igual al entero inmediatamente inferior de N_{equiv} (Obrer-Marco y Aguilar 2011). La diferencia con esta última curva dependerá de la parte decimal de N_{equiv} y cuanto mayor sea la parte decimal, mayor será la diferencia. Ello es debido a que cuando las esloras son constantes, a medida que se aumenta la longitud del muelle, esta no es aprovechada hasta el momento en el que cabe un buque más, y mientras tanto la parte permanentemente desocupada pesa en el valor de ϕ_L . Como consecuencia nunca se podrá alcanzar una tasa de ocupación igual a la unidad, ni aunque la cola de los buques (ϵ_r) fuese infinita (Aguilar y Obrer-Marco 2013).

De todo ello se deduce el error que los planificadores podrían estar cometiendo si para calcular la tasa de ocupación asociada con la espera relativa igual a 0,1 dado un N_{equiv} fraccionario, se hace una interpolación entre las ϕ asociadas a las curvas de los enteros inmediatamente superior e inferior a N_{equiv} . Como se ha demostrado, la evolución de la tasa de ocupación no evoluciona linealmente como muestra la Figura VII-11, sino como muestra la Figura VII-12. Los datos de ambas figuras están obtenidos asumiendo esloras constantes de 200 m.

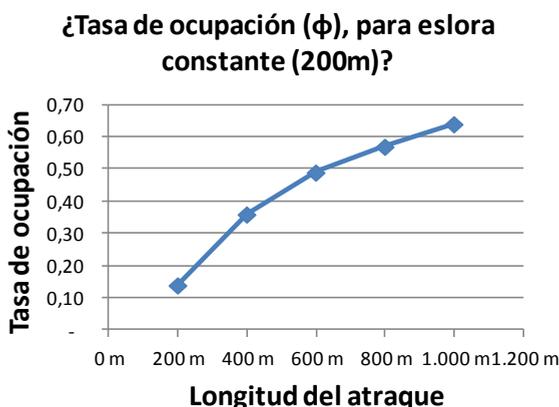


Figura VII-11: Evolución incorrecta de la tasa de ocupación con la longitud de atraque para esloras constantes. Fuente: Aguilar y Obrer-Marco (2013).

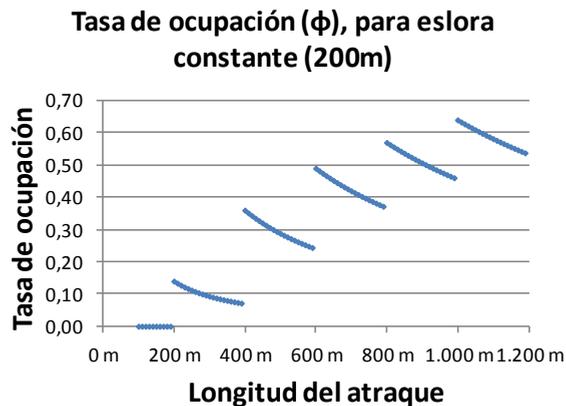


Figura VII-12: Evolución correcta de la tasa de ocupación con la longitud de atraque para esloras constantes. Fuente: Aguilar y Obrer-Marco (2013).

VII.2.2.2. Estudio de los escenarios donde las esloras tienen variabilidad y se llevan a cabo enmendadas

Si en el punto anterior se vio la falta de aprovechamiento del muelle cuando las esloras son constantes y el número de atraques equivalentes no es entero llevándose a cabo enmendadas, en este punto se pretende ver la influencia de introducir variabilidad en las esloras de los buques. Como se indicó en el apartado de escenarios, se han analizado tanto esloras uniforme como triangulares con distintos rangos.

Los análisis de los datos arrojados por el programa de simulación han hecho ver que la variabilidad de esloras puede mejorar los resultados (tasas de ocupación mayores para la misma espera relativa) o empeorarlos (tasas de ocupación menores para la misma espera relativa) respecto de las esloras constantes. El factor clave vuelve a ser el número de atraques equivalentes²⁹. Se ha podido ver que si la parte fraccionaria de dicho indicador es inferior a 0,5, la variabilidad de esloras empeora el resultado, es decir, las curvas $\phi_L - \epsilon_r$ se encuentran a la izquierda de la curva asociada a unas esloras constantes. Por tanto, para la misma espera relativa, la tasa de ocupación es menor. Por el contrario, cuando es superior a 0,5, la variabilidad de esloras mejora el

²⁹ Como ya se ha mencionado, se ha adoptado como tal el cociente entre la longitud del muelle y la eslora media de los buques afectada por el resguardo de seguridad.

resultado y las curvas se quedan a la derecha, de manera que para la misma espera relativa, la tasa de ocupación es mayor.

La Figura VII-13 muestra las curvas $\phi_L - \epsilon_r$ para un muelle de 1000 m donde llegan buques con diferentes distribuciones de esloras, pero de media siempre igual a 150m, resguardo de seguridad de 1,15 veces la eslora, y donde se llevan a cabo enmendadas. En este caso, el número de atraques equivalentes es de 5,797, es decir, la parte decimal es superior a 0,5. Como se puede apreciar, la variabilidad en las esloras mejora los resultados respecto de las esloras constantes con independencia de la función aplicada a las esloras (uniforme o triangular) y de los rangos (± 50 o ± 75).

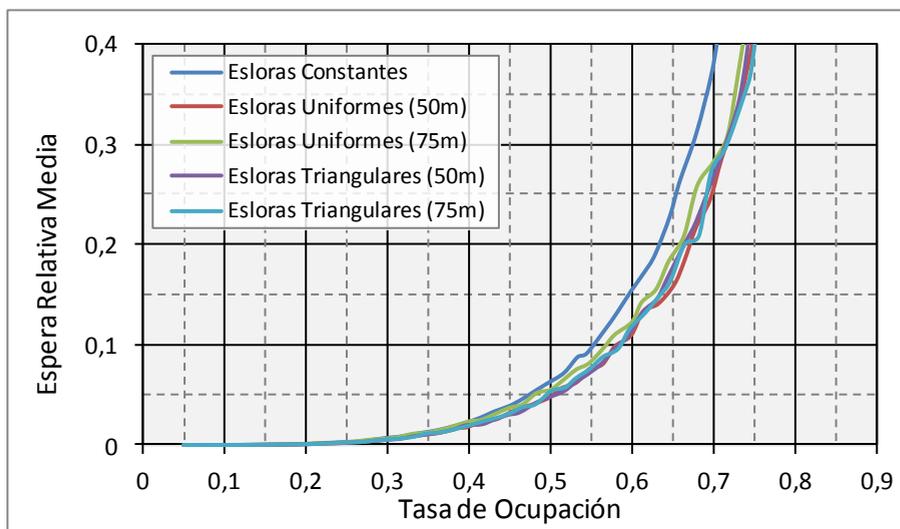


Figura VII-13: Influencia de la variabilidad de esloras cuando se llevan a cabo enmendadas. Muelle de 1000m, eslora media 150m y resguardo de 1,15.

Por el contrario, la Figura VII-14 muestra el mismo muelle que el de la Figura VII-13, pero aplicando los resguardos de seguridad propuestos por la ROM 2.0-11. En este caso el valor del número de atraques equivalentes es de 6,030, por lo que la parte fraccionaria es prácticamente nula. Se aprecia como la variabilidad de esloras, sea de tipo que sea, empeora los resultados.

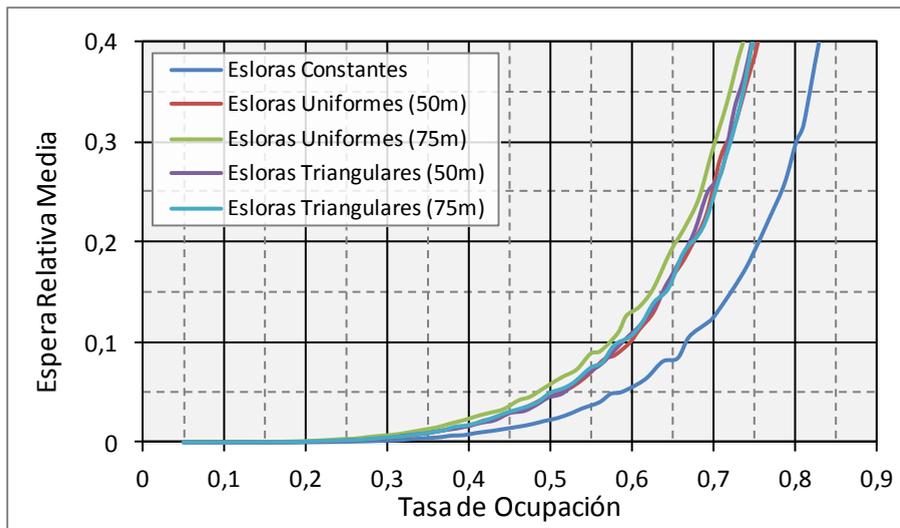


Figura VII-14: Influencia de la variabilidad de esloras cuando se llevan a cabo enmendadas. Muelle de 1000m, eslora media 150m y resguardo ROM.

Estos resultados parecen razonables desde que valores de N_{equiv} muy cercanos a valores enteros por la derecha (valores de la parte fraccionaria de N_{equiv} prácticamente nulos) con esloras constantes implican una optimización del muelle que es difícil de conseguir si existe variabilidad de esloras. Por el contrario, cuando los valores de N_{equiv} son muy cercanos a valores enteros por la izquierda (valores de la parte fraccionaria de N_{equiv} tendiendo a 1 por la izquierda) con esloras constantes, el muelle está tan poco optimizado que la variabilidad de esloras hace que mejore su utilización.

La última de las figuras que evidencia la afección de la variabilidad de las esloras es la Figura VII-15. En ella se presentan los resultados de un muelle de 1000m donde atracan buques cuya eslora tiene de media 250m y se aplica el criterio de resguardo ROM 2.0-11. En este caso el valor del número de atraques equivalentes es de 3,555. Como se puede apreciar, todas las curvas están superpuestas, esto es la existencia o no de variabilidad en las esloras no tiene ninguna afección.

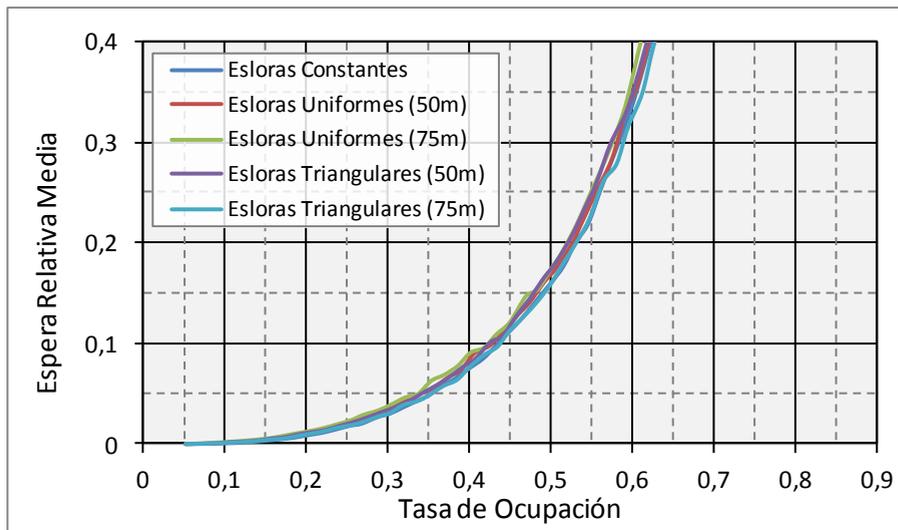


Figura VII-15: Influencia de la variabilidad de esloras cuando se llevan a cabo enmendadas. Muelle de 1000m, eslora media 250m y resguardo ROM.

Es de destacar la poca afección que tiene en los resultados el tipo de función (uniforme o triangular) y la desviación máxima ($\pm 50\text{m}$ o $\pm 75\text{m}$) empleados en las esloras, de hecho tanto en la Figura VII-13 y Figura VII-14, como en la Figura VII-15, las curvas están prácticamente superpuestas. Por tanto, que sea una función uniforme o triangular y que tenga mayor o menor desviación típica daría a priori igual, lo que sí es importante es considerar que existe variabilidad en las esloras. Nótese que en caso de que se considerara la eslora extremal como eslora tipo, el número de atraques equivalentes sería distinto para cada tipo de función, cuando el resultado de la curva es el mismo, bien entendido, cuando hay variabilidad de esloras (Obrer-Marco y Aguilar 2011).

Con el fin de ejemplificar esta última idea, la Tabla VII-3 muestra los valores del número de atraques equivalentes para cada tipo de función y rango dado el caso de un muelle de 1000m y una eslora media de 150 m:

NÚMERO DE ATRAQUES EQUIVALENTES			
		Eslora Media	Eslora 85%
Uniforme	[100, 200]	5,787	4,700
	[75, 225]	5,787	4,294
Triangular	[100, 200]	5,787	5,037
	100, 200]	5,787	4,728

Tabla VII-3: Comparación del número de atraques equivalente entre la eslora media y la eslora del 85% para diferentes distribuciones de esloras. Muelle de 1000m y resguardos del 15%.

Como ya se ha mencionado, podría pensarse que el hecho de que la variabilidad de esloras mejore o empeore la situación respecto de la situación de esloras constantes en función del valor de la parte fraccionaria del número de atraques equivalentes, tenga que ver con la posición de la curva cuando no hay variabilidad de esloras. De hecho, como se ha visto, cuando no hay variabilidad de esloras la curva $\phi_L - \epsilon_r$ está más separada de la curva $\phi - \epsilon_r$ asociada al entero de N_{equiv} cuanto mayor es la parte fraccionaria de N_{equiv} .

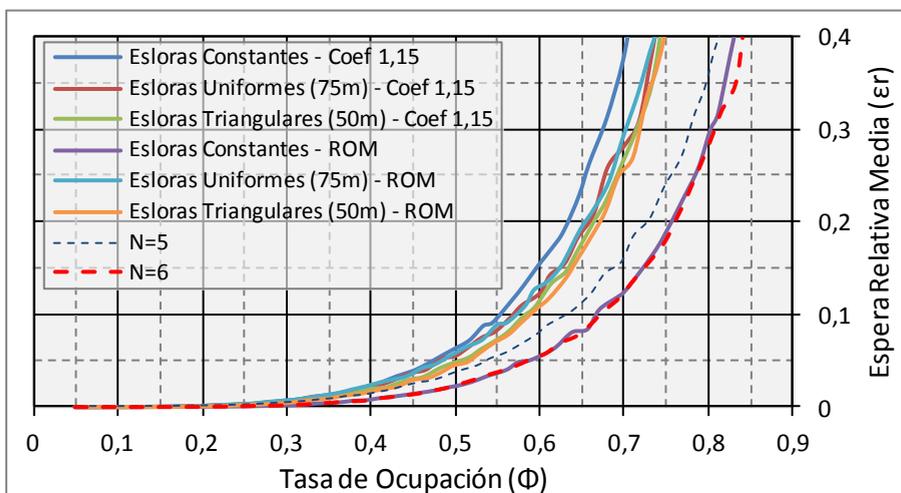


Figura VII-16: Influencia de la variabilidad de esloras cuando se llevan a cabo enmendadas. Muelle de 1000m y eslora media 150m. Comparación con distintos resguardos.

Para ello se han representado en la Figura VII-16 algunas de las curvas contenidas en la Figura VII-13 y Figura VII-14, en concreto las correspondientes a las esloras constantes, a las esloras uniformes cuya desviación máxima es de $\pm 75\text{m}$, y a las esloras triangulares cuya desviación máxima es de $\pm 50\text{m}$. También se han representado las curvas $\phi_L - \epsilon_r$ para $N=5$ y $N=6$ a efectos comparativos.

Como se puede apreciar, las curvas correspondientes a los casos con variabilidad de esloras se solapan con independencia del valor de N_{equiv} , es decir, con independencia del criterio de resguardo aplicado, tal y como se intuía. La curva $\phi_L - \epsilon_r$ asociada con esloras constantes aplicando el criterio ROM 2.0-11 se encuentra a la derecha de las anteriores puesto que se consigue optimizar el muelle ($N_{\text{equiv}}=6,030$), de ahí que la curva esté prácticamente solapada con aquella de $N=6$. Todo lo contrario ocurre con la curva $\phi_L - \epsilon_r$ asociada con esloras constantes aplicando el criterio de resguardo del 15%. Esta curva está a la izquierda (peores resultados) que cuando hay variabilidad, y por supuesto la curva asociada a $N=5$ queda a la derecha de las curvas $\phi_L - \epsilon_r$ con independencia de la distribución de esloras, pues aplicando el resguardo del 15% $N_{\text{equiv}} = 5,797$.

VII.2.2.3. Comparación entre escenarios con distinto criterio de asignación de huecos

Para seguir con este análisis, inicialmente se ha querido verificar algo que a priori se podría intuir, y es que entre la elección del hueco más pequeño o el hueco más grande, los resultados de las curvas $\phi_L - \epsilon_r$ son mejores cuando los buques se posicionan en el hueco más pequeño de todos los huecos donde cabe, dejando así los huecos de mayor longitud para posibles buques de mayor eslora. El resultado ha sido sorprendente, pues en la mayoría de los escenarios no tiene ninguna repercusión optar por asignar el atraque a los buques en los huecos más pequeños donde caben o en los más grandes (ver Figura VII-17). En algún caso, como el que muestra la Figura VII-18, la repercusión es algo mayor, pero ha sido un resultado puntual. Se ve como la curva vinculada con la simulación del “hueco pequeño” está más a la derecha, es decir, proporciona mayores tasas de ocupación para la misma espera relativa.

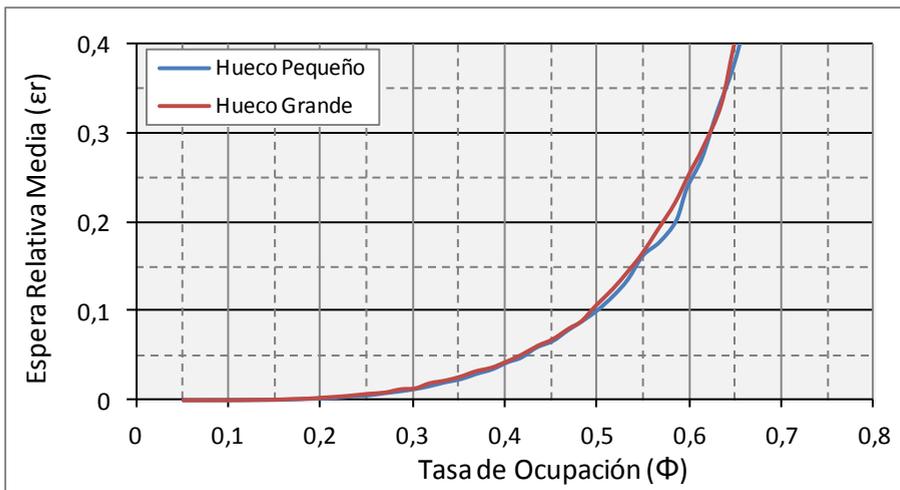


Figura VII-17: Comparación entre la asignación de buques en los huecos más pequeños y los huecos más grandes. Muelle de 1500m, esloras triangulares [200,300].

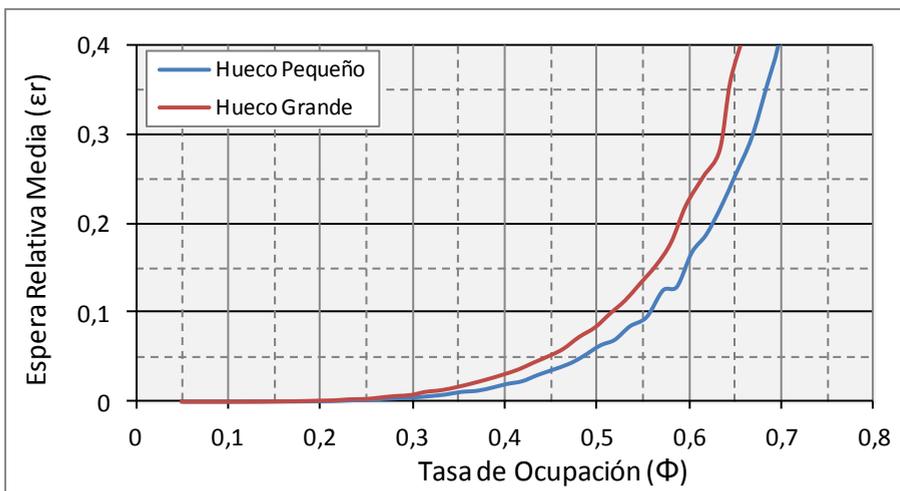


Figura VII-18: Comparación entre la asignación de buques en los huecos más pequeños y los huecos más grandes. Muelle de 2000m, esloras triangulares [200,300].

VII.2.2.4. Comparación entre escenarios con distinto criterio de asignación del buque dentro del hueco

Al contrario que en el apartado anterior, los resultados que han arrojado las simulaciones sí que son las esperadas, es decir, parece lógico pensar que optando por posicionar los buques en el centro de los huecos disponibles en

lugar de en los extremos, las tasas de ocupación serán más bajas para la misma espera relativa, y se ha confirmado esta intuición mediante los resultados de las simulaciones (ver Figura VII-19 y Figura VII-20).

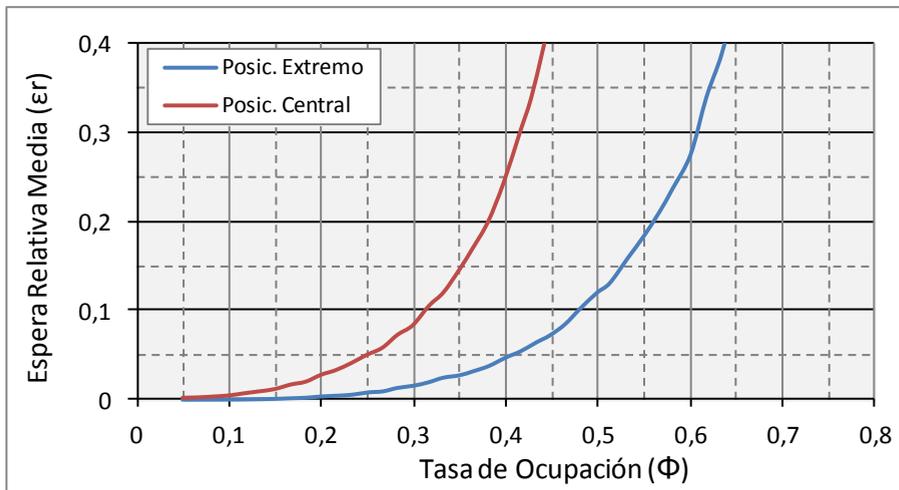


Figura VII-19: Comparación entre la asignación de buques en el centro y en el extremo de los huecos. Muelle de 1500m, esloras triangulares [200,300].

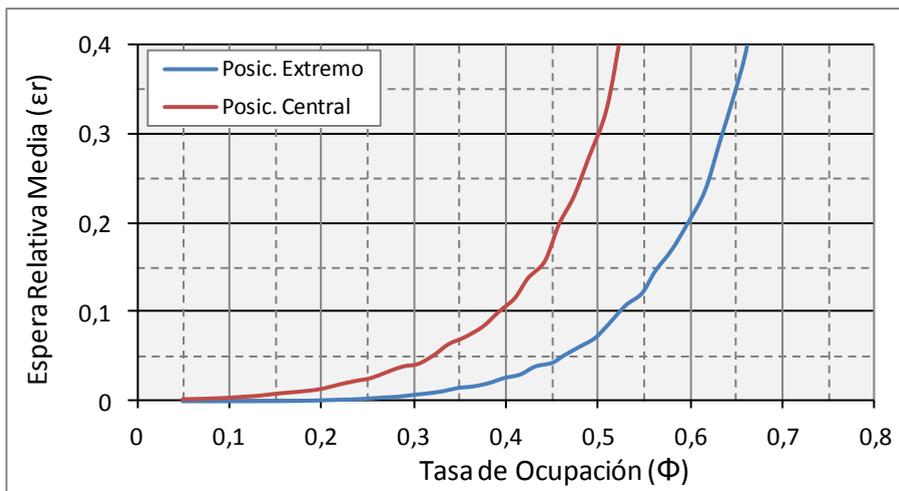


Figura VII-20: Comparación entre la asignación de buques en el centro y en el extremo de los huecos. Muelle de 2000m, esloras triangulares [150,350].

VII.2.2.5. Comparación entre escenarios con y sin enmendadas

Con este análisis se pretende demostrar una de las hipótesis que se ha adoptado desde el inicio de esta tesis, y es que cualquier escenario donde se llevan a cabo enmendadas proporciona resultados iguales o mejores que cualquier otro escenario.

Para demostrarlo se comparan los resultados arrojados por las simulaciones donde se llevan a cabo enmendadas con aquellos en los que se posiciona el buque en el hueco más pequeño de entre aquellos huecos donde cabe y en un extremo del hueco, pues como se ha visto en los apartados anteriores es el escenario mejor de entre aquellos donde no se llevan a cabo enmendadas.

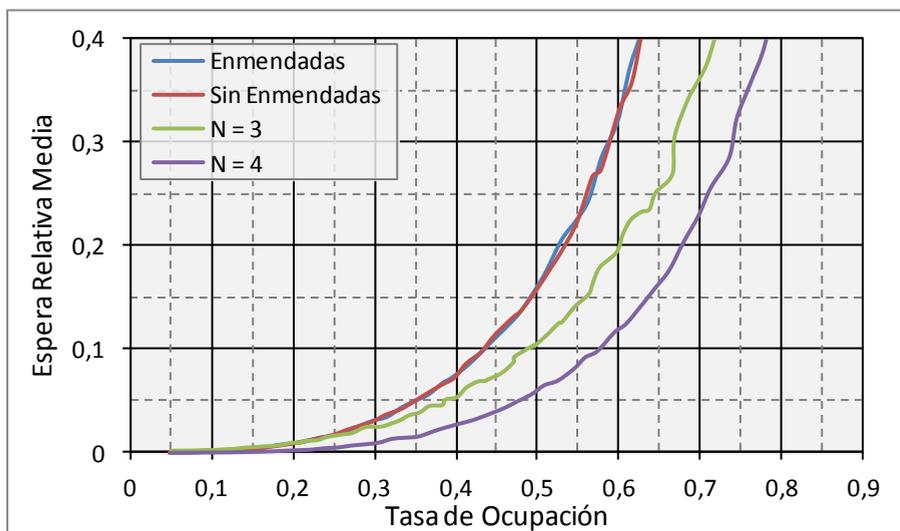


Figura VII-21: Comparación de escenarios con y sin enmendadas (hueco pequeño y posicionamiento en un extremo) con esloras constantes. Muelle de 1000m y eslora 250m.

Como se podría pensar, los resultados de ambas curvas tienen resultados iguales cuando las esloras son constantes, pues haya enmendadas o no, si los buques se posicionan en los extremos de los huecos y todos los buques tienen la misma eslora, las posiciones de los buques estarán siempre definidas (Obrer-Marco y Aguilar 2012). La Figura VII-21 y Figura VII-22 constatan esta intuición, la primera se trata de un muelle de 1000m donde llegan buques de eslora constante e igual a 250m y donde se establece un resguardo del 15%, por lo que $N_{equiv}=3,478$. La segunda se trata de un muelle de 2000m donde llegan

buques de eslora constante e igual a 250m y donde el resguardo es del 15%, por lo que $N_{equiv}=6,957$.

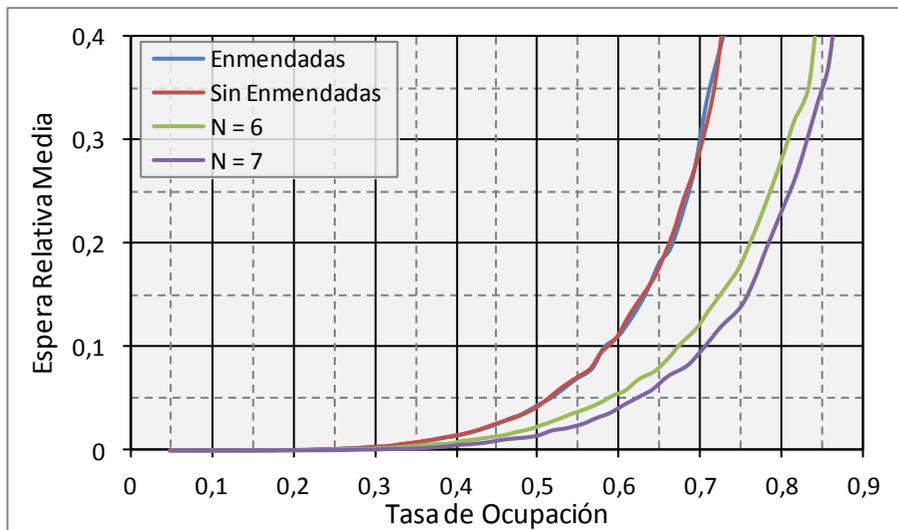


Figura VII-22: Comparación de escenarios con y sin enmendadas (hueco pequeño y posicionamiento en un extremo) con esloras constantes. Muelle de 1000m y eslora 250m.

Cuando existe variabilidad de las esloras los resultados también son los esperados: las curvas asociadas a los escenarios donde no se realizan enmendadas proporcionan resultados peores (ver Figura VII-23 y Figura VII-24), es decir proporcionan valores inferiores de la tasa de ocupación para la misma espera relativa.

La Figura VII-23 representa un muelle de 1000m donde llegan buques cuyas esloras se distribuyen según una función uniforme ([200, 300]) y donde el resguardo es el propuesto por la ROM 2.0-11. La Figura VII-24 representa un muelle de 1500m donde llegan buques cuyas esloras se distribuyen según una función uniforme ([200, 300]) y donde el resguardo es un 15% de la eslora.

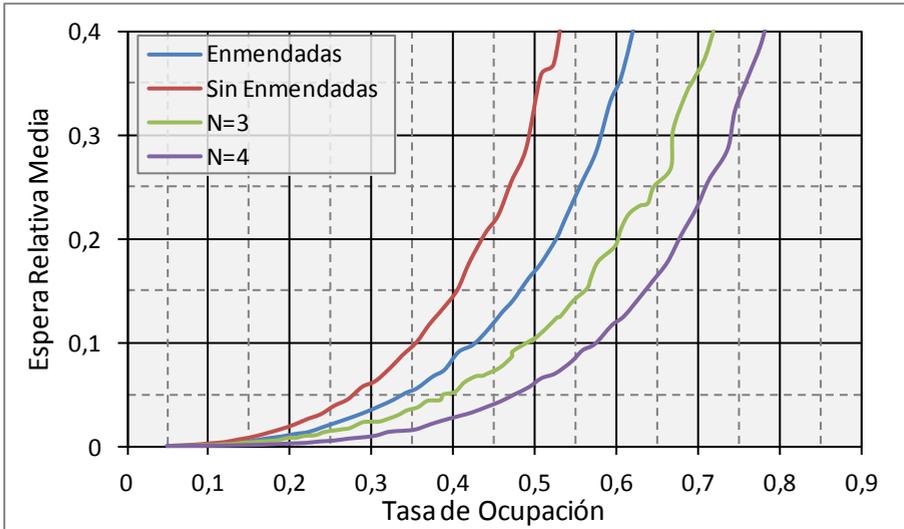


Figura VII-23: Comparación de escenarios con y sin enmendadas (hueco pequeño y posicionamiento en un extremo) con esloras uniformes [200,300] y criterio de resguardo ROM. Muelle de 1000m y eslora media 250m.

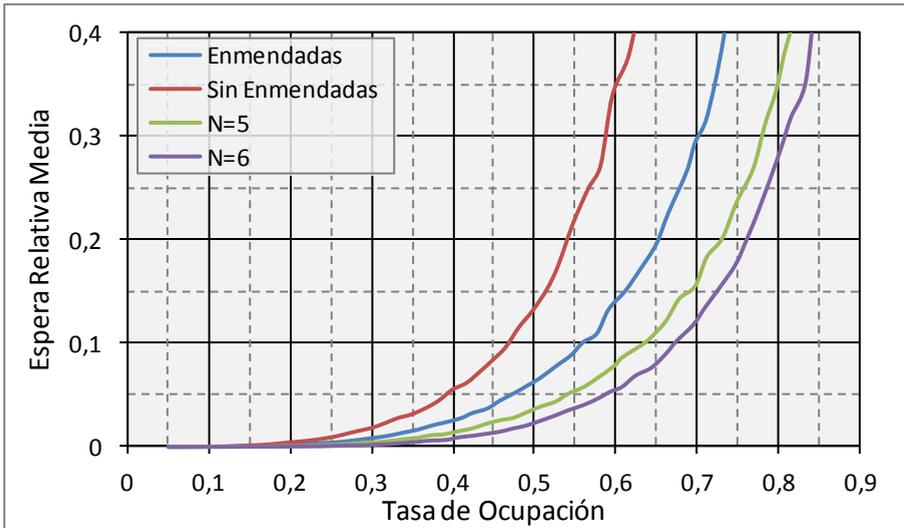


Figura VII-24: Comparación de escenarios con y sin enmendadas (hueco pequeño y posicionamiento en un extremo) con esloras uniformes [200,300] y criterio de resguardo del 15%. Muelle de 1500m y eslora media 250m.

VII.2.2.6. Estudio de los escenarios donde las esloras tienen variabilidad y no se llevan a cabo enmendadas

Llegados a este punto, parece razonable plantearse la afección que tiene la variabilidad de las esloras frente a esloras constantes cuando no se producen enmendadas. Al igual que en el apartado anterior, para hacer este análisis y basándose en los resultados vistos en este capítulo, en los escenarios donde no se producen enmendadas se ubicarán los buques en el hueco más pequeño posible y en un extremo de este hueco.

Los resultados de las simulaciones son claros, la variabilidad de las esloras siempre empeora los resultados respecto de las esloras constantes cuando no se llevan a cabo enmendadas (ver Figura VII-25 y Figura VII-26). Este resultado es crucial puesto que en muchos casos los planificadores, al dimensionar terminales no existentes pueden llegar a asumir buques tipo constantes, como puedan ser buques del tipo Post-Panamax, Super-Post-Panamax, etc. Introduciendo variabilidad en las esloras en el momento de la explotación, la capacidad real del muelle sería inferior a la estimada con esloras constantes.

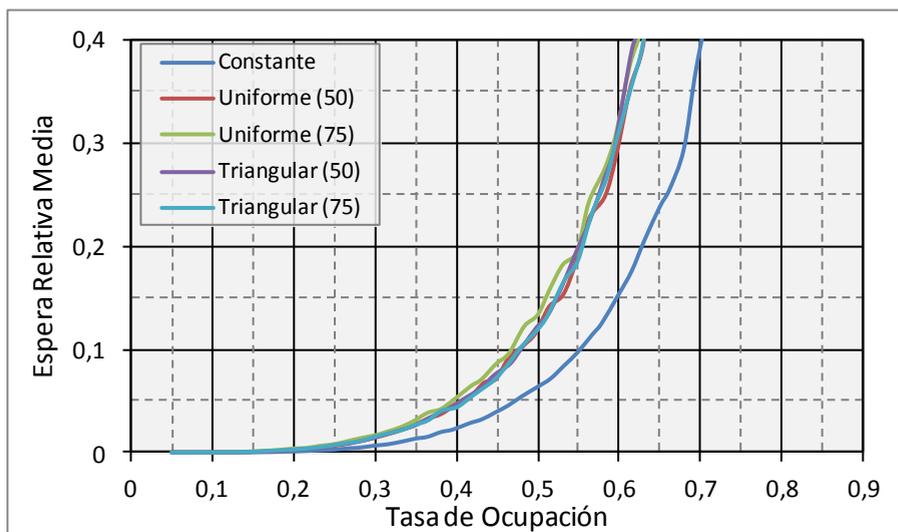


Figura VII-25: Influencia de la variabilidad de esloras cuando no se llevan a cabo enmendadas. Muelle de 1000m y eslora media 150m. Resguardos del 15%. $N_{equiv}=5,797$.

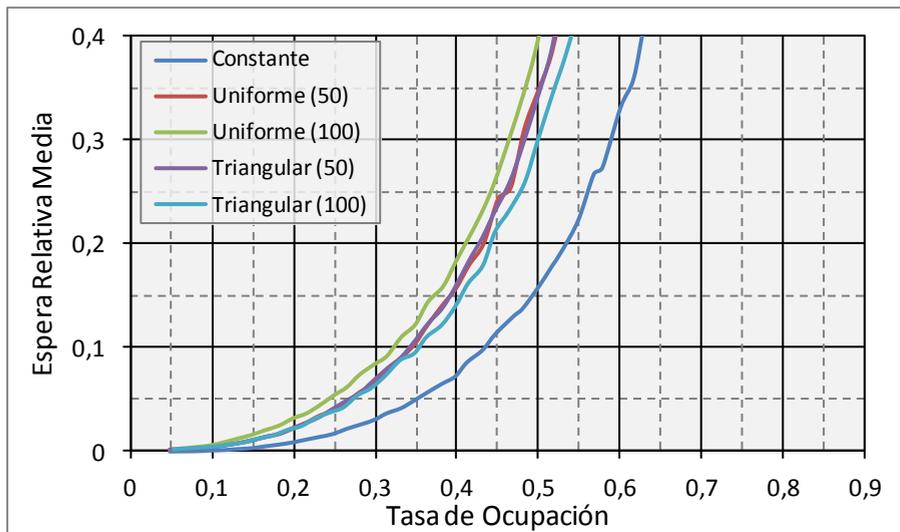


Figura VII-26: Influencia de la variabilidad de esloras cuando no se llevan a cabo enmendadas. Muelle de 1000m y eslora media 250m. Resguardos del 15%. $N_{equiv}=3,478$.

VII.2.2.7. Estudio de la afección de la distribución Erlang K en la duración del servicio

Tal y como se dedujo del estudio de las terminales de contenedores españolas, la función de distribución que siguen las duraciones de servicio es en todos los casos una Erlang K, donde K está entre 3 y 6.

En el análisis realizado en base a los resultados de las simulaciones ejecutadas asumiendo una explotación discreta del muelle, se pudo concluir que los resultados de la curva $\phi - \epsilon_r$ no se ven afectados por el valor de K siempre y cuando esta se mantenga en el rango mencionado.

El objetivo del análisis que se va a llevar a cabo en este punto es ver si en el caso de un muelle explotado de manera continua esta invariabilidad de la curva en relación al valor de K se mantiene. Tal y como se ha indicado en el apartado de escenarios, se han realizado diferentes simulaciones con diferentes valores de K. Los resultados son tan contundentes como en el caso del muelle discreto, las curvas no son sensibles al valor de K para valores entre 3 y 7, independientemente de los valores que adoptan el resto de variables.

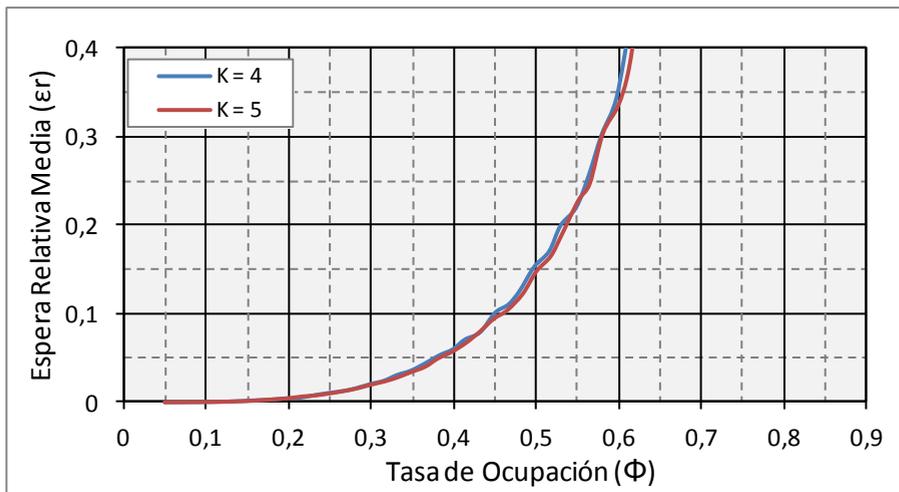


Figura VII-27: Comparación entre duración de servicio Erlang 4 y Erlang 5 para un muelle de 1500m, esloras uniformes [150, 350], resguardo del 15%. Asignación del buque en el hueco más pequeño y en un extremo.

La Figura VII-27 muestra las curvas $\phi_L - \epsilon_r$ para un muelle de 1500m donde llegan buques de esloras uniformes entre 150m y 350m, con llegadas exponenciales, y servicios Erlang K (con K igual a 4 y 5). La asignación de los buques en el muelle se hace en el hueco menor de todos los que cabe y en un extremo de este. Se aprecia que ambas curvas se superponen.

La Figura VII-28 muestra las curvas $\phi_L - \epsilon_r$ para un muelle de 1000m donde llegan buques de esloras también uniformes entre 100m y 200m, con llegadas exponenciales, servicios Erlang K (con K igual a 4 y 6) y donde se llevan a cabo enmendadas. Las dos curvas también se superponen (para tasas de ocupación entre 0,6 y 0,7 parece que sufren una ligera separación, pero esta es fruto de la propia variabilidad de los datos).

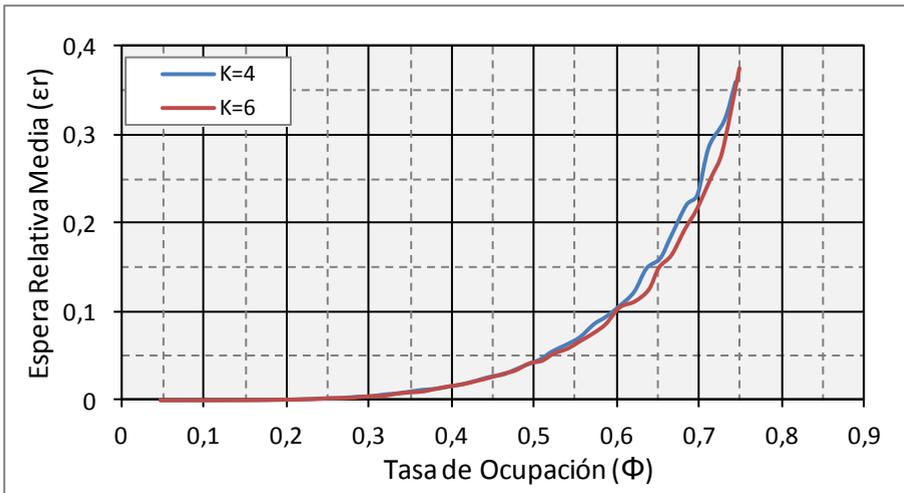


Figura VII-28: Comparación entre duración de servicio Erlang 4 y Erlang 6 para un muelle de 1000m, esloras uniformes [100, 200], resguardo del 10%. Enmendadas.

CAPÍTULO VIII

Síntesis, conclusiones y futuras líneas de investigación

La revisión del estado del arte realizada como punto de partida de la tesis doctoral ha permitido establecer una definición clara de la capacidad de un muelle y motivar un estudio preciso de las terminales de contenedores españolas para conocer los límites de la aplicación de la formulación de la capacidad asociada a tal definición. Se ha visto la necesidad de vincular el concepto de capacidad de un muelle a un determinado nivel de servicio ofrecido al naviero (usuario del muelle), un nivel de servicio que puede ser cambiante en el tiempo y que por tanto hace que el valor de la capacidad de un muelle también lo sea.

Ese nivel de servicio viene definido por dos variables, la **productividad del muelle** y la **espera relativa** (cociente de la duración de espera media entre la duración de servicio media). Muchos autores asumen la espera relativa como indicador exclusivo de la calidad (hasta el punto de llamarle “calidad del servicio”). Pero ello puede dar una idea totalmente equivocada de la realidad. Tal sería la situación en un caso en el que la espera media fuese elevada, pero dado que el sistema de carga y descarga fuese extremadamente ineficiente, la duración del servicio media fuese a su vez elevada y por lo tanto la espera relativa resultase ser razonable. Es preciso que para que la espera relativa sea

el estimador que se está buscando, vaya acompañada de una productividad del muelle razonable.

Ambas variables, la productividad del muelle y la espera relativa, están en la formulación propuesta de capacidad del muelle, la primera directamente y la segunda indirectamente a través de la tasa de ocupación.

La relación algebraica entre la tasa de ocupación y la espera relativa sólo se puede obtener en dos casos a través de teoría de colas: 1) cuando las llegadas de los buques al puerto y las duraciones de servicio de los buques en el atraque se distribuyen como una función exponencial (con independencia del número de atraques); 2) cuando las llegadas de los buques al puerto o las duraciones de servicio de los buques en el atraque se distribuyen como una función exponencial, y hay un único atraque.

El estudio de las terminales de contenedores españolas llevado a cabo como parte de esta tesis, ha determinado que no se cumple ninguna de estas dos condiciones, de ahí la necesidad de utilizar herramientas de simulación.

VIII.1. Estudio de las terminales de contenedores españolas

En la elaboración de este estudio han participado 9 terminales. Los principales problemas ocurridos han sido la falta de estandarización de los datos recogidos por éstas (tanto en la terminología empleada como en los datos en sí) y la falta de sistematización en la recopilación.

Las variables que se han estudiado se han dividido entre aquellas relacionadas con la demanda de servicio y aquellas relacionadas con la oferta de servicio. De entre las primeras se han analizado:

1. El intervalo entre llegadas de buques: en todas las terminales analizadas esta variable se distribuye según una función exponencial (aunque de medias muy diversas).
2. Las esloras de los buques que escalan en las terminales no presentan resultados muy claros, parecen asemejarse a funciones uniformes o triangulares superpuestas (lo que puede indicar la coexistencia de dos familias de buques).

3. El volumen de carga de los buques manipulado en cada muelle se distribuye en algunos casos según una Erlang K y en otros según una distribución triangular.

Las variables analizadas relacionadas con la oferta del servicio han sido:

4. Duración del servicio: el resultado del análisis de las duraciones de servicio ha sido, al igual que en el caso de las llegadas, totalmente rotundo: en todas las terminales esta variable se distribuye según una función Erlang K donde K se encuentra entre 3 y 6, y de medias diversas.
5. Duración de los tiempos muertos: esta variable no se ha podido estudiar en todas las terminales por falta de datos. En la mayoría de las terminales estudiadas la función algebraica que más se adapta es la Erlang 2. Se ha comprobado que la duración de los tiempos muertos es independiente de la ocupación del muelle y tiene altas variabilidades.
6. Plancha unitaria: en todas las terminales las planchas unitarias se distribuyen según una Erlang, por lo que el periodo de tiempo empleado en manipular una unidad de carga en cada barco no es puramente aleatorio, sino que tiene cierto grado de certidumbre (mayor cuando mayor sea el valor de K).

Además del análisis independiente de todas las variables, se han analizado algunas relaciones entre ellas que pudieran ser interesantes. En relación con la eslora se ha visto que a medida que esta aumenta la variabilidad del volumen de carga movido en cada escala también aumenta (aunque es la envolvente de máximos la que crece de forma significativa). También aumenta la variabilidad de duraciones de servicio, aunque de forma mucho más atenuada y también debido mayoritariamente a la envolvente de máximos. Si estos resultados se presentan así, ha de ser necesariamente porque con el aumento del volumen de carga por escala, la productividad del muelle (o del buque en este caso) también aumenta, y así se ha constatado.

VIII.2. Definición de capacidad de muelle

Del estudio de las terminales de contenedores españolas también se ha comprobado que en todos los casos los muelles se explotan como una línea

continua, donde en función de las esloras de los buques que en cada momento hacen escala, el número de buques atracados es diferente. La formulación del tráfico del muelle (que llevado al límite proporciona la capacidad) hasta ahora utilizada asume que los muelles están formados por un número determinado y entero de atraques, por lo que en esta tesis se propone una nueva formulación.

$$T = L \cdot \Phi_L \cdot P_L \cdot H_{año}$$

Siendo: L la longitud del muelle (m); Φ_L la tasa de ocupación del muelle explotado de manera continua; P_L la productividad del muelle TEUs/(h·m), contenedores/(h·m) o movimientos/(h·m)); y $H_{año}$ el número de horas operativas del muelle al año (h/año).

De entre todas las variables de esta nueva formulación, la tasa de ocupación del muelle explotado de manera continua (Φ_L) es totalmente crítica. Esta variable, a diferencia de la tasa de ocupación del muelle explotado de manera discreta (Φ), considera exclusivamente como ocupados aquellos metros del muelle en los que hay realmente un buque atracado, y no como en el caso de Φ , el cual considera exclusivamente la ocupación o no ocupación del puesto de atraque con independencia de si el buque allí albergado ocupa el puesto en su totalidad o solamente una parte. Esta gran diferencia explica algunos de los resultados de esta tesis.

Al igual que en las formulaciones utilizadas desde los años 70, en esta nueva formulación es necesario conocer la relación entre la espera relativa (ϵ_r) y la tasa de ocupación (Φ_L), pues fijada una P_L elevada, la manera de llevar al límite el tráfico es llevando al límite la espera relativa (se considera que ese límite está en 0,1). Para conocer dicha relación es necesario recurrir también a herramientas de simulación.

Así, en esta tesis se ha desarrollado una herramienta de simulación capaz de proporcionar entre otros la relación $\epsilon_r - \Phi$ cuando el muelle se explota de manera discreta (con independencia de si se cumplen las condiciones anteriormente descritas para aplicar las expresiones algebraicas de la teoría de colas), y la relación $\epsilon_r - \Phi_L$ cuando el muelle se explota de manera continua, para lo cual ha sido necesario reproducir ciertas pautas de comportamiento de la explotación de los muelles.

VIII.3. Resultados de las simulaciones realizadas en un muelle explotado de manera discreta

Con el fin de comprobar el correcto funcionamiento del programa de simulación, se han comprobado algunos resultados ya conocidos como es que a medida que crece el número de atraques, para la misma espera relativa, la tasa de ocupación es mayor. De esto se deduce que fijada la calidad a ofrecer al naviero (en términos de espera y de productividad), es posible conseguir mayores tasas de ocupación (de la terminal o del atraque, pues coinciden) cuando el número de atraques de la terminal es mayor. Por tanto, a priori, resulta más interesante construir menos terminales con mayor número de atraques que más terminales con menor número de atraques.

Otra conclusión que se ha podido extraer es que para el caso de llegadas exponenciales y duraciones del servicio Erlang K, fijado el número de atraques no existe prácticamente variación en los resultados de $\epsilon_r - \phi$ cuando K se mueve entre 3 y 7. En efecto, en las terminales de contenedores españolas, las llegadas son exponenciales y los servicios Erlang K donde k está entre 3 y 6, por lo que en todos los casos, la curva $\epsilon_r - \phi$ está prácticamente superpuesta para un mismo número de atraques. Esta conclusión también se ha obtenido cuando el muelle se explota de manera continua.

Por otro lado se ha analizado la variabilidad de ϕ frente a variaciones de ϵ_r , y se ha visto que esa variabilidad crece entre 1 y 3 atraques, pero que a partir de 3 atraques disminuye progresivamente.

Finalmente se ha querido ver cómo evoluciona la variabilidad de la espera relativa entre los distintos ciclos de repetición que se realizan en el programa para un mismo periodo de tiempo. Se ha podido comprobar que a medida que la tasa de ocupación crece, la variabilidad de la espera relativa también lo hace. La conclusión principal es que para tasas de ocupación relativamente elevadas, pueden darse situaciones de crisis con más facilidad que para tasa menores. Por lo tanto, es necesario matizar la afirmación anteriormente expuesta en cuanto a que, dado que se pueden obtener mayores tasas de ocupación para la misma espera relativa, es preferible tener pocas terminales grandes que muchas pequeñas. Ahora por el contrario se aprecia que aunque esta afirmación sea cierta, hay que considerar que la mayor variabilidad de las

esperas relativas que se producen para tasas de ocupación elevadas, facilitaría la aparición de episodios de crisis, lo que las convierte en potencialmente más críticas.

VIII.4. Resultados de las simulaciones realizadas en un muelle explotado de manera continua

Del examen de los resultados arrojados por el programa simulando un muelle continuo se han extraído conclusiones totalmente reveladoras que advierten de los errores que se pueden estar cometiendo al aplicar las prácticas que hasta ahora se han llevado a cabo para calcular la capacidad de los muelles. Dada la gran cantidad de variables que afectan en la explotación continua del muelle, este apartado de conclusiones se ha estructurado estableciendo unos valores de las mismas de manera que se parte de los casos más sencillos y se avanza hacia los casos más complejos.

CASO DE ESLORAS CONSTANTES

La primera conclusión clave que se ha comprobado ha sido cuando se asume que las esloras de los buques que llegan a la terminal son constantes. En este caso, en función de la longitud del muelle, de las esloras y del criterio que se adopte para calcular los resguardos de seguridad, el aprovechamiento del muelle será diferente. Es clave pues el número de ataques equivalentes, es decir la proporción de la longitud del muelle y la eslora de los buques afectada por el resguardo. Así, se ha comprobado que la curva $\varepsilon_r - \phi_L$, proporciona resultados peores a medida que crece la parte fraccionaria del número de ataques equivalentes. Esto es así porque, a medida que crece la parte fraccionaria del número de ataques equivalentes, la curva $\varepsilon_r - \phi_L$ se va desplazando progresivamente hacia la izquierda de la curva correspondiente a la parte entera del número de ataques equivalentes (que es la misma que la curva $\varepsilon_r - \phi$ de ese mismo número entero), llegando a proporcionar valores de la tasa de ocupación de un 15% inferior (para una $\varepsilon_r = 0,1$).

Por tanto, la práctica de interpolar entre las curvas de número entero superior e inferior al número de ataques equivalentes siempre arrojará datos de capacidad superiores a los reales si las esloras son constantes, pues el valor de la tasa de ocupación no es lineal entre el valor de ϕ del número de ataques entero inferior y superior al número de ataques equivalentes. La práctica de

quedarse con el valor de la tasa de ocupación asociada con el entero inferior al número de atraques equivalentes, también proporcionará datos superiores a los buscados en el momento en el que ese número de atraques equivalentes no sea entero.

Cuando las esloras son constantes no se ha diferenciado entre el caso de realizarse enmendadas o no realizarse enmendadas puesto que, en este caso, los buques siempre adoptarán la misma posición con independencia de si se llevan a cabo, o no, las enmendadas, y por tanto los resultados siempre serán los mismos.

CASO DE ESLORAS VARIABLES Y REALIZACIÓN DE ENMENDADAS

En el caso de que exista variabilidad de esloras y se produzcan enmendadas (máxima optimización del muelle), los resultados arrojan datos interesantes. La variabilidad de esloras puede mejorar o empeorar la tasa de ocupación en relación con los casos de esloras constantes. Es decir, las curvas $\epsilon_r - \phi_L$ pueden quedar a la derecha o a la izquierda de la curva de esloras constantes. El factor clave es el valor de la parte fraccionaria del número de atraques equivalentes. Si este valor es inferior a 0,5, la variabilidad de esloras empeorará los resultados, mientras que si este valor es superior a 0,5 los mejorará.

Resulta también de máximo interés el hecho de que no afecte en los resultados el tipo de función que aporta la variabilidad de las esloras, ya sea uniforme o triangular. Tampoco que la desviación típica de esas funciones sea mayor o menor. En todos los casos en los que se simula con estas dos funciones, las curvas $\epsilon_r - \phi_L$ están solapadas y por tanto los resultados de la tasa de ocupación son los mismos. Este resultado se ha producido tanto en las simulaciones donde se realizan enmendadas como en las que no.

CASO DE ESLORAS VARIABLES Y NO REALIZACIÓN DE ENMENDADAS

Se ha podido comprobar que cuando no se realizan enmendadas y se pretende asignar un hueco del muelle a un buque, prácticamente no tiene afección el criterio de elegir el hueco más pequeño o el más grande de entre todos los huecos posibles donde cabe el buque. Esto es así porque de entre todos los casos simulados, solamente en uno la curva $\epsilon_r - \phi_L$ ha quedado más a la izquierda cuando se ha optado por ubicar los buques en el hueco más grande

posible que en el hueco más pequeño, haciendo que para una ϵ_r de 0,1, la tasa de ocupación sea un 5,5% inferior.

También se ha podido comprobar que los resultados son mejores cuando los buques se posicionan en el extremo del hueco en lugar de en el centro, como podría pensarse. Así, las tasas de ocupación son alrededor de un 30% inferiores cuando se posicionan los buques en el centro de los huecos en lugar de en los extremos.

Si ya se mencionó que cuando las esloras son constantes el hecho de realizar o no enmendadas no afecta en los resultados, cuando hay variabilidad de esloras esto no es así. Se ha constatado que al realizarse enmendadas los resultados son mejores, es decir se obtienen mayores tasas de ocupación para la misma espera relativa (entre un 15% y un 20% para $\epsilon_r=0,1$).

Finalmente, se ha podido comprobar que en el caso de no producirse enmendadas, la variabilidad de esloras siempre empeora los resultados en relación con el caso de esloras constantes, a pesar de posicionar los buques en los extremos de los huecos, que como se ha demostrado proporciona mejores soluciones. Por tanto, en caso de que se dimensionara un muelle asumiendo esloras constantes, en el momento en el que entrara en explotación y las esloras tuvieran variabilidad, automáticamente la capacidad del muelle se vería disminuida respecto de los cálculos iniciales, puesto que la tasa de ocupación es entre un 10% y un 30% inferior cuando existe variabilidad de esloras (para $\epsilon_r=0,1$).

De todo lo anterior se deduce que es extremadamente complicado definir una regla práctica para obtener la tasa de ocupación con la cual calcular la capacidad de los muelles explotados de manera continua mediante las formulaciones de los años 70. Para cada terminal es necesario aplicar herramientas de simulación que permitan aproximarse a la realidad de la explotación de la terminal, y dado el poco conocimiento de la terminal en sí, en especial cuando no está construida, es necesario simular varios escenarios para que un experto pueda dar una conclusión final.

En todo caso, es fundamental darse cuenta de los errores que se están cometiendo cuando se asume que el muelle está compuesto por un número de atraques discreto y se aplica la formulación de la capacidad discreta.

VIII.5. Líneas futuras de investigación

A partir del trabajo realizado en la presente tesis doctoral y vistas las conclusiones que de él se han extraído, se considera muy interesante seguir con la investigación iniciada. Por ello a continuación se proponen algunas de las líneas que quedan abiertas:

1. Realizar algún tipo de proceso de optimización intermedio entre el mejor de estos procesos (enmendadas) y la no existencia de ellos. Sería interesante saber si la variabilidad de esloras también empeora los resultados respecto de las esloras constantes aplicando un proceso intermedio.
2. Analizar la afección que puede tener en la curva $\varepsilon_r - \phi_L$ el hecho de que la gestión de la cola no sea FIFO, sino que exista algún tipo de prioridades como pudiera ser los buques de mayor eslora, o los buques con mayor número de contenedores a manipular en la terminal.
3. Estudiar la afección que puede tener en la curva $\varepsilon_r - \phi_L$ el hecho de que la duración del servicio no sea independiente de las otras variables como pueda ser la eslora, el número de contenedores a manipular, etc.
4. Analizar cómo podría afectar que existan alineaciones diferentes en un muelle. En esta tesis se ha considerado una única alineación, pero se podría estudiar la afección de tener la misma longitud en varias alineaciones.
5. Estudiar cómo afectaría la existencia de restricciones de calado en el muelle.

Referencias

-
- Aguilar, J. y Obrer-Marco, R. (2008). "Consideraciones sobre la oferta y la demanda del servicio de atraque, en relación con la capacidad de las terminales de contenedores", Proc., *Consideraciones sobre la oferta y la demanda del servicio de atraque, en relación con la capacidad de las terminales de contenedores*, Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Santander, 769-778.
- Aguilar, J. y Obrer-Marco, R. (2010). *La medición del rendimiento, la eficiencia, la capacidad y el nivel de servicio en terminales portuarias de contenedores*. Proyecto de Metodologías de Automatización y Simulación para la evaluación y mejora de la capacidad, rendimiento y nivel de servicio de terminales portuarias de contenedores (MASPORT), Hito 4.1, Ministerio de Ciencia e Innovación.
- Aguilar, J. y Obrer-Marco, R. (2011). "Relaciones entre variables de la escala para la determinación de la duración del servicio en terminales de contenedores". Proc., *Relaciones entre variables de la escala para la determinación de la duración del servicio en terminales de contenedores*, Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Las Palmas de Gran Canaria, 657 - 663.
- Aguilar, J. y Obrer-Marco, R. (2013). "Método probabilístico para determinar la longitud de una atraque calculado con base en la explotación de atraques discretos que atienden a flotas con variabilidad de esloras". Proc. *Método probabilístico para determinar la longitud de una atraque calculado con base en la explotación de atraques discretos que atienden a flotas con variabilidad de esloras*. Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Cartagena,
- Agerschou, H., Dand I., Ernst T., Ghoos H., Jensen O.J., Korsgaard J., Land J.M., McKay T., Oumeraci H., Petersen, J.B., Runge-Schmidt, L., y Svendsen, H.L. (2004). *Planning and design of ports and marine terminals*, 2ª Ed., Thomas Telford, Londres.
- Bassan, S. (2007). *Evaluating seaport operation and capacity analysis – preliminary methodology*, Maritime policy and management: the flagship journal of international shipping and port research, vol. 34, Issue 1, 3-19.
-

- Comisión de las Comunidades Europeas (2007). *Comunicación sobre una política portuaria europea*. COM (2007) 616 final. 18 de noviembre de 2007, Bruselas.
- De Monie, G. (1998). *Medición y evaluación del rendimiento y de la productividad de los puertos*, Publicación de las Naciones Unidas, Nueva York.
- Dragovic, B., Park, N.K., Radmilovic, Z., Maras, V. (2005). *Simulation modelling of ship-berth link with priority service*, Maritime Economics and Logistics, Volume 7, Issue 4, December 2005, 316-335.
- Dragovic, B., Park, N.K., Radmilovic, Z., Maras, V. (2006). *Ship-berth link performance evaluation: simulation and analytical approaches*, Maritime Policy and Management. An International Journal of Shipping and Research, Volume 33, No 3, July 2006, 281-299.
- Drewry (2002). *Global container terminals – Profit, performance and prospects*, Drewry Shipping Consultants Ltd., London.
- Drewry (2010). *Container Terminal Capacity and Performance Benchmarks*, Drewry Shipping Consultants Ltd., London.
- Drewry (2014). *Container Terminal Capacity and Performance Benchmarks*, Drewry Shipping Consultants Ltd., London.
- Henesey, L.E. (2004). *“Enhancing Container Terminal Performance: A Multi Agent Systems Approach”*. Department of Systems and Software Engineering, Blekinge Institute of Technology, Karlshamn, Suecia.
- Kendall, D.G. (1953). *Stochastic processes occurring in the theory of queues and their analysis by the method of the Imbedded Markov Chain*, The Annals of Mathematical Statistics, 24(3), 338-354.
- Lee, A.M. (1966). *Applied queueing theory*, MacMillan, London.
- Monfort, A, Aguilar, J., Gómez-Ferrer, R., Arnau, E., Martínez, J., Monterde, N., Palomo, P. (2001). *Terminales marítimas de contenedores: el desarrollo de la automatización*, Fundación IPEC, Valencia.
- Monfort, A., Aguilar, J., Vieira, P., Monterde, N., Obrer-Marco, R., Calduch, D., Marín, A.M., y Sapiña, R. (2011). *Manual de capacidad portuaria*:

-
- aplicación a terminales de contenedores*, Fundación Valenciaport, Valencia.
- Obrer-Marco, R. y Aguilar, J. (2011). "Influencia de los resguardos entre buques en la capacidad de los muelles". Proc., *Influencia de los resguardos entre buques en la capacidad de los muelles*, Jornadas Españolas de Ingeniería de Costas y Puertos, Las Palmas de Gran Canaria, 664 - 670.
- Obrer-Marco, R. y Aguilar, J. (2012). "Evolución de los factores que afectan a la capacidad de los muelles al aumentar la longitud de atraque". Proc., *Evolución de los factores que afectan a la capacidad de los muelles al aumentar la longitud de atraque*, Congreso de Ingeniería de Transporte, Granada, CD.
- Obrer-Marco, R. y 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.
- Park, S.K. y Kim, J. B. (2015). *Estimating on the optimal productivity indicators based on simulation software*. Information (Japan), Volume 18, Issue 6, 1 June 2015, 2351-2356.
- Rodríguez, F. (1977). *Capacidad de los muelles*, Secretaría General Técnica, Ministerio de Obras Públicas.
- ROM 2.0 (2011). *Recomendaciones para el proyecto y ejecución en Obras de Atraque y Amarre*. Recomendaciones para obras marítimas, Puertos del Estado, Ministerio de Fomento.
- Shabayek, A.A. y Yeung W.W. (2002). *A simulation model for the Kwai Chung container terminals in Hong Kong*, European Journal of Operational Research, 140, 1-11.
- Schreuder, M. (2005). *Application of approximate performance indicators for master planning of large ports*, Port Technology International, vol.26, 19-22.
- UNCTAD (1984). *Desarrollo portuario. Manual de planificación para los países en desarrollo*, 2ª Ed., Publicación de las Naciones Unidas, Nueva York.
-

Referencias

Wang, T.F., Cullinane, K., Song, D.W. (2005). *Container port production and economic efficiency*, Palgrave MacMillan Ltd.

World Bank (2007). *Alternative port management structures and ownership models*, Port reform tool kit, Module 3, World Bank, Washington D.C.

Anejo 1

Publicaciones relacionadas con la tesis

Las principales publicaciones relacionadas con la tesis son:

1. Obrer-Marco, R. y 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.
2. Obrer-Marco, R. y Aguilar, J. (2012). Evolución de los factores que afectan a la capacidad de los muelles al aumentar la longitud de atraque. Proc., Evolución de los factores que afectan a la capacidad de los muelles al aumentar la longitud de atraque, Congreso de Ingeniería de Transporte, Granada, CD.
3. Obrer-Marco, R. y Aguilar, J. (2011). Influencia de los resguardos entre buques en la capacidad de los muelles. Proc., Influencia de los resguardos entre buques en la capacidad de los muelles, Jornadas de Costas y Puertos, Las Palmas de Gran Canaria, 664 - 670.
4. Obrer-Marco, R. y Aguilar, J. (2011). A influência da variabilidade do comprimento dos navios no cálculo de capacidade dos cais de containers. Proc. A influência da variabilidade do comprimento dos navios no cálculo de capacidade dos cais de containers, 7as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Porto, CD.
5. Monfort, A., Aguilar, J., Vieira, P., Monterde, N., Obrer-Marco, R., Calduch, D., Marín, A.M., y Sapiña, R. (2011). Manual de capacidad portuaria: aplicación a terminales de contenedores, Fundación Valenciaport, Valencia.

A continuación se incluyen las principales publicaciones derivadas de las tesis, excepto la monografía "Manual de capacidad portuaria: aplicación a terminales de contenedores", debido a su extensión.

- 1. Obrer-Marco, R. y 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.**



Modélisation continue de l'accostage des navires pour le calcul de la capacité des quais. Application aux grands terminaux à conteneurs espagnols

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, Espagne.
roobmar@gmail.com ; jaguilard@upv.es

Résumé :

Le Système Portuaire Espagnol (SPE) est composé de 46 ports d'intérêt général, gérés par 28 Autorités Portuaires. Les relations entre ces autorités portuaires sont de nature concurrentielle, ce qui fait de la planification un outil indispensable pour qu'elles soient compétitives. Grâce à la planification les gérants des ports sont capables d'ajuster la capacité et les conditions physiques des infrastructures portuaires aux prévisions de croissance du trafic.

Il est essentiel que les départements de planification des Autorités Portuaires espagnoles disposent d'un outil qui soit capable d'estimer la capacité des infrastructures, et plus précisément des quais. Jusqu'à présent, le plus courant pour estimer cette capacité a été d'appliquer une formulation qui assume un nombre déterminé de postes d'accostage, tous identiques : formulation discrète. Néanmoins, l'exploitation des quais des terminaux à conteneurs est faite de manière continue. Pour cette raison, il faut faire un pas en avant et utiliser une formulation qui reflète l'exploitation réelle des quais : formulation continue.

Dans cet article on présente une formulation continue et on la compare avec la formulation discrète, en mettant en évidence les erreurs qui peuvent être commises en supposant que le quai est composé d'un ensemble de postes d'accostage identiques. Pour cela, on a appliqué les deux formulations au terminal à conteneurs MSC Terminal Valencia, S.A. du port de Valencia (Espagne) avant et après son agrandissement en 2010.

Soumis le 20 janvier 2012, accepté le 16 juin 2014, en ligne le 15 décembre 2014.

La seule version examinée est celle écrite en français. La ou les autres versions n'étant pas examinées par le comité de rédaction de la revue, sont donc publiées sous l'entière responsabilité du ou des auteurs.

UNA VERSION TRADUCIDA EN ESPAÑOL ES DISPONIBLE EN LINEA

Pour citer cet article :

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. Introduction et objectifs

La capacité d'un quai est le trafic limite qui peut être admis par le quai pendant une période de temps déterminée, normalement une année, mais, comme la définition de trafic limite n'est pas consensuelle, le concept de capacité ne peut pas être unique. On peut citer trois définitions de trafic limite (RODRIGUEZ, 1977) : le *trafic de congestion*, trafic à partir duquel les attentes des navires commencent à augmenter très rapidement ; le *trafic économique*, trafic où l'addition des coûts des navires et des coûts du quai est minimale ; ou encore le *trafic de saturation*, trafic à partir duquel tous les postes d'accostage sont occupés en permanence.

Néanmoins, dans les grands terminaux à conteneurs et comme conséquence de la grande concurrence qui existe entre eux, ce trafic limite doit être lié au niveau de service offert aux clients du terminal, dans ce cas, les compagnies maritimes.

Jusqu'à maintenant, pour les terminaux à conteneurs, la formulation employée afin d'estimer le trafic considère que les quais sont composés d'un nombre déterminé de postes d'accostage identiques (formulation discrète).

Toutefois, dans la réalité, les quais des grands terminaux à conteneurs ne sont pas exploités de manière discrète, mais de manière continue. Par conséquent une formulation discrète implique le fait d'avoir réalisé une translation conceptuelle du quai : d'une ligne continue à un nombre de postes d'accostage (N).

Le principal objectif de cet article est de présenter une formulation continue du calcul de la capacité des quais, afin de constater comment l'estimation de cette capacité peut changer quand celui-ci est modélisé comme un nombre déterminé de postes d'accostage ou, au contraire, comme une ligne continue. Le cas étudié pour illustrer cet objectif est celui de MSC Terminal Valencia, S.A. (MSCTV).

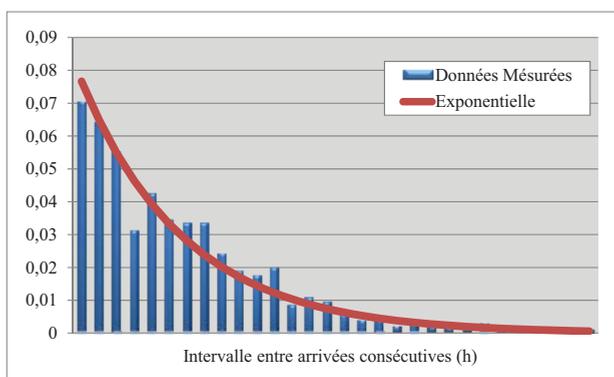


Figure 1. Densité de probabilité des arrivées des navires au terminal MSCTV.

Le terminal MSCTV a commencé ses opérations au Port de Valencia en 2007, et des 656 m opératifs initiaux, il est passé à 756 m en 2010. Pour le terminal MSCTV, avec

des données entre janvier 2008 et juin 2009, la densité de probabilité des arrivées des navires est exponentielle (voir figure 1) et celle des durées de service est Erlang 5 (voir figure 2). La longueur moyenne des porte-conteneurs est d'environ 225 m.

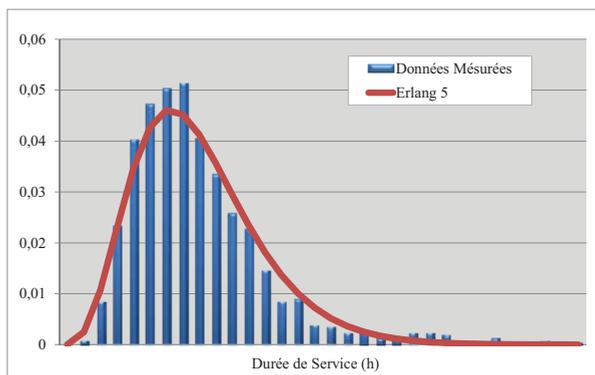


Figure 2. Densité de probabilité des durées du service au terminal MSCTV.

2. La formulation discrète

Une formulation possible et couramment utilisée pour estimer le trafic limite est :

$$r = N \times \rho \times P \times H_{an} \quad (1)$$

où :

r =trafic annuel du quai (conteneur Equivalent Vingt Pied ou EVP/an ou mouvements/an)

N =nombre de postes d'accostage (en fonction de la longueur des navires, N peut être un nombre décimal)

ρ =taux d'occupation du quai (ou d'un poste d'accostage puisqu'ils coïncident)

P =productivité du poste d'accostage (EVP/h ou mouvements/h)

H_{an} =heures opératives du terminal par an (h/an)

Le taux d'occupation (ρ) est défini comme la proportion entre le temps où les postes d'accostage sont occupés et la totalité du temps où les postes sont disponibles (voir équation (5)).

Dans la formulation représentée par l'équation (1), il y a implicitement un niveau de service offert à la compagnie maritime à travers les variables P et ρ . En ce qui concerne la capacité, l'intérêt des compagnies maritimes réside dans un temps d'escale réduit en proportion du nombre de conteneurs à manipuler pendant l'escale. Pour atteindre ce temps d'escale réduit il faut que la productivité du poste d'accostage (P) soit élevée, et que les attentes au mouillage dues à la congestion soient réduites sinon inexistantes. En réalité, la productivité du poste d'accostage ainsi que l'attente apparaissent dans l'équation (1) ; la première directement et la deuxième indirectement au travers de ρ . Intuitivement, quand ρ tend vers un (occupation permanente des postes d'accostage), les

attentes des navires tendent vers l'infini, et de manière analogue, quand ρ tend vers zéro, les attentes des navires sont pratiquement inexistantes.

En outre, il est raisonnable d'admettre que les attentes des navires sont proportionnelles à la durée de service. La relation entre l'attente moyenne des navires (D_a) et la durée de service (période de temps pendant laquelle le navire est amarré) moyenne de ces mêmes navires (D_s) est connue comme l'attente relative (ε_r) :

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

En connaissant la valeur de N , la densité de probabilité de l'intervalle entre arrivées consécutives des navires au terminal (A) et la densité de probabilité des durées de service au quai (B), il est possible de connaître la relation entre ρ et ε_r grâce à la théorie des files d'attente ou grâce à des outils de simulation.

La théorie des files d'attente ne peut être strictement appliquée que dans certains cas (RODRIGUEZ, 1977) :

- 1) Quand A et B sont des fonctions de répartition exponentielles, indépendamment de N .
- 2) Quand A ou B sont des fonctions de répartition exponentielles et $N=1$.

Dans tous les grands terminaux à conteneurs espagnols, on a vérifié que même si les arrivées des navires sont aléatoires, les durées de service suivent une densité de probabilité de la distribution d'Erlang K , où K varie entre 4 et 7 (AGUILAR & OBRER-MARCO, 2009). En conséquence, pour connaître la relation entre ε_r et ρ il est nécessaire d'utiliser des outils de simulation. La figure 3 montre une représentation de cette relation quand A, B et N sont déterminés.

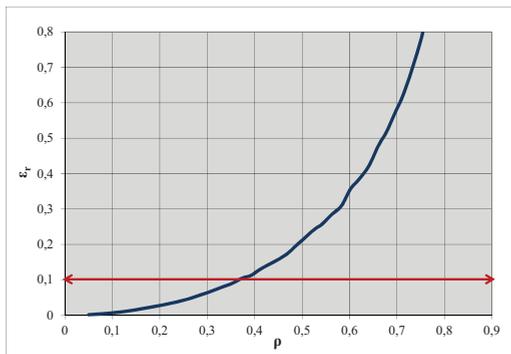


Figure 3. Exemple de représentation de la relation entre ε_r et ρ obtenue par simulation.

En supposant que la productivité du poste d'accostage (P) est élevée, le niveau de service offert aux compagnies maritimes est représenté par ε_r . Quand ce niveau reste fixé à une situation limite admissible par les compagnies maritime, c'est-à-dire quand la

relation entre la durée d'attente au mouillage et la durée de service au quai atteint une valeur maximale que les compagnies sont disposées à supporter, le trafic donné par la formulation équivaut à la capacité. Cette valeur maximale est la limite à partir de laquelle les compagnies maritimes partiraient solliciter escale dans d'autres terminaux. Alors, une fois la relation entre ε_r et ρ connue, il ne reste qu'à établir une valeur maximale de ε_r pour connaître ρ . Dans le cas des terminaux à conteneurs une valeur de ε_r supérieur à 0,1 n'est pas recommandée (AGERSCHOU, 2004).

3. Méthodologie

La méthodologie suivie pour mener les objectifs à bien fut la suivante. Tout d'abord, une nouvelle formulation du trafic du quai a été développée. Ensuite, les deux formulations existantes, celle qui suppose le quai composé d'un nombre N de postes d'accostage (formulation discrète) et celle qui suppose le quai comme une ligne continue (formulation continue), ont été appliquées au quai de MSCTV avant et après son agrandissement en 2010. Finalement, les résultats des quatre calculs ont été comparés et des conclusions tirées.

Pour appliquer la formulation discrète sur un quai exploité de manière continue, N peut être obtenu en divisant la longueur du quai par la longueur moyenne des navires, laquelle doit être augmentée pour tenir compte d'une distance de sécurité entre les navires, voir l'équation (3). En pratique, cette augmentation vaut souvent 10% de la longueur moyenne des navires. La translation conceptuelle du quai peut supposer des erreurs dans l'estimation de la capacité.

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

où :

L =longueur du quai

$L_{navires}$ =longueur moyenne des navires qui font escale

4. Formulation continue

La capacité d'un quai conceptuellement exploité de manière continue peut être obtenue grâce à l'expression suivante :

$$r = L \times \rho_L \times P_L \times H_{an} \quad (4)$$

où :

r =trafic annuel du quai (EVP/an ou mouvements/an)

L =longueur du quai (m)

ρ_L =taux d'occupation du quai exploité de manière continue

P_L =productivité du quai (EVP/(h·m) ou mouvements/(h·m))

H_{an} =heures opératives du terminal par an (h/an)

En comparant les formulations représentées par les expressions (1) et (4), on constate la similitude et l'équivalence entre leurs variables. Ainsi, N et L représentent la dimension du quai, N de manière discrète et L de manière continue. P et P_L représentent la vitesse de manipulation des conteneurs entre le quai et les navires, par unité de poste d'accostage (P), ou de mètre de quai (P_L) ; et H_{an} n'a aucune variation entre les deux formulations. Par contre, même si apparemment les variables ρ et ρ_L sont équivalentes, il y a une différence très importante dans leur définition et dans la manière de les estimer. En conséquence, la comparaison entre ρ et ρ_L doit se faire avec une extrême précaution (voir section suivante).

5 Différence de calcul entre ρ et ρ_L

Afin de calculer la valeur de ρ pendant une période de temps T , il est nécessaire de connaître la proportion entre la période de temps où les postes d'accostage sont occupés par un navire et la période de temps où les postes sont disponibles. Ainsi, le calcul de ρ ne tient pas compte du fait que le navire occupe entièrement le poste ou non. Ce fait est illustré en comparant les deux situations présentées dans la figure 4, pour lesquelles les navires restent dans les deux cas accostés pendant une même période T à quelques jours de différence. Dans les deux situations, la valeur de ρ est la même et égale à un, puisque dans les deux situations les deux postes d'accostage ont été occupés pendant la période complète de T . Néanmoins, la réalité est que dans la situation de droite les bateaux occupent complètement les postes, alors que dans la situation de gauche, les bateaux occupent seulement une faible partie des postes d'accostage. Ce phénomène n'a aucun impact dans les résultats de ρ .



Figure 4. Deux situations différentes où ρ a la même valeur.

Une formulation possible pour estimer ρ est la suivante :

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

où :

ρ = taux d'occupation du quai

i =compteur de postes d'accostage

N =nombre de postes d'accostage

t_i =période de temps où le poste i est occupé

T_i =période de temps où le poste i est disponible pour être occupé



Figure 5. Deux situations différentes où ρ_L a une valeur différente.

La figure 5 montre deux situations où les longueurs des navires sont exactement les mêmes que celles de la figure 4. La différence avec cette dernière est que le quai est conceptualisé comme une ligne continue et pas comme deux postes d'accostage.

Pour calculer la valeur de ρ_L il faut prendre en compte la longueur des navires. Donc, même si les deux navires restent accostés pendant un même temps T dans les deux situations de la figure 5, la valeur de ρ_L sera plus grande dans la situation droite. En effet, le nombre de mètres réellement occupés dans cette situation est plus grand.

La valeur de ρ_L peut être calculée à partir de l'expression (6) :

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

où :

j =compteur de navires

v =nombre de navires qui font escale au terminal

$L_{navires\ j}$ =longueur du navire j

$D_{S\ j}$ =durée du service du navire j

L =longueur du quai

T =période de temps où le quai est disponible

La relation $\varepsilon_r - \rho$ (discrète) se calcule donc indépendamment de la longueur des navires au poste d'accostage, alors que, la relation $\varepsilon_r - \rho_L$ (continue) prend uniquement en compte les mètres occupés par le navire et une marge de sécurité (10% de la longueur). En d'autres termes, ρ_L symbolise un rapport entre des mètres-heures occupés et des mètres-heures totaux, d'où la différence essentielle entre les calculs de ρ et ρ_L .

Afin de connaître ρ_L un programme de simulation basé sur des techniques de Monte Carlo a été développé. Il fournit la relation $\varepsilon_r - \rho_L$ à partir des données du terminal et des navires qui y font escale.

6. Scénarios étudiés

Pour mener les objectifs à bien, la capacité a été calculée selon quatre scénarios différents. Les deux premiers correspondent au quai de MSCTV avant son allongement et les deux derniers après. Les quatre scénarios sont :

- 1) quai de 656 m et formulation discrète ;
- 2) quai de 656 m et formulation continue ;
- 3) quai de 756 m et formulation discrète ;
- 4) quai de 756 m et formulation continue.

Dans tous les scénarios, la densité de probabilité de la longueur des navires est constante et égale à 225 m ($L_{navires}$). La distance de sécurité entre les navires vaut 10% de cette longueur.

Dans les scénarios 2 et 4, où le quai fonctionne de manière continue, il y a d'autres variables à considérer qui conditionnent les résultats de la relation entre ε_r et ρ_L . En effet, quand les navires arrivent dans un port, selon la disposition des navires accostés au quai, ils peuvent rentrer dans des espaces différents. En fonction de l'espace choisi et de la position du navire dans cet espace où finalement ils sont disposés, les résultats peuvent différer.

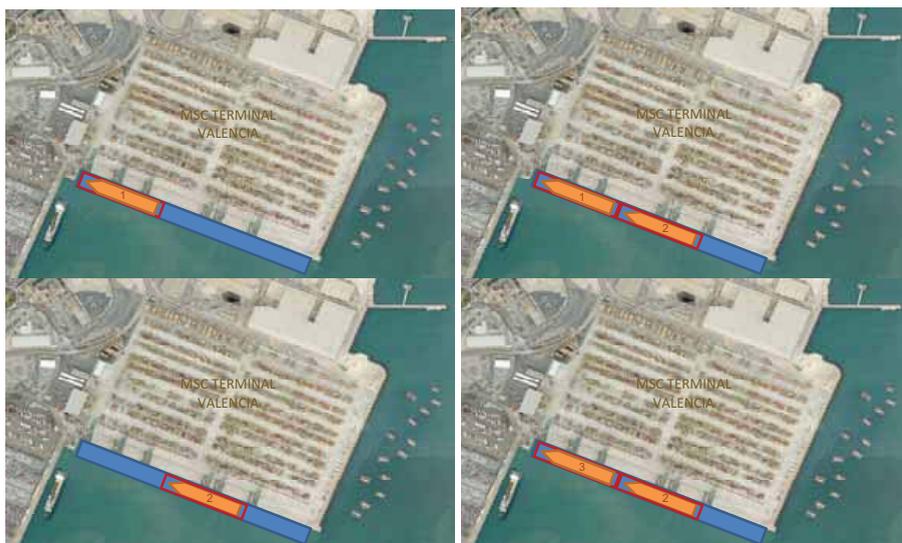


Figure 6. Routine d'assignation de poste d'accostage pour la formulation continue.

Dans cette étude, on a supposé que lorsqu'un navire quitte le quai, tous les autres navires qui restent sont déplacés vers un côté du quai. De cette manière, quand un navire arrive au port, il n'y a qu'un seul espace pour le placer. En outre, on a supposé que dans cet espace, les navires sont accostés à côté des autres navires.

Il est évident que dans les terminaux, les navires ne sont pas déplacés chaque fois que l'un d'entre eux quitte le terminal (situation idéale). Néanmoins, les résultats de cette simulation sont des valeurs maximales qui serviront donc de référence à comparer à d'autres solutions. En outre, comme on a supposé une densité de probabilité des longueurs de navires constante, les résultats seront exactement les mêmes dans cette situation idéale qu'en supposant la routine d'assignation de poste d'accostage suivante : lors de l'arrivée du premier bateau au terminal, il est placé à un extrême ; lors des arrivées suivantes, les bateaux sont placés soit à côté de ceux qui sont déjà accostés (en prenant en compte la distance de sécurité), soit à la place de ceux qui partent (voir figure 6).

Il est important de remarquer que les deux formulations proposées dans cet article sont différentes mais appliquées à une même réalité. C'est-à-dire, même si une formulation considère le quai composé d'un nombre déterminé de postes d'accostage, et l'autre formulation considère le quai comme une ligne continue, les quais à conteneurs sont normalement exploités de manière continue. C'est pour cela que pour appliquer la formulation discrète il faut faire une translation et pour déterminer N il faut appliquer l'équation (3). Cette équation peut donner un résultat non entier.

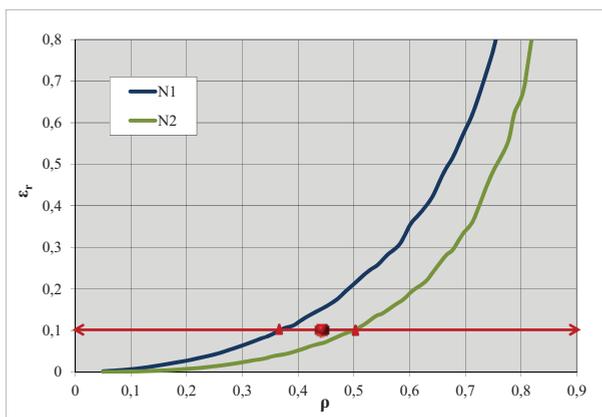


Figure 7. Interpolation de ρ entre deux courbes de N entier pour obtenir la valeur de ρ quand N est non entier.

Le fait que N puisse ne pas être entier pose problème. La relation $\varepsilon_r - \rho$ est étudiée seulement quand N est une valeur entière. Dans cette étude, afin de résoudre ce

problème, on a interpolé les valeurs de ρ entre les nombres entiers inférieur et supérieur de N (voir figure 7).

Autant les fonctions de répartition A et B utilisées dans cette étude correspondent à la réalité du terminal MSCTV, autant, pour des raisons de confidentialité, les valeurs de la productivité (P ou P_L) ont été supposées par les auteurs. Pour les scénarios 1 et 3, la productivité supposée par grue est de 23 mouvements à l'heure. En supposant deux grues par navire et des escales de 24h, dont 3h improductives, P (productivité d'un poste d'accostage) atteint la valeur de 60,38 EVPs/(h·poste) (EVP/mouvement=1,5).

Pour les scénarios 2 et 4, P_L (productivité d'un mètre de quai) a été calculée comme P fois le nombre de postes d'accostage divisé par L .

7. Résultats

Les résultats de la capacité pour chacun des quatre scénarios étudiés sont montrés dans le tableau 1.

Tableau 1. Résultats.

	<i>Scénario 1</i>	<i>Scénario 2</i>	<i>Scénario 3</i>	<i>Scénario 4</i>
<i>Formulation</i>	<i>Discrète</i>	<i>Continue</i>	<i>Discrète</i>	<i>Continue</i>
<i>L (m)</i>	656	656	756	756
<i>L_{navires} (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(EVP/(h·poste))</i>	60,38	-	60,38	-
<i>P_L (EVP/(h·m))</i>	-	0,24	-	0,24
<i>H_{an} (h/an)</i>	360×24	360×24	360×24	360×24
<i>Capacité (EVP/an)</i>	626 062	379 978	802 379	786 346

NB : Les nombres en gris n'ont pas été utilisés directement pour calculer la capacité du scénario correspondant, mais ils sont vitaux afin de mieux comprendre les résultats.

En comparant les résultats du scénario 1 avec ceux du scénario 2, il apparait que l'estimation de la capacité peut grandement différer pour la même longueur du quai selon la formulation utilisée. En effet, l'estimation de la capacité en appliquant la formulation continue est inférieure de presque 40% par rapport à celle obtenue par la formulation discrète. La variable responsable de cette différence est le taux d'occupation qui passe de 0,453 à 0,275. L'explication réside dans la proportion entre L et $L_{navires}$, qui fait qu'une grande partie du quai est inoccupée en permanence (la partie décimale de N , ici 0,65) quand on applique la formulation continue. Comme la figure 8 le montre, quand $L=656$ m et $L_{navires}=225$ m, $N=2,65$, c'est-à-dire, il n'y a que deux

bateaux qui peuvent être accostés, et il y a une partie du quai qui est inoccupée en permanence (0,65). Ce fait est seulement considéré lors de l'application d'une formulation continue, et donc, ρ_L est très inférieur à ρ .



Figure 8. Quai de MSCTV avant son allongement conceptualisé comme une ligne continue.

Si on compare les résultats des deux formulations après l'allongement du quai, à savoir les scénarios 3 et 4, on remarque que même s'il existe une différence, celle-ci est très inférieure (2%). En effet, en allongeant le quai la proportion entre L et $L_{navires}$ (notée N dans la formulation discrète) n'est pas si défavorable puisqu'on peut accoster trois bateaux de 225 m (voir figure 9) et il y a une très petite partie du quai inoccupée en permanence (la partie décimale de N égale à 0,05). Cela se traduit par une valeur très supérieure de ρ_L , qui tend vers la valeur de ρ du scénario 3, d'où le fait que la différence de capacité entre les scénarios 3 et 4 soit très réduite.



Figure 9. Quai de MSCTV après son allongement conceptualisé comme une ligne continue.

Finalement, la comparaison des scénarios 2 et 4 permet de déduire qu'en allongeant le quai de 100 m, à savoir 15% approximativement, la capacité estimée en utilisant la formulation continue (qui représente plus fidèlement la réalité) est multipliée par plus de deux.

8. Conclusions

La principale conclusion qu'on peut tirer de cette étude est que lors de la planification des terminaux, il est nécessaire d'utiliser la formulation continue dans la mesure du possible. Pour cela, les outils de simulation sont requis, car autrement, on ne pourrait pas connaître la valeur de ρ_L .

Dans les cas où on ne peut pas utiliser des outils de simulation, et par conséquent, on utilise des formulations discrètes, il faut être conscient que les résultats peuvent surestimer la capacité réelle. Ceci est fonction de la proportion entre la longueur du quai et la longueur des navires (on peut considérer la longueur moyenne à laquelle on ajoute une distance de sécurité). Ainsi, plus la partie décimale de ce quotient est élevée, plus la capacité peut être surestimée.

De ce qui précède, on peut aussi conclure que, lors de la planification des terminaux, il est très important de connaître la longueur des navires qui vont y faire escale. Dans cette étude, afin de calculer les taux d'occupation, on a supposé que les fonctions de répartition des longueurs des navires sont constantes, car les planificateurs habituellement dimensionnent les quais pour une génération des navires déterminée : Panamax, post-Panamax, superpost-Panamax. Néanmoins, l'exploitation des quais doit faire face à des navires de longueurs différentes et l'influence que cette variation peut avoir sur le résultat du calcul du taux d'occupation d'un quai est évidente (pour la même longueur du quai, et les mêmes fonctions de répartition des arrivées et des services). Les constats précédents montrent qu'il est nécessaire de mener d'autres études sur le sujet afin de déterminer au mieux cette influence. On insiste sur le fait que pour bien continuer, les conclusions présentées dans cet article sont fondamentales.

9. Références bibliographiques

- 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.

2. Obrer-Marco, R. y Aguilar, J. (2012). Evolución de los factores que afectan a la capacidad de los muelles al aumentar la longitud de atraque. Proc., Evolución de los factores que afectan a la capacidad de los muelles al aumentar la longitud de atraque, Congreso de Ingeniería de Transporte, Granada.

Evolución de los factores que afectan a la capacidad de los muelles al aumentar la longitud de atraque

Roser Obrer Marco

Técnico superior de proyectos de investigación, Universitat Politècnica de València,
España

José Aguilar Herrando

Dtor. Del Instituto de Transporte y Territorio, Universitat Politècnica de València, España

RESUMEN

El contexto de austeridad en el que se encuentra el Estado Español está obligando a los gestores de infraestructuras a analizar las necesidades reales de inversión, y no son menos las autoridades portuarias (AAPP), gestoras de los puertos de interés general. Con tal fin, es necesario que los departamentos de planificación de estas AAPP valoren la capacidad de las infraestructuras de la forma más real posible y la comparen con las previsiones de tráfico del puerto.

Las herramientas empleadas para calcular la capacidad de los muelles de las terminales portuarias de contenedores (TPC) son prácticamente las mismas que las que se empleaban hace algunas décadas. Este hecho resulta cuanto menos extraño debido a la evolución vertiginosa que han sufrido estas terminales, al igual que las técnicas computacionales que pueden servir de apoyo al cálculo. Unas de las características a remarcar de los muelles de las TPC es que en la actualidad se explotan como una línea continua en la que se atracan más o menos buques según las esloras de los mismos, característica que no se refleja en las técnicas de cálculo usualmente empleadas.

En esta ponencia se pretende mostrar como la aplicación de dichas técnicas puede llevar a errores en la estimación de la capacidad a través de dos ejemplos de muelles: 1) un muelle de 800 m de longitud; y 2) un muelle de 900 m de longitud. Además, se presenta una formulación alternativa a la empleada hasta el momento que considera la explotación continua de los muelles. Para la aplicación de la misma es necesario recurrir a técnicas de simulación. La formulación alternativa se ha aplicado para los dos ejemplos de muelle en dos casos. El primero cuando se asume que las esloras son constantes (es lo que los planificadores suelen asumir cuando realizan estimaciones de capacidad de terminales que aún no están en servicio) y esloras variables (uniformes y triangulares).

Se ha constatado la necesidad de aplicar nuevas técnicas que representen el muelle como una línea continua y que en la medida de lo posible reflejen la distribución de esloras de los buques que van a hacer escala (o que ya hacen escala) en la terminal.

1. INTRODUCCIÓN

La Ley 33/2010 de modificación de la Ley 48/2003 de régimen económico y de prestación de servicios en los puertos de interés general señala la necesidad de que estos puertos se conformen como puertos “landlord avanzado”. Este modelo de gestión implica que las autoridades portuarias concesionen las terminales a empresas estibadoras que, en cierta medida, han de conformarse con unas instalaciones proyectadas y parcialmente ejecutadas por la autoridad portuaria, cuando no ejecutadas en su totalidad. Con el fin de que las instalaciones puedan servir al mayor número de potenciales empresas estibadoras, los departamentos de planificación de las autoridades portuarias han de hacer un esfuerzo importante para considerar la demanda que previsiblemente puedan tener esas terminales en el futuro. Además, no hay que olvidar que estamos viviendo una época en la que el sector naval está cambiando a un ritmo vertiginoso en lo que a transporte de contenedores se refiere, con lo que las características de los buques pueden cambiar enormemente desde que se empieza a proyectar la infraestructura hasta que se pone en servicio.

En el ejercicio de planificación de las terminales es clave conocer el tráfico límite de la infraestructura, es decir, su capacidad. Las terminales de contenedores se pueden entender como un sistema compuesto por cuatro subsistemas (Monfort et al., 2001): el subsistema de atraque o de carga/descarga del buque; el subsistema de interconexión; el subsistema de almacenamiento; y el subsistema de recepción/entrega. El método de los cuellos de botella (Henesey, 2004) afirma que la capacidad de todo el sistema es igual a la capacidad del subsistema más limitante, de manera que para conocer la capacidad de la terminal sería necesario calcular la capacidad de cada uno de sus subsistemas. Sin embargo y debido por un lado a la propia inflexibilidad del subsistema de atraque y por otro al tiempo requerido para ampliar sus instalaciones, este se puede considerar como el subsistema más limitante de los cuatro, de ahí que en muchas ocasiones se equipare la capacidad de los muelles a la capacidad de las terminales y también de ahí el estudio de la capacidad del muelle que aquí se plantea.

Ya se ha mencionado que la capacidad de un muelle se puede definir como el tráfico límite que ésta admite durante un periodo de tiempo. De esta definición parece lógico pensar que el tráfico límite de un muelle se puede definir de una forma objetiva, sin embargo, no hay más que hojear la documentación de referencia para darse cuenta de no existe una única forma de definirlo. Al hablar de tráfico límite Rodríguez (1977) puede estar refiriéndose al *tráfico de congestión*, tráfico a partir del cual las esperas de los buques empiezan a aumentar rápidamente, al *tráfico económico*, tráfico para el cual la suma de los costes de los buques más los costes de los muelles es mínima, o al *tráfico de saturación*, tráfico a partir del cual todos los puestos de atraque están permanentemente ocupados.

Aun así, dada la alta competencia existente entre las terminales de contenedores, parece razonable pensar que en la estimación de la capacidad de los muelles se considere el nivel de servicio que se ofrece a los clientes directos de este subsistema: las compañías navieras.

Por ello, para el desarrollo de esta ponencia se ha considerado que el tráfico límite es aquel que está asociado a un determinado nivel de servicio mínimo admisible por los navieros.

2. LA FORMULACIÓN DISCRETA DE LA CAPACIDAD

La formulación más comúnmente empleada por los planificadores para estimar el tráfico que fluye a través de los muelles se corresponde con la expresión (1).

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

Donde:

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

N = número de puestos de atraque

ρ = tasa de ocupación del muelles (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)

Con independencia de consideraciones económicas y en lo que a capacidad se refiere, el interés del naviero reside en que el tiempo total de estancia en puerto en relación al número de contenedores a desembarcar y/o embarcar en el puerto sea lo más reducido posible. Ese tiempo total de estancia se compone a su vez de un tiempo de espera motivado por la congestión (si es motivado por otros factores no es de consideración para esta ponencia) más un tiempo de servicio en el puesto de atraque. Así, para lograr un tiempo de escala reducido en proporción a los contenedores a manipular es necesario que las esperas debidas a la congestión sean reducidas y que la productividad en el atraque (P) sea elevada. Como se puede apreciar, el nivel de servicio se refleja en la fórmula anterior a través de dos factores, P directamente y ρ indirectamente.

La tasa de ocupación (ρ) se define como la proporción del tiempo durante el cual los atraques están ocupados en relación al tiempo total durante el cual están disponibles. Es intuitivo pensar que cuando ρ tiende a uno las esperas de los buques tienden a infinito y que cuando ρ tiende a cero, las esperas de los buques también tienden a cero. Tradicionalmente, los autores que han tratado estos temas han considerado la espera en proporción al tiempo de servicio del buque en el atraque. Así, se define la espera relativa (ϵ_r) como el cociente del valor medio de las esperas de los buques que hacen escala en una terminal durante un periodo de tiempo entre el valor medio de los tiempos de servicio de esos mismos buques. La calidad del servicio ofrecida a los navieros se obtiene por tanto con una productividad elevada y una reducida ϵ_r .

De todo lo anterior se deduce que para poder conocer el tráfico al que sirve un muelle durante un tiempo, es necesario conocer la relación entre la tasa de ocupación y la espera relativa ($\rho - \epsilon_r$), relación a la que a partir de ahora denominaremos curva característica de congestión. La curva característica de congestión depende de tres factores: la función de

densidad del intervalo de tiempo que transcurre entre dos llegadas consecutivas de buques a la terminal (A); la función de densidad de la duración del servicio de los buques en el muelle (B); y el número de puestos de atraque (N). Según Rodríguez (1977) la teoría de colas puede resolver analíticamente y de manera exacta este problema para dos casos en concreto: cuando una de las dos funciones de densidad es exponencial y el muelle se compone de un único atraque; cuando las dos funciones de densidad son funciones exponenciales independientemente del número de atraques del muelle.

Según Aguilar y Obrer-Marco (2009) las terminales de contenedores españolas no se corresponden con ninguno de los dos casos anteriores, pues aunque A se distribuye como una función exponencial, B se distribuye como una Erlang K, donde K varía entre 4 y 7, y la gran mayoría tienen más de un atraque. Así, para conocer la curva característica de congestión es necesario recurrir a herramientas de simulación que modelen el muelle. La Figura 1 muestra un ejemplo de la curva característica de la congestión obtenida mediante la herramienta de simulación desarrollada por el Laboratorio de Puertos y Costas de la Universitat Politècnica de València para el caso en el que A es exponencial y B es Erlang 4 y $N = 4$. Las irregularidades de la curva se deben a que cada punto de la curva se ha obtenido simulando 25 años.

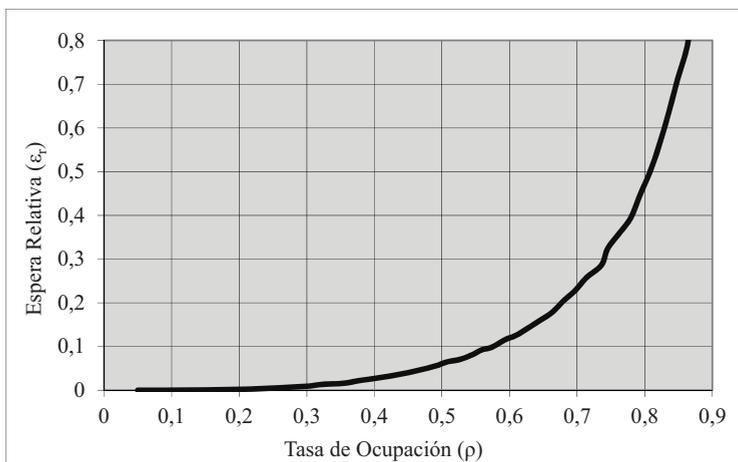


Fig. 1 – Representación de la curva característica de congestión.

Para que la ecuación (1) proporcione el tráfico límite, es decir la capacidad del muelle, es necesario que P sea un valor razonablemente elevado y que ϵ_r alcance el valor máximo que los navieros estarían dispuestos a soportar. Agerschou (2004) propone que este valor sea igual a 0,1 en terminales de contenedores.

2.1 Aplicación de la fórmula discreta a muelles explotados de forma continua

Con la ecuación (1) implícitamente se está considerando que en el muelle existen unas posiciones exactas e invariables en el tiempo donde atracan los buques. Esto es, existen

unos puestos de atraque definido. Sin embargo, la realidad de las grandes terminales de contenedores es bien diferente. En función de las esloras de los buques que en cada momento hacen escala en la terminal (en esta ponencia se asume que no hay limitaciones de calado) el número de buques atracados (y por tanto, el número de atraques) puede variar.

Este hecho implica que hasta el momento, para estimar la capacidad de los muelles de estas terminales de contenedores se ha aplicado una formulación que asume el muelle compuesto por un número invariable de atraques (formulación discreta) en unos muelles que se explotan como líneas continuas. Para ello se requiere obtener un número de atraques a partir de la longitud del muelle (L) y de la eslora tipo de los buques que hacen escala en la terminal (E_T), siempre considerando que entre los buques atracados siempre debe de existir una distancia de seguridad (el resguardo). Al cociente de la longitud de atraque entre la eslora tipo afectada por el resguardo se le denomina número de atraques equivalentes (N_{equiv}). Cuando la formulación de la capacidad se aplica con el fin de conocer el tráfico límite de una terminal existente y en servicio, uno de los problemas que se presentan es definir esa eslora tipo siendo que realidad se dispone de una función de densidad de esloras de los buques que hacen escala ($\{E\}$). Algunos autores definen la eslora tipo como un valor extremal como es el caso de González-Herrero (2006) quien propone un percentil del 85%. Los autores han constatado que para lo que esta ponencia plantea, resulta exagerado tomar un valor extremal, dando mejores resultados el valor medio aunque con algunas consideraciones adicionales que más adelante detallaremos.

Tal y como se ha definido N_{equiv} en la mayoría de casos se trata de un valor no entero, lo que plantea un grave problema pues la relación $\rho - \varepsilon_r$ puede obtenerse cuando el número de atraques del muelle es entero. Hasta el momento ha venido siendo habitual por lo intuitivo interpolar el valor de ρ entre los valores asociados a las curvas de los enteros inmediatamente superior e inferior a N_{equiv} , pero los autores han detectado que esto puede estar llevando a errores graves.

3. OBJETIVOS DE LA PONENCIA

El primer objetivo de esta ponencia es presentar una formulación de la capacidad de los muelles alternativa a la formulación discreta y que sea capaz de reflejar el comportamiento continuo de los muelles. Se pretenden también analizar las variables que intervienen en cada una de las dos formulaciones para conocer sus similitudes y diferencias entre la formulación discreta y su alternativa, la formulación continua.

El segundo y más importante de los objetivos es demostrar que cuando se pretende emplear una formulación discreta en un muelle explotado de manera continua, alguno de los procedimientos que parece lógico emplear puede llevar a graves errores, haciendo que el valor estimado de la capacidad sea muy diferente al real. Un ejemplo es la interpolación entre las curvas $\rho - \varepsilon_r$ correspondientes a números enteros cuando N_{equiv} es no entero.

También se pretende mostrar como la diferencia entre los valores reales en muelles explotados de manera continua y los valores estimados a partir de la formulación discreta pueden variar en función de la proporción entre la longitud del muelle y las esloras que hacen escala. Así, en ocasiones, la prolongación de un muelle en unos pocos metros puede mejorar con creces la capacidad del muelle.

4. LA FORMULACIÓN CONTINUA DE LA CAPACIDAD

La expresión (2) muestra la formulación propuesta para estimar el tráfico de un muelle explotado de manera continua y que conceptualmente refleje esta misma explotación:

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

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 (TEUs/(h·m) o movimientos/(h·m))

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

De manera análoga a la formulación discreta, cuando la tasa de ocupación está ligada a un nivel de servicio límite reflejado por el indicador ε_r , la expresión (2) proporciona la capacidad del muelle (siempre que P_L sea relativamente alta).

4.1 Diferencia conceptual entre ρ y ρ_L

La tasa de ocupación de un muelle compuesto por un número de puestos de atraque determinado y para un periodo de tiempo T se calcula como el periodo de tiempo en el que los puestos están ocupados en relación al periodo del tiempo en el que los puestos están disponibles para albergar los buques (ver la ecuación (3)):

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

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

De la definición anterior se extrae que las esloras de los buques no afectan al cálculo de ρ , y que por lo tanto, no se hace distinción entre los casos donde los buques ocupan los puestos enteramente y los casos donde los que no. La Figura 2 muestra dos situaciones, en la de la izquierda los buques ocupan solamente una parte del puesto de atraque, mientras que en la de la derecha lo ocupan en su totalidad. Los dos marcos grises representan los dos puestos de atraque de que se compone el muelle representado. Imagínese que en ambas situaciones (izquierda y derecha) los dos navíos quedan atracados durante todo el periodo T para el que se va a calcular ρ . Según la definición mencionada en el párrafo anterior, el valor de ρ es igual a 1 en ambas situaciones a pesar de que en la situación de la derecha los buques ocupan más metros del muelle.

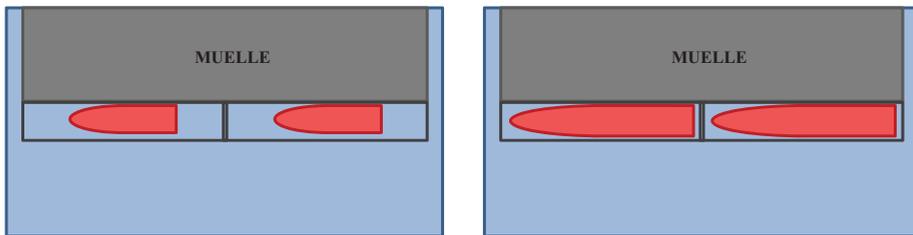


Fig. 2 – Dos situaciones diferentes donde el valor de ρ es el mismo.

Por el contrario, si el muelle se conceptualiza como una línea continua, al calcular ρ_L se consideran exclusivamente los metros de muelle que realmente están ocupados. La ecuación (4) muestra una expresión para calcular ρ_L :

$$\rho_L = \frac{\sum_{j=1}^B L_{\text{Buque } j} \cdot 1,10 \cdot D_{S_j}}{L \cdot T} \quad (4)$$

Donde:

j = contador de buques

B = número de buques que hacen escala en la terminal durante el periodo T

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

D_{S_j} = duración de servicio del buque j

L = longitud del muelle

T = periodo de tiempo durante el cual el muelle está disponible (se asume coincidente con el periodo para el cual se calcula ρ_L).

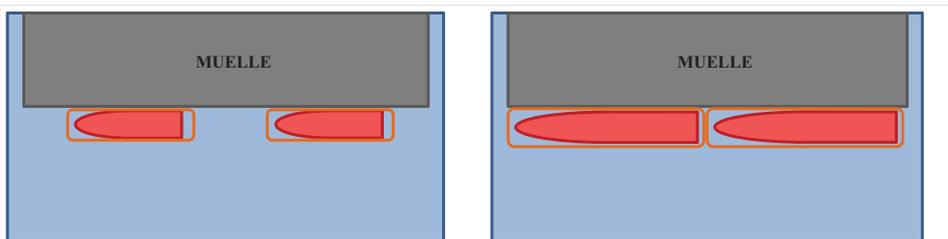


Fig. 3: Dos situaciones diferentes donde ρ_L tiene un valor diferente.

En la Figura 3 se muestran dos situaciones diferentes en las que las esloras de los buques son exactamente las mismas que las representadas en la Figura 2. El contorno color naranja que envuelve a los buques representa la distancia de seguridad que ha de considerarse alrededor de éstos para evitar daños entre ellos (resguardo) y que equivale a un 10 % de su eslora (de ahí el coeficiente que mayor a las esloras en la ecuación (4)).

Asumiendo que los dos buques permanecen en el muelle durante un periodo T tanto en la situación de la derecha como en la de la izquierda de la Figura 3, el valor de ρ_L será mayor en la situación de la derecha dado que las esloras de los buques son mayores y por lo tanto el espacio del muelle realmente ocupado también será mayor.

De todo lo anterior se puede deducir que ρ_L representa la relación entre los metros-hora ocupados y los metros-hora disponibles, de ahí que ρ_L sea inferior a ρ en todos los casos, y excepcionalmente igual.

5. METODOLOGÍA

La metodología que se ha seguido para llevar a término los objetivos planteados ha consistido en aplicar las dos formulaciones propuestas ((1) y (2)) en dos muelles diferentes, uno de 850 m y otro ampliado hasta 900 m. Esto es, se han aplicado dos formulaciones bien diferentes (una asume que el muelle se compone de un número de puestos de atraque determinado y la otra de una línea continua donde en función de las esloras de los buques puede haber más o menos buques atracados) a una misma realidad: muelles explotados de manera continua.

Para aplicar la formulación discreta se ha calculado el número de puestos de atraque equivalentes (N_{equiv}) a partir de una longitud de atraque y una eslora tipo (afectada por el coeficiente de seguridad). Como se mencionó anteriormente, lo más probable es que N_{equiv} sea un número decimal, sin embargo las curvas $\rho - \epsilon_r$ se obtienen para números enteros. Con el fin de mostrar los errores que se pueden estar cometiendo y dado que es una práctica habitual entre los planificadores pues puede ser lo más intuitivo, se han realizado interpolaciones entre las curvas correspondiente a los enteros superior e inferior a N_{equiv} .

La eslora tipo (considerando que es igual al valor medio) se ha asumido en todos los casos igual a 200 m. Inicialmente, se ha asumido que la distribución de esloras es constante, puesto que en la fase de proyecto de las terminales así se suele considerar. Aun así, se han simulado también distribuciones de esloras uniformes y triangulares con el fin de saber si la propia variabilidad de las esloras puede mejorar o empeorar los resultados en relación al caso de las esloras constantes.

Como es habitual en las terminales de contenedores españolas, se ha considerado que las llegadas de los buques a la terminal se distribuyen según una función exponencial, mientras que los servicios se distribuyen según una función Erlang 4.

Al simular variabilidad en las esloras aparecen otras variables a considerar y que condicionan los resultados de la relación $\rho_L - \varepsilon_r$, como son el hueco en el que ubicar los navíos de entre todos aquellos en los que cabe, o el posicionamiento dentro del hueco (en el centro, en un extremo, etc.). En realidad, con algoritmos de optimización es posible conseguir buenas soluciones para dar valores a dichas variables, sin embargo en función de la técnica utilizada el resultado puede diferir, siendo éste mejor o peor. Para esta ponencia se ha supuesto que cada vez que un buque sale del muelle, todos los buques que quedan atracados se desplazan hacia un extremo, es decir se ha supuesto que se producen enmendadas. Es sabido que en las terminales esta no es una práctica habitual, sin embargo el resultado obtenido de estas simulaciones es un máximo de referencia. Cualquier otra solución será peor (siempre que la gestión de la cola se mantenga FIFO). Cuando las esloras se simulan constantes se asume que el primer buque se ubica en un extremo de la terminal y los siguientes buques que llegan se ubican lo más cerca posible de que los que ya están atracados o en uno de los huecos que los que salieron dejaron, así se consigue aprovechar al máximo el muelle.

Para calcular la productividad, se ha tomado un valor razonablemente elevado de productividad por puesto de atraque como es 60 TEUs/(h·puesto). La P_L del muelle se ha obtenido multiplicando el valor de P por N_{equiv} y dividiendo el resultado por la longitud del muelle.

6. RESULTADOS INICIALES

La Figura 4 muestra la relación entre la tasa de ocupación y la espera relativa en diferentes casos. El primero de ellos es aquel en el que el muelle mide 850 m y todos los buques tienen una eslora de 200 m (aumentada en un 10% por seguridad). Por un lado, para aplicar la formulación continua es necesario conocer la relación $\rho_L - \varepsilon_r$, representada en rojo en la Figura 4, y obtener el valor de ρ_L asociado a una ε_r igual a 0,1. Nótese que como las esloras se han asumido constantes, no tiene repercusión hacer enmendadas o no en el muelle. Por otro lado, para aplicar la formulación discreta y dado que $N_{\text{equiv}} = 3,86$ se ha interpolado entre el valor de ρ asociado a $\varepsilon_r = 0,1$ de las curvas $\rho - \varepsilon_r$ obtenidas para $N = 3$

y $N = 4$. Como se puede apreciar, el valor de la tasa de ocupación obtenido de la interpolación es mucho mayor que el de ρ_L (0,5635 frente a 0,3800).

De forma análoga se puede proceder para obtener los valores asociados a un muelle recrecido de 50 m ($L = 900$ m). En este caso se puede ver como la curva obtenida de una simulación que modela el muelle como una línea continua (curva naranja) y que se va a emplear para aplicar la formulación continua, no está tan alejada de las curvas $N = 4$ y $N = 5$, las que se necesitarían para interpolar y obtener un valor de ρ con el que aplicar la formulación discreta. Aun así, haciendo una interpolación entre las curvas se estaría cometiendo un error relevante.

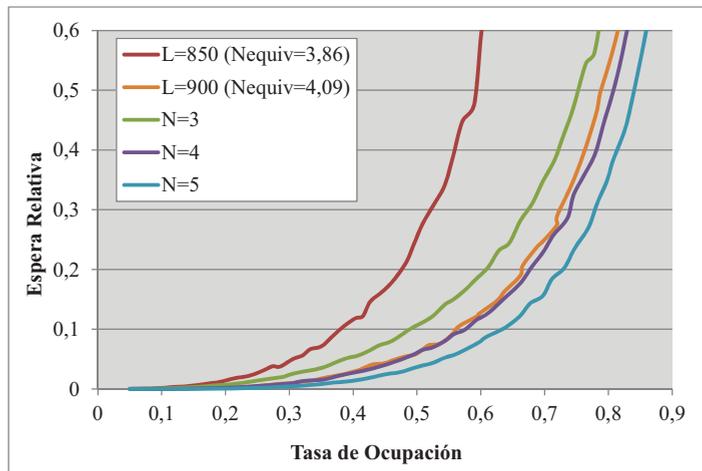


Fig. 4: Relación entre la tasa de ocupación y la espera relativa en los casos planteados por la metodología.

La Tabla 1 muestra los resultados de aplicar la formulación discreta y la continua a los dos muelles que han servido de ejemplo. Nótese que no se ha considerado el término $H_{año}$ de las formulaciones, por lo que los resultados están expresados en TEUs /h:

	850 - 200		850 - 200	
	F. CONT.	F. DISCR.	F. CONT.	F. DISCR.
L	850		900	
N_{equiv}		3,86		4,09
ρ_L	0,380		0,562	
ρ		0,564		0,638
P_L	0,272		0,273	
P		60		60
$L \cdot \rho_L \cdot P_L / N_{equiv} \cdot \rho \cdot P$	88,0	130,5	137,8	156,6

Tabla 1: Resultados. Propuesta 1.

Como se puede apreciar, la aplicación de la formulación discreta sobre muelles explotados de manera continua proporciona siempre resultados mayores que la realidad (muelle explotado de manera continua). De ahí se puede deducir que se pueden estar sobrestimando las capacidades de los muelles si se emplea la formulación (1) interpolando entre las curvas de N entero superior e inferior a N_{equiv} .

Se aprecia como la diferencia entre los resultados de la formulación continua y la discreta es mucho más acusada en la situación inicial del muelle (850 m). El responsable de ello es el valor de la tasa de ocupación. La parte decimal de N_{equiv} es mucho mayor cuando el muelle mide 850 m ($N_{\text{equiv}} = 3,86$), y dado que se están simulando esloras constantes ello implica que en el muelle caben 3 buques y que una gran parte del mismo está desocupado permanentemente. Dado que ρ_L sí que discrimina los metros de muelle realmente ocupados, su valor se reduce considerablemente respecto de $N = 3$. Es diferente cuando el muelle se amplía hasta 900 m puesto que ahora $N_{\text{equiv}} = 4,09$, lo que significa que caben 4 buques y pocos metros del muelle están desocupados.

Resulta lógico que cuando $N_{\text{equiv}} = 3,86$, ρ_L nunca podrá alcanzar el valor de 1 (ni aunque la cola de buques pudiera ser infinita) y el valor máximo estará muy lejos de la unidad. Contrariamente, cuando $N_{\text{equiv}} = 4,09$, aunque tampoco se podrá llegar a $\rho_L = 1$, el valor máximo sí que podrá acercarse a la unidad.

Nótese que si se siguiera ampliando el muelle a partir de 900 m (pensemos que se puede ampliar de metro en metro) y manteniendo las esloras constantes e iguales a 200 m, la ρ_L decrecería a medida que el muelle creciera, o lo que es lo mismo, la curva $\rho_L - \varepsilon_r$ se iría desplazando hacia la izquierda. Esto es así puesto que en los metros ampliados no cabría un nuevo buque de tal manera que esos metros contarían como metros disponibles, pero no como metros ocupados. La ρ_L seguiría decreciendo hasta el momento en el que la ampliación del muelle fuera tal que cupiese otro buque y N_{equiv} fuera igual a 5. En ese momento, la curva $\rho_L - \varepsilon_r$ daría un salto hacia la derecha.

7. ALTERNATIVA DE CÁLCULO

Cuando por las razones que fueren la formulación continua no se pudiera aplicar, tal y como los autores proponen en Monfort et al. (2011) resulta conveniente no adoptar el valor de N_{equiv} e interpolar entre las curvas de los enteros superior e inferior para obtener el valor de la tasa de ocupación. Una forma de quedarse del lado de la seguridad y aproximarse al valor real de la capacidad es quedarse con el entero inferior a N_{equiv} y obtener la tasa de ocupación a partir de la curva $\rho - \varepsilon_r$ asociada al mismo entero.

Si se aplica esta alternativa de cálculo a los casos de estudio propuestos para desarrollar esta ponencia, antes de la prolongación del muelle la capacidad se calcularía con un valor de $N = 3$ puesto que $N_{\text{equiv}} = 3,86$, y después de la prolongación $N = 4$ puesto que $N_{\text{equiv}} = 4,09$.

Los resultados obtenidos de la alternativa de cálculo se muestran en la Tabla 2.

N	3	4
ρ	0,489	0,576
P (TEUs/h)	60	60
N·ρ·P (TEUs/h)	88,0	138,2

Tabla 2: Resultados. Propuesta 2.

Como se puede ver, los resultados aplicando esta alternativa de cálculo son prácticamente idénticos a los arrojados por la formulación continua, la cual representa con mayor fidelidad el comportamiento del muelle. Cuando el muelle mide 850 m el resultado de aplicar la formulación continua es 88,015 TEUs/h, valor muy similar al obtenido con la alternativa de cálculo (87,971 TEUs/h). Después de la ampliación del muelle (L = 900 m), la formulación continua arroja un valor de 137,847 TEUs/h, también muy parecido al valor que arroja la alternativa de cálculo (138,158 TEUs/h).

8. VARIABILIDAD DE ESLORAS

Hasta ahora se ha considerado que las esloras de los buques que hacen escala en la terminal son constantes pues así lo consideran habitualmente los planificadores a la hora de dimensionar terminales. Sin embargo, resulta lógico plantearse cómo puede variar la estimación de la capacidad cuando se considera variabilidad en las esloras, pues durante la explotación de la terminal las esloras de los buques son cambiantes.

Con el fin de analizar el comportamiento del muelle frente a esa variabilidad de esloras se han simulado los dos mismos casos propuestos en los apartados anteriores, pero donde las esloras de los buques que hacen escala en la terminal en vez de ser iguales a 200 m en todos los casos, se distribuyen según dos funciones con diferente dispersión, aunque con igual media: 1) Según una función de densidad uniforme de valor mínimo 100 m y máximo 300 m (de manera que la eslora media sigue siendo de 200 m); 2) Según una función de densidad triangular de valor mínimo 100 m y máximo 300 m.

Como se mencionó anteriormente, cuando existe variabilidad de esloras aparecen nuevas variables de la explotación. Los autores han asumido que se llevan a cabo enmendadas en el muelle y que por lo tanto los valores obtenidos son valores máximos. Es importante destacar que aún con unos algoritmos de optimización potentes, los resultados serían peores que los obtenidos cuando se realizan enmendadas. Haciendo esta suposición se evita tener que entrar en valoraciones acerca de la eficiencia del algoritmo de optimización.

La Figura 5 proporciona las curvas $\rho_L - \epsilon_r$ cuando el muelle tiene una longitud de 850 m. Como se puede apreciar, la variabilidad de esloras conduce a un mejor aprovechamiento del muelle dado que para el mismo valor de la ϵ_r es posible obtener valores mayores de la

ρ_L . Si no se hubiera asumido que en el muelle se hacen enmendadas las curvas roja y verde estarían más cerca de la azul, con lo que la mejora no sería tan considerable.

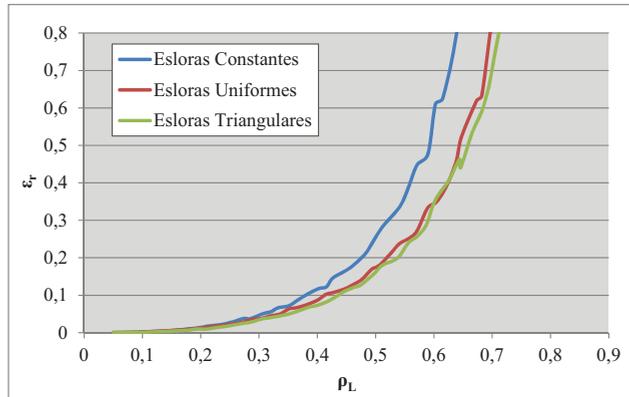


Fig. 5: Variación de la curva $\rho_L - \epsilon_r$ cuando hay variabilidad de esloras en un muelle de 850 m de longitud.

Contrariamente, la Figura 6 muestra como la variabilidad de esloras puede empeorar los resultados haciendo que para la misma ϵ_r se obtengan valores menores de ρ_L .

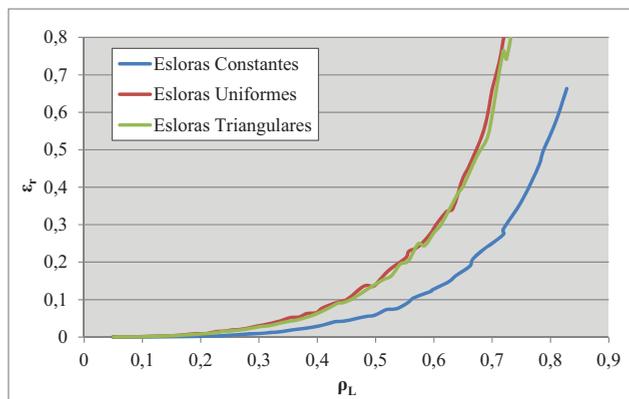


Fig. 6: Variación de la curva $\rho_L - \epsilon_r$ cuando hay variabilidad de esloras en un muelle de 900 m de longitud.

La diferencia en cómo afecta la variabilidad de las esloras en ambos casos se explica por el valor de N_{equiv} . Se ha visto que cuando la parte decimal de N_{equiv} supera 0,5 la variabilidad de esloras implica mejores resultados que cuando las esloras son constantes (N_{equiv} en el primer caso es igual a 3,86). De manera análoga, cuando la parte decimal de N_{equiv} es inferior a 0,5 la variabilidad de esloras implica peores resultados que cuando las esloras son constantes (N_{equiv} en el segundo caso es 4,09). Finalmente, cuando esa parte decimal está muy cerca de 0,5 la variabilidad de esloras no afecta a los resultados.

Además, de la Figura 5 y de la Figura 6 se puede concluir que los resultados obtenidos cuando las esloras son uniformes son idénticos a los obtenidos cuando las esloras son triangulares. Este resultado constata que definir la eslora tipo como el valor medio de la función es una buena elección, pues las curvas dan resultados lógicos adoptando dicho estimador (aunque la forma y la dispersión de las dos funciones sean diferentes). Si para comparar dos distribuciones diferentes de igual eslora tipo se hubiera considerado como tal la eslora asociada al percentil del 85% como propone González-Herrero (2006) probablemente no hubiéramos podido detectar esta importante conclusión. Para la función uniforme anterior $P_{85} = 270$ m y para la triangular $P_{85} = 230,38$ m.

Con el fin de analizar cómo afecta la ampliación del muelle cuando existe variabilidad de esloras se han representado algunas de las curvas incorporadas en las Figuras 5 y 6 en la Figura 7. Dado que de las dos figuras anteriores se deduce que no existe diferencia alguna entre la distribución de esloras uniforme y triangular, solamente se ha representado esta segunda.

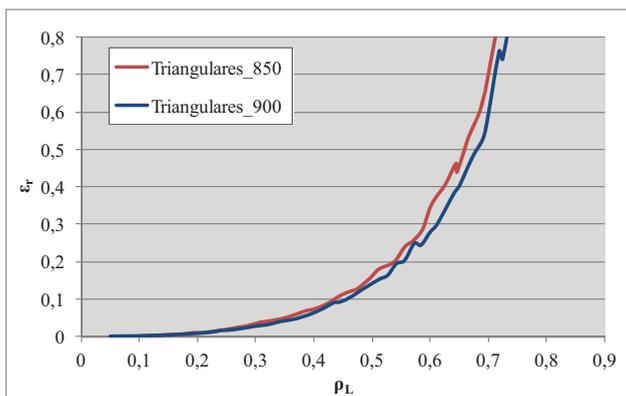


Fig. 7: Variación de la curva $\rho_L - \epsilon_r$ al ampliar el muelle de 850 m a 900 m cuando hay variabilidad de esloras.

Como se deduce de la Figura 7, la ampliación del muelle en 50 m cuando las esloras se distribuyen como una función uniforme o triangular, implica una mejora de ρ_L para la misma espera relativa, es decir que el aprovechamiento del muelle es mejor. Aun así, esa mejora no es ni mucho menos tan sustancial como cuando las esloras son constantes puesto que cuando el muelle mide 850 m la curva no está tan cerca del eje de ordenadas como cuando las esloras son constantes (o lo que es lo mismo el muelle está tan infrutilizado), ni cuando el muelle mide 900 m está tan alejada del mismo eje (o lo que es lo mismo, el muelle está siendo utilizado de manera casi óptima).

La Tabla 3 muestra los resultados de aplicar la formulación continua parcialmente, pues no se ha considerado el factor de conversión temporal $H_{año}$, cuando las esloras de los buques son triangulares.

L	850	900
ρ_L	0,436	0,462
P_L (TEUs/h)	0,272	0,273
$L \cdot \rho_L \cdot P_L$	101,0	113,3

Tabla 3: Resultados de la capacidad del muelle en TEUs/h cuando existe variabilidad de esloras.

RESULTADOS FINALES

La Tabla 4 muestra los resultados de la estimación de la capacidad de los muelles de 850 m y de 900 m cuando la media de las esloras de los buques es de 200 m. En las dos primeras columnas se representan las capacidades resultado de aplicar la formulación continua. La diferencia entre ellas es la distribución de esloras, que como es lógico afecta a la relación $\rho_L - \varepsilon_r$. Téngase en cuenta que cuando hay variabilidad de esloras se ha asumido que se hacen enmendadas, por lo que los resultados aquí presentados son los óptimos. En realidad ese valor será inferior.

Las dos últimas columnas representan los resultados de aplicar la formulación discreta sobre muelles que se explotan de manera continua. En el primer caso se ha asumido que para obtener el valor de ρ cuando N_{equiv} es no entero se ha de hacer la interpolación entre las curvas de N inmediatamente superior e inferior a N_{equiv} . En el segundo caso se ha asumido que el número de puestos de atraque ha de ser el entero inferior a N_{equiv} y el valor de ρ ha de ser el relativo a ese entero.

	FORMULACIÓN CONTINUA		FORMULACIÓN DISCRETA	
	ESL. CONSTANTES	ESL. VARIABLES	INTERPOLACIÓN	ALTERNATIVA
L = 850	88,0	101,0	130,5	88,0
L = 900	137,8	113,3	156,6	138,2

Tabla 4: Resultados de la estimación de la capacidad horaria de los muelles (en TEUs/h) aplicando las diferentes formulaciones y metodologías.

CONCLUSIONES

La principal conclusión que se puede extraer de este estudio es que a la hora de estimar la capacidad de un muelle de contenedores es muy recomendable aplicar una formulación continua como la que se propone en esta ponencia. Para aplicar esta formulación es necesario recurrir a herramientas de simulación capaces de modelar un muelle de explotación continua.

Además, y a la vista de la influencia que tiene la variabilidad de las esloras en los resultados de la capacidad, es de suma importancia conocer la distribución de esloras de los buques que hacen escala en la terminal. Es importante destacar que la capacidad de un

muelle no es un valor invariable a lo largo de la vida de éste, sino que en cuanto los buques que hacen escala en la terminal varíen haciendo que la función de densidad de esloras sea diferente, la capacidad del muelle también cambiará. En los casos en los que se desconozca la distribución de esloras por ser una terminal en proyecto, es importante tener presente que las estimaciones iniciales de la capacidad pueden ser muy diferentes a aquellas que se hagan cuando la terminal esté en explotación.

Finalmente, conviene remarcar que a la hora de calcular la capacidad de un muelle es muy conveniente recurrir a herramientas de simulación que reflejen la explotación real de ese muelle y la estructura del tráfico al que sirve en cada momento.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al proyecto “Metodologías de automatización y simulación para la evaluación y mejora de la capacidad, rendimiento y nivel de servicio de terminales portuarias de contenedores” (MASPORT, 2008-2011), financiado por el Ministerio de Fomento, dentro del Plan Nacional de Investigación Científica, Desarrollo e Innovación Tecnológica en su convocatoria de 2008, por el soporte recibido para el desarrollo de este trabajo.

REFERENCIAS

- AGERSCHOU, H. (2004). Facilities requirements. En: H. AGERSCHOU (ed.) *Planning and design of ports and marine terminals*, 2nd Ed., Thomas Telford Ltd., London, pp. 5-20.
- AGUILAR, J. y OBRER-MARCO, R. 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*, 27-28 de mayo de 2009, pp 769-778. Santander.
- GONZÁLEZ-HERRERO, J.M. y Comisión redactora de la ROM 2.1 (2006). ROM 2.1: *Obras de Atraque y Amarre*. EROM 02. Editorial UPV, Puertos del Estado, Madrid.
- HENESEY, L.E. (2004). *Enhancing container terminal performance: a multi agent systems approach*. Blekinge Institute of Technology, Karlshamn.
- MONFORT, A.; AGUILAR, J.; GÓMEZ-FERRER, R.; ARNAU, E.; MARTÍNEZ, J.; MONTERDE, N.; y PALOMO, P. (2001). *Terminales marítimas de contenedores: el desarrollo de la automatización*. Fundación IPEC, Valencia.
- MONFORT, A.; AGUILAR, J.; VIEIRA, P.; MONTERDE, N.; OBRER, R.; CALDUCH, D.; MARTÍN, A.M. y SAPIÑA, R. (2011). *Manual de capacidad portuaria: aplicación a terminales de contenedores*. Fundación Valenciaport, Valencia.
- RODRÍGUEZ, F (1977). *Capacidad de los muelles*. Ministerio de Obras públicas, Madrid.

3. Obrer-Marco, R. y Aguilar, J. (2011). Influencia de los resguardos entre buques en la capacidad de los muelles. Proc., Influencia de los resguardos entre buques en la capacidad de los muelles, Jornadas de Costas y Puertos, Las Palmas de Gran Canaria, 664 - 670.

5.5.5. INFLUENCIA DE LOS RESGUARDOS ENTRE BUQUES EN LA CAPACIDAD DE LOS MUELLES

R. Obrer-Marco¹, J. Aguilar²

1. Técnico superior de proyectos de investigación. Dpto. de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia. Edificio 4A. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia. roobmar@upv.es
2. Catedrático de universidad. Dpto. de Ingeniería e Infraestructura de los Transportes, E.T.S. Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politécnica de Valencia. Edificio 4A. Camino de Vera s/n, 46022 Valencia. jaguilar@upv.es

INTRODUCCIÓN

El espectacular crecimiento del tráfico contenedorizado sufrido en las últimas décadas y la necesidad de aprovechar las economías de escala han propiciado la construcción de buques portacontenedores cada vez mayores y, como consecuencia, de muelles más profundos y de mayor longitud. Con esta situación y con el fin de utilizar más eficientemente las infraestructuras existentes, las líneas de muelle han empezado a explotarse como líneas continuas, pudiendo aprovecharse más o menos el espacio en función de la longitud de los buques que en cada momento llaman a la terminal. Sin embargo y como consecuencia de la premura por adecuar las instalaciones a los buques, se ha ido dejando de lado el avance en el estudio de los muelles y en la forma de estimar su capacidad de manera que se refleje la nueva forma de explotarlos.

La capacidad de un muelle se puede definir como el tráfico límite que éste admite a lo largo de un periodo de tiempo, normalmente un año. La formulación más comúnmente empleada para estimar el tráfico que discurre a través de un muelle durante un año implica que la línea de atraque está compuesta por un número constante de atraques:

$$T = a \cdot \rho \cdot P \cdot H_{\text{año}}$$

Donde T es el tráfico que discurre por el muelle a lo largo de un año (TEUs/año, contenedores/año o movimientos/año); a es el número de atraques; ρ es la tasa de ocupación del muelle (o de un atraque, pues coinciden); P es la productividad de un atraque (TEUs/(h·atraque), contenedores/(h·atraque) o movimientos/(h·atraque)); y $H_{\text{año}}$ es el número de horas operativas del muelle al año (h/año).

La formulación anterior refleja la relación entre el tráfico al que sirve un muelle y la calidad de servicio ofrecida a las compañías navieras (nivel de servicio –NdS). El interés de éstas es que el tiempo de la escala en la terminal sea relativamente reducido, aunque proporcionado al número de contenedores que vayan a embarcar/desembarcar. Para ello es preciso que P sea relativamente elevada y que la espera en fondeo debida a la congestión de la terminal sea reducida o nula. Al igual que P este segundo indicador está considerado en la formulación del tráfico, aunque aparezca por medio de la tasa de ocupación (ρ). Cuando la tasa de ocupación aumenta, las esperas también lo hacen llegando al límite en el que cuando todos los atraques están permanentemente ocupados, la cola de buques se hace infinita. Por el contrario, cuando la ocupación de los atraques tiende a cero, las esperas debidas a la congestión tienden a cero. Además, parece razonable que las esperas estén proporcionadas a la duración del servicio (periodo de tiempo entre el atraque y el desatraque del buque). La relación entre la espera media de un conjunto de buques y la duración del servicio media de esos mismos buques se conoce como espera relativa (ϵ_r). Si se asume que P es relativamente elevada, el NdS de los buques queda representado por ϵ_r .

Fijando ϵ_r es posible obtener el valor de ρ que proporcionará el valor de la capacidad del muelle al introducirlo en la formulación anterior, por lo que una de las

claves para conocer la capacidad del muelle es conocer la relación entre ρ y ϵ_r . Esta relación depende de tres variables: 1) el número de atraques del muelle - a -; 2) la función de densidad de la variable "intervalo entre llegadas consecutivas de los buques que hacen escala en la terminal", de ahora en adelante función de densidad de las llegadas - $\{A\}$ -; y 3) la función de densidad de la duración del servicio de los buques - $\{B\}$ -. Para la obtención de la relación ρ - ϵ_r inicialmente se suele emplear la teoría de colas, teoría desarrollada en el sector de las comunicaciones, y por lo tanto no siempre aplicable a terminales portuarias. La teoría de colas solamente ofrece soluciones analíticas exactas en dos casos: 1) cuando el muelle se compone de un atraque y las llegadas o los servicios son exponenciales; y 2) cuando las llegadas y los servicios son exponenciales, independientemente del número de atraques (Rodríguez, 1977). Sin embargo, estas condiciones no se dan en todas las terminales, entre las que se encuentran las terminales de contenedores españolas. En estas últimas se ha comprobado que, a pesar de que las llegadas son exponenciales, las duraciones de servicio se distribuyen como funciones Erlang K, donde $K \in [4,7]$ (Aguilar y Obrer-Marco, 2009), de ahí que no sea posible aplicar la teoría de colas. En estos casos es posible obtener la relación entre las dos variables mediante simulación a partir de técnicas de Montecarlo.

En el caso de muelles explotados de manera continua, ha venido siendo habitual hacer una traslación de "muelle continuo" a "muelle discreto" obteniendo el número de atraques equivalentes (a_{equiv}) a partir de un buque tipo (que puede ser un valor medio o un valor extremal de la función de distribución de esloras) y aplicar la misma formulación. Mientras que unos autores proponen desestimar aquellas alineaciones donde no quepa el buque tipo (UNCTAD, 1986), otros autores consideran que tomando esta decisión la capacidad se puede estar subestimando (Obrer-Marco, 2009). Por todo ello, conviene modificar la formulación que considere el muelle como una línea continua, y que resultaría así:

$$T = L \cdot \rho_c \cdot P_c \cdot H_{atno}$$

Donde L es la longitud del muelle; ρ_c es la tasa de ocupación del muelle explotado de manera continua; y P_c es la productividad por metro lineal de muelle explotado de manera continua (TEUs/(h·m) , contenedores/(h·m) o movimientos/(h·m)).

Por tanto, cuando se pretende aplicar una formulación continua para estimar el tráfico límite admisible por un muelle, es preciso previamente conocer la relación entre ρ_c y ϵ_r , para lo que se ha de recurrir a la simulación.

Consideraciones sobre el cálculo de la tasa de ocupación

Como se ha comentado, es imposible que un muelle esté permanentemente ocupado dado que ello implicaría colas tan desmesuradas que los clientes terminarían por escalar en otras terminales. Por ello, en las formulaciones anteriores aparecen las variables ρ y ρ_c indicando la proporción del tiempo en la que el muelle está ocupado (aprovechamiento del muelle). Sin embargo existe una diferencia fundamental entre el cálculo de ambas variables; la primera no considera la eslora de los buques y el posicionamiento en los atraques es siempre igual e independiente de la eslora, todo lo contrario que la segunda. A continuación se presentan las ecuaciones de las dos variables:

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^N \frac{t_i}{T_i}}{N} \qquad \rho_c = \frac{\sum_{j=1}^B \frac{(E_j + R_j) \cdot t_j}{L \cdot T}}$$

Donde i y j son los contadores respectivos de atraques y buques; y N y B son el número de atraques y buques; t_i es el tiempo durante el cual el atraque i está ocupado; y 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); E_j es la eslora del

buque j ; R_j es el resguardo asociado a 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; y 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_j).

Variables definitorias del muelle

Cuando un muelle se explota de manera discreta las variables que definen el muelle son: a , $\{A\}$ y $\{B\}$. Sin embargo, cuando el muelle se explota de manera continua, aparecen nuevas variables fruto de disponer de una línea continua donde atracar los buques, en lugar de unas posiciones de atraque concretas. Las variables definitorias de un muelle explotado de manera continua se pueden clasificar en intrínsecas al muelle o propias de la explotación. Las variables intrínsecas al muelle son: la longitud del muelle (L); la función de distribución de las esloras de los buques que escalan en la terminal ($\{E\}$); $\{A\}$; y $\{B\}$. Las variables propias de la explotación son: la posibilidad de hacer enmendadas; el hueco donde atracar el buque; el posicionamiento del buque dentro del hueco; y el criterio de resguardo. En los casos en los que $\{E\}$ es constante y el cociente de L dividido entre E (a la que se le añade el resguardo por seguridad) resulta un número entero, da igual resultado simular de forma continua o discreta.

La mejor o peor utilización del muelle depende de las variables propias de la explotación, 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. Sin embargo, la solución adoptada puede depender del algoritmo o la técnica de optimización empleada. Para resolverlo, se ha asumido que en el muelle se realizan enmendadas, es decir que 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 que no haya huecos entre ellos. A pesar de ser una situación poco frecuente o irreal, al emplear 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.

Por otra parte, existen diversos criterios para determinar el resguardo necesario entre buques. Como regla práctica en el día a día de las operaciones portuarias, se asume que el resguardo implica un porcentaje de la eslora de los buques, que suele estar comprendido entre el 10% y el 15%. Sin embargo existen otros criterios que no solamente consideran la eslora de los buques, sino también la distribución en planta de las alineaciones del muelle y su tipología estructural. Es el caso de la ROM 2.0-08. Estos son los dos criterios que se han considerado en esta ponencia, aunque existen otros como el propuesto por Agerschou (2004), para quien el resguardo debe estar entre 10 y 20 m, o el propuesto por Rodríguez (1977) condicionado al espacio necesario para disponer las amarras de los buques en el muelle.

OBJETIVOS, METODOLOGÍA Y DISEÑO DE EXPERIMENTOS

El principal objetivo de esta ponencia es conocer la influencia que puede tener la elección de uno u otro criterio de resguardo en la relación $\epsilon_r - \rho_c$, y por tanto en la capacidad de un muelle, cuando la calculamos mediante una formulación que concibe el muelle como una línea continua. También se pretende conocer la influencia que pueden tener las variables propias de la explotación en la capacidad.

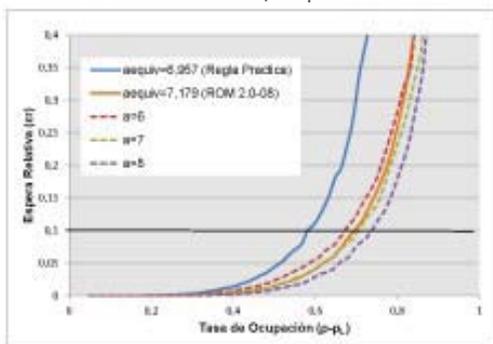
Para cumplir con los objetivos, se ha desarrollado un programa que modeliza el muelle de manera continua o discreta y por lo tanto proporciona las relaciones $\epsilon_r - \rho$ y $\epsilon_r - \rho_c$. Como viene siendo habitual entre los textos que tratan la capacidad de los muelles, los resultados del programa se representan de forma gráfica. Cada simulación proporciona una curva compuesta de 50 puntos, que a su vez son fruto de 25 iteraciones de 365 días, lo que resulta en 4 horas de simulación por curva. Validado el programa de simulación, se han diseñado los

escenarios y casos a simular con base a los valores conocidos de las terminales de contenedores españolas (Aguilar y Obrer-Marco, 2009). El valor de L ha adoptado los valores: 1000m, 1500m y 2000m. {A} se corresponde con una función exponencial y {B} con una función Erlang 4. En cuanto a la función {E} se han simulado tres tipos de funciones: constante, uniforme y triangular, con medias de 150 m y 250 m, para las que a su vez se han simulado dos rangos diferentes (± 50 m y ± 75 m; y ± 50 m y ± 100 m respectivamente).

En cuanto a las variables propias de la explotación se han diseñado escenarios con enmendadas y sin enmendadas. Cuando no se han simulado enmendadas se han simulado asignaciones de buques al hueco más grande y al hueco más pequeño, y para la variable "posicionamiento dentro del hueco" se ha simulado el posicionamiento en un extremo del hueco y en el centro del hueco.

RESULTADOS

A la vista de los resultados, se obtiene una primera deducción correspondiente al escenario en el que se llevan a cabo enmendadas y las esloras de los buques son constantes. Para este escenario, se han simulado varios casos combinando las tres posibles asignaciones de muelle y las dos posibles esloras, y para cada caso se han simulado dos situaciones cuya diferencia es el criterio de resguardo. Se aprecia claramente que el valor de a_{equiv} es decisivo en los resultados obtenidos. Con el fin de clarificar, se presentan a continuación los resultados del caso en



el que el muelle tiene una longitud de 2000m y la eslora de los buques es de 250m. Nótese que en la Figura 1 también se incorporan los resultados de la relación $er - \rho$ con el fin de comparar resultados.

Figura 1: Curvas $er - \rho_c$ para un muelle de 2000m al que llegan buques cuya {E} es constante e igual a 250m. Comparación con los resultados correspondientes a un muelle explotado de manera discreta ($er - \rho$).

Al aplicar el criterio de resguardo de la regla práctica, el valor de a_{equiv} es 6,957, y en comparación con los resultados obtenidos cuando el muelle se explota de manera discreta y está compuesto por 6 y por 7 atraques, los resultados proporcionan tasas de ocupación muy inferiores para el mismo valor de er . Por otro lado, al aplicar el criterio de la ROM 2.0-08, el valor de a_{equiv} es 7,179, cuya parte decimal es muy inferior al caso anterior. Con este criterio, la curva $er - \rho_c$ no está tan alejada de las curvas correspondientes al muelle explotado de manera discreta y compuestos de 7 y de 8 atraques. De ahí se deduce que la curva resultado de la simulación continua no se encuentra entre las dos curvas que se obtienen cuando el muelle se explota de manera discreta y está compuesto por un número de atraques igual al entero inmediatamente inferior y superior al valor de a_{equiv} , sino que proporciona siempre resultados iguales o peores al caso en el que el muelle está compuesto por un número de atraques igual al entero inmediatamente inferior. La diferencia con esta última curva dependerá de la parte decimal de a_{equiv} y cuanto mayor sea la parte decimal, mayor será la diferencia. Ello es debido a que cuando las esloras son constantes, a medida que se aumenta la longitud del muelle, esta no es aprovechada hasta el momento en el que cabe un buque más, y mientras tanto la parte permanentemente desocupada pesa en el valor de ρ_c . Como consecuencia nunca se podrá alcanzar una tasa de ocupación igual a la unidad, ni aunque la cola de los buques (er) fuese infinita.

La segunda deducción se obtiene del escenario en el que se hacen enmendadas en el muelle y las esloras no son constantes. En el caso planteado en la Figura

2, la elección de un criterio de resguardo u otro afecta al valor de a_{equiv} y éste a su vez a cómo se comporta el muelle cuando la distribución de esloras no es constante. Cuando se aplica la regla práctica $a_{equiv}=5,797$, y ello implica que los resultados obtenidos por las simulaciones en las que existe variabilidad de esloras sean mejores pues, a igual valor de ϵ_r el valor de p_c es mayor. Al contrario ocurre cuando se aplica la ROM 2.0-08, pues la parte entera de a_{equiv} es inferior a 0,5 (en efecto, $a_{equiv}=6,030$). Véase ahora la Figura 3. En este caso, al aplicar ambos criterios de resguardo, el valor entero de a_{equiv} es el mismo y la parte decimal es muy próxima a 0,5 en ambos casos. Tanto al aplicar la regla práctica como al aplicar la ROM 2.0-08, la variabilidad de esloras no tiene prácticamente ninguna influencia en el aprovechamiento del muelle.

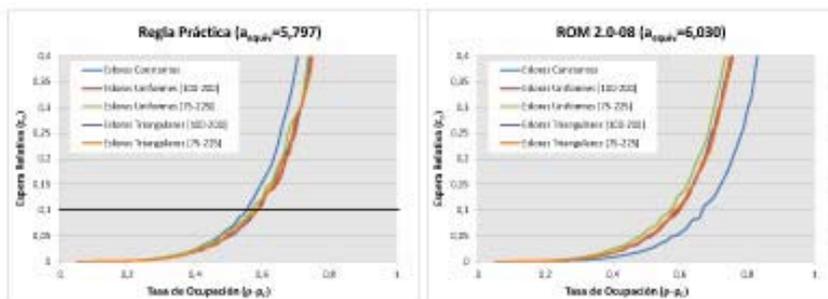


Figura 2: Curvas $\epsilon_r - p_c$ en diferentes situaciones de resguardo para un muelle de 1000m en el que hacen enmendadas y al que llegan buques cuya $\{E\}$ tiene una media de 150m. Comparación de las diferentes funciones de distribución de esloras.

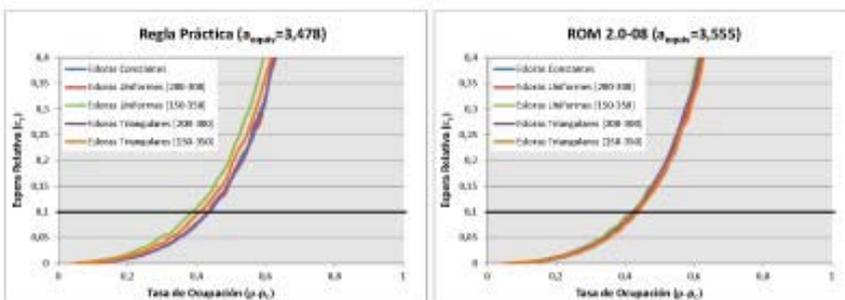


Figura 3: Curvas $\epsilon_r - p_c$ en diferentes situaciones de resguardo para un muelle de 1000m en el que se hacen enmendadas y al que llegan buques cuya $\{E\}$ tiene una media de 250m. Comparación de las diferentes funciones de distribución de esloras.

La tercera deducción se obtiene del escenario en el que no se hacen enmendadas y existe variabilidad de esloras. En efecto, como se ve en los casos de la Figura 4 y la Figura 5, independientemente de la parte decimal de a_{equiv} siempre se obtienen mejores resultados cuando no existe variabilidad en las esloras.

Además de la influencia del criterio de resguardo elegido, otro objetivo de esta ponencia es conocer la influencia que tiene la elección de un hueco u otro en la asignación de atraque cuando el muelle se explota de manera continua. En concreto en esta ponencia se ha comparado el caso en el que se ubican los buques en el hueco más pequeño de entre aquellos huecos en los que cabe y al contrario, en el hueco más grande. Se ha comprobado que en algunos casos no existe una diferencia significativa en los resultados cuando los buques se disponen en el menor de los espacios posibles o en el mayor, con independencia del criterio de resguardo escogido. Sin embargo, en otros casos sí que se ha visto una diferencia clara. Por ello no es posible formular una conclusión, debiéndose estudiar cada caso.

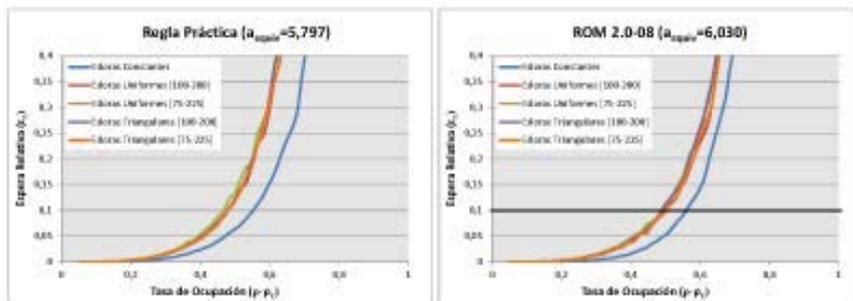


Figura 4: Curvas $\epsilon_r - p_c$ en diferentes situaciones de resguardo para un muelle de 1000m en el que no se hacen enmendadas y al que llegan buques 150m de media. Comparación de las diferentes funciones de distribución de esloras.

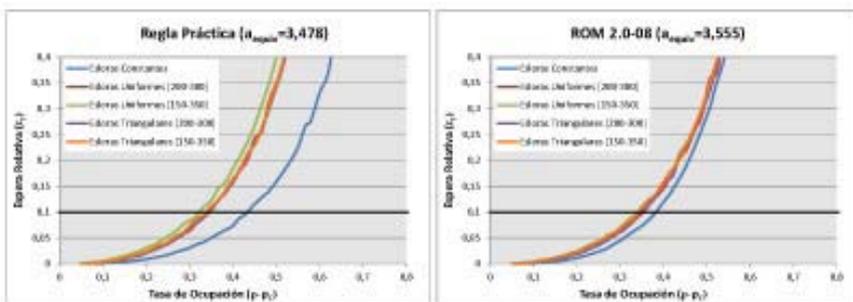


Figura 5: Curvas $\epsilon_r - p_c$ en diferentes situaciones de resguardo para un muelle de 1000m en el que no se realizan enmendadas y al que llegan buques de 250m de media. Comparación de las diferentes funciones de distribución de esloras.

Finalmente, como cuarta deducción, se ha podido comprobar que en todos los casos los resultados del aprovechamiento del muelle son peores cuando una vez escogido el hueco en el que se va a atracar el buque, éste se dispone en la parte central del hueco en lugar de uno de los extremos (ver Figura 6).

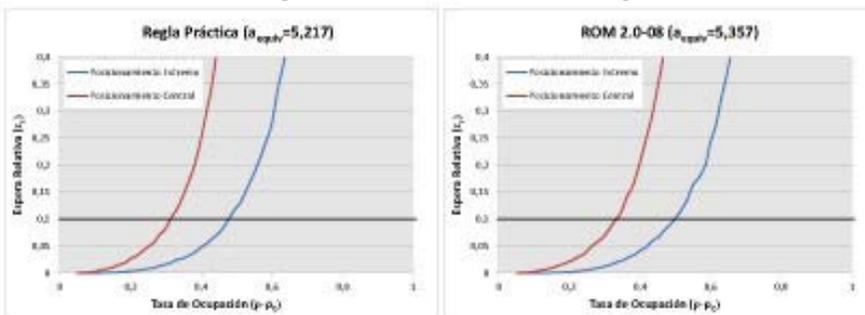


Figura 6: Curvas $\epsilon_r - p_c$ en diferentes situaciones de resguardo para un muelle de 1500m en el que no se hacen enmendadas y al que llegan buques cuya $\{E\}$ es triangular de valor mínimo 200m y máximo 300m. Comparación del posicionamiento del buque en el hueco.

CONCLUSIONES

La principal conclusión que se puede obtener del estudio realizado y presentado en esta ponencia es que asumiendo una distribución esloras constante, el criterio de resguardo puede influir mucho en el aprovechamiento de un muelle siempre que la explotación de éste implique la realización de enmendadas de

los buques. Esto es así porque el criterio de resguardo incide directamente en el número de atraques equivalentes y el aprovechamiento del muelle está totalmente condicionado por el espacio del muelle que queda permanentemente libre, el cual se traduce en la parte decimal del número de atraques equivalentes. Así, dado que el aprovechamiento del muelle se ve condicionado por el criterio de resguardo, la capacidad de los muelles también, puesto que ésta es directamente proporcional a la tasa de ocupación.

Además, mientras se lleven a cabo enmendadas en el muelle, la variabilidad de las esloras no siempre proporciona aprovechamientos de muelle mejores que cuando las esloras son constantes, al contrario de lo que se podría pensar. Ahora bien, cuando no se llevan a cabo enmendadas el aprovechamiento del muelle siempre es peor en los casos en los que hay variabilidad de esloras, con independencia del criterio de resguardo empleado.

En relación al criterio de elección del hueco a la hora de asignar atraque a un buque (y claro está, en ausencia de enmendadas), no se ha podido extraer ninguna conclusión.

Por el contrario, con independencia del criterio de resguardo, el posicionamiento del buque en el centro del hueco siempre implica un peor aprovechamiento del muelle, y por lo tanto, a igual calidad ofrecida a los navieros, la capacidad del muelle es menor.

De todo esto se deduce la importancia de planificar los muelles asumiendo que la explotación de los mismos se lleva a cabo de manera continua, o lo que es lo mismo, de emplear formulaciones continuas a la hora de calcular las capacidades de los muelles, para lo que es necesario simular cada caso y obtener la relación $\epsilon_r - \rho_c$.

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.

Obrer-Marco, R. (2009). "Determinación de la capacidad de la línea de atraque en terminales portuarias. Aplicación al sistema portuario español", Universitat Politècnica de València, Valencia.

Rodríguez, F. (1977). "Capacidad de los Muelles", MOPU, Secretaría General Técnica, Madrid, España.

UNCTAD (1984). "Desarrollo portuario. Manual de planificación para los países en desarrollo", Publicaciones de las Naciones Unidas, Nueva York, USA.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la participación de las terminales de contenedores, MSC Terminal Valencia, S.A.; Marítima Valenciana, S.A.; Operaciones Portuarias Canarias, S.A., APM Terminals Algeciras, S.A., Abra Terminales Marítimas, S.A., Terminales Marítimas de Bilbao, S.A.; así como de las respectivas Autoridades Portuarias y del Organismo Público Puertos del Estado. También agradecen el apoyo del proyecto MASPORT perteneciente a la convocatoria del Ministerio de Fomento de 2008.

4. Obrer-Marco, R. y Aguilar, J. (2011). A influência da variabilidade do comprimentos dos navios no cálculo de capacidade dos cais de containers. Proc. A influência da variabilidade do comprimentos dos navios no cálculo de capacidade dos cais de containers, 7as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Porto.



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

Roser Obrer-Marco¹ e José Aguilar²

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). jaquilar@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:

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

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)

$H_{\text{año}}$ 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 el 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 un 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 $K \in [4,7]$ (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.

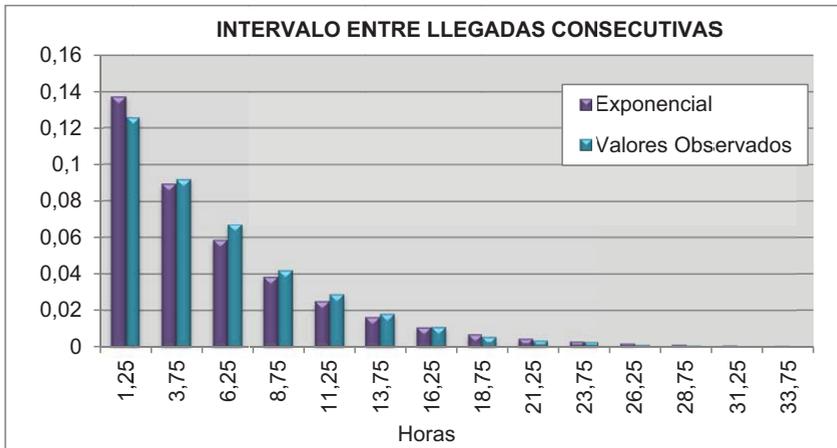


Figura 1: Función de densidad del intervalo entre llegadas consecutivas a una terminal de contenedores española.

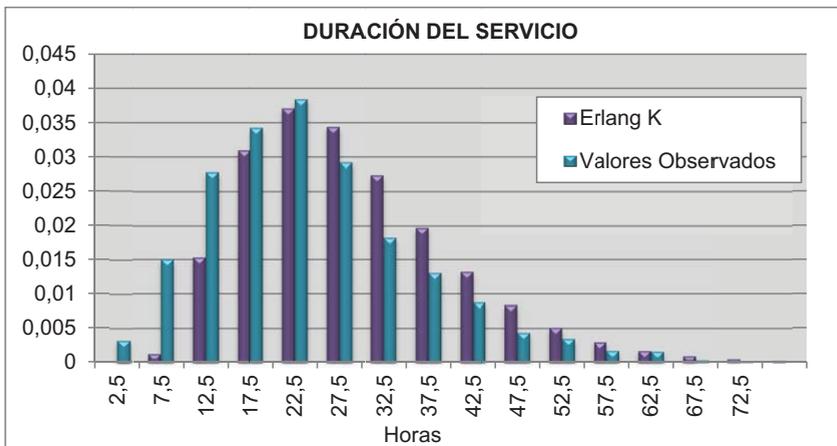


Figura 2: Función de densidad de la duración del servicio en una terminal de contenedores española.

3. Presentación de los ábacos $\rho - \varepsilon_r$

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 .

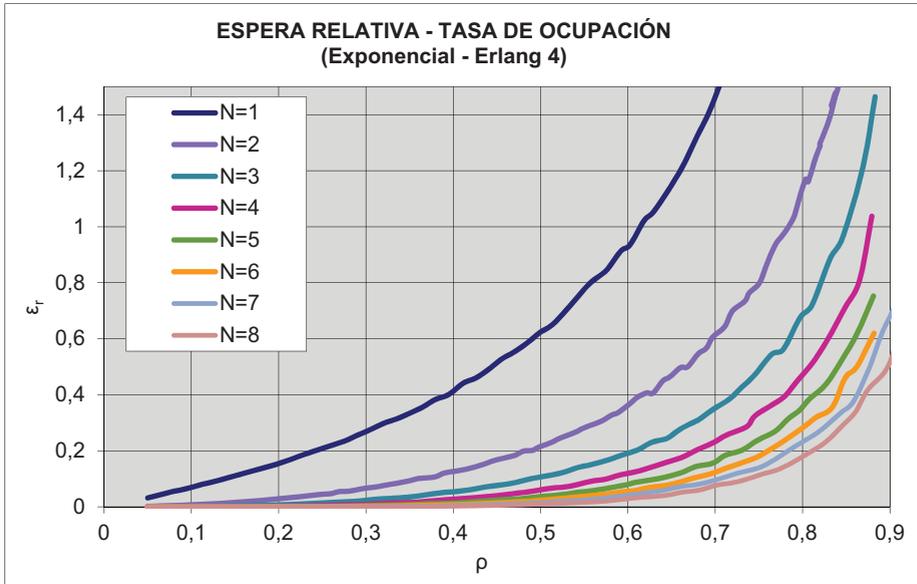


Figura 3: Ábaco $\rho - \varepsilon_r$ cuando las llegadas se distribuyen según una función exponencial y las duraciones de servicio según una función Erlang 4, cuando el muelle está compuesto de entre 1 y 8 atraques.

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.

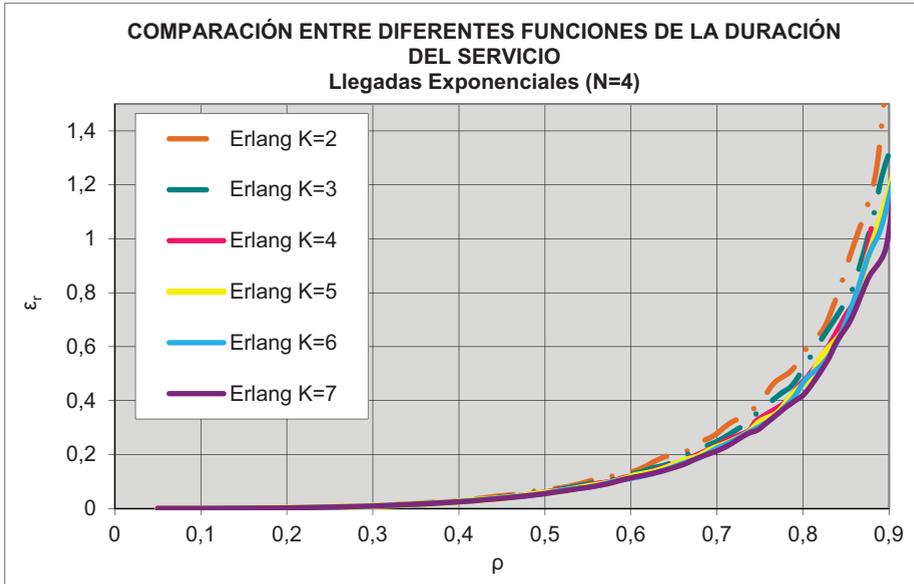


Figura 4: Comparación entre diferentes valores del parámetro K de la función de densidad de la duración del servicio Erlang K . Caso de 4 ataques.

En la Figura 4 se representan las curvas $\rho - \epsilon_r$ cuando el muelle está compuesto por cuatro ataques idénticos, las llegadas son exponenciales y los servicios son Erlang K donde $K \in [2,7]$. Como se puede ver, las curvas se superponen casi a la perfección cuando $K \in [4,7]$, 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 $\rho - \epsilon_r$ es preciso desarrollar un programa de simulación. El resultado de ese programa son las curvas $\rho - \epsilon_r$ dados una función de llegadas, una función de servicios y un número de ataques. 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 ataques 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 ataques varía. Esto es, los muelles no se explotan como si estuvieran formados por un número de ataques 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 ataques 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:

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

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))

$H_{\text{año}}$ 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 mayor 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:

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

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:

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

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.

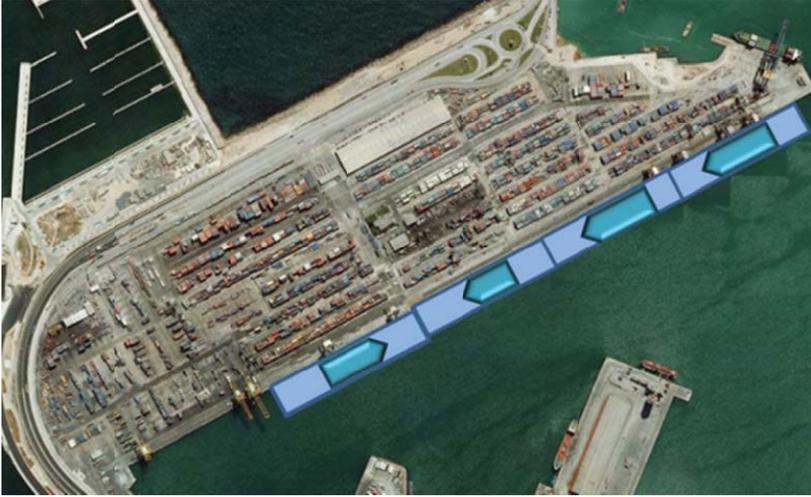


Figura 6: Muelle de la terminal TCV explotado como un muelle discreto. Situación 1. Fuente: Visor SigPac y elaboración propia.

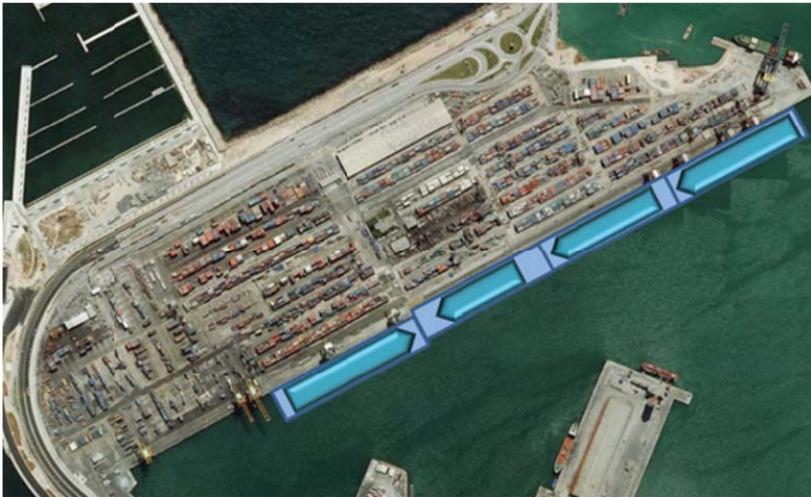


Figura 7: Muelle de la terminal TCV explotado como un muelle discreto. Situación 2. Fuente: Visor SigPac y elaboración propia.

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 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 $K \in [4,7]$, 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.

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

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

TIPO DE DISTRIBUCIÓN DE ESLOAS	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:

$$N_{equiv} = \frac{L}{1,15 \cdot E_{media}} \quad (5)$$

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.

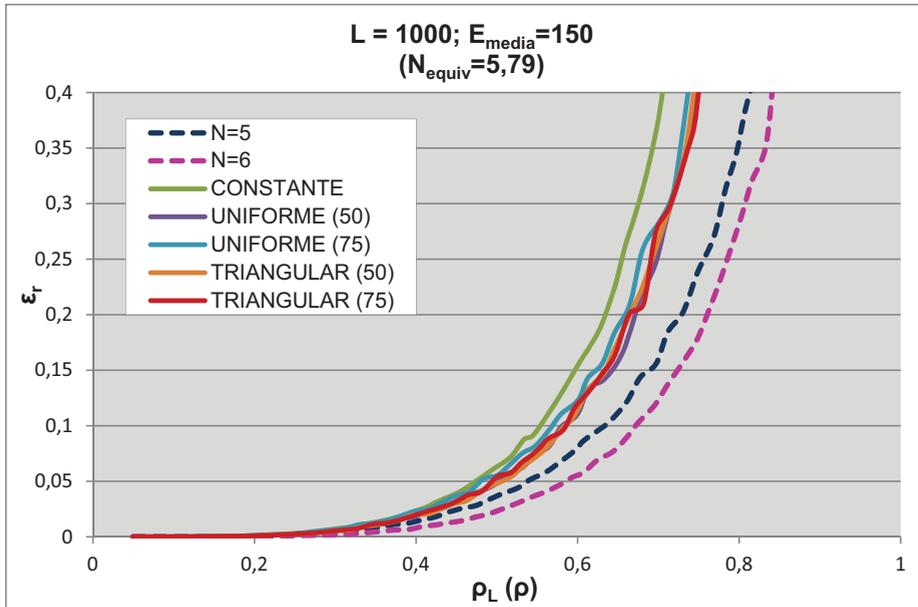


Figura 10: Relación $\varepsilon_r - \rho$ y $\varepsilon_r - \rho_L$ para el caso de $L=1000m$ y $E_{media}=150m$.

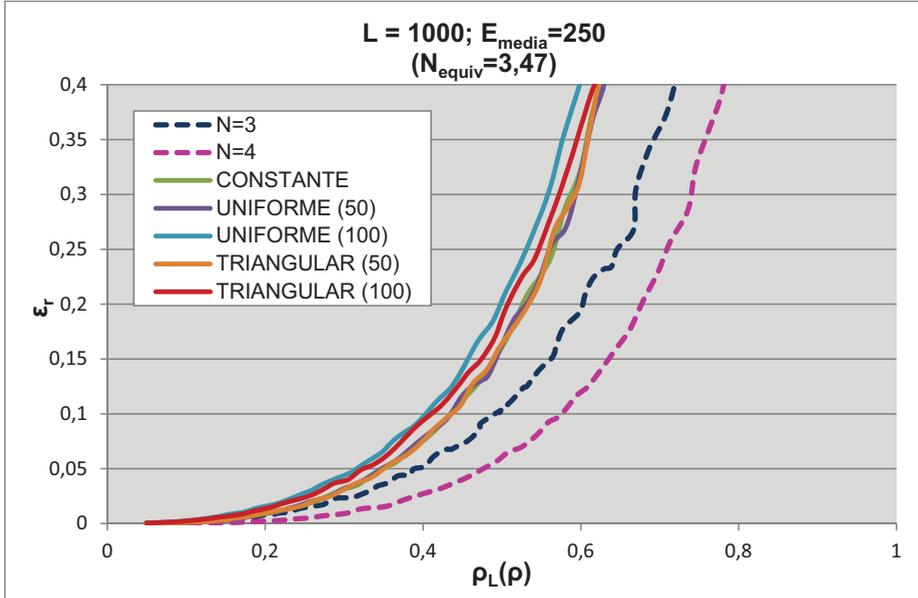


Figura 11: Relación $\varepsilon_r - \rho$ y $\varepsilon_r - \rho_L$ para el caso de $L=1000m$ y $E_{media}=250m$.

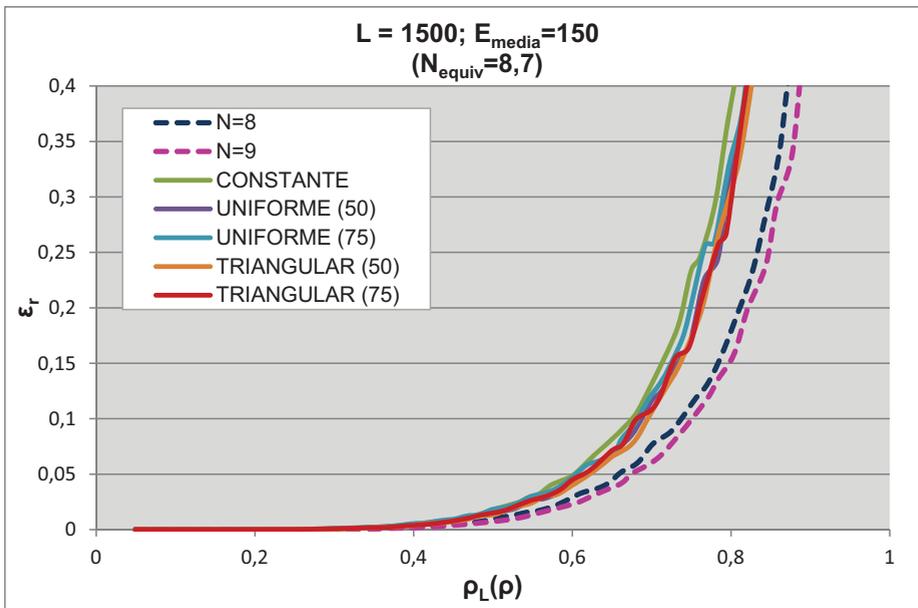


Figura 12: Relación $\varepsilon_r - \rho$ y $\varepsilon_r - \rho_L$ para el caso de $L=1500m$ y $E_{media}=150m$.

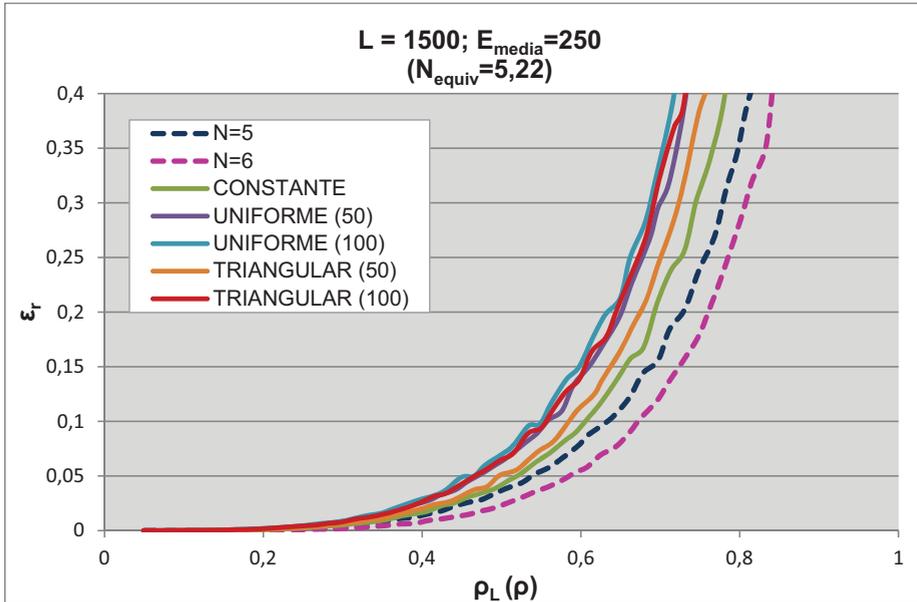


Figura 13: Relación $\varepsilon_r - \rho$ y $\varepsilon_r - \rho_L$ para el caso de $L=1500m$ y $E_{media}=250m$.

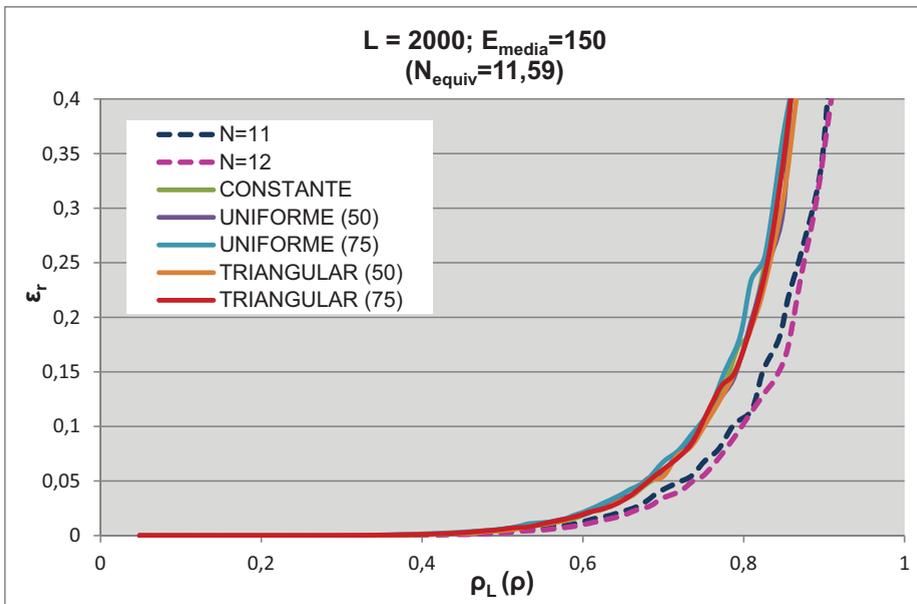


Figura 14: Relación $\varepsilon_r - \rho$ y $\varepsilon_r - \rho_L$ para el caso de $L=2000m$ y $E_{media}=150m$.

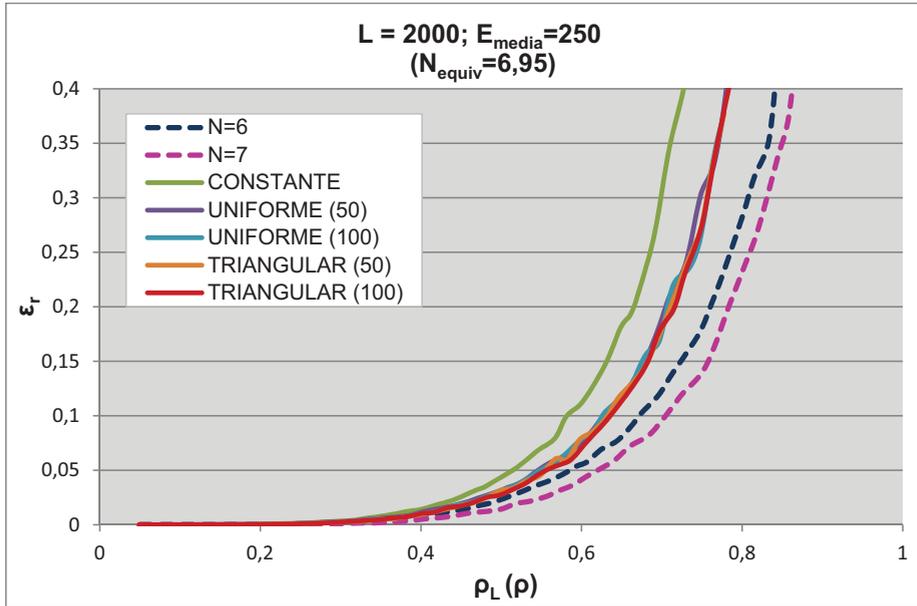


Figura 15: Relación $\varepsilon_r - \rho$ y $\varepsilon_r - \rho_L$ para el caso de $L=2000m$ y $E_{media}=250m$.

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 ε_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 media 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 media 400m. Es decir, si se asumen colas infinitas y buques de igual eslora, la tasa de ocupación es máxima cuando N_{equiv} es entero. Si a partir de esa situación el muelle se prolonga de manera que N_{equiv} sea fraccionario y superior al N_{equiv} inicial, la tasa de ocupación disminuirá hasta que la longitud sea tal que N_{equiv} 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.

Anejo 2

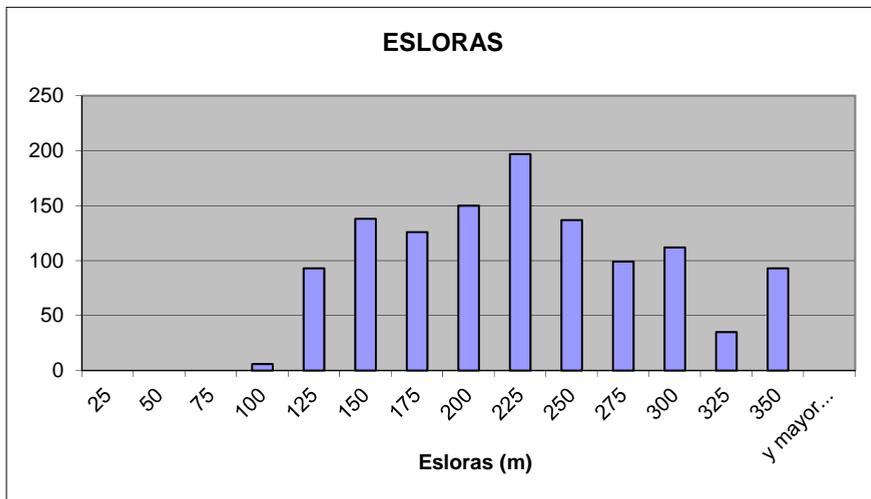
Resultados de los Análisis de las Terminales de Contenedores Visitadas

ANÁLISIS DE LAS DISTRIBUCIONES DE ESLORAS

TERMINAL A

- Barcos Observados: 1186
- Comentarios: No se han tomado todos los buques de los que se disponía. Se ha hecho una selección aleatoria y finalmente se han escogido 1186 en total.

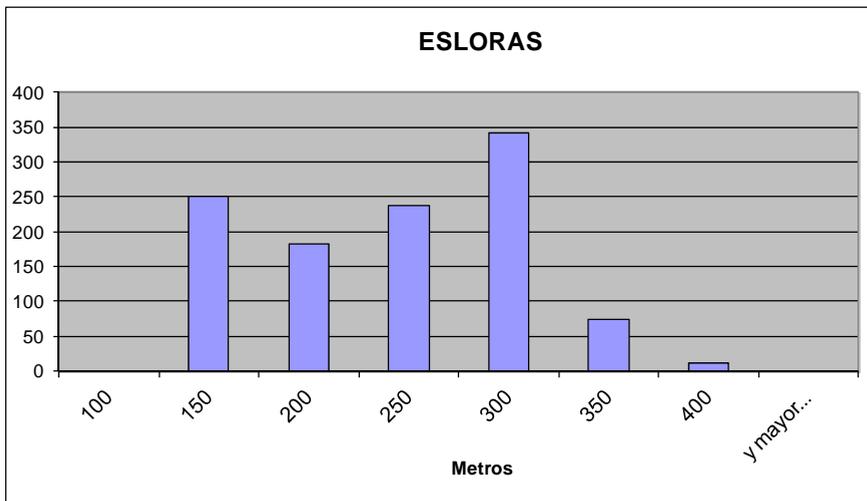
Mínimo	99,0
Máximo	349,0
Promedio	214,8
Desv. Típ.	64,8



TERMINAL B

- Barcos Observados: 1101

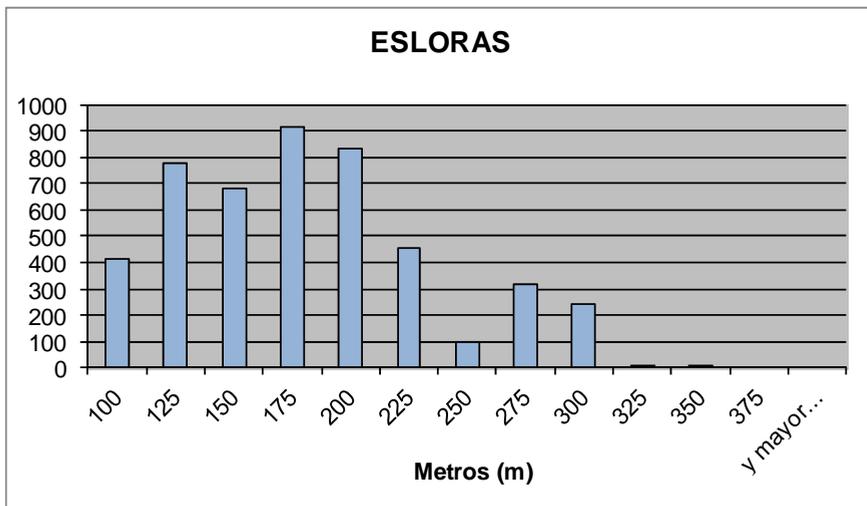
Mínimo	113,0
Máximo	366,1
Promedio	221,2
Desv. Típ.	64,7



TERMINAL C

- Barcos Observados: 4743

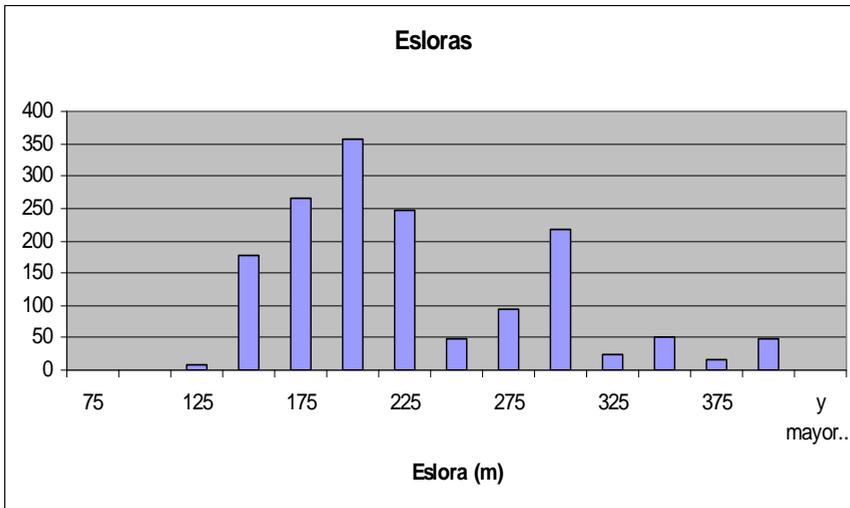
Mínimo	68,0
Máximo	295,0
Promedio	165,7
Desv. Típ.	53,5



TERMINAL E

- Barcos Observados: 1558

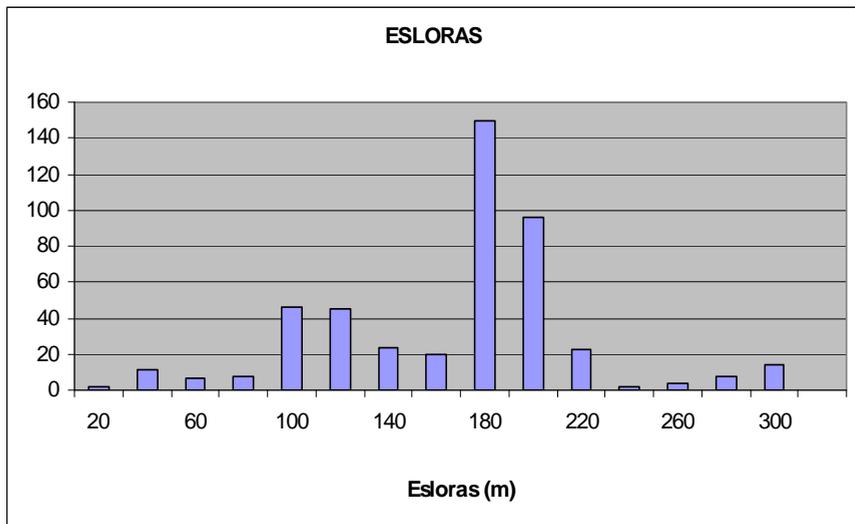
Mínimo	88,5
Máximo	397,7
Promedio	216,9
Desv. Típ.	65,5



TERMINAL F

- Barcos Observados: 460

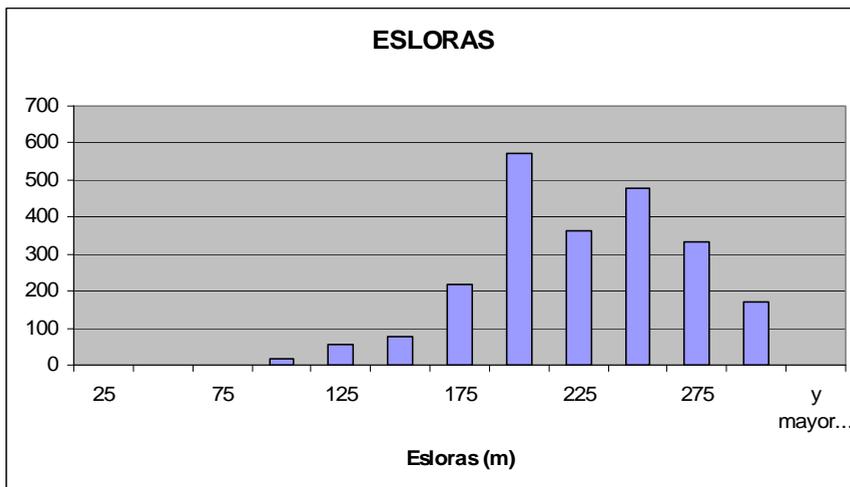
Mínimo	18,0
Máximo	299,9
Promedio	158,1
Desv. Típ.	52,0



TERMINAL G

- Barcos Observados: 2283
- Comentarios: No se dispone de todas las esloras de los buques que hacen escala en la terminal, de manera que el resultado puede estar sesgado. De un total de 3008 escalas, se dispone de los datos de esloras de 2283.

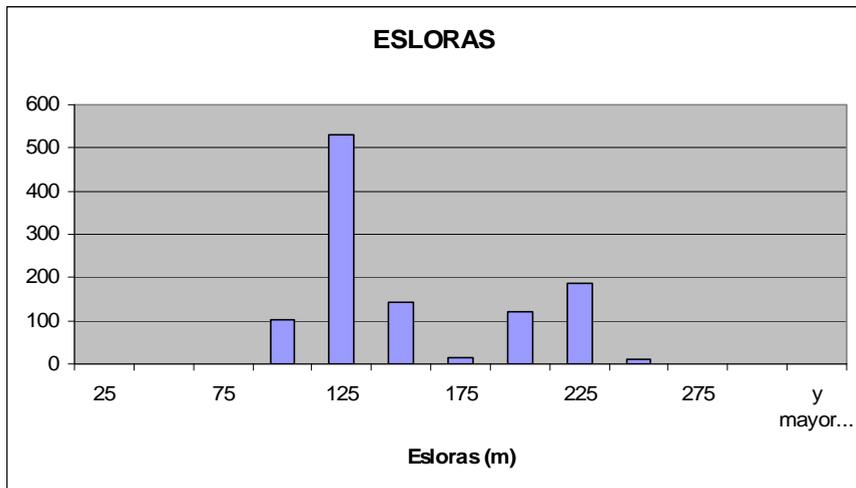
Mínimo	100,0
Máximo	299,0
Promedio	214,6
Desv. Típ.	44,5



TERMINAL H

- Barcos Observados: 1115

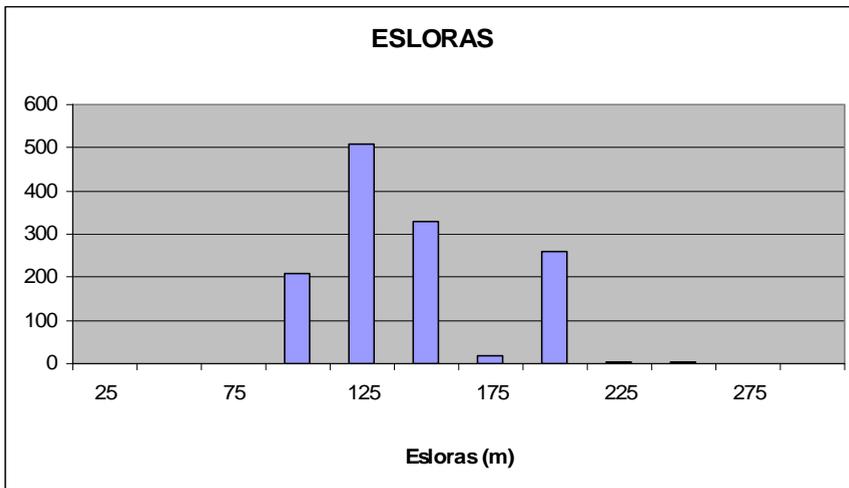
Mínimo	85,0
Máximo	295,0
Promedio	138,9
Desv. Típ.	40,6



TERMINAL I

- Barcos Observados: 1335

Mínimo	88,0
Máximo	253,0
Promedio	130,4
Desv. Típ.	31,4

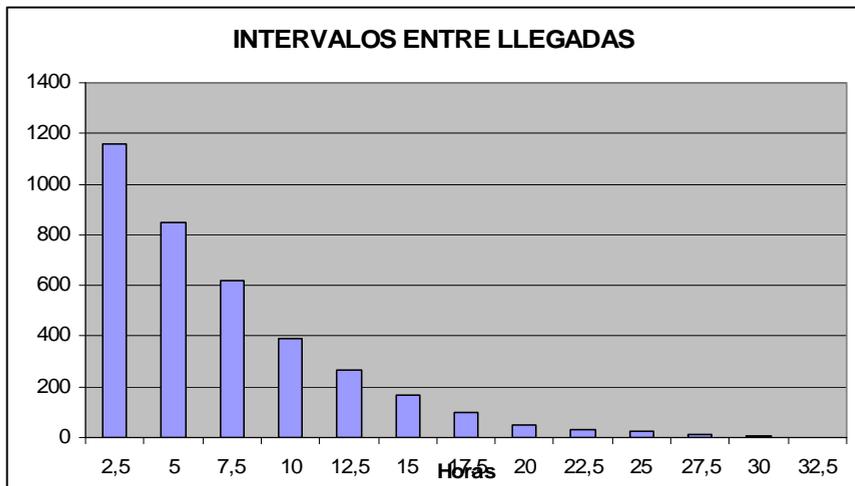


ANÁLISIS DE LAS DISTRIBUCIONES DE LLEGADAS

TERMINAL A

- Barcos Observados: 2487
- Observaciones: Los datos son de entrada a la terminal, no a puerto. No incluyen el fondeo.

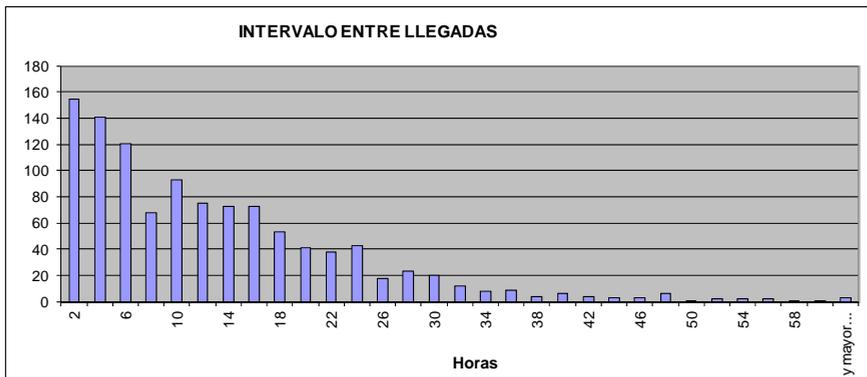
Mínimo	0,0
Máximo	44,6
Promedio	5,9
Desv. Típ.	5,1



TERMINAL B

- Barcos Observados: 1102
- Observaciones: Sí que se dispone de datos de fondeo

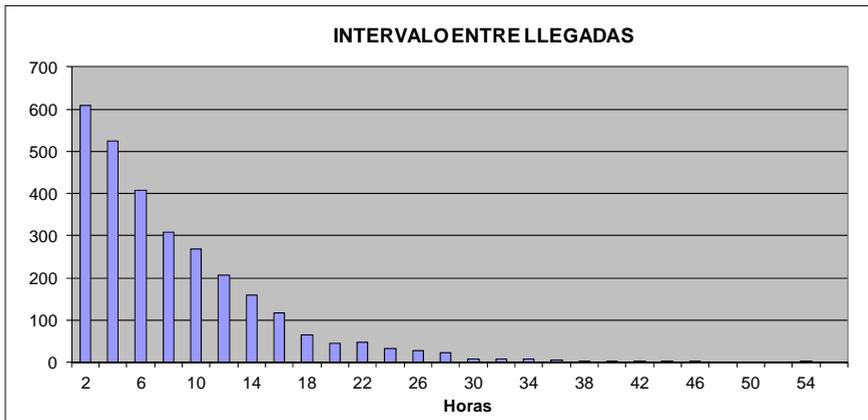
Mínimo	0,0
Máximo	72,0
Promedio	12,0
Desv. Típ.	10,8



TERMINAL C

- Barcos Observados: 2890
- Observaciones: Los datos son de entrada a la terminal, no a puerto. No incluyen el fondeo.

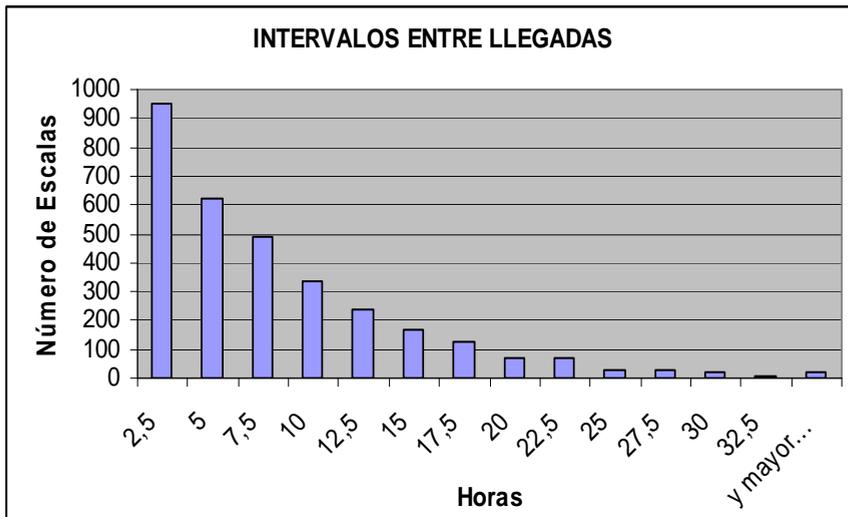
Mínimo	0,0
Máximo	53,3
Promedio	7,4
Desv. Típ.	6,7



TERMINAL D

- Barcos Observados: 3185
- Observaciones: Sí que se dispone de datos de fondeo

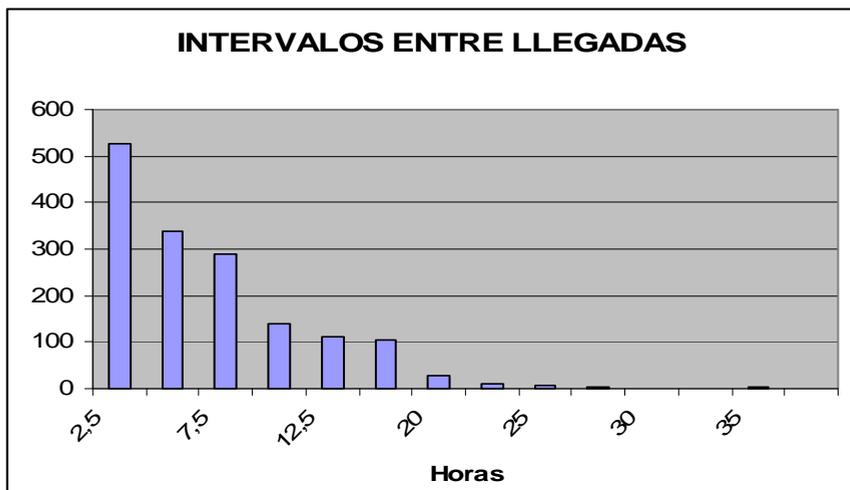
Mínimo	0,0
Máximo	69,3
Promedio	7,1
Desv. Típ.	6,9



TERMINAL E

- Barcos Observados: 1561
- Observaciones: Cuando hay fondeo, los datos se corresponden con la llegada a fondeadero, mientras que cuando no hay fondeo se corresponden con la llegada al atraque.

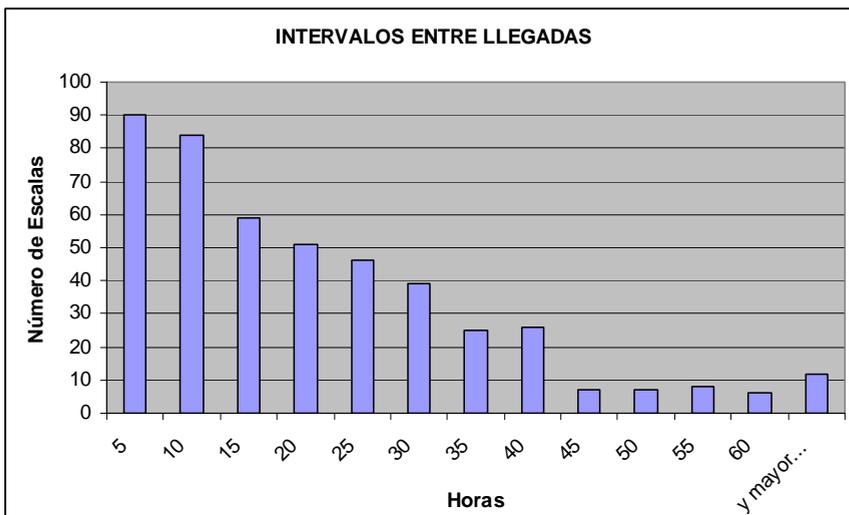
Mínimo	0,0
Máximo	32,8
Promedio	5,6
Desv. Típ.	5,0



TERMINAL F

- Barcos Observados: 461
- Observaciones: Cuando hay fondeo, los datos se corresponden con la llegada a fondeadero, mientras que cuando no hay fondeo se corresponden con la llegada al atraque.

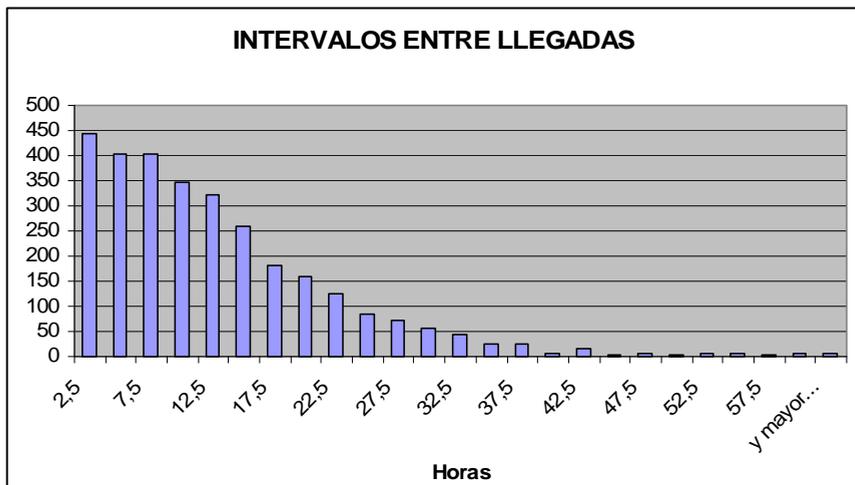
Mínimo	0,0
Máximo	148,7
Promedio	18,9
Desv. Típ.	17,1



TERMINAL G

- Barcos Observados: 3008
- Observaciones: No se dispone de datos de fondeo ni de datos reales de llegada al puerto. Se ha trabajado con los datos de atraque facilitados por la AP, que son ligeramente diferentes a los facilitados por la terminal.

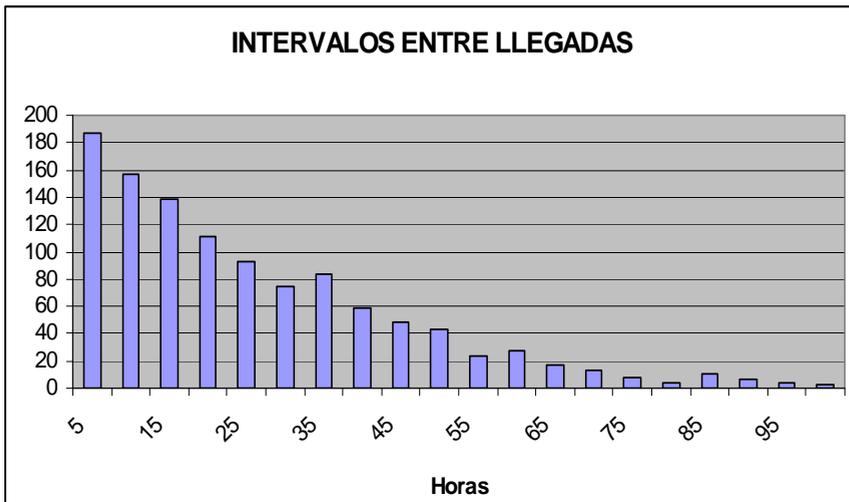
Mínimo	0,0
Máximo	86,8
Promedio	11,7
Desv. Típ.	9,9



TERMINAL H

- Barcos Observados: 1115
- Observaciones: Sí que se dispone de datos de fondeo. También de datos concretos de llegada a puerto, diferentes del atraque.

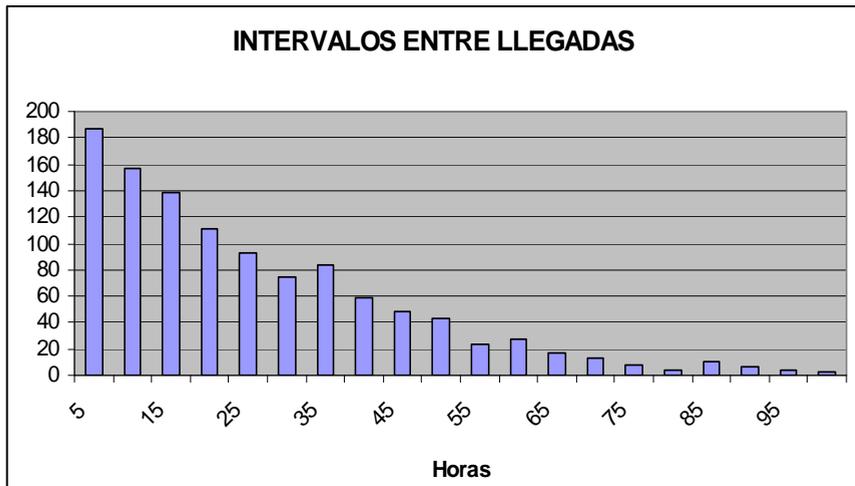
Mínimo	0,0
Máximo	153,7
Promedio	23,6
Desv. Típ.	20,2



TERMINAL I

- Barcos Observados: 1335
- Observaciones: Sí que se dispone de datos de fondeo. También de datos concretos de llegada a puerto, diferentes del atraque.

Mínimo	0,0
Máximo	117,9
Promedio	19,7
Desv. Típ.	18,3

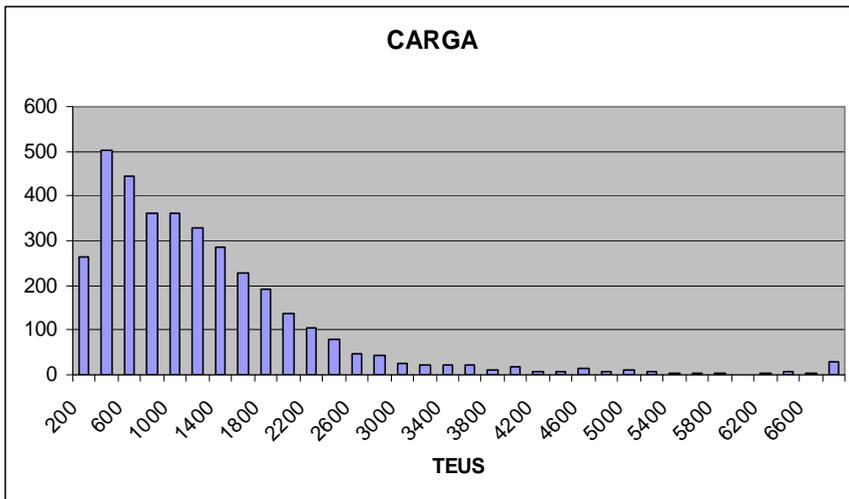


ANÁLISIS DE LAS DISTRIBUCIONES DE CARGA

TERMINAL A

- Barcos Observados: 3595
- Carga Total: 4,248 M TEUs.

Mínimo	0
Máximo	9715
Promedio	1182
Desv. Típ.	1109



TERMINAL B

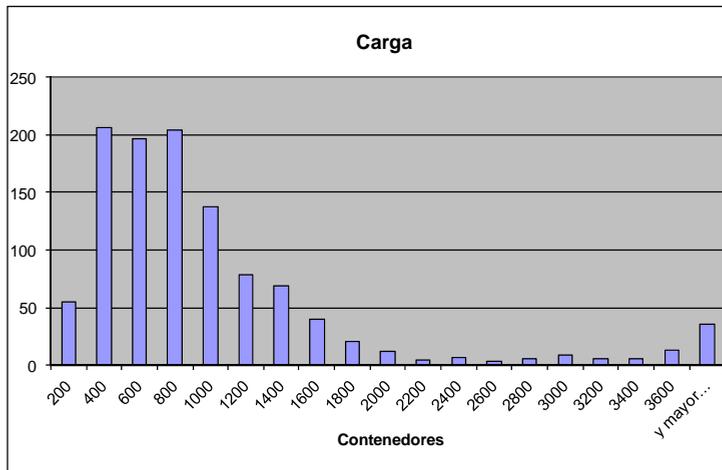
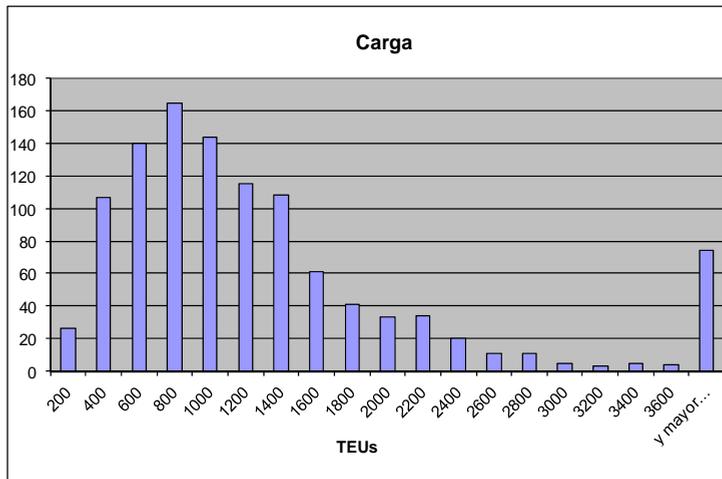
- Barcos Observados: 1107
- Carga Total: 1.491.994 TEUs / 1.039.524 contenedores.

Mínimo	0
Máximo	9507
Promedio	1348
Desv. Típ.	1358

TEUs

Mínimo	0
Máximo	6300
Promedio	939
Desv. Típ.	908

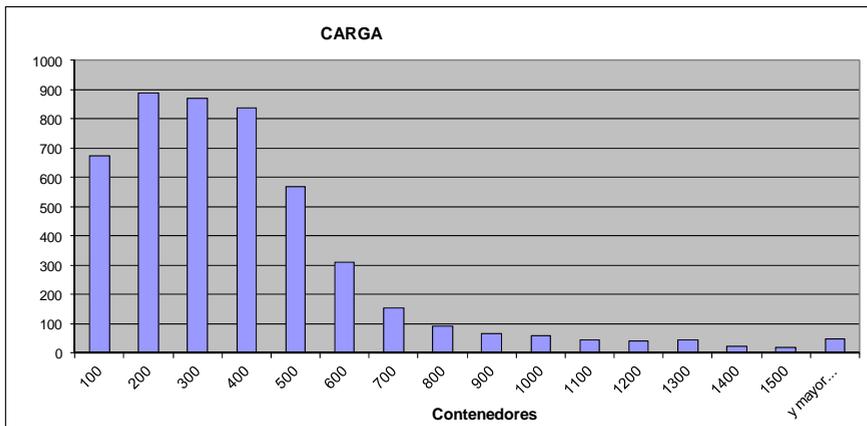
Contenedores



TERMINAL C

- Barcos Observados: 1561
- Carga Total: 853.978 contenedores.

Mínimo	0
Máximo	2487
Promedio	357
Desv. Típ.	302



TERMINAL D

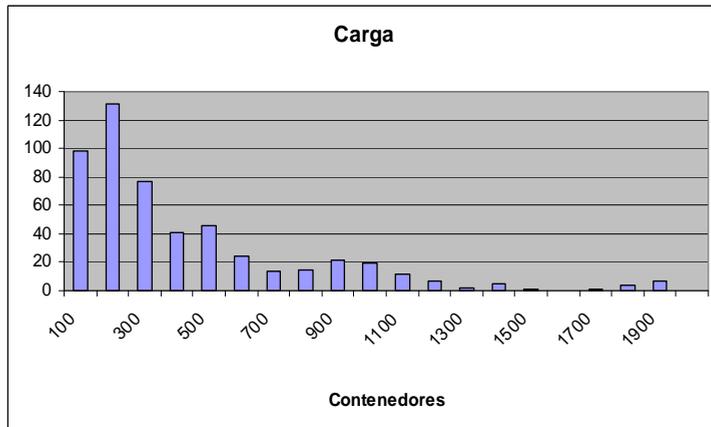
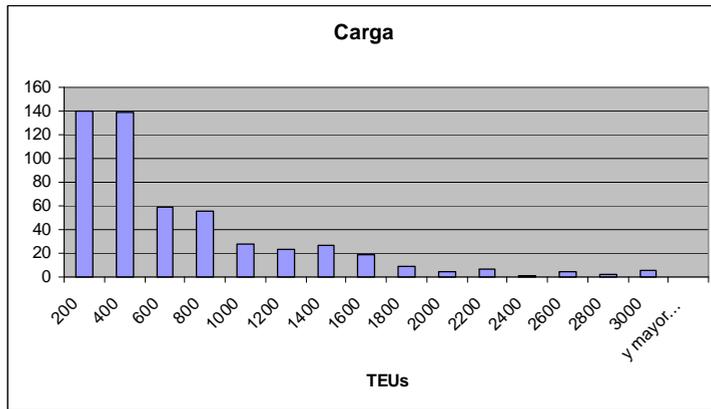
- Barcos Observados: 525
- Carga Total: 311.748 TEUs / 202.044 contenedores.

Mínimo	1
Máximo	2891
Promedio	594
Desv. Típ.	578

TEUs

Mínimo	1
Máximo	1873
Promedio	385
Desv. Típ.	377

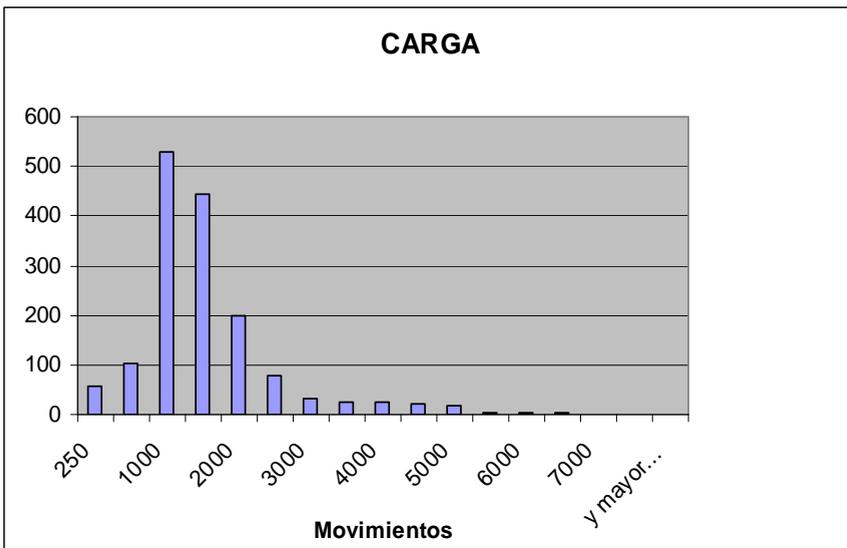
Contenedores



TERMINAL E

- Barcos Observados: 1561
- Carga Total: 2,021 M de movimientos.

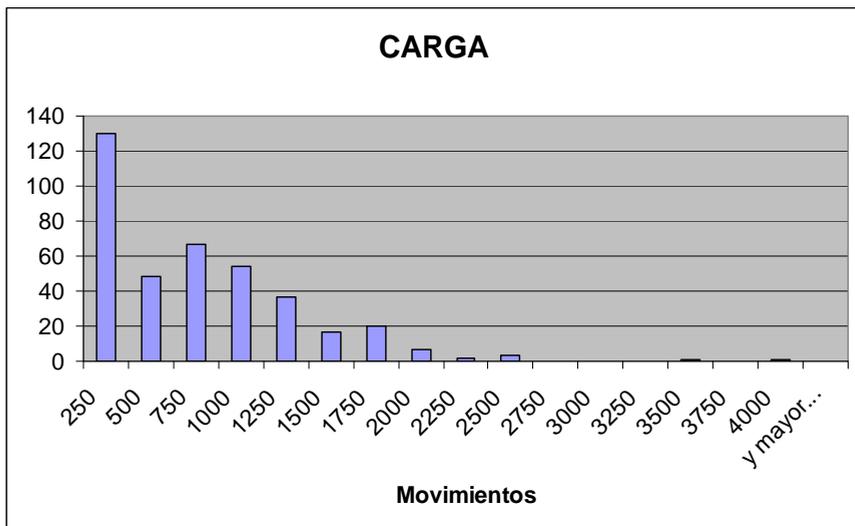
Mínimo	13
Máximo	7224
Promedio	1310
Desv. Típ.	955



TERMINAL F

- Barcos Observados: 387
- Carga Total: 0,251 M de movimientos.

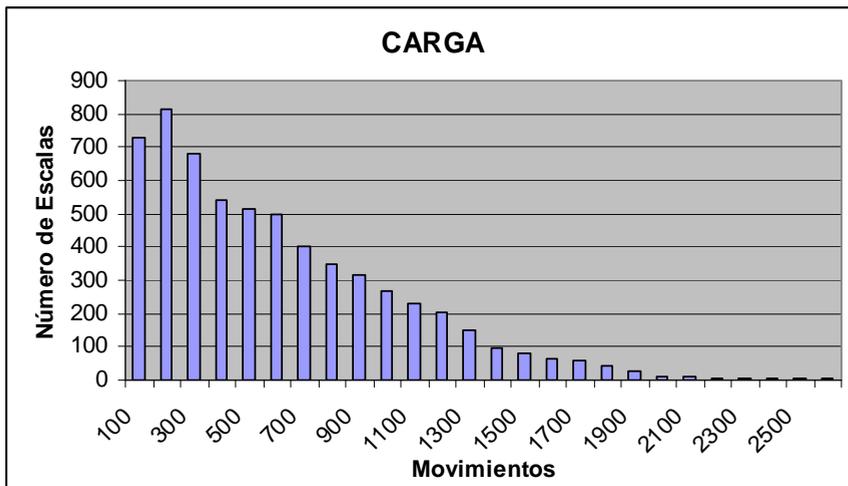
Mínimo	1
Máximo	3790
Promedio	650
Desv. Típ.	561



TERMINAL G

- Barcos Observados: 6102
- Carga Total: 3,390 M movimientos.

Mínimo	1
Máximo	3401
Promedio	556
Desv. Típ.	443



TERMINAL H

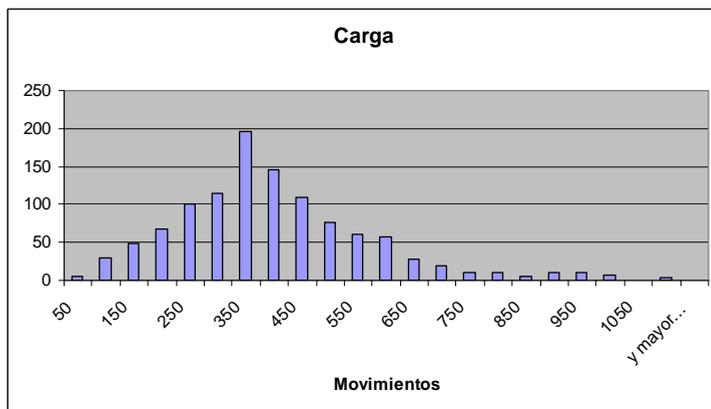
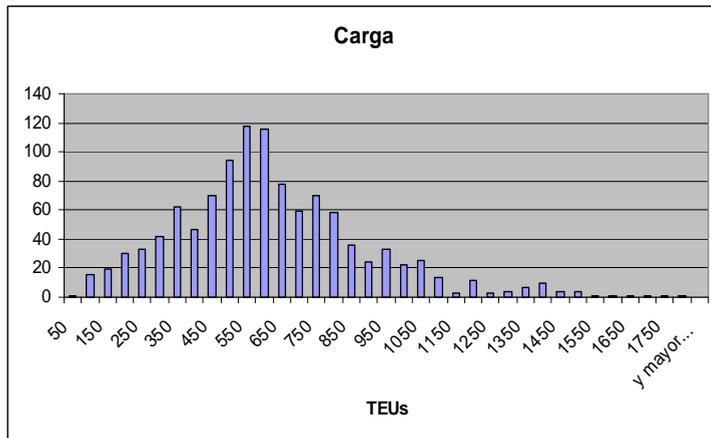
- Barcos Observados: 1120
- Carga Total: 666.557 TEUs / 422.259 movimientos.

Mínimo	36
Máximo	1762
Promedio	595
Desv. Típ.	277

TEUs

Mínimo	18
Máximo	1098
Promedio	377
Desv. Típ.	178

Contenedores



TERMINAL I

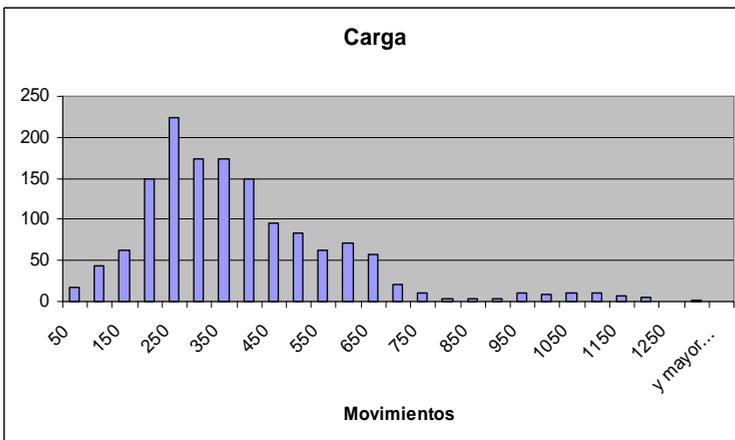
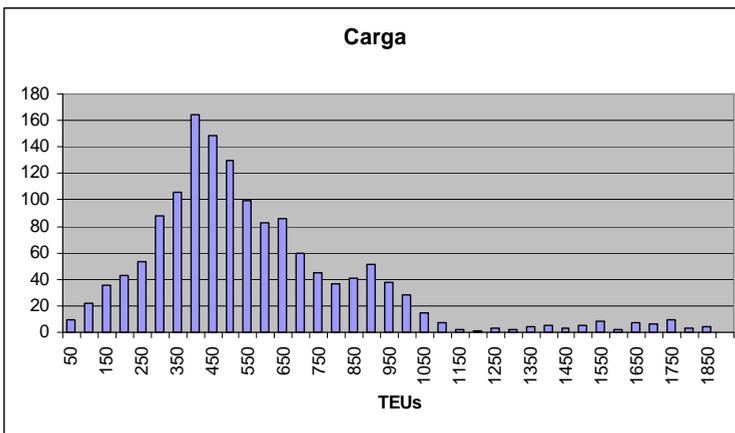
- Barcos Observados: 1454
- Carga Total: 520.435 TEUs / 789.372 contenedores.

Mínimo	0
Máximo	1843
Promedio	543
Desv. Típ.	308

TEUs

Mínimo	0
Máximo	1298
Promedio	358
Desv. Típ.	202

Contenedores

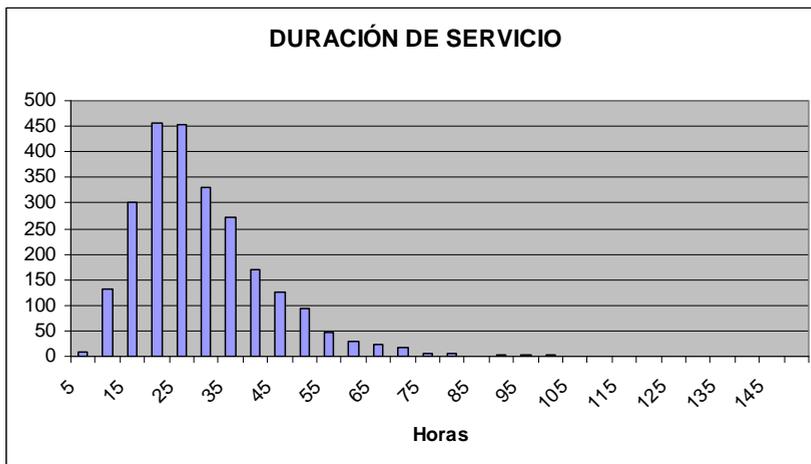


ANÁLISIS DE LAS DISTRIBUCIONES DE DURACIÓN DEL SERVICIO

TERMINAL A

- Barcos Observados: 2487

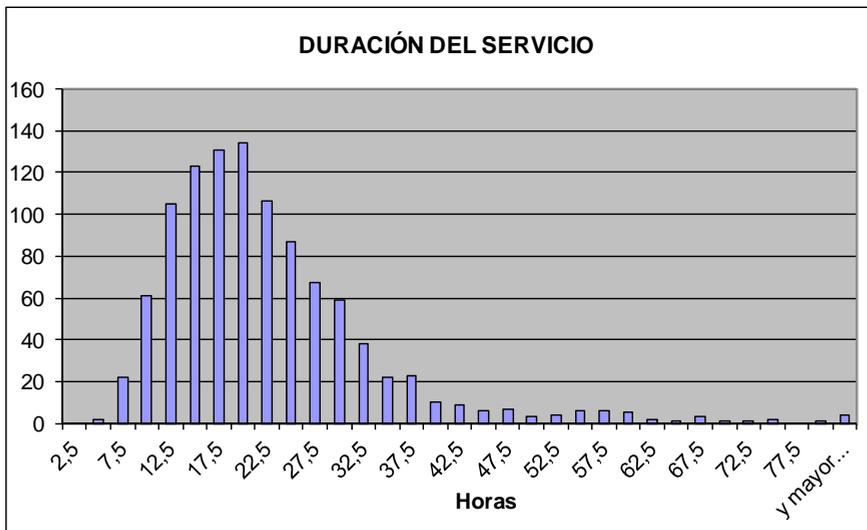
Mínimo	3,3
Máximo	143,8
Promedio	26,6
Desv. Típ.	13,9



TERMINAL B

- Barcos Observados: 1051

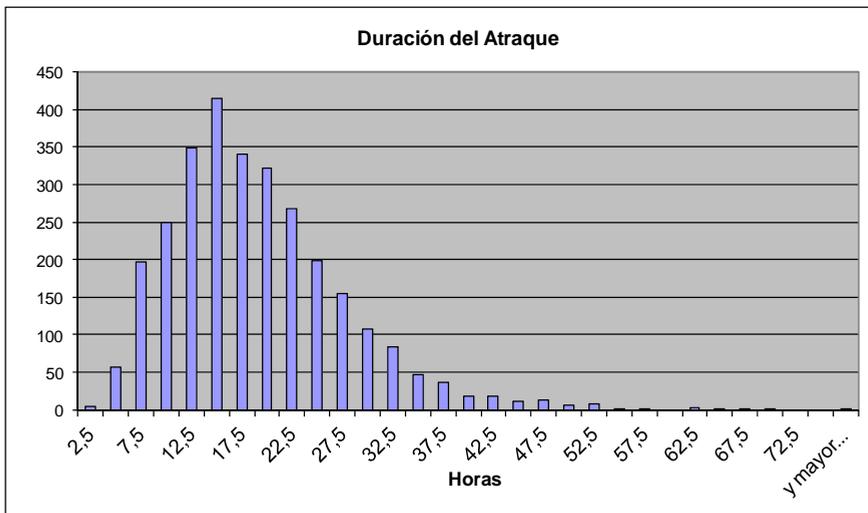
Mínimo	4,0
Máximo	181,2
Promedio	21,6
Desv. Típ.	12,5



TERMINAL C

- Barcos Observados: 2918

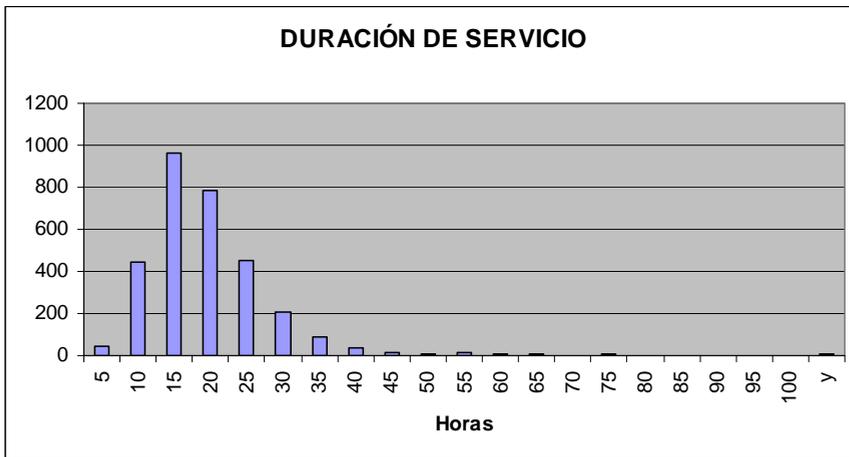
Mínimo	0,0
Máximo	130,3
Promedio	17,9
Desv. Típ.	9,2



TERMINAL D

- Barcos Observados: 3104

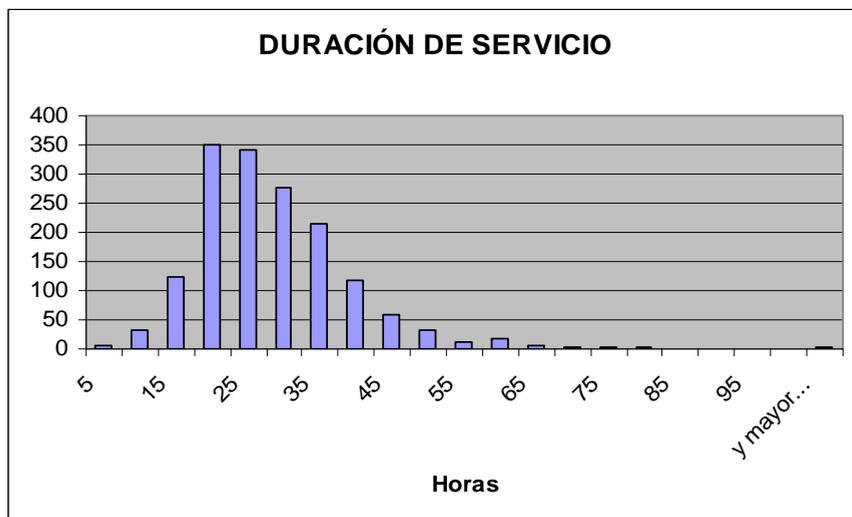
Mínimo	1,6
Máximo	1605,2
Promedio	18,2
Desv. Típ.	29,6



TERMINAL E

- Barcos Observados: 1594

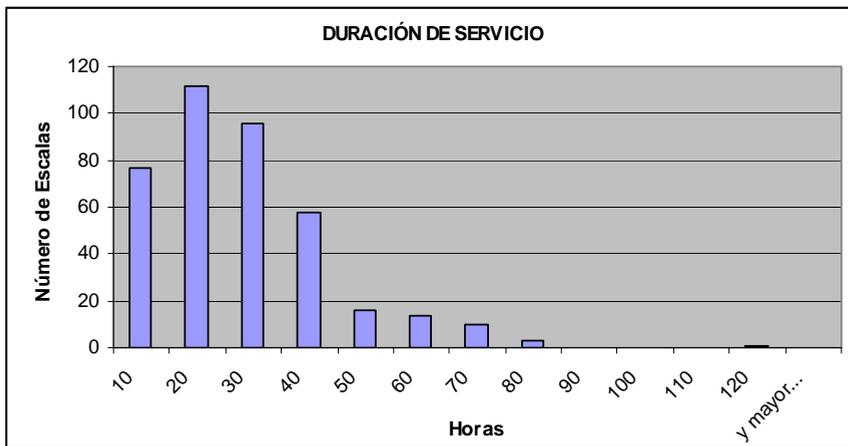
Mínimo	1,7
Máximo	771,2
Promedio	26,4
Desv. Típ.	21,6



TERMINAL F

- Barcos Observados: 387

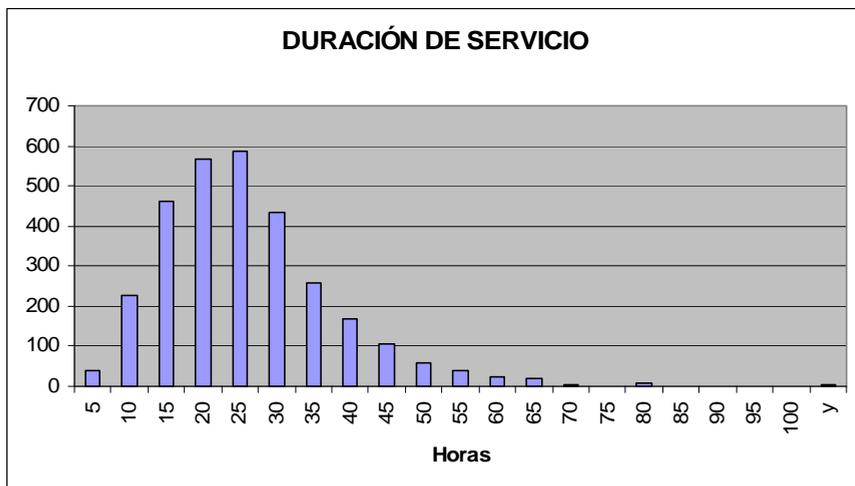
Mínimo	0,3
Máximo	113,6
Promedio	23,1
Desv. Típ.	15,2



TERMINAL G

- Barcos Observados: 3008

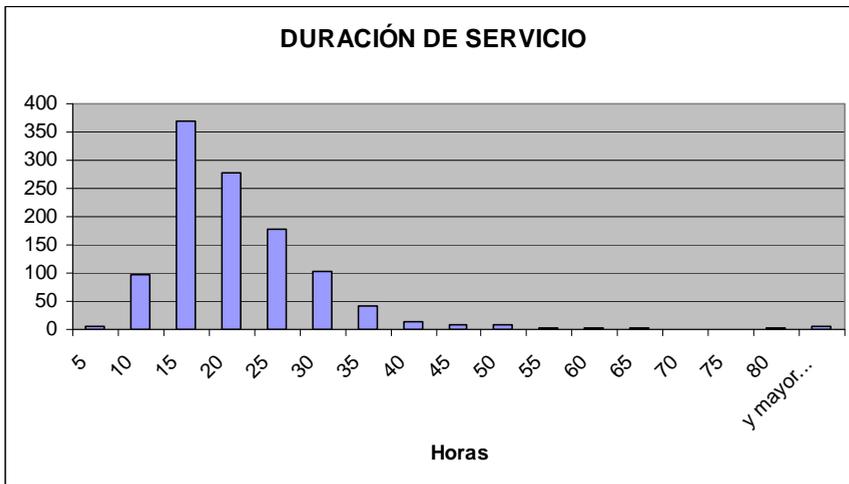
Mínimo	0,2
Máximo	124,8
Promedio	23,6
Desv. Típ.	12,1



TERMINAL H

- Barcos Observados: 1119

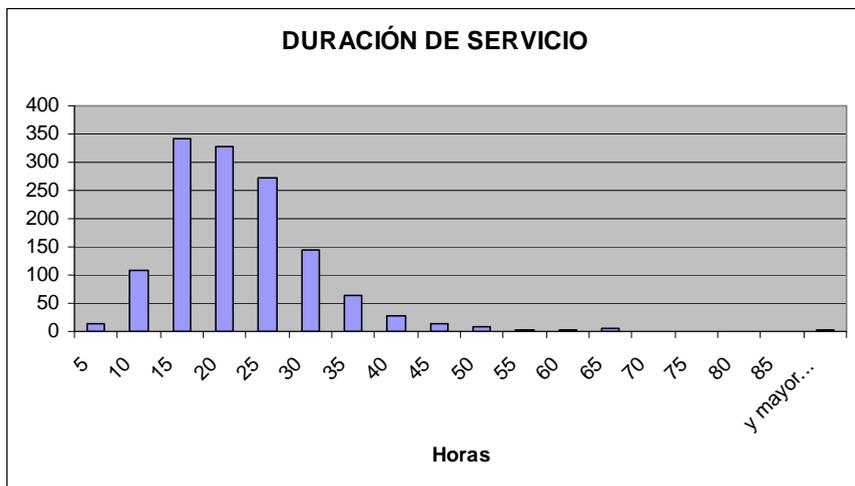
Mínimo	3,9
Máximo	141,4
Promedio	18,6
Desv. Típ.	10,4



TERMINAL I

- Barcos Observados: 1336

Mínimo	3,2
Máximo	131,1
Promedio	19,5
Desv. Típ.	9,7

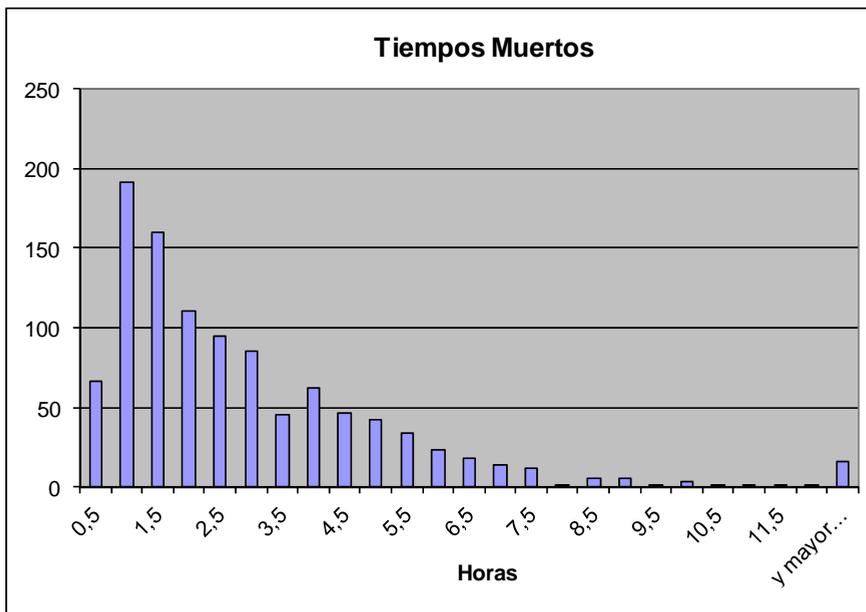


ANÁLISIS DE LAS DISTRIBUCIONES DE LOS TIEMPOS MUERTOS

TERMINAL B

- Barcos Observados: 1051

Mínimo	0,0
Máximo	169,3
Promedio	3,0
Desv. Típ.	6,0



TERMINAL C

- Barcos Observados: 2815

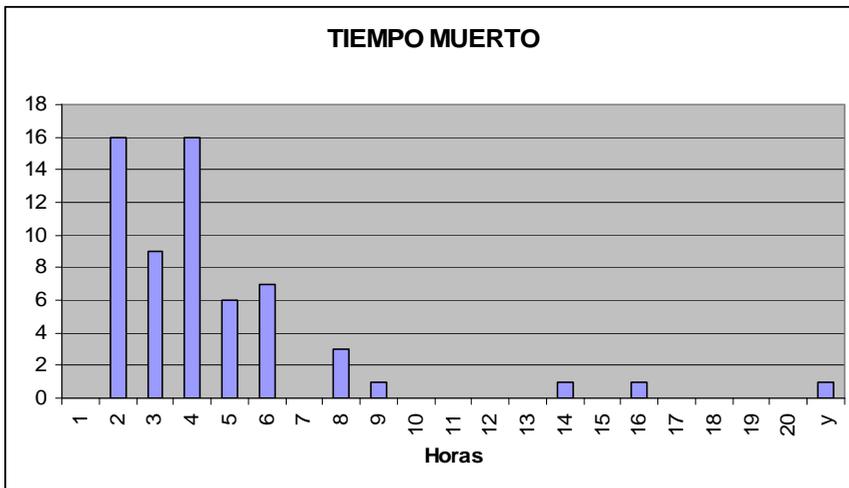
Mínimo	0,3
Máximo	39,8
Promedio	3,4
Desv. Típ.	3,9



TERMINAL G

- Barcos Observados: 61

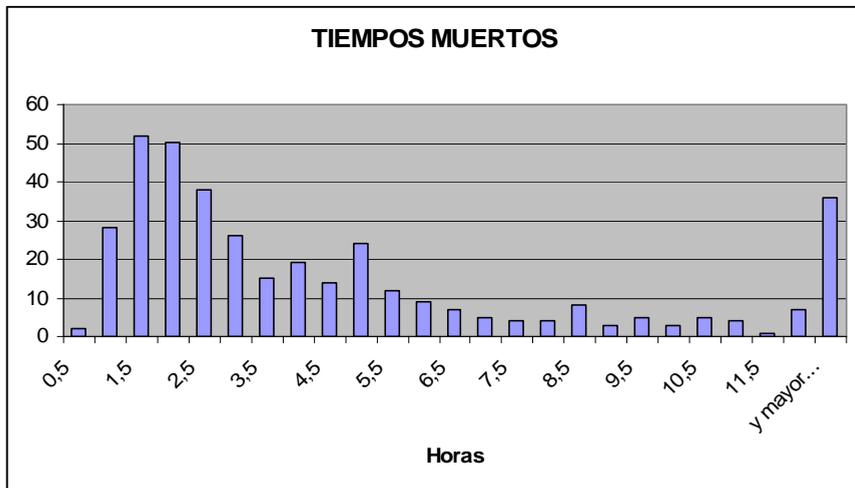
Mínimo	1,0
Máximo	36,0
Promedio	4,4
Desv. Típ.	4,9



TERMINAL H

- Barcos Observados: 381

Mínimo	0,2
Máximo	70,7
Promedio	5,0
Desv. Típ.	6,4

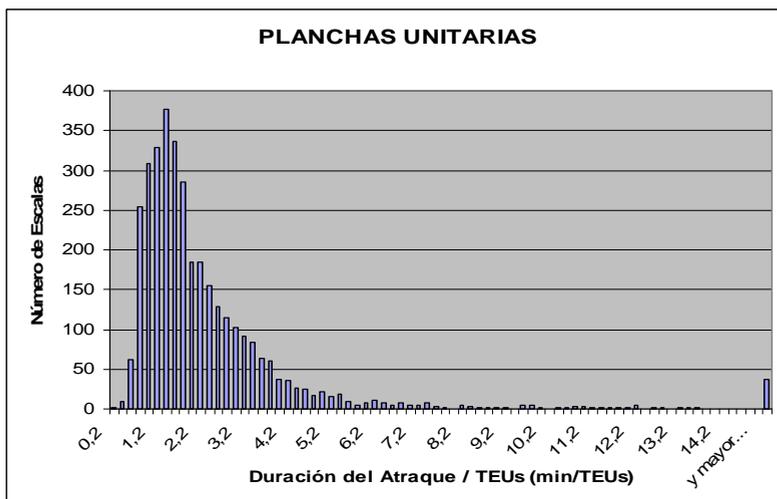


ANÁLISIS DE LAS DISTRIBUCIONES DE PLANCHAS EFECTIVAS UNITARIAS

TERMINAL A

- Barcos Observados: 3491
- Movimientos en el periodo observado: 4,149 M mov.
- Observaciones: Los datos disponibles en relación con la carga tienen solamente unidades de TEUs, de manera que no es posible comparar directamente los resultados con el resto de terminales de contenedores, a excepción de las B, D H e I, de las que se dispone de datos en TEUs y en movimientos. Se puede utilizar un factor de 1.5 TEUs/mov pues en todas las terminales estudiadas se ha comprobado que dicho ratio está siempre sobre éste valor.

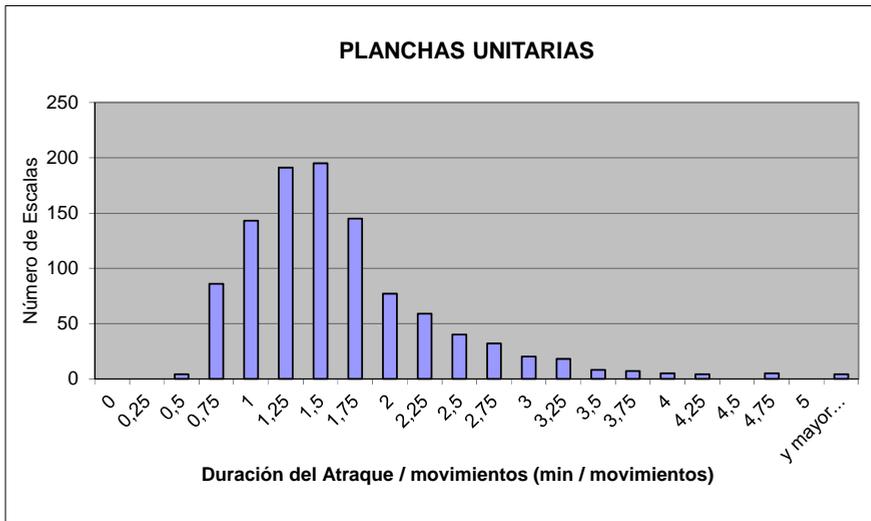
Mínimo	0,2
Máximo	107,4
Promedio	2,4
Desv. Típ.	4,1



TERMINAL B

- Barcos Observados: 1043
- Movimientos en el periodo observado: 975.333 mov.

Mínimo	0,4
Máximo	8,0
Promedio	1,5
Desv. Típ.	0,8



TERMINAL D

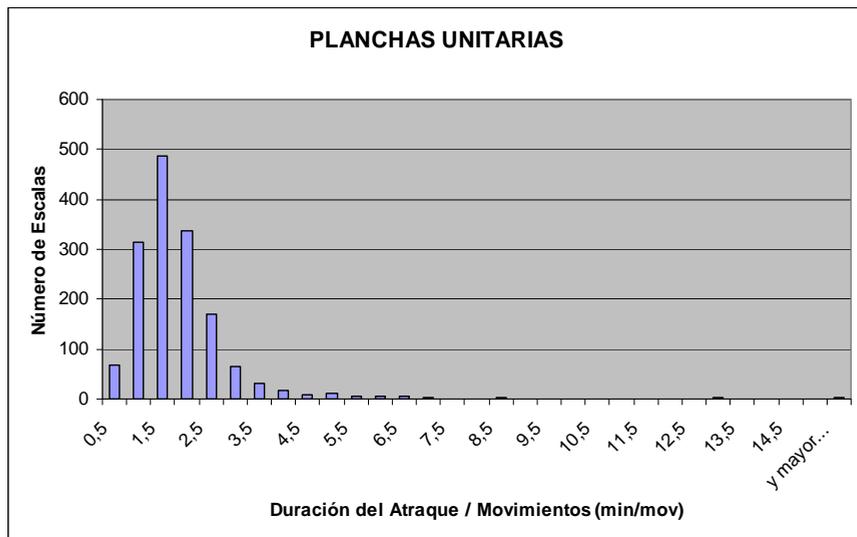
- Observaciones: No es posible calcular las planchas unitarias de cada uno de los buques pues el periodo de tiempo del que se disponen los datos de la duración del atraque de cada buque es diferente al periodo de tiempo del que se disponen los movimientos. Aun así, con el fin de tener un orden de magnitud de la plancha unitaria media en la terminal, se ha tomado:
 1. la duración de atraque media de los buques que hacen escala en la terminal: 18,18 horas.
 2. el número de movimientos medios de los buques que hacen escala en la terminal: 384,85.

$$PlanchaUnitariaMedia = \frac{18.18 * 60}{384.85} = 2.83 \text{ min/ mov}$$

TERMINAL E

- Barcos Observados: 1542
- Movimientos en el periodo observado: 2,021 M movimientos

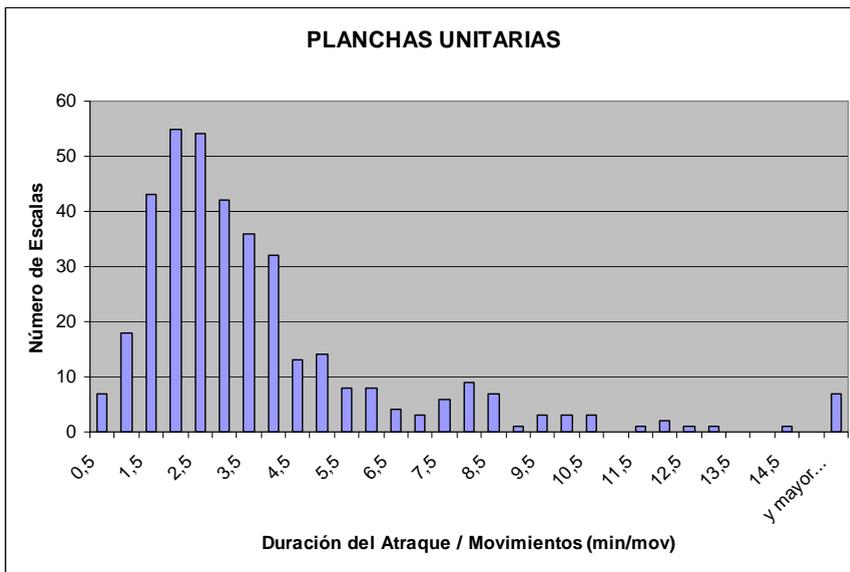
Mínimo	0,2
Máximo	19,5
Promedio	1,6
Desv. Típ.	1,3



TERMINAL F

- Barcos Observados: 461
- Movimientos en el periodo observado: 251,416 movimientos

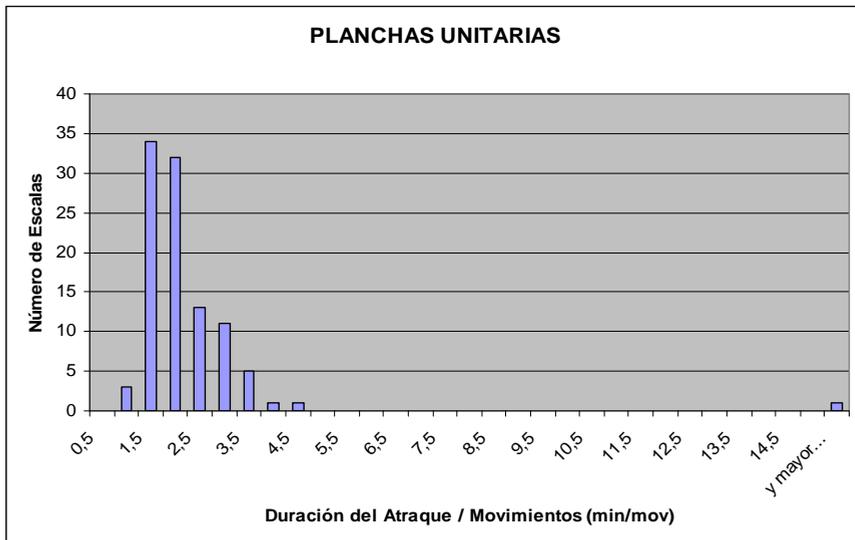
Mínimo	0,2
Máximo	28,9
Promedio	3,6
Desv. Típ.	3,3



TERMINAL G

- Barcos Observados: 100
- Movimientos en el periodo observado: 84,430 movimientos
- Observaciones: Dado que los datos facilitados por la terminal están en formato papel, ha sido necesario introducir manualmente los datos. Así, se han elegido aleatoriamente 100 escalas para hacer el presente análisis.

Mínimo	0,9
Máximo	18,3
Promedio	2,0
Desv. Típ.	1,8



TERMINAL H

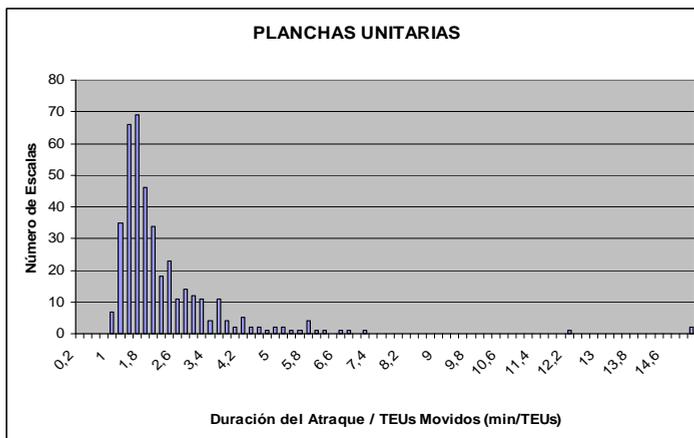
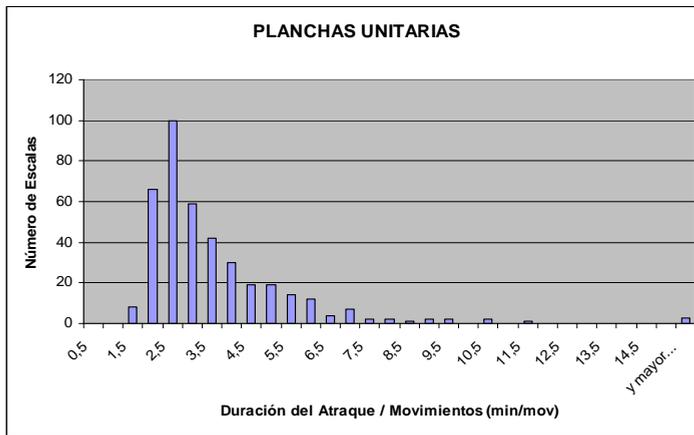
- Barcos Observados: 395
- Carga movida en el periodo observado: 242.562 TEUs / 154.975 mov.

Mínimo	0,8
Máximo	24,5
Promedio	2,2
Desv. Típ.	2,8

TEUs

Mínimo	1,2
Máximo	41,4
Promedio	3,4
Desv. Típ.	2,9

Movimientos



TERMINAL I

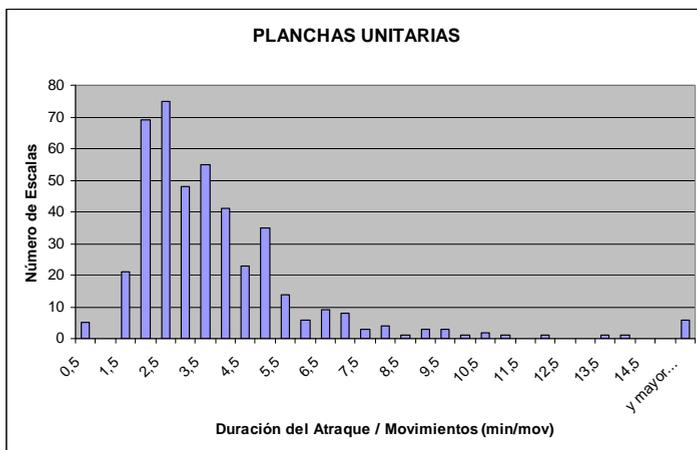
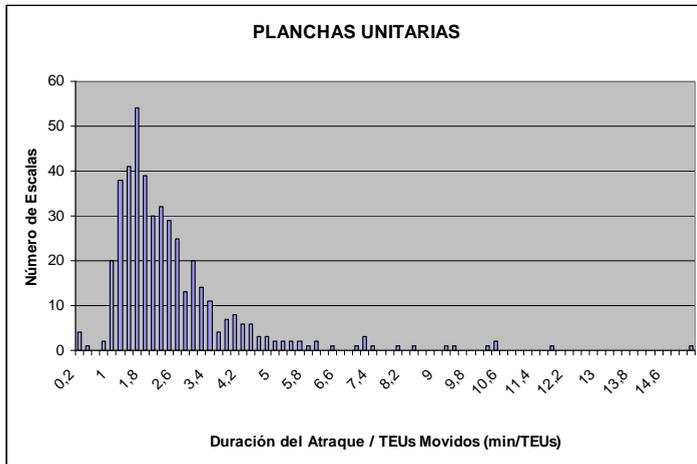
- Barcos Observados: 1335
- Carga movida en el periodo observado: 291.400 TEUs / 189.797 mov.

Mínimo	0,1
Máximo	18,8
Promedio	2,4
Desv. Típ.	1,7

TEUs

Mínimo	0,1
Máximo	37,5
Promedio	3,6
Desv. Típ.	2,9

Movimientos



Anejo 3

Definiciones e Hipótesis

DEFINICIONES E HIPÓTESIS

Tal y como se ha mencionado en el estado del arte de esta tesis, el muelle puede considerarse como un sistema de espera. En él hay diversos tiempos que marcan las diferentes operaciones vinculadas al buque que se van produciendo entre que éste llega al sistema hasta que sale del mismo:

- *Tiempo de llegada a puerto*: momento en el que el buque llega al puerto. Coincide con el ETA (expected time of arrival) del buque al puerto.
- *Tiempo de entrada a fondeadero*: en el caso de que el buque no pueda acceder al muelle, se dirige al fondeadero. Puede haber varias razones por las cuales el buque no pueda acceder al muelle, como por ejemplo mareas, huelgas, o imposibilidad de navegación en el canal de acceso, pero en el desarrollo de esta tesis, se asume que la única razón posible es la congestión del muelle. Así, el buque va a fondeadero porque el atraque está ocupado. Solamente podrá acceder al muelle cuando se libere el espacio suficiente para que el buque quepa.
- *Tiempo de salida de fondeadero*: momento en el que el buque abandona el fondeadero para dirigirse hacia el muelle.
- *Tiempo de amarre del primer cabo*: momento en el que el buque ha realizado las maniobras de aproximación al atraque y se amarra el primer cabo. Entre el tiempo de salida de fondeadero y el tiempo de amarre del primer cabo, el buque está accediendo por el canal de acceso hasta las aguas abrigadas del muelle y se producen las maniobras de aproximación al atraque.
- *Tiempo de amarre del último cabo*: momento a partir del cual el buque está en condiciones de que se inicien las operaciones de carga y descarga.
- *Tiempo de desamarre del primer cabo*: momento a partir del cual el buque deja de estar en condiciones de ser tratado.

- *Tiempo de desamarre del último cabo*: momento a partir del cual el buque inicia las maniobras de desatraque y puede iniciar la navegación hacia la salida del puerto por el canal de acceso¹.
- *Tiempo de salida de puerto*: momento en el que el buque abandona el puerto.

Es importante destacar que, con el objetivo de diferenciar aquellas variables que hacen referencia a un instante concreto de aquellas que hacen referencia a un periodo de tiempo, en esta tesis se ha utilizado intencionadamente el término “tiempo” de manera diferente al término “duración”. El primero hace referencia a aquellas variables que implican instantes concretos de tiempo, es decir momentos puntuales, mientras que el segundo a periodos de tiempo.

Así, a partir de los tiempos definidos en las operaciones asociadas a un buque se pueden definir las siguientes duraciones:

- *Estancia del buque en puerto*: es el periodo de tiempo entre el *tiempo de llegada a puerto* y el *tiempo de salida de puerto*.
- *Duración de la espera (o espera)*: es el periodo de tiempo entre el *tiempo de entrada a fondeadero* y el *tiempo de salida de fondeadero*.
- *Duración del atraque bruta*: es el periodo de tiempo entre el *tiempo de amarre del primer cabo* y el *tiempo de desamarre del último cabo*.
- *Duración del atraque neta*: es el periodo de tiempo entre el *tiempo de amarre del último cabo* y el *tiempo de desamarre del primer cabo*. En este periodo de tiempo el buque está en condiciones de ser atendido por la estiba. Puede darse el caso, y de hecho así suele ocurrir, de que el buque esté en condiciones de ser atendido, pero por la propia organización de los horarios de los estibadores no se inicien las operaciones. Este hecho hará que la duración del atraque neta se dilate en el tiempo.

¹ Un buque está siendo tratado, atendido o manipulado cuando se están cargando o descargando contenedores.

Estos tiempos y duraciones vinculados a las operaciones que sufre el buque pueden relacionarse con los tiempos asociados a las operaciones que se van produciendo en la estiba, o lo que es lo mismo, al tratamiento de los buques.

- *Tiempo de inicio del turno*: momento en el que el personal de estiba inicia su turno. En España los turnos se organizan en periodos de 6 horas, iniciándose a las 2:00, a las 8:00, a las 14:00 o a las 20:00. En ocasiones la jornada de 6h se puede ampliar a razón de 1 o 2 h para terminar de tratar un buque.
- *Tiempo de posicionamiento en los puestos de trabajo*: momento en el que el personal de estiba se posiciona en sus puestos para iniciar el trabajo. En los puertos españoles el inicio y fin de los turnos no coincide con el momento en el que los estibadores están en sus puestos de trabajo, sino con el momento en el que éstos acceden o abandonan las instalaciones de las terminales, por ello se puede considerar que entre que acceden y se posicionan en sus puestos, o entre que abandonan sus puestos y abandonan las instalaciones de la terminal, pasan entre 20 y 30 minutos.
- *Tiempo de inicio del primer movimiento*: momento en el que el personal de estiba inicia el primer movimiento de la grúa, ya sea para descargar/cargar un contenedor o abrir una bodega, para lo cual manipulará una tapa de escotilla. No todas las terminales registran este valor².
- *Tiempo de inicio de paralización de estiba*: entre el inicio del primer movimiento y la finalización del último movimiento pueden producirse interrupciones del tratamiento del buque motivadas por diversas razones (inutilidad de la grúa, huelgas, u otras actividades indirectas, etc.).
- *Tiempo de finalización de paralización de estiba*: el periodo de interrupción del tratamiento del buque finaliza y se retoma la carga/descarga del buque.

² O al menos no lo han facilitado a la autora de esta tesis.

- *Tiempo de finalización del último movimiento*: momento en el que personal finaliza el último movimiento de la grúa en el turno (puede ocurrir que no sea el último movimiento del buque).
- *Tiempo de abandono de los puestos de trabajo*: momento en el que el personal de estiba abandona en sus puestos para prepararse para dejar las instalaciones de la terminal.
- *Tiempo de finalización del turno*: momento en el que el personal de estiba finaliza su turno.

A partir de los tiempos definidos en las operaciones que se van produciendo en la estiba se pueden definir las siguientes duraciones:

- *Duración bruta de la mano*³: es el periodo de tiempo entre el tiempo de inicio del turno y el tiempo de finalización del turno.
- *Duración neta de la mano*: es el periodo de tiempo entre el tiempo de posicionamiento en los puestos de trabajo y el Tiempo de abandono de los puestos de trabajo.
- *Duración neta-neta de la mano*: es el periodo de tiempo entre el tiempo de inicio del primer movimiento y el tiempo de finalización del último movimiento al que se le sustraen todos los periodos de interrupción de tratamiento del buque, esto es los periodos entre el tiempo de finalización de paralización de estiba y el tiempo de inicio de paralización de estiba.

³ Se entiende por “mano” el conjunto de trabajadores de la estiba asociados a la operación de una grúa.

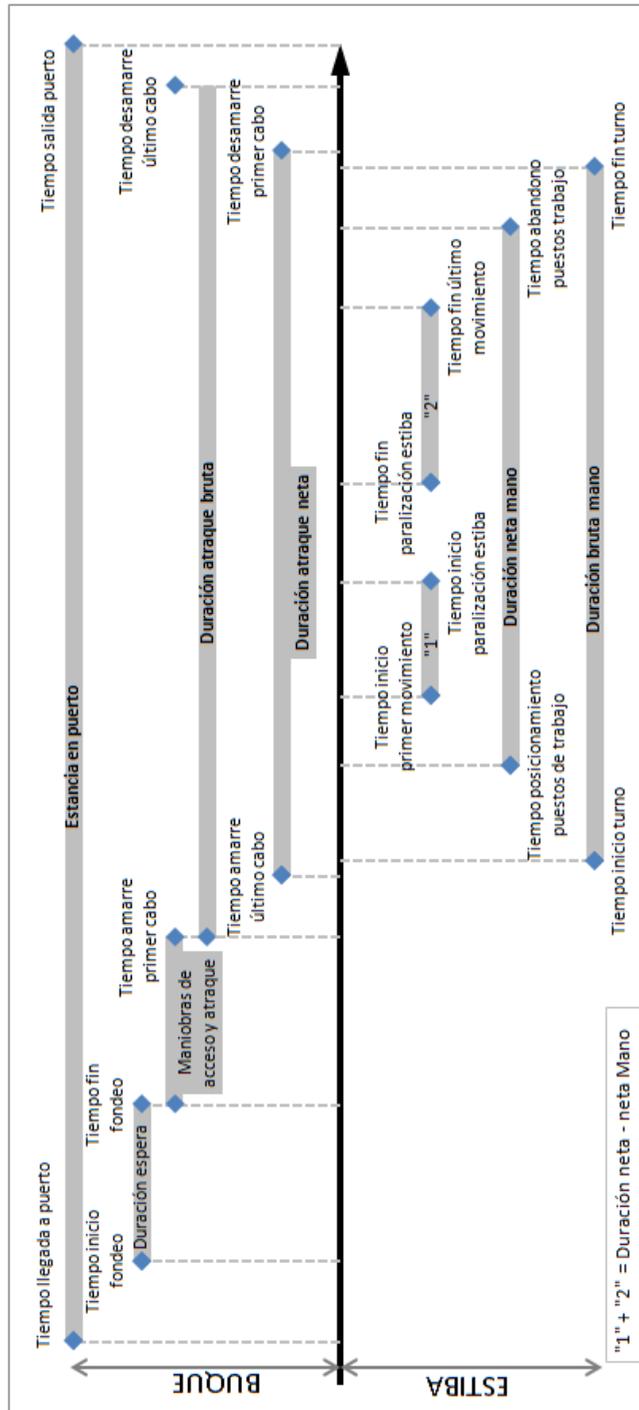


Figura 3-1. Definiciones de tiempos y duraciones del buque y la estiba.

En relación con todas estas definiciones en esta tesis se han asumido las siguientes hipótesis:

- En el día a día de las terminales puede haber varias razones por las cuales el buque no pueda acceder al muelle, como por ejemplo mareas, huelgas, o imposibilidad de navegación en el canal de acceso, pero en el desarrollo de esta tesis y ligado a los objetivos de la misma, se asume que la única razón posible por la cual un buque no puede acceder al muelle es la congestión de éste.

Así, el buque va a fondeadero porque el atraque está ocupado. Solamente podrá acceder al muelle cuando se libere el espacio suficiente para que el buque quepa. De no ser así, se estarían produciendo interferencias y no se conseguiría el objetivo propuesto, además de que tampoco se estaría cumpliendo con uno de las motivaciones de la tesis, que las conclusiones del trabajo sean lo más globales posibles para que puedan ser de aplicación a todas las terminales posibles en una fase de planificación, más bien que de explotación.

- En el caso de los buques que no esperan al llegar a puerto, éstos se dirigen al muelle, haciendo inicialmente la maniobra de acceso a la zona abrigada y posteriormente la maniobra de atraque. En esta tesis, para no tener que considerar estas maniobras, se ha asumido que dichas maniobras están incluidas en la *duración del servicio*, de manera que ésta podrá ser mayor que la propia duración de atraque neta. Lógicamente, dado que esas maniobras dependen del diseño en planta de los puertos y terminales, y de las condiciones de operación, en función del puerto y terminal que se esté considerando en cada momento, será necesario afectar a la *duración del servicio* en mayor o menor medida.

Así, como la **duración del servicio** de un buque se define como el periodo de tiempo durante el cual el puesto de atraque (o los metros de atraque si se explota de manera continua) está a disposición del mismo, se considerará que está a disposición de un buque desde que el buque que ocupaba ese espacio anteriormente inició las

operaciones de desatraque (larga el primer cabo) hasta que el propio buque inicia esa misma operación.

- De forma equivalente, cuando los buques han de esperar en fondeadero al llegar a puerto, se producen las maniobras de acceso al mismo. Para no tener que considerar los periodos de tiempo de esas maniobras, se asume que están incluidas en la *duración de la espera* del buque en cuestión.
- Se ha asumido que el calado del puerto es suficientemente profundo como para que no limite el acceso de los buques a ninguna de las zonas del muelle.
- Se asume que existe únicamente una alineación. Como dice la ROM, varias alineaciones implican para la misma longitud total una capacidad menor. Es una de las futuras líneas de investigación.
- Se asume que los subsistemas son independientes y por tanto la saturación en la interconexión, el patio o las puertas, no afecta al comportamiento del muelle.
- La gestión de la cola de buques es tipo FIFO.

Tal y como se han definido los anteriores conceptos, resulta fácil asociar aquellas definiciones relativas al buque con el recurso muelle (cuando este se explota de manera discreta) y aquellas relativas al personal de estiba con el recurso grúa. De esta manera y teniendo en mente que se definió la categoría de medición *productividad* como una *producción* por unidad de recurso, esto es un volumen de mercancías por unidad de tiempo y de recurso, se pueden definir las siguientes productividades que se presentan en la Tabla 3-1.

Cuando el muelle se explota de manera continua, no es tan evidente la asociación entre el recurso muelle y el recurso buque, dado que un buque no está vinculado con un puesto de atraque.

		PRODUCTIVIDAD	VOLUMEN	UNIDAD DE TIEMPO
UNIDAD DE RECURSO	BUQUE - ATRAQUE	Productividad del buque en puerto	Movimientos / contenedores / TEUs durante la escala	Horas
		Productividad del buque en el atraque bruta	Movimientos / contenedores / TEUs manipulados durante la duración del atraque bruta	Horas
		Productividad del buque en el atraque neta	Movimientos / contenedores / TEUs manipulados durante la duración del atraque neta	Horas
	GRÚA	Productividad de la grúa bruta	Movimientos / contenedores / TEUs manipulados por la mano durante la duración del bruta de la mano	Horas
		Productividad de la grúa neta	Movimientos / contenedores / TEUs manipulados por la mano durante la duración del neta de la mano	Horas
		Productividad de la grúa neta-neta	Movimientos / contenedores / TEUs manipulados por la mano durante la duración del neta-neta de la mano	Horas

Tabla 3-1: Definición de productividades asociadas al recurso atraque/buque y grúa/mano.