

# Análisis de las diversas metodologías para el estudio del sistema de atraque en terminales portuarias

Alberto Camarero Orive<sup>1</sup>, Íñigo López Ansorena<sup>1</sup>, M<sup>a</sup> Nicoletta González Cancelas<sup>1</sup>  
Pascual Pery Paredes<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Civil: Transportes. Universidad Politécnica de Madrid.

Escuela Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos

C/ Profesor Aranguren, s/n - 28040 Madrid, España. E-mail: [alberto.camarero@upm.es](mailto:alberto.camarero@upm.es)

[i.lopeza@alumnos.upm.es](mailto:i.lopeza@alumnos.upm.es), [nicol@caminos.upm.es](mailto:nicol@caminos.upm.es), [pper@caminos.upm.es](mailto:pper@caminos.upm.es)

**Abstract.** This paper is concerned with the study of the berth system in port terminals. The main objective is to present the management methodologies, which include empirical methods, analytical methods and simulation methods

The comparison shows that these three methods are not independent, but they are complementary. Each method has advantages and limitations and these depend on the type of study performed.

*Keywords:* port terminals, berth management, port planning

## 1. Introducción.

Los cambios tecnológicos y logísticos de nuestros días han forzado a los puertos a ofrecer un servicio más rápido, eficaz y económico a sus clientes. La continua competencia entre las terminales hace que la correcta gestión de línea atraque sea un objetivo para cualquier operador, ya que este sistema suele ser el cuello de botella preferente en la explotación de la terminal.

A la hora de abordar una descripción precisa del estado actual de los conocimientos en la materia, es conveniente destacar que la optimización de los puestos de atraque es el objetivo básico en la explotación del sistema de atraque.

La determinación de un número óptimo de atraques en una terminal ha sido tratada en diversos estudios desde el punto de vista teórico y práctico. Entre los estudios que han inspirado la presente ponencia se encuentran los realizados por Tu-Cheng Kuo<sup>[1]</sup>, Wen-Chih Huang<sup>[2]</sup>, Noritake M<sup>[3]/[4]</sup>, y Camarero A.<sup>[5]</sup>.

Todos ellos tratan la identificación o evaluación de las variables portuarias que intervienen en la operativa del sistema de atraque, desde alguna de las tres metodologías que se tratan en este artículo.

La motivación de la comunicación responde a una doble necesidad: por un lado la relativa al ejercicio de planificación de la oferta portuaria, a medio y largo plazo y por otro, al imprescindible proceso de optimización de la explotación de infraestructuras y superestructuras portuarias en un escenario de desarrollo sostenible.

## 2. Desarrollo del problema.

Para tratar el problema de la congestión del atraque, que engloba tanto la provisión de puestos de atraque suficientes como la gestión de las esperas de los buques y en suma el rendimiento de la línea de atraque, se utilizan las tres metodologías que se presentan a continuación:

### 2.1. Método empírico.

La capacidad y las dimensiones de una terminal dependen básicamente del tráfico que se mueve por sus muelles. En los métodos empíricos, la capacidad se obtiene aplicando a la terminal índices de rendimiento establecidos en otras terminales, que se consideran explotadas de forma satisfactoria. Los métodos empíricos generalmente se emplean:

- En un primer nivel de anteproyecto o prediseño en las primeras fases del desarrollo de una terminal, en donde muchas veces no hay datos disponibles para la aplicación de otros métodos.
- En un segundo nivel, en terminales que se encuentren operativas, estos métodos son utilizados como herramienta de control y seguimiento en la explotación del muelle.

Para su aplicación en cualquiera de los dos casos (nivel de prediseño o nivel de control) se requiere una amplia base de datos, que relacione un conjunto variables correspondientes a diversas terminales. Estas variables suelen estar relacionadas con el tráfico o la productividad, pero también pueden estar relacionadas con la calidad de los servicios, las dimensiones de los muelles, etc. Cabe distinguir en este sentido entre las variables de:

- Tráfico: expresa volúmenes de mercancías manipuladas por unidad de tiempo, sin explicitar los recursos empleados.
- Productividad: expresa volúmenes de mercancías manipuladas (o de producción), por unidad de recurso y por unidad de tiempo.

Como ejemplo, la figura 1 ha sido construida con los ratios de productividad de 67 terminales de contenedores europeas. Las ilustraciones relacionan las tres principales variables con incidencia en el rendimiento de la línea de atraque y son una “guía” para el prediseño o planificación del sistema de atraque de una nueva terminal. También pueden ser utilizados para controlar la actividad anual de una terminal frente a sus competidoras.

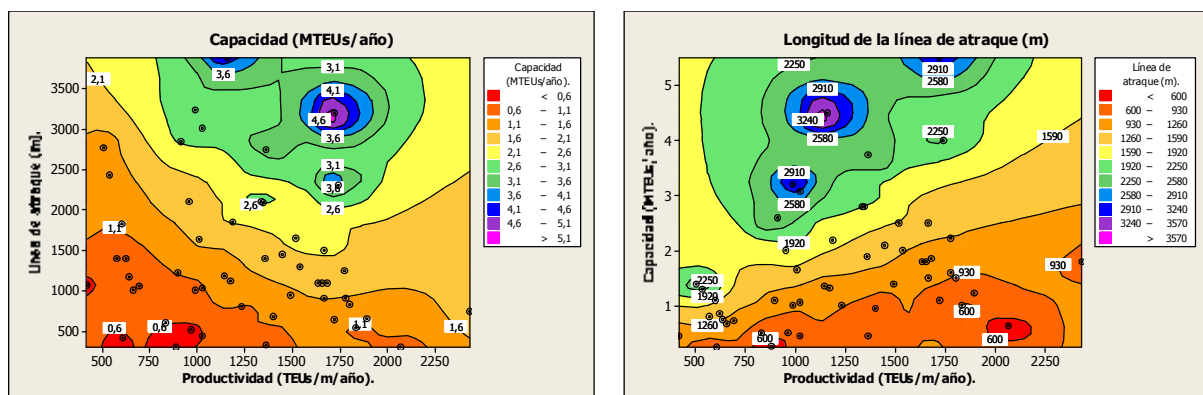


Fig. 1 Gráficas de contorno con variables de productividad. Fuente: Elaboración propia

Si bien estos métodos son de baja complejidad y ofrecen una limitada información, ya que no tienen en cuenta un gran número de variables. Conviene resaltar su interés para realizar cálculos rápidos en la medición de productividad (TEUs/ml atraque/año) en las etapas de predimensionamiento y de control y seguimiento.

## 2.2. Método analítico.

El sistema de atraque es un sistema de espera múltiple, con un centro de servicio (muelle) dotado de varias estaciones de servicio (atraques), con una función de entrada (llegadas de buques) y otra de servicio (permanencia en el atraque) y un centro de espera (zona de fondeo) común a los atraques que integran la terminal.

Los métodos analíticos utilizan conceptos y formulaciones matemáticas para describir los procesos de llegada-servicio a los “n” puestos de atraque que conforman el sistema. Estos métodos se apoyan en la Teoría de Colas, que resuelve el problema y permite estimar la capacidad de una terminal en función del tiempo de espera.

Los modelos de colas que resuelven son casos no excesivamente complejos con solución matemática exacta. Como ejemplo se muestran dos gráficas de control de la congestión en línea de atraque en dos modelos M/E2/n y E2/E2/n (\*)<sup>1</sup>.

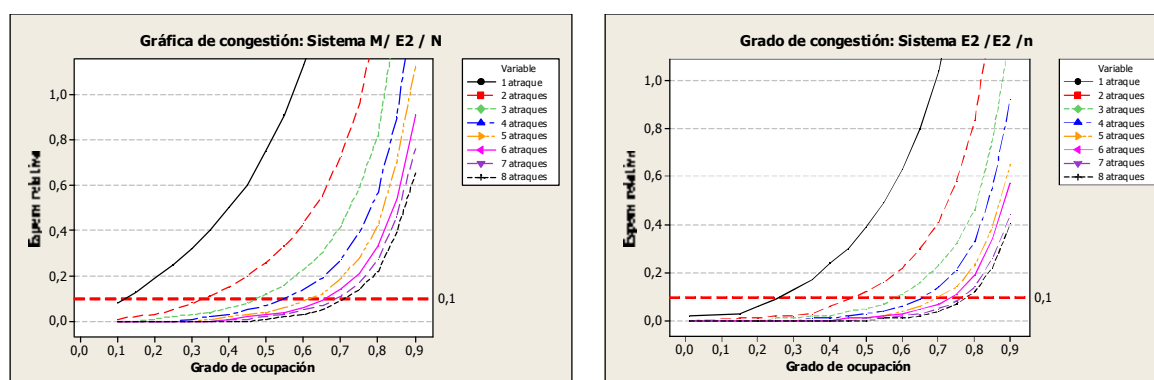


Fig. 2 Gráficas de congestión en sistemas M/E2/n y E2/E2/n Fuente: Elaboración propia

Los resultados que proporcionan permiten la definición de los puestos de atraque ofrecidos y las esperas en la línea de atraque, que están relacionadas con el grado de utilización y la eficiencia del sistema y en los que:

- La utilización define la relación entre el uso de un determinado recurso y su máxima utilización posible en un periodo de tiempo.
- La eficiencia define la relación entre el tiempo medio que un cliente se encuentra en el sistema y el tiempo medio que el sistema tarda en procesar su servicio, lógicamente cuanto mayor es el cociente menor es la eficiencia del sistema.

<sup>1</sup> Según la notación de Kendall en Teoría de Colas, los símbolos “M/E2/n y E2/E2/n” indican: “distribución de llegadas” / “distribución de servicios” / “nº de atraques”

Sin embargo la información que proporcionan los métodos analíticos es limitada, ya que tienen una capacidad reducida para resolver o afrontar ciertos problemas, como son aquellos en los que se presentan patrones no normalizados de entrada y de servicio, o aquellos en los que existe una gran complejidad del sistema a modelar o con una compleja disciplina de cola.

### 2.3. *Método de simulación.*

Las simulaciones son empleadas para realizar el estudio de una parte coherente del mundo real, denominada “sistema”, por medio de la experimentación con modelos que representan ese sistema.

La simulación es la herramienta más efectiva en el proceso de optimización de la línea de atraque, se basa en la “modelización” de la realidad para poder analizarla. Esta representación o modelo, se puede utilizar para examinar la situación actual y también para intuir lo que sucederá en el futuro.

Con las simulaciones de terminales portuarias, se puede obtener un mayor conocimiento e interpretación de los fenómenos que se manifiestan en el sistema de atraque, mejorando el control del mismo y obteniendo sensibles beneficios en su operación.

La complejidad del sistema está relacionada con el grado de paralelismo de los eventos que en él se manifiestan. En una terminal portuaria, por ejemplo, existe gran dificultad para controlar la conducta de varios componentes del sistema (buques, grúas, etc.), que se encuentren llevando a cabo operaciones en forma simultánea.

Con la evolución de los ordenadores los procesadores de hoy en día, permiten realizar un elevado número de operaciones en fracciones de segundo, y también (con una adecuada programación) elevar el número de interacciones, facilitando la generación de modelos mucho más fiables y robustos. Por estas razones, los modelos de simulación actuales pueden representar sistemas de elevada complejidad y de comportamiento dinámico sin mayores inconvenientes.

El diseñador de un modelo de cierta complejidad como el portuario, no debe iniciar la confección del mismo sin una secuencia o una serie de pasos lógicos, desarrollados con el fin de asumir una mayor comprensión del funcionamiento general del sistema a estudiar.

Por esto, de la misma manera que sería prácticamente impensable tratar de construir un edificio sin una serie de planos, la modelización y posterior simulación de un sistema requiere de una planificación previa, siendo las actividades para la modelización y posterior simulación de un sistema las siguientes.

La primera actividad es la recogida y tratamiento de la información, una vez depurada se ordena y se generan los correspondientes histogramas, que se corresponden con el comportamiento observado de la terminal. En la siguiente fase los datos muestreados ordenados en forma de histograma se ajustan a una distribución continua teórica, que es un *input* de la simulación posterior.

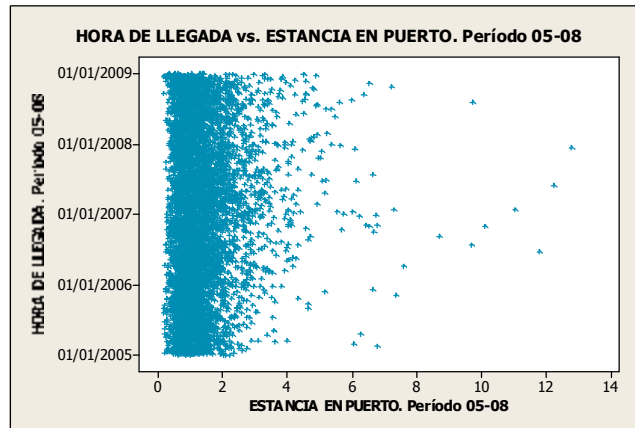


Fig. 3 Gráfica real: Hora de llegada vs Estancia en puerto. Fuente: Elaboración propia

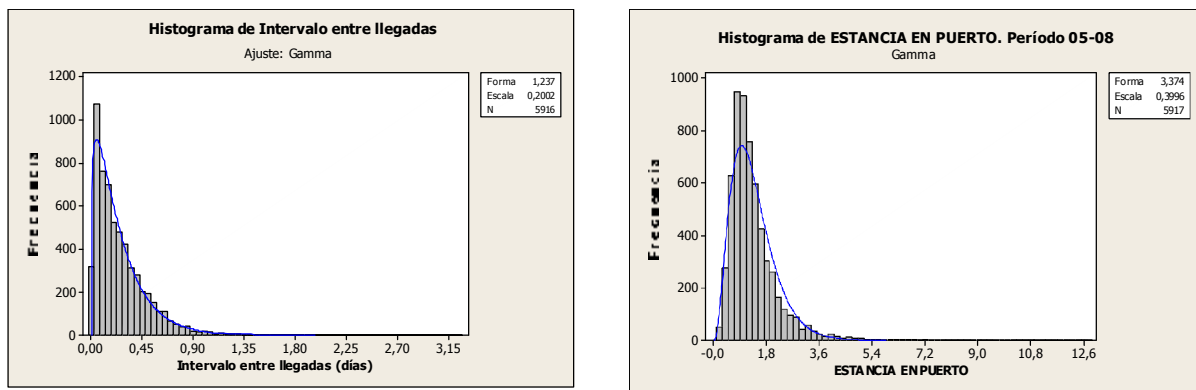


Fig. 4 Histogramas y ajustes estadísticos de distribuciones de llegada y servicio en Puerto. Fuente: Elaboración propia

Finalmente esta información se incorpora al modelo de colas que se pretende estudiar y se simulan diversos escenarios, con el objeto de experimentar su comportamiento ante los cambios en su estructura o entorno.

Al igual que los métodos analíticos, los resultados que proporcionan las simulaciones permiten la definición de los puestos de atraque ofrecidos y las esperas en la línea de atraque, que están relacionadas con el grado de utilización y la eficiencia del sistema. Como paso definitivo los resultados de las simulaciones deben ser analizados y validados.

En definitiva, las técnicas de simulación se emplean en sistemas portuarios complejos y cuando el nivel de tráfico es intenso. Exigen abundante información para la correcta modelización del sistema, pero permiten superar las carencias de los métodos analíticos cuando el volumen de información disponible es alto.

#### 2.4. Naturaleza del problema

A continuación se muestran sintéticamente en la Tabla 1, para cada uno de los métodos presentados en esta comunicación las principales variables que definen la naturaleza del problema, en cuanto a etapa de aplicación, nivel de tráfico, complejidad, información requerida o facilitada y resultados:

	<b>Métodos empíricos</b>	<b>Métodos analíticos</b>	<b>Simulación</b>
<b>Etapa</b>	Inicial	Desarrollo	Desarrollo
<b>Nivel de tráfico</b>	Cualquiera	Medio	Intenso
<b>Complejidad</b>	Baja	Media	Alta
<b>Información</b>	Limitada	Limitada	Abundante
<b>Resultados</b>	Productividad	Definición de puestos de atraque / esperas	Definición de puestos de atraque / esperas

Tabla 1. Naturaleza del problema. Fuente: Elaboración propia

Como se ha podido apreciar en el desarrollo del problema, cada una de las metodologías expuestas presenta ciertas características que pueden enriquecer el estudio del sistema de atraque. Por tanto la solución del problema se encontraría en la gestión integrada de la información aportada por cada método y no en la supresión o desistimiento de alguna de las metodologías de estudio.

### 3. Conclusiones.

La explotación de la línea de atraque en las terminales de contenedores es un problema complejo y las tres metodologías presentadas no son excluyentes sino complementarias, ya que permiten incorporar al problema toda la información necesaria para su correcto tratamiento.

Las ventajas, limitaciones y posibles aplicaciones de cada uno de los métodos se exponen sintéticamente en la Tabla 2:

	<b>Métodos empíricos</b>	<b>Métodos analíticos</b>	<b>Simulación</b>
<b>Ventajas</b>	Sencillez de elaboración	Permiten una 1ª aproximación	Método mas exacto
<b>Limitaciones</b>	No trata fenómenos de espera y no tiene capacidad predictiva	Grado de aproximación insuficiente en fenómenos de espera	Exige abundante información (modelo complejo)
<b>Posibles aplicaciones</b>	Prediseño y control de la gestión-competencia	Apto para Media-Baja intensidad de tráfico	Idóneo con alta intensidad de tráfico

Tabla 2. Ventajas, limitaciones y posibles aplicaciones de cada uno de los métodos. Fuente: Elaboración propia

### Referencias.

- [1] Tu-Cheng Kuo, et al. "A case study of inter-arrival time distributions of container ships". Journal of Marine Science and Technology, Vol. 14, No. 3, pp. 155-164 (2006).

- [2] Wen-Chih Huang, et al. “*A comparison of analytical methods and simulation for container terminal planning*”, Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers, Vol. 24, No. 3, pp. 200-209 (2007).
- [3] Noritake, M., “*A study on optimum number of berths in public wharf*”, Proceedings of the Japanese Society of Civil Engineers, 278, 113-122 (1978).
- [4] Noritake et al, “*Optimum number and capacity of seaport berths*”, Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 109, 323-329 (1983).
- [5] Camarero, A. et al: “*Optimización y estudio de la capacidad de terminales portuarias mediante modelos de simulación de la explotación. Determinación de los niveles de servicio*”. CEDEX Código PT-2006-004-14IAPM. (2009).