

# EL DIMENSIONAMIENTO ANALITICO DE LOS GRANDES TERMINALES MARITIMOS (\*)

Por CESAR LOPEZ SANCHEZ

Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.

*No son pocos los puertos en los que ha quedado de forma manifiesta el defecto de sobredimensionar sus obras e instalaciones. A veces, se presenta el vicio contrario de infradimensionarlas, todavía más oneroso si cabe. El presente artículo pretende enmarcar conceptualmente cuál debe ser el equilibrio para el dimensionamiento de dichas obras e instalaciones, centrándose en aras de la practicidad en el caso de los terminales marítimos, que pueden ser un claro exponente fácilmente generalizable a otros casos portuarios.*

## 1. INTRODUCCION

Sea cual fuere la dimensión de un terminal marítimo, la capacidad de sus servicios queda limitada a esa dimensión, y la aleatoriedad del proceso portuario hace aparecer durante ciertos intervalos de tiempo fenómenos de espera, bien de las obras e instalaciones y servicios del terminal, bien del modo de transporte marítimo, que llevan asociados unos costes.

Desde el punto de vista de la administración del terminal la explotación financiera ideal de éste sería con una utilización total a lo largo del año, es decir, con ocupaciones del 100 por 100; sin embargo, es evidente que esto no se puede garantizar en ningún caso. No obstante, la administración del terminal tenderá a manejar porcentajes de ocupación elevados.

Desde el punto de vista del transportista marítimo su explotación financiera ideal sería lograr que sus permanencias en el terminal fuesen las estrictamente necesarias para realizar la operación, y como en el caso anterior, esto resulta muy improbable. El naviero evitará por consiguiente visitar los terminales congestionados en los que no tenga garantía de obtener demoras admisibles.

Estos dos puntos de vista contrapuestos tienen un mismo origen en la mercancía, que es el objeto del transporte, y, por tanto, la que directa o indirectamente recibe los servicios prestados y paga por ellos. La mercancía es, lógicamente, el sujeto dirimente en la resolución del problema de encontrar el equilibrio entre las políticas financieras de portuario y naviero, llegando a un compromiso óptimo entre ambas, en el que el precio del transporte resulta mínimo para ella.

Normalmente, las posturas antagónicas de portuario y naviero no son tan radicales como tal vez se deduzca de la exposición anterior. En cada caso particular existen matices paliativos que condicionan, a veces fuertemente, las políticas financieras descritas.

Desde la situación utópica de libre concurrencia de buque y mercancía a un terminal administrado como empresa privada, que respondería al planteamiento inicial dado, hasta el caso de intervención pública total en la administración del terminal y control de tráfico, existen una serie de posibilidades dentro de las que quedan comprendidas todos los casos prácticos.

(\*) Se admiten comentarios sobre el presente artículo, que pueden remitirse a la Redacción de esta Revista hasta el 31 de enero de 1975.

El dimensionamiento del terminal para cada caso concreto dependerá, pues, de estos factores apuntados: estructura de costes y leyes de tráfico.

## 2. MODELO DEL TERMINAL

Debemos tener presente en la elaboración del modelo que es prácticamente imposible tratar a la vez de forma detallada y simultánea todos los factores en que se basa el proceso. El modelo de nuestro terminal en estudio contempla a éste como un centro operacional constituido por un centro de espera o zona de fondeo y un centro de servicio integrado a su vez por varios puntos de servicio o puestos de atraque idénticos. A este sistema llegan una serie indefinida de unidades (buques) según una ley aleatoria, solicitando un servicio (transbordo de la mercancía) que se les presta en los puestos de atraque, siguiendo la duración de este servicio una ley también aleatoria; como vemos, la variable del proceso es el tiempo, respecto al que el sistema se puede considerar en régimen permanente.

Este modelo así descrito tiene un suficiente grado de aproximación, cuando menos para determinar las líneas generales del plan director del terminal.

El comportamiento del sistema se analiza en el modelo siguiendo la Teoría de Colas, determinando una serie de parámetros característicos del proceso, entre los que como más significantes destacaremos los tiempos de espera de buques  $T_{eb}$  y de puestos de atraque  $T_{ea}$ , que asociados a sus costes unitarios correspondientes  $C_b$  y  $C_a$  nos definen en definitiva la función económica que interesa minimizar, puesto que este coste global de esperas grava al fin el coste del transporte de la mercancía.

Si suponemos el terminal integrado por  $S$  puestos de atraque, la expresión del tiempo de espera de buques es:

$$T_{eb} = T \cdot [P_{s+1} + 2 P_{s+2} + \dots + (n-S) P_n + \dots]$$

donde  $T$  es el período de utilización de estudio y  $p_i$  la probabilidad de estado  $i$  del sistema.

La expresión del tiempo de espera de puestos de atraque es:

$$T_{ea} = T S (1 - \theta)$$

siendo  $\theta$  el grado de ocupación o coeficiente de utilización del sistema;  $T$  y  $S$  tienen el significado anterior.

El volumen de mercancía operado en el terminal en el período  $T$  es:

$$Q = T S \theta R$$

teniendo  $T$ ,  $S$  y  $\theta$  los significados dados y  $R$  el de rendimiento de transbordo del puesto de atraque estándar.

Esta función junto con la de costes descrita:

$$C = C_b T_{eb} + C_a T_{ea}$$

definen totalmente el comportamiento de crecimiento del terminal, ya que para cada  $S$  podemos obtener la curva  $Q-C$  en función de las probabilidades de estado y de la ocupación del sistema.

De la familia  $S$  de curvas  $Q-C$  nos interesan en particular dos series de puntos: la serie correspondiente a costes mínimos relativos y la correspondiente a máximos admisibles. Las previsiones se harán siempre sobre la serie de mínimos, mientras que las transiciones de dimensión del terminal se llevarán a cabo utilizando la serie de máximos.

### 3. ABACOS DE OCUPACIONES OPTIMAS Y DE OCUPACIONES MAXIMAS

Las ideas expuestas han sido la base de elaboración de estos ábacos, que consisten en la representación cartesiana  $Q-C$  de los lugares geométricos de mínimos y máximos para cada  $S$  y cada estructura de costes del terminal. Se han desarrollado, como ejemplo, sobre el supuesto de que el tráfico marítimo sigue unas leyes de Poisson en cuanto a llegadas de buques, y exponencial, en cuanto a duración del servicio de los mismos.

La expresión de la probabilidad de estado  $n$  en este supuesto para  $n \geq S$  es:

$$P_n = \frac{s \cdot 0^n}{s!} \cdot \frac{1}{\sum_{n=0}^{s-1} \frac{0^n s^n}{n!} + \frac{0^s s^s}{s! (1-0)}}$$

Para lograr una mayor versatilidad de los ábacos los ejes se han graduado con la siguiente escala:

$$X = \frac{Q}{TR}; \quad Y = \frac{C}{C_b T}$$

La formulación matemática en estos ejes de las curvas  $S$  es:

$$X = s \cdot 0$$

$$Y = \frac{s \cdot 0^{s+1}}{s! (1-0)^2} \cdot \frac{1}{\sum_{n=0}^{s-1} \frac{0^n s^n}{n!} + \frac{0^s s^s}{s! (1-0)}} + \alpha s (1-0)$$

donde  $S$  es el número de puestos de atraque,  $0$  el grado de ocupación del sistema y  $\alpha = \frac{C_n}{C_b}$  la relación entre el coste imputable al día de inactividad de un puesto de atraque y la estadía del buque medio.

Estas ecuaciones paramétricas nos permiten dibujar, para cada  $\alpha$ , la familia  $S$  de curvas  $X-Y$  haciendo variar el parámetro  $0$ , y de ellas obtener los lugares geométricos de mínimos y máximos explicados, que constituyen en definitiva nuestros ábacos. La materialización del cálculo se ha realizado con ayuda de ordenador dibujando las curvas por medio de *plotter*.

