

PROBLEMATICA DE LA CONGESTION PORTUARIA

Por FRANCISCO ENRIQUEZ AGOS

Dr. Ing. de Caminos, Canales y Puertos

En este artículo se estudian los problemas técnicos y económicos que plantea la congestión portuaria, para cuya solución deben adecuarse los procesos operativos de los buques e instalaciones portuarias, tratando de conseguir un costo total mínimo del transporte. También se alude a la importancia que tiene la aplicación de las técnicas de investigación operativa a los estudios portuarios y se desarrolla al final un supuesto teórico de toma de decisión a través de estos métodos.

1.1. Considerar que el puerto es un ente público que sirve al bien común, como un eslabón fundamental dentro del sistema general de transportes de un país, es entenderlo en su más amplia función, mejorando la categoría singular que se le suele otorgar "como punto de enlace entre los transportes terrestres y marítimos", lo que ciertamente es minimizar su naturaleza. Y tal consideración lleva aparejada consigo el no intentar plantear ni resolver problemas portuarios, sin tener en cuenta su incidencia y relación con el sistema total de transportes.

Por ello, pretender que el problema fundamental portuario es cargar y descargar mercancías, es definir técnica y económicamente el papel del puerto en forma excesivamente simplista es mantener en puro *slogan* la tan traída y llevada "coordinación de los transportes", sobre cuya viabilidad se habla más que se realiza, fundamentalmente por la evidente complejidad técnica del tema y el cúmulo de los intereses económicos en él implicados.

1.2. Un paso adelante en el enjuiciamiento correcto del aspecto económico portuario, es ligar la productividad del sector a la velocidad de rotación del buque, con la salvedad de que este concepto es aún restrictivo y debe ampliarse también a la velocidad de circulación de la mercancía que transporta. Es precisa esta puntualización, pues el problema sería planteado y

resuelto unilateralmente, si nos fijáramos únicamente en el buque, por aquello de que los puertos parecen estar hechos para los barcos. Formando parte los puertos del sistema general de transportes, en su ámbito específico están hechos no sólo para el barco, sino también y fundamentalmente para el usuario más general del sistema: la mercancía.

El obstáculo fundamental que se opone al logro adecuado de estos objetivos es el de la congestión de los puertos, que afecta a la velocidad de rotación de los barcos y directa e indirectamente a la velocidad de circulación de la mercancía.

Al abordar el problema, es decir, al tratar de establecer las reglas precisas para incrementar ambas velocidades, es preciso en principio fijar los factores que determinan la duración de las operaciones portuarias dentro del tiempo total consumido en puerto, primero desde el punto de vista técnico, para pasar en seguida a la faceta económica en función de los costos portuarios, previa evaluación económica de dichas velocidades, según las características del buque y la mercancía y terminando por tratar de establecer la evaluación de los efectos económicos inducidos por tal incremento.

Un exceso de estadías de un barco provoca esperas en los restantes y esto trae aparejado

un exceso de demanda de servicios, con su secuela de aumento de inversiones y gastos consuntivos a ellas ligados.

1.3. Un arma fundamentalmente necesaria en esta clase de estudios es la estadística (medida

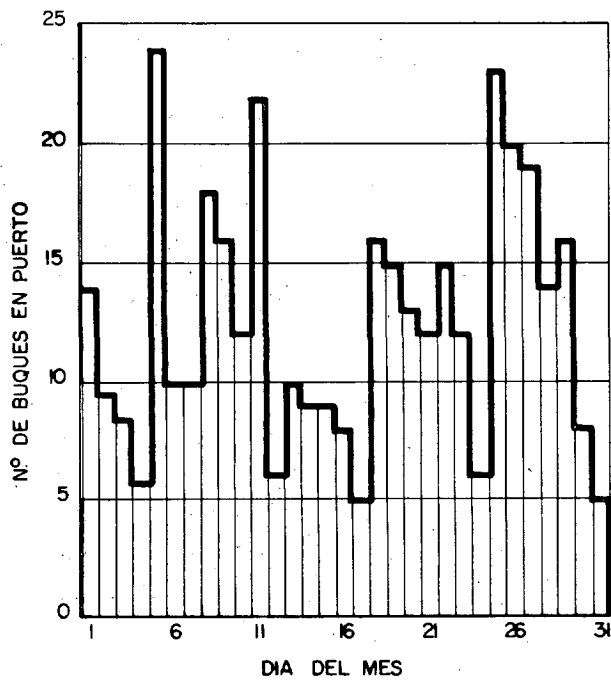


Figura 1.

de estadías, de velocidad de rotación de tiempos operativos o no...), establecida a niveles convenientes, pues no basta con poseer un dato medio de rendimiento de un muelle en toneladas/metro lineal, si existe una fuerte concentración de demanda en determinados días por la existencia de líneas regulares. Ni tampoco cabe prescindir de una estadística de frecuencia de utilización de grúas, que nos puede dar la clave para conocer cuál es la grúa marginal de las existentes o hasta qué número debe llevarse una futura adquisición. En la figura 1 se muestra un gráfico típico de ocupación de atraques en un mes; la figura 2 señala una curva de distribución de frecuencia de estancias de buques en puerto; la figura 3 representa una curva típica de utilización de grúas en función de su número.

1.4. Estableciendo criterios diferenciales para los barcos, es preciso distinguirlos en función de su naturaleza y sobre todo en razón de

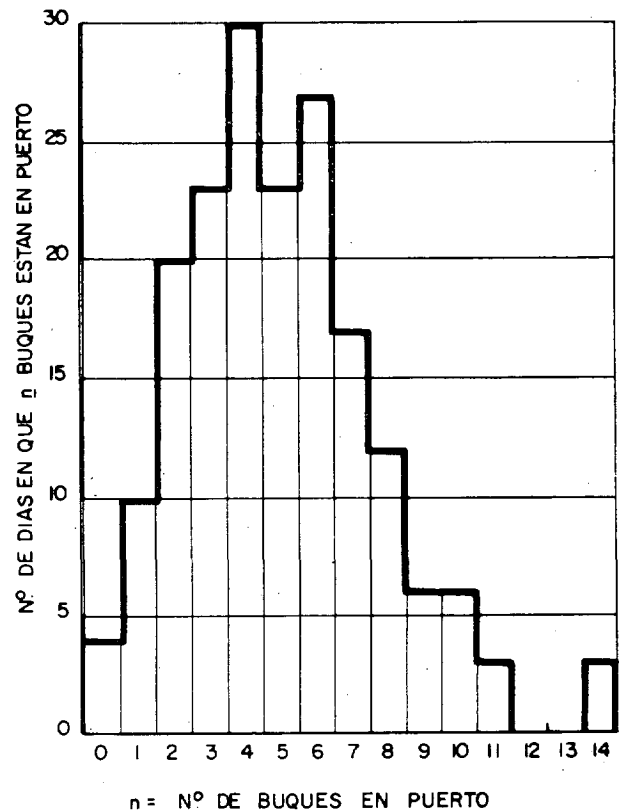


Figura 2.

su tamaño, con objeto de no establecer el incierto criterio de relacionar el tiempo operativo en proporción al tamaño del buque, es decir, al volumen de su cargamento, pues sería tanto como tratar de ignorar la clara tendencia existente al aumento del tamaño medio de los bu-

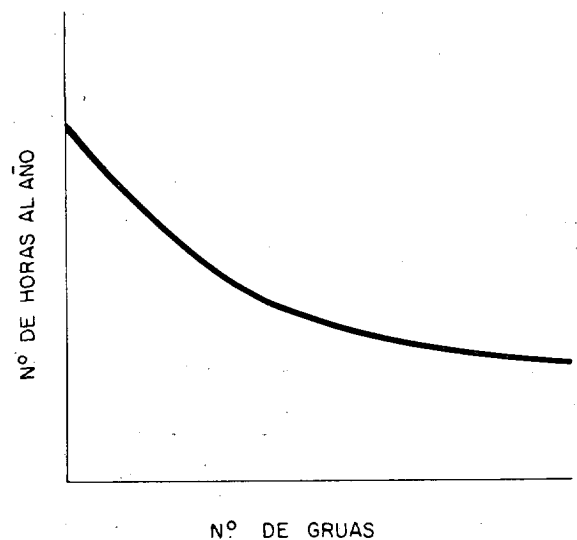


Figura 3.

ques, como un camino para mejorar su rendimiento de trasbordo.

De forma que si partimos de la fijación de un coeficiente unitario de tiempo preciso para transbordar la unidad de carga (un peso de una tonelada, por ejemplo, para mercancía general; una unidad física para carga unitizada); habremos tenido en cuenta el tamaño del barco y su efecto beneficioso, ya que dicho coeficiente tiende a disminuir cuando aumenta el tamaño y por otro lado el tiempo total no operativo decrece en proporción al operativo, debido al aumento de la velocidad de rotación.

Dada la estrecha relación existente entre los procesos operativos del buque y del muelle, cualquier modificación en la estructura de uno de los factores, como es la recepción de buques mayores y más rápidos, lleva consigo variaciones ineludibles en la del otro factor, en este caso la instalación portuaria, debido a que el coeficiente T.P.M./metro lineal de eslora aumenta con el tamaño del barco, y por consiguiente la recepción de un buque mayor supone un mayor transbordo de mercancías por metro lineal de muelle y además en un tiempo menor por un mejor rendimiento de la operación de transbordo.

De aquí que sea muy representativo estimar dicho rendimiento en función de la relación toneladas/metro lineal de eslora y en la unidad de tiempo (un turno o veinticuatro horas), de forma a tener en cuenta el tamaño del barco.

2.1. Al ritmo adecuado de transbordo se oponen una serie de factores que provocan congestión en la instalación portuaria, con lo que la congestión inducida en el buque se compone de dos sumandos: la falta material de servicios y la infrautilización de los existentes.

Estos factores terrestres de congestión son principalmente: la franquicia de ocupación de superficie; la demora en el despacho de aduanas; programa inadecuado de levante de mercancías; conflictos laborales; mal tiempo...

2.2. Antes de iniciar la etapa de estudios técnicos tendentes a resolver los problemas de congestión, se suele utilizar como corrector a corto plazo la palanca económica de las tarifas, manejada como penalidad por la infrautilización de las inversiones realizadas en los servicios portuarios.

Las congestiones que tengan su origen en operaciones lentas, bien porque fomente esta lentitud una tarifa baja, bien por intereses del propio barco (poca prisa en abandonar el puerto por ser base o por estar esperando flete), se verán reducidas o desaparecerán, ya que una tarifa fuertemente progresiva supone primar el despacho rápido o bien, inversamente, penalizar una mayor estancia. Sin embargo, no tendrán efectividad señalada sobre congestiones cuyo origen sea un despacho lento de aduanas, o influencias meteorológicas adversas.

El trato justo que debe tratar de conseguirse con medidas de este tipo queda patente; si se piensa que la congestión y sus retrasos inducidos es una paradójica penalización de los buques modernos, rápidos y de gran tamaño, que si en un principio pudiera tomarse como una reacción o revancha del puerto frente a los mayores gastos (dragados, muelles profundos...) que dichos buques le ocasionan, en realidad sería un ir inconscientemente contra el desarrollo técnico, cuya línea de avance tiende a concentrar el tráfico en determinados puertos, contribuyendo así a la racionalización e integración del sistema general de transportes.

Se ve por otra parte que existiendo en realidad una proporción decreciente entre el tiempo operacional del buque y su tonelaje de registro neto, a medida que éste aumenta, al tarifar la estancia por el citado tonelaje, se produce un nuevo trato de favor a los buques modernos, que estimula su tendencia al aumento del tamaño medio.

2.3. Para hacer frente a las irregularidades en las frecuencias de llegadas, que afectan más gravemente a los puertos pequeños con un número limitado de servicios, es preciso tomar medidas en tierra que van desde una racionalización de operaciones en explanadas y almacenes, hasta un aumento del tiempo operacional, mediante el uso de horas extraordinarias o mejor el establecimiento de dos turnos de trabajo. Y tratar de modificar la presentación de la mercancía para adecuarla a su manipulación, problema este que se sale del ámbito portuario, para entrar dentro de una racionalización del sistema general del transporte.

Esa racionalización de operaciones, que ha de ser realizada indefectiblemente bajo el signo de la mecanización y esa mayor utilización del

tiempo operacional, tratan en definitiva de conseguir una mayor "velocidad de circulación" de la mercancía a través de los canales terrestres, es decir, una descongestión de los mismos, lo que desde luego puede lograrse, pero a base normalmente de un aumento del costo absoluto de la operación.

3.1. Hemos planteado, pues, la existencia de dos sumandos fundamentales; el costo económico del despacho del buque y el costo económico de la operación de transbordo y su continuación a través de explanadas y almacenes. Podemos plantear la función económica que la suma de ambos costos define y minimizarla con una serie de ecuaciones de restricción, tales como un mínimo de utilización de las instalaciones portuarias, una rentabilidad mínima de sus inversiones, una velocidad de rotación del barco superior a una dada, etc.

Al establecer dicha función económica estamos aceptando que la situación que nos defina el costo total mínimo no tiene por qué coincidir con la utilización al máximo de las instalaciones de transbordo en el barco y en tierra, sobre todo éstas. Es decir, y volviendo a lo que antes apuntábamos al hablar de la racionalización de las operaciones en tierra, el costo de manipulación será generalmente superior al que el puerto, o la instalación portuaria de que se trate, sea capaz de lograr y en contrapartida el rendimiento de la instalación será inferior (y en qué grado lo veremos más adelante) al máximo que unilateralmente pudiera conseguirse.

Si no abordamos así el problema en su totalidad, no nos debe extrañar que cuantas veces se vea enfrentado aisladamente el sumando "costo del buque" con el del "costo del transbordo" y con más intensidad si este enfrentamiento se realiza a través de una misma persona (consignatario-empresario de carga y descarga), se provocará un conflicto, resuelto las más de las veces sobre la base de conseguir un mínimo para el costo del transbordo (beneficio directo del empresario de carga y descarga) y en contrapartida un aumento del otro coste producido por mayores estadías (pérdida directa del armador).

3.2. La existencia de estos problemas hace que sobre los puertos presionen y cada vez más intensamente:

a) Los armadores, con sus modernos barcos, concebidos para operaciones rápidas y al-

tas velocidades de rotación, cuyos gastos (fuertes inversiones, elevadas velocidades, amortizaciones rápidas) exigen altas rentabilidades.

b) Los expedidores, que preparan sus cargamentos para ser manipulados mecánicamente y cada vez en grado más intenso, con un costo que en muchas ocasiones es difícil parangonar de una manera evidente con la economía que ello supone.

Todos estos factores y otros muchos obligan al puerto a mecanizarse y a montar nuevos y más costosos servicios, disminuyendo paradójicamente el coeficiente de utilización de los mismos, para conseguir un mayor rendimiento del conjunto, y en definitiva una circulación de la mercancía a un costo mínimo.

3.3. Es lógico, pues, que a las lamentaciones de los armadores de que no obtienen la debida rentabilidad de sus inversiones y de los expedidores, enfrentados con sus dudas acerca de las ventajas de sus gastos de embalaje, se sumen, por qué no, las del puerto que no recauda lo suficiente para hacer frente a las inversiones que se ve obligado hacer. Ya que, aunque acusado de vivir en una posición semi-monopolítica, no puede utilizar libre e indiscriminadamente el arma de sus tarifas, arma de dos filos que ha conducido a más de un fracaso; y el único recurso aplaudido por sus clientes, pero no infalible para aumentar su tráfico y sus ingresos, es el de ofrecer mejores y mayores servicios; tratando en contrapartida de resarcirse de los mayores costos que la traducción de ambos objetivos a términos económicos suponen.

Si este recurso no da el resultado esperado, el puerto piensa que si en definitiva el paso de la mercancía a través del puerto se hace a un costo mínimo por la existencia de unos servicios adecuados a los modernos barcos, que hacen posible además mejorar el rendimiento de transbordo, bastante se ha conseguido y su participación en la mejora de la situación consistirá, ¡parca participación!, en defender a ultranza sus tarifas sin bajarlas, pues lo contrario sería establecer una doble prima sin beneficio alguno para él y en tal caso el círculo vicioso en que estas situaciones suelen degenerar le sometería a la tentación de no estimular los aumentos de velocidad de rotación de los buques y de transbordo de las mercancías, que para él se realizan en pura pérdida.

3.4. Dentro, pues, del marco de una integración lo más amplia posible del transporte, en cuyo espíritu nos movemos, es preciso estudiar y desarrollar un proceso económico global que abarque todos los aspectos referentes a la mercancía, al buque y al puerto, de forma que la eficacia y capacidad de los servicios se corresponda con un adecuado coeficiente de tonelaje/metro lineal de eslora y unidad de tiempo de los barcos que los utilicen y a un costo mínimo del transporte.

Al aumentar la velocidad de rotación del buque se incide sobre la demanda y naturaleza del tonelaje mundial, desechando buques viejos y tendiendo a aumentar el tamaño medio de las nuevas construcciones. Todo ello con la mira puesta en conseguir un aumento de ingresos buque/día, que es el beneficio a favor de los armadores.

Al aumentar la velocidad de circulación de la mercancía, directamente por el aumento del rendimiento de transbordo y como efecto inducido de la mayor velocidad de rotación del buque, se consigue un ahorro en la incidencia del coste del transporte sobre el valor medio de la mercancía, que es el beneficio a favor de los expedidores.

Por último, la mejor, ¡que no la mayor!, utilización de las instalaciones portuarias, redundará en una disminución de la demanda de otras nuevas, con su correspondiente contracción en los gastos de inversión y en los consuntivos a ellos ligados, pero casi siempre con un aumento de gastos de equipo. Sin embargo, este beneficio en favor del puerto no se ve tan claro como para los otros dos sectores antes estudiados, ya que el desnivel inevitable entre las tecnologías naval y portuaria (plazos de construcción, desfase de previsiones y programaciones) incide siempre en perjuicio de esta última, al mantener una demanda constante de instalaciones modernas adecuadas a los nuevos buques, y únicamente le es posible al puerto, y no con carácter general, llamar a participar a los particulares en inversiones de equipo, pero quedando siempre obligado a la servidumbre de cargar íntegramente con las costosas inversiones de las infraestructuras fundamentales.

Existe actualmente cierta tendencia a tratar de establecer a los puertos en un papel de banqueros, manejando los procesos técnicos y eco-

nómicos de los puertos desde el punto de partida de su propiedad o usufructo de las áreas portuarias y sus instalaciones básicas. Concretamente es una política seguida en cierta manera por algún gran puerto europeo y con resultados discutibles al decir de observadores exteriores; pero indefectiblemente y cuando se trata de una fuerte inversión; por ejemplo, mejora o establecimiento de un nuevo acceso, su economía se muestra incapaz de afrontarla y le es preciso recurrir a la ayuda estatal.

3.5. Podemos, pues, asegurar que si la aplicación de los principios del liberalismo económico a los puertos no hace sino acumular nubarrones sobre la "empresa portuaria" (y ahí está el significativo ejemplo inglés), el panorama se clarifica si se aborda su destino y función como "entes públicos para un servicio público". Su vida técnica y económica debe estar íntimamente ligada a la política de transportes de la nación, y ésta ha de sentar las bases de su subsistencia y responder de ella, cuidando naturalmente de que su desarrollo económico sea el más ortodoxo posible dentro de las características especiales que lo informan.

4.1. Los retrasos y congestiones en los puertos pueden contemplarse como un problema general de colas, y si bien a corto plazo y con limitaciones pueden resolverse con variaciones de tarificación, tal tratamiento no será eficaz ni indicado, como hemos visto, en muchas ocasiones, y sobre todo no será adecuado para el establecimiento de nuevas instalaciones o al abordar el estudio general del desarrollo de un puerto.

En estos casos, cabe recurrir, y cada vez se camina más por esta ruta, al planteamiento matemático de los problemas, mediante la aplicación de la tecnología de los fenómenos de espera.

4.2. En líneas generales, un fenómeno de colas se presenta a la llegada de una serie de unidades en solicitud de determinados servicios a prestar por otra serie de canales, de forma que la posible programación de tales llegadas y la prestación de tales servicios se ven distorsionadas por una serie de factores que convierten los datos del problema en aleatorios. Por tanto, las variables no se suceden en forma determinista, sino siguiendo una cierta función de probabilidad.

Así, a la llegada de las unidades, producidas según leyes de azar, son atendidas en los canales de servicio según cierta disciplina de colas, pudiendo existir o no factores de prioridad. Igualmente la salida, en función del tiempo de servicio, es también una variable aleatoria, que se distribuye según leyes de probabilidad.

Si el número de canales de servicio no es suficiente, o su capacidad de servicio no es la adecuada, se producirán esperas de unidades con determinados niveles de pérdidas. Si el número de canales de servicio es muy grande o su capacidad excesiva, tendrán tasas bajas de utilización que redundarán en una mala rentabilidad de las inversiones. Es preciso, pues, buscar el equilibrio entre los tiempos de espera y los grados de utilización, para conseguir un conjunto ordenado dentro de un rendimiento económico máximo.

4.3. Este esquema general responde perfectamente a lo que es la actividad portuaria. La existencia de variables aleatorias es evidente si se piensa que, ni siquiera en muelles privados o en instalaciones especializadas, se logra obtener una imagen de llegadas y salidas de buques que responda fielmente a los programas previstos, a pesar de la ventaja evidente que con respecto a instalaciones públicas o muelles de mercancía general tienen aquéllas para hacer frente a los imprevistos que tan corrientes son en los puertos y que son debidos a múltiples factores, tales como mal tiempo, dificultades operativas, problemas de carga y descarga, fluctuaciones no estacionales del tráfico, conflictos sociales, etc. Todas estas fuentes de distorsión producen sustanciales modificaciones en las previsiones del grado de utilización de las instalaciones y de la velocidad de rotación de los buques que se sirven de ellas.

4.4. Estadísticas, tales como las indicadas en los gráficos de las figuras 1 y 2, permiten apreciar, cómo la ocupación de atraques sigue ciertas leyes de azar, en que las probabilidades de estar un número de buques en puerto un día determinado no guardan relación con las referentes a la estancia de otro número en día distinto, y teniendo en cuenta además que cada buque entra y sale sin una relación determinada con el movimiento de los demás.

Uno de los factores más representativos para

tomar el pulso a una instalación portuaria, es el contenido por su capacidad de transbordo, tomada como producto del rendimiento diario por los días de trabajo de la misma; esta definición, que contempla una faceta del problema, es preciso completarla con el factor restrictivo que supone el establecer un esquema operativo tal que se cumpla dicho rendimiento sin congestión indebida o excesiva, no sólo por lo que a la estancia de los barcos se refiere, sino también con respecto a las fases terrestres del esquema: transbordo, depósito y levante de las mercancías.

La limitación de ocupación de una serie de atraques viene dada en función de su capacidad para adaptarse al plan de llegadas y salidas de los buques. Si existe un gran número de atraques nos encontramos ante un sistema de gran elasticidad frente a puntas de demanda

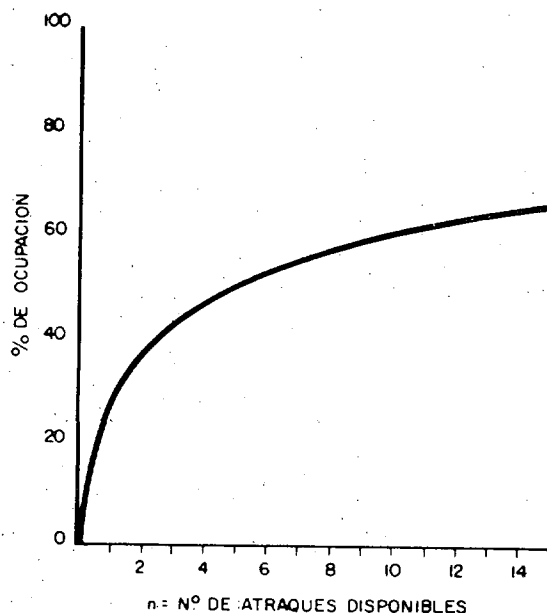


Figura 4.

y en contrapartida se corre el peligro de una baja tasa media de utilización; mientras que un número limitado de atraques puede dar lugar a una tasa media de utilización elevada, a costa de provocar congestiones o retrasos inaceptables en horas punta. En general, pues, la capacidad operativa del sistema tiende a ser mayor cuanto mayor es el número de atraques, y si

existe la debida compenetración entre el tráfico (tipo de buques y clase de mercancía) y el número y capacidad adecuada de las instalaciones, el rendimiento de éstas puede crecer a más velocidad que lo haga el número de atraques.

4.5. En lo que antecede, nos hemos referido

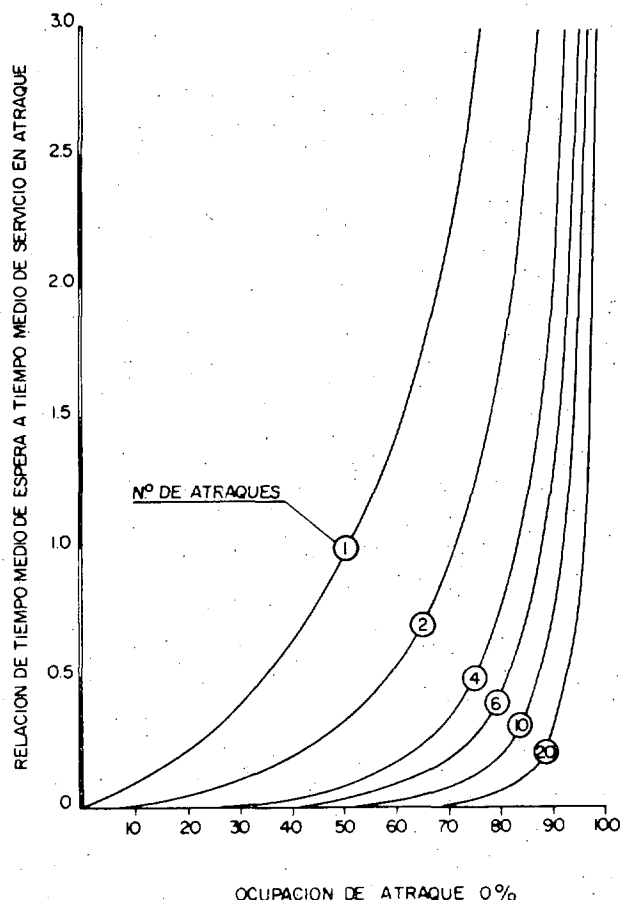


Figura 5.

en varias ocasiones al término congestión con los calificativos de indebida, inaceptable, excesiva. Para poder centrar los problemas y establecer bases de partida, es preciso transformar a bases mensurables tales abjetivos, lo que puede lograrse admitiendo un techo de congestión expresado en tanto por ciento del tiempo total; esto equivale a fijar un número de días máximo en el año para la posible existencia de congestión. Entonces puede calcularse la curva que fije, para una congestión dada, el tanto por

ciento de ocupación de un número determinado de atraques en función de dicho número, curva que como la de la figura 4 muestra una convergencia horizontal al crecer el número de atraques. Dicha curva, calculada para una su-puesta congestión del 5 por 100 (dieciocho días en el año), muestra tasas de ocupación que van desde un 30 por 100 para un atraque hasta un 60 por 100 para 10, decreciendo después rápidamente.

4.6. Un planteamiento más general de este interesante tema puede realizarse mediante la fórmula de Erlang, que permite establecer una relación entre el número de canales de servicio y su tanto por ciento de ocupación, en función de los tiempos medios de espera y de servicio, tal y como puede verse en el gráfico de la figura 5. Ha de tenerse en cuenta que, si suponemos que el tiempo de servicio es fundamentalmente el operativo, nos encontramos ante un esquema operativo con sólo una fase de servicio (lo que equivale a hacer $k=1$ en la fórmula general de Erlang), cuyo tiempo es precisamente el operativo, lo que se adapta bastante bien al modo de operar de los buques de carga general modernos, eficientes y rápidos. Esta ha sido la simplificación adoptada para la determinación del citado gráfico.

Un examen atento del mismo, aun contando con las simplificaciones de origen y en el caso de que no se disponga del complemento valioso de unas buenas estadísticas, permite establecer en primera aproximación criterios valiosos a la hora de programar inversiones portuarias o de reestructurar la explotación de instalaciones existentes.

Si, por ejemplo, admitimos como techo de congestión un tiempo de espera del 10 por 100 del tiempo de servicio, podemos comprobar que un sistema de dos atraques alcanzará un límite de ocupación del 30 por 100 y uno de 6 atraques un límite del 63 por 100. Inversamente, si queremos mantener una discreta ocupación del 50 por 100 en un sistema de dos atraques, los tiempos de espera aumentarán a cifras del orden del 30 por 100 de los de servicio, mientras que parecidas cifras de espera se obtienen en 6 atraques con tasas de ocupación de más del 70 por 100. Esto vuelve a confirmarnos lo que antes dijimos: la mayor elasticidad de un sistema de numerosos atraques (puerto grande)

frente al de pocos (puerto pequeño), o lo que es lo mismo, la mayor facilidad de explotación de un puerto grande que de uno pequeño, desde el punto de vista operativo. Y que, sin variación de las restantes circunstancias, es mayor el provecho obtenido de la ampliación equilibrada de un puerto que de la construcción de uno nuevo.

5.1. Hasta ahora nos hemos estado refiriendo al problema en su más amplia extensión, tal y como puede presentarse en un puerto comercial, cuyas instalaciones se dediquen al tráfico de mercancía general. En el caso de atraques especializados, las circunstancias varían, ya que suelen ser instalaciones de no muchos atraques, concebidas primordialmente para altas velocidades de rotación y que por consiguiente pueden incurrir en grandes retrasos, a menos que se trabaje a un nivel bajo de ocupación o a un tiempo de servicio muy corto, pudiendo lograrse esto último con un equipo adecuado de manipulación.

Como ejemplos muy representativos de estas consideraciones, vamos a esquematizar la planificación de cuatro instalaciones especializadas, con proyectos ya desarrollados u obras en curso:

A) Estructura: Nueve atraques para petroleros, tres de ellos para buques de más de 100 000 T.P.M.

Tráfico previsto: Diez millones de toneladas de importación, cinco millones de exportación.

Esquema operativo: Flota compuesta de seis petroleros de 100 000 T.P.M. para crudos y 12 de 25 000 T.P.M. para refinados. Costo del terminal/costo de la flota = 0,05. Días de trabajo al año, ciento cincuenta. Ocupación por atraque, 15 por 100. Retrasos previstos nulos.

B) Estructura: Instalación para descarga de minerales a 3 000 Tn./h.

Tráfico previsto: Cinco millones de toneladas.

Esquema operativo: Flota compuesta de cinco buques de 100 000 T.P.M. Días de trabajo al año, ciento cincuenta. Retrasos previstos no más de un mes. La tasa de ocupación del 20 por 100, en función de los retrasos, se logra por un elevado rendimiento de transbordo.

C) Estructura: Instalación para carga de fosfatos, dos atraques, 2 500 Tn./h.

Tráfico previsto: Cinco millones de toneladas.

Esquema operativo: Ocupación media del atraque, 20 por 100. Retrasos no considerados.

D) Estructura: Instalación de descarga de granos, 1 000 Tn./h.

Tráfico previsto: 700 000 toneladas.

Esquema operativo: Dos buques de 35 000 toneladas peso muerto.

Ocupación media del atraque, 22 por 100.

Con retrasos no superiores a un mes puede incluirse un tercer buque.

En estos ejemplos resaltan con características comunes:

a) Un retraso máximo admisible del 10 por 100.

b) Una ocupación de atraques influida grandemente por la importancia y naturaleza del tráfico.

c) En general, bajo coeficiente de utilización de las instalaciones, que permite fuertes economías en el despacho de los grandes buques y elevadas velocidades de rotación de los mismos.

6.1. Los modelos matemáticos de supuestos de colas pueden ser abordados con criterios simplificadores, mediante la aplicación de la Ley de Poisson, que se adapta bastante bien al esquema operativo de la ocupación de atraques en un puerto comercial.

En esencia, esta ley establece que la probabilidad de n llegadas durante un tiempo T es:

$$\frac{(\lambda T)^n e^{-\lambda T}}{n!}$$

siendo el valor medio de la distribución λT y representando por consiguiente λ el número esperado de llegadas por unidad de tiempo.

El tiempo de servicio tiene una distribución exponencial de la forma:

$$g(s) = \mu \cdot e^{-\mu s}$$

cuya media es $1/\mu$, representando, pues, μ el número de unidades que puede servir un canal en la unidad de tiempo.

Si existen k canales en el sistema y llamamos P_n a la probabilidad de n unidades en el sistema, bien en cola o recibiendo servicio, se obtienen las relaciones:

$$P_n = \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n P_0 \quad \text{con } n = 0, 1, 2, \dots (K-1)$$

$$P_n = \frac{1}{k! k^{n-k}} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n P_0 \quad \text{con } n \geq k$$

en que $k\mu > \lambda$, ya que en caso contrario la cola sería infinita.

Imponiendo la condición de que la suma de las probabilidades sea la unidad, tendremos:

$$P_0 = \frac{1}{\left[\sum_{n=0}^{k-1} \frac{1}{n!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n \right] + \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^k \frac{k\mu}{k\mu - \lambda}}$$

con un tiempo medio del sistema igual a:

$$E(V) = \frac{\mu (\lambda/\mu)^k}{(k-1)! \cdot (k\mu - \lambda)^2} P_0 + 1/\mu$$

Para ver la interesante aplicación que de esta ley puede hacerse a un estudio particular, supongamos que se trata de construir una instalación de descarga de minerales, decidiendo sobre el número de atraques (dentro de un máximo de tres por razones de espacio) y la capacidad de transbordo del equipo de descarga, de forma que se obtenga un costo total mínimo.

Los equipos de descarga con que puede contarse son tres, de las siguientes características:

Tipo	Coste fijo día	Coste operativo día	Capacidad T día
A	840	840	3 600
B	1 350	1 350	5 800
C	1 500	1 600	6 400

La instalación, por cuestiones de calado, debe alimentarse con buques de poco tonelaje (8 000 T.P.M.) y se admite que pueden llegar al sistema cinco barcos semanales, cuyo costo unitario de explotación diario es de 2 000. Entonces, $\lambda = 5/7 = 0,714$ barcos/día.

Los tiempos de servicio, distribuidos según la función exponencial indicada, tienen por parámetros:

$$\mu A = 3\,600/8\,000 = 0,450 \text{ barcos al día}$$

$$\mu B = 5\,800/8\,000 = 0,725 \text{ barcos al día}$$

$$\mu C = 6\,400/8\,000 = 0,800 \text{ barcos al día}$$

De entrada puede verse que la cola sería infinita para la solución A con un solo atraque, ya que $k \cdot \mu = 1 \cdot 0,45 < \lambda = 0,714$.

El costo total que ha de minimizarse se compone del costo fijo, más el operativo, más el de estancia del buque. El costo fijo se valora en la siguiente tabla-matriz:

Tipo	Número de atraques		
	1	2	3
A	—	1 680	2 520
B	1 350	2 700	4 050
C	1 500	3 000	4 500

(1)

Para determinar los costos de operación por día, calculamos, en primer lugar, la fracción de día que constituye el tiempo de servicio de un atraque, es decir, el factor de utilización de las instalaciones ($= \lambda/\mu$):

	1	2	3
A	—	0,793	0,529
B	0,985	0,493	0,328
C	0,892	0,448	0,297

Multiplicando los elementos de esta matriz por el número de atraques y el costo diario de los mismos, obtenemos el costo operativo referente a un día:

	1	2	3
A	—	1 332	1 332
B	1 330	1 330	1 330
C	1 427	1 427	1 427

(2)

Se calculan a continuación los valores de P_0 dados por la fórmula anterior:

	1	2	3
A	—	0,115	0,190
B	0,015	0,340	0,369
C	0,108	0,383	0,406

y de éstos se deducen los tiempos medios dentro del sistema:

	1	2	3
A	—	5,96	2,48
B	90,90	1,82	1,43
C	11,60	1,56	1,29

Multiplicando los términos de esta última matriz por λ (número de barcos esperados por día) y por su costo diario (2 000), se tienen los costos de estancia en puerto:

	1	2	3
A	—	8 511	3 541
B	129 805	2 599	2 042
C	16 565	2 228	1 842

Sumando las tres matrices de costos (1), (2) y (3) se obtiene el costo total buscado:

	1	2	3
A	—	11 523	7 393
B	132 485	6 629	7 422
C	19 482	6 655	7 769

que nos indica que la solución óptima es construir dos atraques y equiparlos con la instala-

ción tipo B. La solución 2-C, de costo equivalente, posee un coeficiente de utilización 0,448 inferior.

Debe hacerse notar que el elevado coeficiente de ocupación (0,493) se obtiene gracias al elevado rendimiento relativo del equipo en relación al tonelaje supuesto de los barcos.

Vemos, pues, que el desarrollo y aplicación de estos esquemas de investigación operativa, significa poner en las manos de la técnica portuaria un instrumento valioso, del que extraer información necesaria que ayude a tomar decisiones óptimas a la hora de planificar y proyectar nuevos puertos o instalaciones, o con vistas a la previsión del desarrollo futuro de las existentes.

REFERENCIAS

- Economic Problems of Increasing Speed of Ships Turn-round.* Dr. Econ. W. Andruszkiewicz. Instytut Morski. Poland.
- Prediction of maximum practical berth occupancy.* Fratar, Goodman and Brant. Proceedings of the American Society of Civil Engineers. Junio, 1960.
- The Dock and Harbour Authority.* Diciembre, 1966. Abril, 1967.