

**UNIVERSIDAD DE BELGRANO  
FACULTAD DE INGENIERIA  
CATEDRA PUERTOS Y VIAS NAVEGABLES**

**TEMA 5  
METODOS PARA EL CALCULO DE  
CANTIDAD DE PUESTOS DE ATRAQUE**

**ING RAUL S. ESCALANTE  
1991**

La determinación del número de puestos de atraque con que va a contar un puerto es una tarea de gran importancia ya que queda definido a partir de allí el nivel de inversión necesario para la obra.

El número de puestos de atraque se calcula para cada mercadería de significación para el puerto ó para mercaderías diferenciadas. El número de puestos de atraque total es la sumatoria de los puestos de atraque para cada mercadería.

En general puede decirse que una mercadería que participe con menos de un 5% del volumen total del puerto tratará de manejarse a través de alguno de los puestos de atraque existentes aunque con menos eficiencia que si se contara con atraque especializado.

Existen diversos métodos para determinar el número de puestos de atraque necesarios, que van desde métodos muy expeditivos y económicos hasta métodos muy sofisticados, que demandan un largo tiempo para su implementación y que son relativamente onerosos. Cada uno de estos métodos se aplica según las circunstancias de acuerdo a la importancia del proyecto, el nivel en que se encuentra el estudio, los datos que se disponen, etc.

Cuando se habla de número de puestos de atraque se está considerando indirectamente la longitud de muelle necesaria para efectuar las operaciones portuarias.

En efecto, conocido el buque tipo o de proyecto se tiene una eslora de buque tipo que multiplicada por el número de puestos de atraque y adecuadamente mayorizada nos da la longitud de muelle requerida. Dado que los buques presentan una variedad de esloras debe tenerse en cuenta la influencia del número de puestos de atraque en la longitud resultante del muelle. Si el número de puestos de atraque es 1 el muelle debe tener longitud suficiente para acomodar el buque más largo; si n es mayor que 1 pue-

de tomarse la eslora del buque tipo.

Los métodos que analizaremos son

- Método del rendimiento (R)
- Teoría de colas
- Simulación portuaria

## 5.1 METODO DEL RENDIMIENTO (R)

Se denomina rendimiento del frente de atraque al valor R que expresa en toneladas de carga por metro lineal de muelle y por año la capacidad de embarque del muelle según la naturaleza de la mercadería.

Algunos valores de rendimiento son los siguientes:

	t/m/año
Mercaderías generales	600
Arena por refulado	1200
Cereales	4500
Carbon y minerales a granel	2000
Combustibles líquidos	4000
Rollizos y maderas	800
Contenedores	2800

El método del rendimiento presenta numerosas objeciones pues depende de un gran número de variables que no son tenidas en cuenta. Sin embargo es útil para realizar cálculos rápidos en la etapa de predimensionamiento.

La longitud de muelle (L) necesario se calcula en base al dato de tonelaje a mover (T) en el puerto de la mercadería que se está considerando

$$L(m) = \frac{T}{R} \frac{(t/año)}{(t/m/año)}$$

En esta relación está implícito que el movimiento se efectúa a ritmo uniforme durante todo el año. En caso en que el movimiento sea estacional debe aumentarse la lon-

gitud de muelle en forma acorde a la relación entre el período del año que opera el puerto y el año total.

Calculada L se puede calcular el número de puestos de atraque (n) en base a la eslora (E) del buque tipo

$$n = \frac{L}{E}$$

Dado que el n habitualmente no es entero se redondea al entero superior.

La longitud definitiva de muelle para esa mercadería se calcula como:

$$L_{def} = n \times E \times 1,1 \text{ a } 1,2$$

Este método es muy expeditivo y permite tener una idea del número de sitios necesarios. Tiene englobado en el valor de R todas las particularidades de la operación portuaria. El método puede ser válido cuando se aplica en condiciones conocidas y probadas como puede ser la construcción de un puerto cercano a uno existente y con condiciones de operación similares.

Entre las falencias más notorias del método del R figura el hecho que no tiene en cuenta la interacción que se produce entre sitios vecinos a medida que aumenta el número de sitios.

Para el método del rendimiento la capacidad del muelle (Q) para dos puestos de atraque es el doble que para un puesto de atraque cuando en realidad es mucho mayor como veremos cuando analicemos teoría de colas.

Otro aspecto que el método del rendimiento no tiene en cuenta es la variación que se produce en los rendimientos de carga o descarga en función del tamaño del buque. Cuando se compara el rendimiento obtenido en cargar buques de gran tamaño se encuentra que los ritmos de carga aumentan significativamente comparados con los rendimientos obtenidos en buques menores.

A los efectos de obviar en parte los inconvenientes indica  
dos es que se ha propuesto modificar los resultados obteni  
dos mediante el método del R de acuerdo con los siguientes  
coeficientes correctores a aplicar a los valores básicos  
de R

1° Calado del muelle

- Petróleos	No hay variantes	
- Graneles	12 m de calado	1,00
	7 m de calado	0,50
- Para calados intermedios	Interpolar lineal <u>mente</u>	
- Carga general	12 m de calado	1,00
	5 m de calado	0,80
- Para calados intermedios	Interpolar lineal <u>mente</u>	

2° Carga media

- Muelles exclusivos para barcos de calendario fijo	0,50
- Muelles para barcos de calendario fijo y otros	
Interpolar linealmente entre 0.50 y 1.00 según la posición	
- Muelles en concesión de carga general	1,10
- Muelles en concesión de graneles o muelles de uso público para cargamentos homogéneos	1,20

Por Número de Puestos de Atraques Unificados

Se interpretan como unificados dos ó más puestos de atraques  
contiguos en un muelle que se explotan conjuntamente  
bajo la misma dirección, de forma que el barco pueda ha-  
cer operaciones indiferentemente en cualquiera de ellos.

La misma definición se aplicará en el caso de atraques  
de otro tipo (pantalones, duques de alba, etc.)

N° de puestos de atraque	1	2	3	4 ó más
Coeficiente	1,00/1,05	1,10/1,15	1,20/1,25	1,30/1,35

### 5.1.1 Ejemplos de aplicación

Calcular la longitud y el número de atraques necesarios (Rendimientos)

Datos:

Mercadería: General

Volumen movido: 200.000 t/año

Rendimiento: 600 t/m.año

Eslora típica : 170 m

Se calcula la longitud necesario como  $L = \frac{V}{R} =$   
 $= \frac{200.000 \text{ t/año}}{600 \text{ t/m.año}} = 333,3 \text{ m}$

Las cantidades de postas de atraque será:

$$b = \frac{L}{1,2 \times E} = \frac{333,3 \text{ m}}{1,2 \times 170 \text{ m}} = 1,63$$

Por lo tanto, serán necesarias dos postas (b= 2) y la longitud real es  $L = 1,2 \times 2 \times 170 \text{ m} = 408 \text{ m}$

Variante: Caso con estacionalidad marcada

Mercadería: Cereales

Ritmo: 70% en 120 días

Volumen: 2.000.000 t/año

Rendimiento: 7500 t/m.año

Eslora: 200 m

Se calcula igual que antes pero con los datos correspondientes a 120 días:

Volumen:  $0,7 \times 2.000.000 \text{ t} = 1.400.000 \text{ t}$

Rendimiento:  $7500 \text{ t/m} \times \frac{120}{360} = 2500 \text{ t/m}$

$$L = \frac{V}{R} = \frac{1.400.000 \text{ t}}{2.500 \text{ t/m}} = 560 \text{ m} \quad b = \frac{L}{1.2 \text{ E}} =$$
$$= \frac{560 \text{ m}}{1,2 \times 200 \text{ m}} = 2,33$$

Por lo tanto son necesarios 3 postas y la longitud necesaria es

$$L = 1,2 \times 3 \times 200 = 720 \text{ m}$$

A los efectos de calcular el número de sitios que es necesario disponer para atender a los buques que llegan puede considerarse al puerto como un sistema al cual arriban buques según una función de arribos y son atendidos de acuerdo a una función de servicios.

Si la función de servicios es insuficiente para satisfacer a los buques que llegan se produce una cola con los buques que quedan a la espera. Si por el contrario el número de sitios disponible es excesivo se encuentran puestos de atraque desocupados un alto porcentaje del tiempo

El problema es complejo por la interacción que se produce entre la función de llegadas y la función de servicios y además por el efecto que tiene sobre el problema el número de sitios.

El análisis se efectúa considerando que el muelle comprende un número de sitios homogéneos que manejan mercaderías y buques de características no muy diferentes.

### 5.2.1

#### Definiciones

N : Número de atraques en el puerto o en aquella parte del mismo que se estudia como unidad operativa: el número de atraques está limitado en la práctica por el hecho de que cualquier buque debe poder operar en cualquier atraque del grupo analizado.

n : Número total de buques que arriban en el período considerado generalmente de un año

$\lambda$  : Frecuencia promedio de llegadas (barcos/día)

$$\lambda = \frac{n}{d} \text{ siendo } d \text{ el número de jornadas laborables por año}$$

$t_b$ : Tiempo de servicio (días). Es el tiempo que transcurre entre iguales fases de operación de dos buques que, sucesiva e ininterrumpidamente ocupan el mismo atraque. Puede descomponerse en:

- a) Tiempo activo o tiempo neto empleado en la carga y descarga. Se obtiene dividiendo el tráfico unitario por el número de grúas disponibles en el atraque y por el rendimiento de las mismas.
- b) Tiempo de maniobra de atraque y desatraque.
- c) Tiempo improductivo: abrir y cerrar escotillas, embarque de palas o carretillas para trabajar en bodega, demoras en las grúas o en la autorización para iniciar la descarga, etc.
- d) Tiempo de marea: cuando, en un puerto de ría, hay que aguardar a una determinada fase de la marea para poder desatracar y navegar de salida. El tiempo de permanencia en el fondeadero aguardando marea para navegar de entrada no es un tiempo de servicio sino un tiempo de espera.

$T_b$ : Período de servicio - Es el valor medio de los tiempos de servicio (días/barco) *Si considero que para atender 200 barcos he demorado 300 días, luego  $T_b = 1,5$  días/barco*

$\mu$ : Intensidad de servicio (barcos/día). Es el número medio de buques servidos por unidad de tiempo en un atraque.

$$\mu = \frac{1}{T_b} = \frac{1}{1,5} = 0,66 \text{ barcos/día}$$

$\rho$ : Tasa de ocupación (adimensional). Mide la proporción de atraque ocupados. *Varía entre 0 y 1*

$$\rho = \frac{\lambda}{N\mu} = \frac{\lambda T_b}{N}$$

La tasa de ocupación es el parámetro fundamental de la teoría de colas, ya que la mayoría de los resultados no dependen de  $\mu$  ó  $\lambda$ , sino de su relación.

De la relación puede deducirse una expresión simplificada para determinar N

$$N = \frac{\lambda}{\rho\mu}$$

O sea conocidos o supuestos  $\lambda$  y  $\mu$  se puede calcular N asumiendo un valor razonable de  $\rho$ .

Esta fórmula puede aplicarse en una etapa preliminar de diseño considerando valores de  $\rho$  de acuerdo a la siguiente tabla

N	$\rho$
1	40
2	50
3	55
4	60
5	65
6 - 10	70

Los valores indicados de  $\rho$  corresponden considerando carga general.

El número de atraques ocupados es también una variable aleatoria, su media será:

$$n_b = \rho N = \lambda T_b$$

*$n_b =$  número medio de atraques ocupados*

tw: Tiempo de espera (días). Es el tiempo que media entre el momento del arribo al puerto y el momento en que comienza el movimiento hacia el puesto de atraque.

Tw: Período de espera - Es el valor medio de los tiempos de espera.

Al fondear uno ó más buques por encontrarse ocupados todos los atraques se forma una cola de espera y se demuestra que, por pequeña que sea la tasa de ocupación, nunca es nula la probabilidad de que la cola se forme, ni siquie

ra la de que exceda de un número arbitrario, por grande que sea (excepto en el caso trivial de que los intervalos de llegada y los tiempos de servicio sean exactamente constantes. Entonces el sistema es determinista y no aleatorio). Inversamente, mientras  $\rho < 1$ , tampoco es nula la posibilidad de inexistencia de cola, ni siquiera la de que todos los atraques estén de ocupados.

$\tau$ : Espera relativa (adimensional) es la relación entre tiempos de espera y de servicio.

$$\tau = \frac{T_w}{T_b}$$

La longitud media de la cola será:  $n_w = \lambda T_w = \tau n_b$

y el número medio de barcos en puerto, atracados y fondeados es:

$$n_p = n_b + n_w = \lambda(T_b + T_w) = \lambda T_b (1 + \tau) = \frac{\lambda}{\mu} (1 + \tau) = N\rho (1 + \tau)$$

admitiremos que la frecuencia de llegadas y la intensidad de servicio (y por lo tanto la tasa de ocupación  $\rho$ ) son constantes; que el régimen es permanente o en equilibrio estadístico, es decir, independiente de la situación inicial; que todos los atraques son idénticos, infinita la capacidad de la zona de fondeo y que los buques atracan según el orden de llegada al puerto. Finalmente, que el ritmo de llegadas no depende del número de barcos en el puerto.

## 5.2.2

Función de llegadas

Si describimos la llegada de buques al puerto vemos que lo que nos interesa es el número de eventos que se produce y carece de importancia el número de eventos que no se produce. Esto es, deseamos saber cuantos barcos llegaron en ese día y no nos importa cuantos barcos no llegaron.

Matemáticamente ese tipo de fenómenos se describe muy bien mediante la distribución de Poisson. Según la distribución de Poisson la probabilidad de que se produzcan  $n$  sucesos en un intervalo  $t$  es

$$P_n = \frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!}$$

siendo  $\lambda$  el número medio de buques que llegan durante el período de operación del puerto que puede adoptarse un año.

Se presenta un ejemplo basado en datos del puerto de Iskenderum (Turquía)

Nº de buques que llegan en el mismo día	Nº de días que llegan $n$ barcos observados	Probabilidad de arribo de buques		Nº de días que llegan $n$ barcos calculado
		Observada $P(n)=t/366$	Esperada $P(n)=\frac{\lambda^n e^{-\lambda}}{n!}$	
$n$	$t$ (días)			$F=366 \times P(n)$
0	73	0.1993	0.1755	64.24
1	111	0.3032	0.3054	111.77
2	86	0.2340	0.2657	97.25
3	55	0.1502	0.1540	56.36
4	24	0.0655	0.0670	24.52
5	10	0.0273	0.0233	8.53
6	7	0.0191	0.0068	2.47

En la columna 1 se indican el número de buques que pueden llegar en un mismo día al puerto; en la columna 2 se presenta el número de días en los cuales se presenta un arribo de  $n$  buques. Así, por ejemplo, 86 días en el mismo año

llegaron 2 buques. Multiplicando los valores de columna 1 por los de columna 2 y sumando nos da el número de buques que llegaron en el año (636) que dividido por el número de días (366) nos da  $\lambda = 1,74$ . La probabilidad calculada para un valor medio de 1,74 se calcula mediante la fórmula de Poisson. La comparación de los valores de la columna 3 nos da la bondad de la distribución elegida.

En resumen fijado el valor de  $\lambda$  podemos calcular la distribución de llegada de buques.

En este caso existe una variabilidad en los arriuos por lo que la distribución elegida es razonablemente buena. Para el caso que se presentan llegadas con una cierta planificación pueden adoptarse otras distribuciones del tipo Erlang-2.

### 5.2.3

#### Función de servicios

Cuando un buque atraca al muelle y efectúa la operación de descarga y carga y luego desatraca llamamos tiempo de servicio ( $t_b$ ) al tiempo que transcurre entre iguales fases de operación de dos buques.

Sin duda que los tiempos de servicio individuales de cada buque serán diferentes entre sí debido al volumen de carga que transporte cada uno y a una serie de aspectos aleatorios relacionados con el utilaje, el personal, etc.

Nos interesa conocer las funciones de distribución que representan los tiempos de servicio al buque. Se nos presentan casos bien definidos en los cuales los tiempos de servicio individuales son muy diferentes al tiempo de servicio medio. En esos casos resulta apropiado una distribución del tipo exponencial negativa para las probabilidades acumuladas.

Cuando por el contrario los tiempos de servicio individuales son muy parecidos al tiempo de servicio medio la función de distribución se parece más a una función escalón

con el salto en el valor correspondiente al valor medio.

El primer caso corresponde aproximadamente al caso de mercadería general y el segundo a los buques con calendario fijo tipo ferries.

Para otras mercaderías se producen situaciones intermedias. La función de distribución denominada Erlang-k nos proporciona una buena alternativa para considerar situaciones de este tipo.

Esta función responde a la siguiente ecuación:

$$P_0(t) = e^{-k\mu t} \times \sum_{n=0}^{k-1} \frac{(k\mu t)^n}{n!}$$

donde:

$P_0(t)$  = la probabilidad de que el tiempo de servicio exceda  $t$

$\mu$  = ritmo de servicio medio (buques/día)

$k$  = variable de Erlang, número entero positivo

Para  $k=1$  la función se expresa como:

$$P_1(t) = e^{-\mu t}$$

que no es más que una función exponencial negativa.

Para  $k=2$

$$P_2(t) = e^{-2\mu t} (1 + 2\mu t)$$

Para  $k=3$

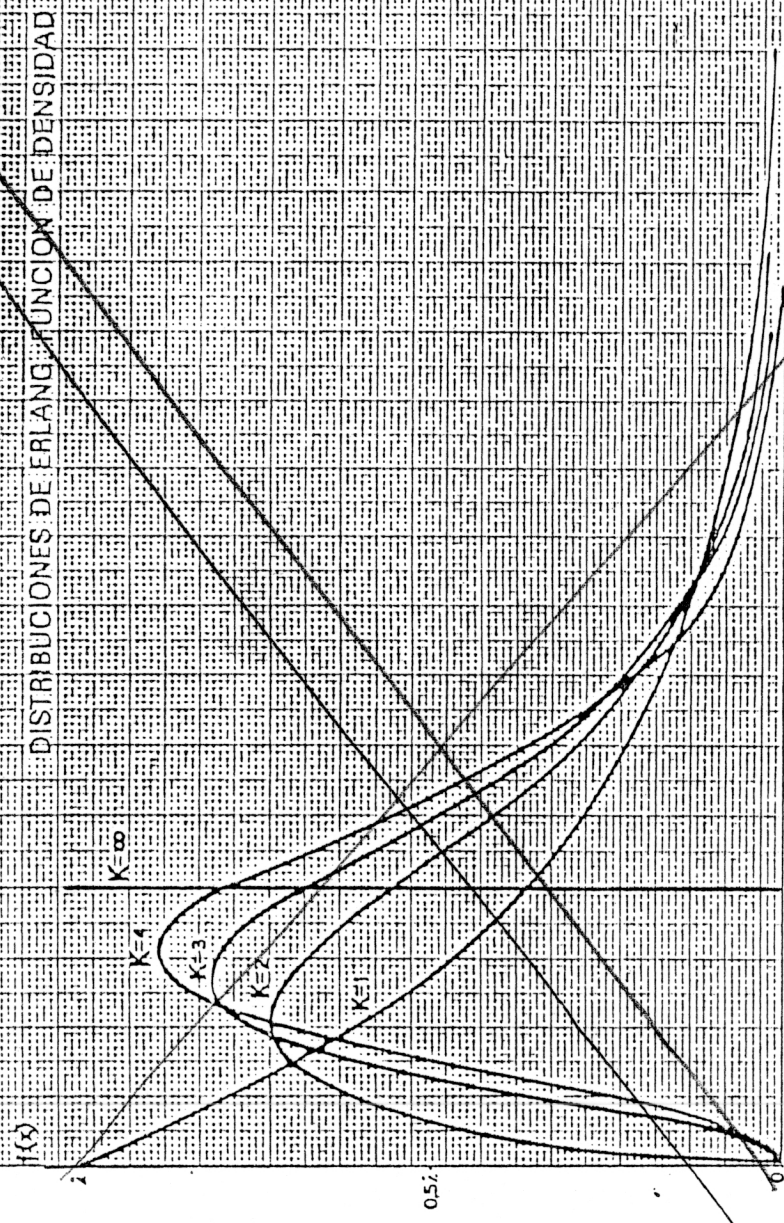
$$P_3(t) = e^{-3\mu t} \left( 1 + 3\mu t + \frac{(3\mu t)^2}{2} \right)$$

En la figura se muestra la forma que toma la función de distribución de Erlang para valores de  $k$  entre 1 y  $\infty$ .

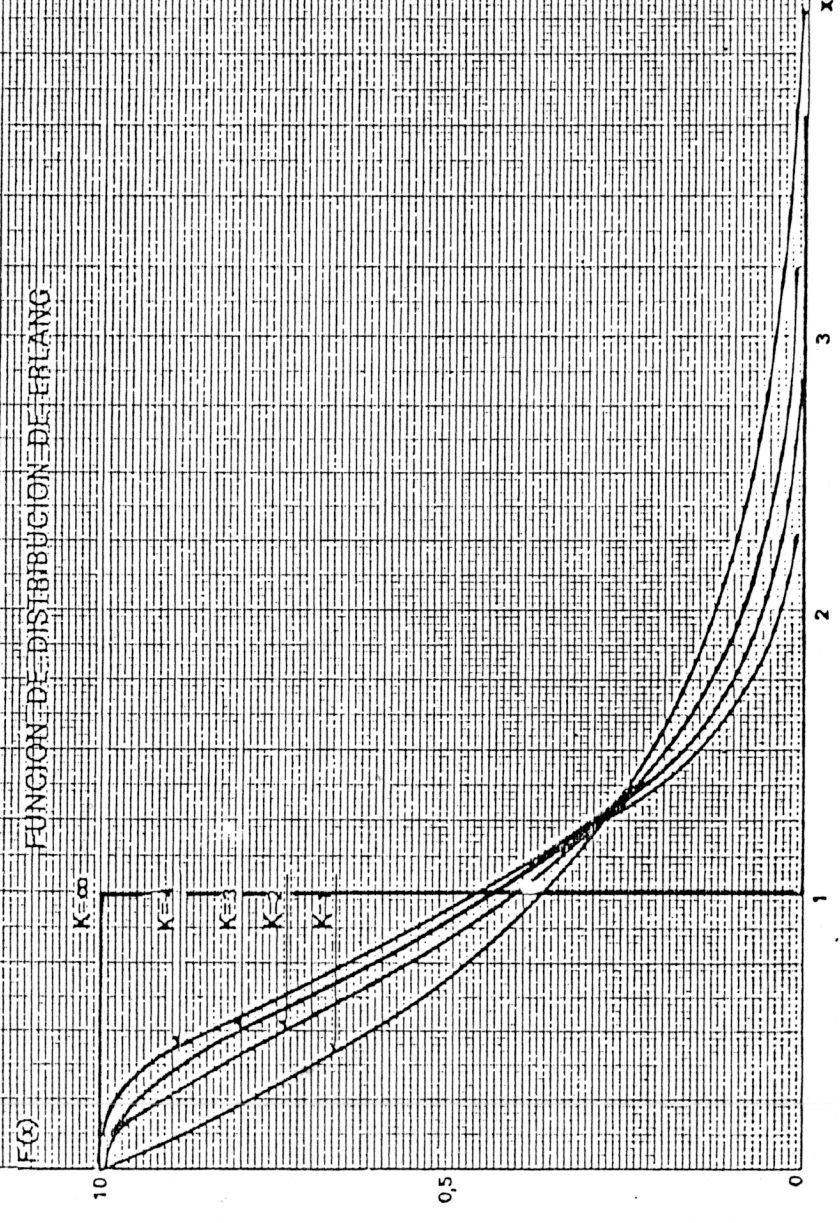
En la figura se presenta una comparación de las distribuciones Erlang 1 y Erlang 2 para un tiempo medio de servicio de cinco días.

Hay otras funciones de distribución que pueden utilizarse como representativas de la función de servicios pero las funciones de Erlang son las más difundidas.

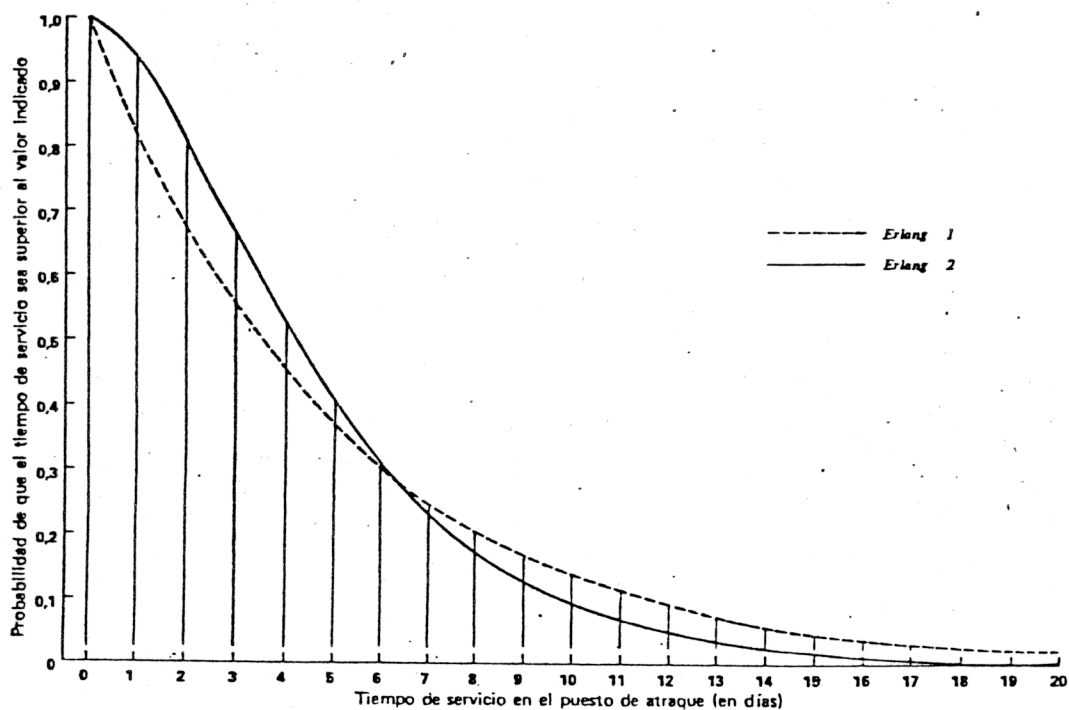
DISTRIBUCIONES DE ERLANG Y FUNCION DE DENSIDAD



FUNCION DE DISTRIBUCION DE ERLANG



Comparación de las distribuciones Erlang 1 y Erlang 2 para un tiempo medio de servicio de cinco días



Conocida la función de arribos de los buques y la función de servicios en el muelle nos interesa conocer cuanto deberá esperar un buque para disponer de muelle y cuanto tiempo total estará en el puerto.

Denominamos tiempo de espera,  $T_w$ , al tiempo que transcurre entre que el buque llega a la cola y el momento que le asignan muelle, y tiempo de servicio  $T_b$ , al que transcurre entre que le asignan muelle y el momento en que está listo para zarpar. Tiempo total es la suma de ambos,  $T_t = T_w + T_b$ .

Se utilizan diversas formas de los tiempos en el puerto como indicadores de funcionamiento. Los indicadores usuales son:

- Tiempo medio de espera.
- Tiempo total en puerto.
- Espera relativa:  $\tau = \frac{T_w}{T_b}$

Nosotros analizaremos el problema considerando a  $\tau$  como indicador.

Desde el punto de vista matemático es un problema complejo analizar un sistema como el propuesto con N puestos de atraque.

El sistema se denomina de acuerdo a la función de entrada, a la función de servicios y al número de puestos de atraque.

Así un sistema  $M/E_k/N$  significa arribos según Poisson, servicios según Erlang-K y N puestos de atraque, igualmente un sistema puede ser  $E2/E2/4$ .

Hay tablas y gráficos que ayudan a resolver problemas de este tipo.

En la tabla se dan los valores de  $\tau$  en función de  $\rho$  y

de N para un sistema M/E1/15. Se presentan tablas para M/E2/30 y E2/E2/8.

Ha sido muy difundido el uso del gráfico de Metham bas do en M/E1/20 superpuesto con M/E $\infty$ /20

Relación entre el tiempo de espera y el tiempo de servicio

	Número de puestos de atraque															
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	
0,050	0,053	0,003	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,050
0,100	0,111	0,010	0,001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,100
0,150	0,176	0,023	0,004	0,001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,150
0,200	0,250	0,042	0,010	0,003	0,001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,200
0,250	0,333	0,067	0,020	0,007	0,003	0,001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,250
0,300	0,429	0,099	0,033	0,013	0,006	0,003	0,001	0,001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,300
0,350	0,538	0,140	0,053	0,023	0,011	0,006	0,003	0,002	0,001	0,001	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,350
0,400	0,667	0,190	0,078	0,038	0,020	0,011	0,006	0,004	0,002	0,001	0,001	0,001	0,0	0,0	0,0	0,400
0,450	0,818	0,254	0,113	0,058	0,033	0,020	0,012	0,008	0,005	0,003	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,450
0,500	1,000	0,333	0,158	0,087	0,052	0,033	0,022	0,015	0,010	0,007	0,005	0,004	0,003	0,002	0,002	0,500
0,550	1,222	0,434	0,217	0,126	0,079	0,053	0,037	0,026	0,019	0,014	0,010	0,008	0,006	0,005	0,004	0,550
0,575	1,353	0,494	0,254	0,151	0,097	0,066	0,047	0,034	0,025	0,019	0,014	0,011	0,009	0,007	0,005	0,575
0,600	1,500	0,562	0,296	0,179	0,118	0,082	0,059	0,044	0,033	0,025	0,020	0,016	0,012	0,010	0,008	0,600
0,625	1,667	0,641	0,344	0,213	0,143	0,101	0,074	0,056	0,043	0,034	0,027	0,021	0,017	0,014	0,012	0,625
0,650	1,857	0,732	0,401	0,253	0,173	0,124	0,093	0,071	0,055	0,044	0,035	0,029	0,024	0,020	0,016	0,650
0,675	2,007	0,837	0,468	0,301	0,209	0,152	0,115	0,090	0,071	0,057	0,047	0,038	0,032	0,027	0,023	0,675
0,700	2,333	0,961	0,547	0,357	0,252	0,187	0,143	0,113	0,091	0,074	0,061	0,051	0,043	0,037	0,031	0,700
0,725	2,636	1,108	0,642	0,426	0,305	0,229	0,178	0,142	0,115	0,095	0,080	0,067	0,058	0,049	0,043	0,725
0,750	3,000	1,286	0,757	0,509	0,369	0,281	0,221	0,178	0,147	0,123	0,104	0,089	0,076	0,066	0,058	0,750
0,775	3,444	1,504	0,899	0,614	0,451	0,347	0,276	0,225	0,187	0,158	0,135	0,117	0,102	0,089	0,079	0,775
0,800	4,000	1,778	1,079	0,746	0,554	0,431	0,347	0,286	0,240	0,205	0,176	0,154	0,135	0,119	0,106	0,800
0,825	4,714	2,131	1,311	0,917	0,689	0,543	0,441	0,367	0,311	0,267	0,232	0,204	0,181	0,161	0,145	0,825
0,850	5,667	2,604	1,623	1,149	0,873	0,693	0,569	0,477	0,408	0,353	0,310	0,274	0,245	0,220	0,199	0,850
0,875	7,000	3,267	2,062	1,476	1,132	0,908	0,751	0,635	0,547	0,478	0,422	0,376	0,338	0,306	0,278	0,875
0,900	9,000	4,263	2,724	1,969	1,525	1,234	1,028	0,877	0,761	0,669	0,594	0,533	0,482	0,439	0,402	0,900
0,925	12,333	5,926	3,829	2,796	2,185	1,782	1,497	1,285	1,122	0,993	0,888	0,802	0,729	0,668	0,614	0,925
0,950	19,000	9,256	6,047	4,457	3,511	2,885	2,441	2,110	1,855	1,651	1,486	1,348	1,233	1,134	1,049	0,950
0,975	38,999	19,252	12,708	9,451	7,504	6,211	5,291	4,602	4,068	3,642	3,295	3,006	2,762	2,553	2,373	0,975

Fuentes: Cálculos efectuados por la secretaría de la UNCTAD según la fórmula de la teoría de las colas (distribución de Poisson para las llegadas de buques y distribución exponencial para los tiempos de servicio). Se supuso que los puestos de atraque se asignaban por orden riguroso de llegada de los buques.

$$M | E_1 | N$$

$$N = 1 \text{ a } 15$$

Tiempos medios de espera de los buques en una cola  $M/E_2/M$   
(En unidades de tiempo medio de servicio)

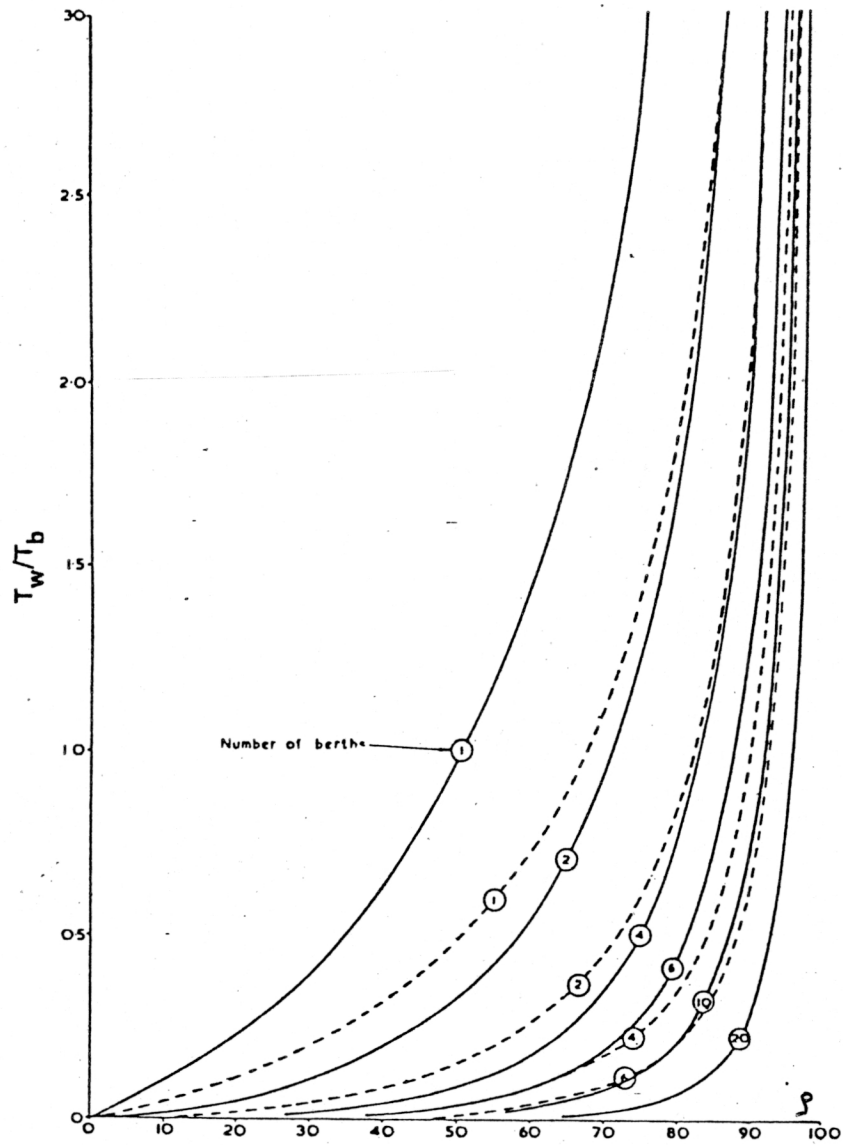
A. — PARA 1 A 15 PUESTOS DE ATRAQUE

Utilización	Número de puestos de atraque														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
0,10	0,08	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,15	0,13	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,20	0,19	0,03	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,25	0,25	0,05	0,02	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,30	0,32	0,08	0,03	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,35	0,40	0,11	0,04	0,02	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,40	0,50	0,15	0,06	0,03	0,02	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0
0,45	0,60	0,20	0,08	0,05	0,03	0,02	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0
0,50	0,75	0,26	0,12	0,07	0,04	0,03	0,02	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0	0
0,55	0,91	0,33	0,16	0,10	0,06	0,04	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0	0	0
0,60	1,13	0,43	0,23	0,14	0,09	0,06	0,05	0,03	0,03	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
0,65	1,38	0,55	0,30	0,19	0,12	0,09	0,07	0,05	0,04	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02
0,70	1,75	0,73	0,42	0,27	0,19	0,14	0,11	0,09	0,07	0,06	0,05	0,04	0,03	0,03	0,03
0,75	2,22	0,96	0,59	0,39	0,28	0,21	0,17	0,14	0,12	0,10	0,08	0,07	0,06	0,05	0,05
0,80	3,00	1,34	0,82	0,57	0,42	0,33	0,27	0,22	0,18	0,16	0,13	0,11	0,10	0,09	0,08
0,85	4,50	2,00	1,34	0,90	0,70	0,54	0,46	0,39	0,34	0,30	0,26	0,23	0,20	0,18	0,16
0,90	6,75	3,14	2,01	1,45	1,12	0,91	0,76	0,65	0,56	0,50	0,45	0,40	0,36	0,33	0,30

B. — PARA 16 A 30 PUESTOS DE ATRAQUE

Utilización	Número de puestos de atraque														
	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
0,50	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,55	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,60	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,65	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0,70	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0	0	0
0,75	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,01
0,80	0,07	0,07	0,06	0,05	0,04	0,04	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,02
0,85	0,14	0,13	0,12	0,11	0,10	0,09	0,09	0,08	0,07	0,07	0,06	0,06	0,06	0,05	0,05
0,90	0,28	0,26	0,24	0,22	0,21	0,19	0,18	0,17	0,16	0,15	0,14	0,14	0,13	0,12	0,12
0,95	0,74	0,69	0,65	0,61	0,58	0,55	0,51	0,49	0,46	0,43	0,41	0,40	0,38	0,37	0,36

Fuente: Cálculos de la secretaria de la UNCTAD.



Línea llena:  $K = 1$   
 Línea quebrada:  $K = 00$

Relación entre  $\bar{t}$  y  $p$  para diferente número de puestos de atraque.

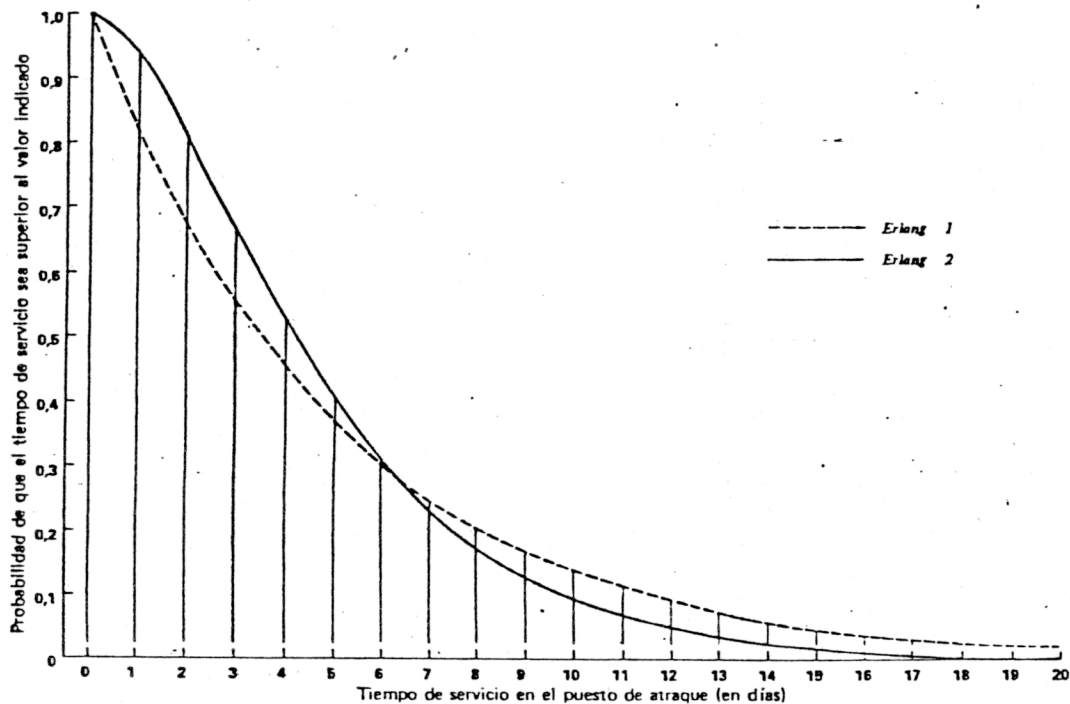
Tiempos medios de espera de los buques en una celda  $E_2/E_2/m$   
(En unidades de tiempo medio de servicio)

Utilización	Número de puestos de buques							
	1	2	3	4	5	6	7	8
0,10	0,02	0	0	0	0	0	0	0
0,15	0,03	0,01	0	0	0	0	0	0
0,20	0,06	0,01	0	0	0	0	0	0
0,25	0,09	0,02	0,01	0	0	0	0	0
0,30	0,13	0,02	0,01	0	0	0	0	0
0,35	0,17	0,03	0,02	0,01	0	0	0	0
0,40	0,24	0,06	0,02	0,01	0	0	0	0
0,45	0,30	0,09	0,04	0,02	0,01	0,01	0	0
0,50	0,39	0,12	0,05	0,03	0,01	0,01	0,01	0
0,55	0,49	0,16	0,07	0,04	0,02	0,02	0,02	0,01
0,60	0,63	0,22	0,11	0,06	0,04	0,03	0,02	0,01
0,65	0,80	0,30	0,16	0,09	0,06	0,05	0,03	0,02
0,70	1,04	0,41	0,23	0,14	0,10	0,07	0,05	0,04
0,75	1,38	0,58	0,32	0,21	0,14	0,11	0,08	0,07
0,80	1,87	0,83	0,46	0,33	0,23	0,19	0,14	0,12
0,85	2,80	1,30	0,75	0,55	0,39	0,34	0,26	0,22
0,90	4,36	2,00	1,20	0,92	0,65	0,57	0,44	0,40

Fuente: E. Paht, *Queueing Theory in OR*, Londres, Butterworths, 1972, pág. 155.

GRÁFICO IV

Comparación de las distribuciones Erlang 1 y Erlang 2 para un tiempo medio de servicio de cinco días



$j = n_g \times j_g \times \eta$  donde  $n_g =$  número de grúas  
 $j_g =$  rendimiento teórico de una grúa  
 $\eta =$  factor que tiene en cuenta la disminución por roturas e interacción entre grúas, etc

5.2.5

Concepto de capacidad

Definimos como capacidad del muelle, Q, a la cantidad de mercadería que puede pasar en un lapso de tiempo dado, usualmente un año.

La capacidad se calcula como:

$$Q = \rho N j' d$$

donde:

$\rho =$  factor de ocupación

$N =$  Número de puestos de atraque

$j' = j \times \frac{T_{ba}}{T_b} =$  rendimiento efectivo del muelle

$j =$  rendimiento teórico (ton/día)

$T_{ba} =$  tiempo activo

$T_b =$  tiempo de servicio =  $T_{ba} + T_{bm}$

$d =$  número de días laborables.

Vemos que dada una determinada capacidad del puerto la podemos incrementar siguiendo diversas vías de acción.

Podemos aumentar el número de días laborables; reducir el tiempo de servicio muerto,  $T_{bm}$ , con lo que reduzco el  $T_b$  y aumento  $j'$ ; aumentar  $j$ ; aumentar  $N$ ; aumentar  $\rho$ .

Cada una de las posibilidades indicadas significan costos adicionales como contrapartida al aumento de movimiento.

En especial el aumento de  $N$ , o sea la construcción de nuevos puestos de atraque implica la inversión necesaria para ello y la demora en tener el resultado. El aumento de  $\rho$  implica un aumento de  $\tau$  con el consiguiente aumento en los costos del buque.

La diferencia en este caso estriba en quien afronta los gastos adicionales resultantes.

Desde el punto de vista estricto debería adoptarse la solución que haga mínimos los costos totales pero no es siempre el caso.

## 5.2.6

Ejemplos de aplicaciónProblema N° 1

Datos:                    Mercadería:    Carga general

Movimiento total :    900.000 t/año

N                                :    6

Movimiento medio de mercadería por puesto: 150.000t/a

Productividad Neta :    600 t/día

d                                :    250 días

$\rho$                                 :    0,75

$T_b$                                 :    4 días

Carga media                :    2400 ton

$T_w$                                 :    1,1 días

Tiempo total                :     $T_b + T_w = 5,1$  días

Pregunta: La previsión indica que el tráfico aumentará a 1.050.000 ton/año dentro de dos años. Como se puede hacer frente a este aumento?

a) Mediante la construcción de nuevos puestos de atraque

Dados los datos adoptamos un sistema M/E1/7

Movimiento total: 1.050.000 t/año

N                                :    7

Movimiento por puesto: 150.000 t/año (como antes)

Adoptamos  $\rho$  : 0.75 (como antes)

Obtenemos de tabla  $\tau$ : 0.221

$T_b$  : 4 días (como antes)

$T_w$  :  $\tau T_b = 0.88$  días

Tiempo total de permanencia en puerto:  $T_t = 4,88$  días

O sea mi nuevo sistema podría mover más carga y con una espera menor para los buques en contrapartida a una inversión en un nuevo sitio.

b) Mediante un aumento en la capacidad de los sitios existentes.

Movimiento total: 1.050.000 t/año

N                                :    6

Movimiento por puesto: 175.000 t/año

d : 250 días

Productividad:  $j'$ : 700 t/día

$T_b$ :  $2400/700 = 3,43$  días

De tablas  $\tau$ : 0.281

$T_w$ : 0.96 días

$T_t$ : 4,39 días

Si mejoro mi productividad efectiva puedo cubrir el aumento de movimiento y disminuir el  $T_t$ . El aumento de  $j'$  lo puedo conseguir con un aumento de  $j$  ó con una disminución de  $T_{bm}$ .

### Problema N° 2

Comparar la capacidad de carga de un muelle de carga general con 1 y 2 puestos de atraque.

$$\tau = 0,5$$

$$N = 1 \text{ y } 2$$

$$Q_1 = \rho N j' d = 0.33 \times 1 \times j' \times d$$

$$Q_2 = \quad \quad = 0.58 \times 2 \times j' \times d$$

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{1.16}{0.33} = 3.51$$

Lo que implica que la capacidad de carga de un muelle con dos atraques es más de tres veces superior a un muelle con un atraque. Este resultado sorprendente surge de la interacción compleja que se produce entre la función de arribos y la función de servicios a medida que aumenta  $N$  que permite para igual  $T_t$  mayores factores de ocupación.

Si efectuamos la misma comparación por medio del método del rendimiento encontramos que  $Q_2 = 2Q_1$ , siendo una de las deficiencias serias del método.

### Problema N° 3

Determinar cual es el factor de ocupación para un muelle con 1, 2, 4 y 20 puestos de atraque para valores de  $\tau$

iguales a 0,5 y 1,0.

Para  $N = 1$

$$\tau = 0,5 \quad \rho = 0,35$$

$$\tau = 1,0 \quad \rho = 0,50$$

Para  $N = 2$

$$\tau = 0,5 \quad \rho = 0,58$$

$$\tau = 1,0 \quad \rho = 0,70$$

Para  $N = 4$

$$\tau = 0,5 \quad \rho = 0,74$$

$$\tau = 1,0 \quad \rho = 0,82$$

Para  $N = 20$

$$\tau = 0,5 \quad \rho = 0,93$$

$$\tau = 1,0 \quad \rho = 0,96$$

Este resultado nos muestra que a medida que aumenta el número de puestos de atraque la capacidad aumenta mucho gracias al aumento no solo del número de puestos de atraque sino también del aumento de  $\rho$  para igual  $\tau$ .

Además nos muestra que operar el sistema con altos valores de  $\rho$  implica un riesgo potencial muy grande ya que el mínimo incremento de  $\rho$  nos produce importantes incrementos de  $\tau$ .

Así para duplicar  $T_w$  en el sistema con un puesto de atraque necesito aumentar  $\rho$  de 0.35 a 0.50 mientras que el mismo caso con 20 puestos de atraque con solo pasar de 0,93 a 0,96 ya tengo graves problemas de cola. El aumento de  $\rho$  en esos porcentajes se produce por cualquier factor que aumente  $T_b$  como pueden ser conflictos laborales. Por lo tanto hay que evitar estar cerca de los valores de  $\rho$  que producen esta situación.

#### Problema N° 4

Calcular la variación de los costos de permanencia en puerto de los buques debido a una variación en el tiem-

tiempo de servicio.

Datos: Mercadería: Cereales

Vamos a considerar un sistema M/E1/3 a título de ejemplo aunque siendo un terminal especializado con llegadas programadas es más adecuado un sistema E2/E2/3 (ver problema N° 5)

N° de sitios (N) = 3

$T_b = 3,4$  días/buque

d = 330 días

número de buques (n) = 260

Calculamos  $\rho = \frac{260 \times 3,4}{3 \times 330} = 0,89$

De tablas  $\tau = 2,72$

Costo medio de permanencia en puerto ( $\bar{c}$ ) = 9100 U\$S/día.buque  
Variación del tiempo de servicio ( $\Delta T_b$ ) = -0.4 día/buque

a) Situación original

$T_w = \tau T_b = 2,72 \times 3,4 = 9,25$  días/buque

$T_t = T_w + T_b = 9,25 + 3,4 = 12,6$  días/buque

El costo total de permanencia en puerto es

$C = n \times T_t \times \bar{c} = 260 \times 12,6 \times 9.100 = \text{U\$S } 29,8 \times 10^6$

b) Situación modificada

El nuevo tiempo medio de servicio es

$T'_b = T_b + \Delta T_b = 3,4 - 0,4 = 3,0$  días/buque

$\rho = \frac{260 \times 3,0}{3 \times 330} = 0,79$

$T'_w = \tau T'_b = 1,08 \times 3,0 = 3,24$  días/buque

$T'_t = 3,0 + 3,24 = 6,24$  días/buque

$C' = 260 \times 6,24 \times 9.100 = \text{U\$S } 14,8 \times 10^6$

El ahorro será de  $\text{U\$S } 15 \times 10^6$ , un 50% al disminuir

$T_b$  un 10%

Problema N° 5

Repetir el cálculo del problema N° 4 para un sistema E2/E2/n

a) Situación original

Mercadería: Cereales

$$\rho = 0,89$$

$$\text{de tablas } \tau = 1,20$$

$$T_w = 1,20 \times 3,4 = 4,08 \text{ días/buque}$$

$$T_t = 3,4 + 4,08 = 7,5 \text{ días buque}$$

$$C = 260 \times 7,5 \times 9100 = \text{U\$S } 17,7 \times 10^6$$

b) Situación modificada

$$T'_b = 3,0 \text{ días/buque}$$

$$\rho = 0,79$$

$$\tau = 0,46$$

$$T'_w = 0,46 \times 3,0 = 1,38 \text{ días/buque}$$

$$T'_t = 3,0 + 1,38 = 4,4 \text{ días/buque}$$

$$C' = 260 \times 4,4 \times 9100 = \text{U\$S } 10,4 \times 10^6$$

El ahorro será de  $\text{U\$S } 7,3 \times 10^6$  (40%)

Si comparamos los resultados obtenidos con los del ejemplo 4 para la situación original vemos los efectos positivos de la programación de arribos y homogeneización de los tiempos de servicio. Esto puede lograrse en algunos casos mediante medidas no estructurales tales como regulaciones operativas.

La teoría de colas presenta una serie de limitaciones que pueden salvarse a través de un modelo de simulación cuando el problema en estudio es lo suficientemente importante como para afrontar los gastos que representa.

La simulación se utiliza cuando se presentan las siguientes situaciones:

- La función de arribos no corresponde a una distribución de Poisson.
- Los buques que llegan no pueden ser atracados en cualquier sitio.
- Se da prioridad de atraque a buques, por ejemplo, en muelles multipropósito, por la eslora,
- Se efectúa la descarga del buque tanto por el frente del muelle como por alije.
- Es necesario por las características operativas del puerto incluir un análisis de las facilidades existentes para almacenamiento, el utilaje o el transporte interior.

Se han desarrollado numerosos modelos de simulación portuaria desde esquemas muy simples hasta versiones muy complejas.

En principio en los modelos se simulan bien las siguientes variables estocásticas.

- Tiempos entre arribos sucesivos de barcos.
- Tamaño del buque
- Volumen de carga cargada o descargada.
- Disponibilidad de grúas y utilaje
- Días y horas de trabajo
- Entrada y salida de la carga del almacenamiento
- Interrupciones provocadas por huelgas, reparaciones, o condiciones meteorológicas.

Se transcribe un artículo publicado en la revista Desarrollo Nacional de Enero 1984 escrito por el Ing. A.T. Zador que describe un buen ejemplo de simulación portuaria.

La simulación es un valioso recurso para planificar sistemas portuarios y de manipulación de materiales a granel. Durante los últimos diez años, a medida que los sistemas se hacían más complejos y aumentaban sus rendimientos, la técnica pasó a ser reconocida como instrumento necesario en el análisis ingenieril.

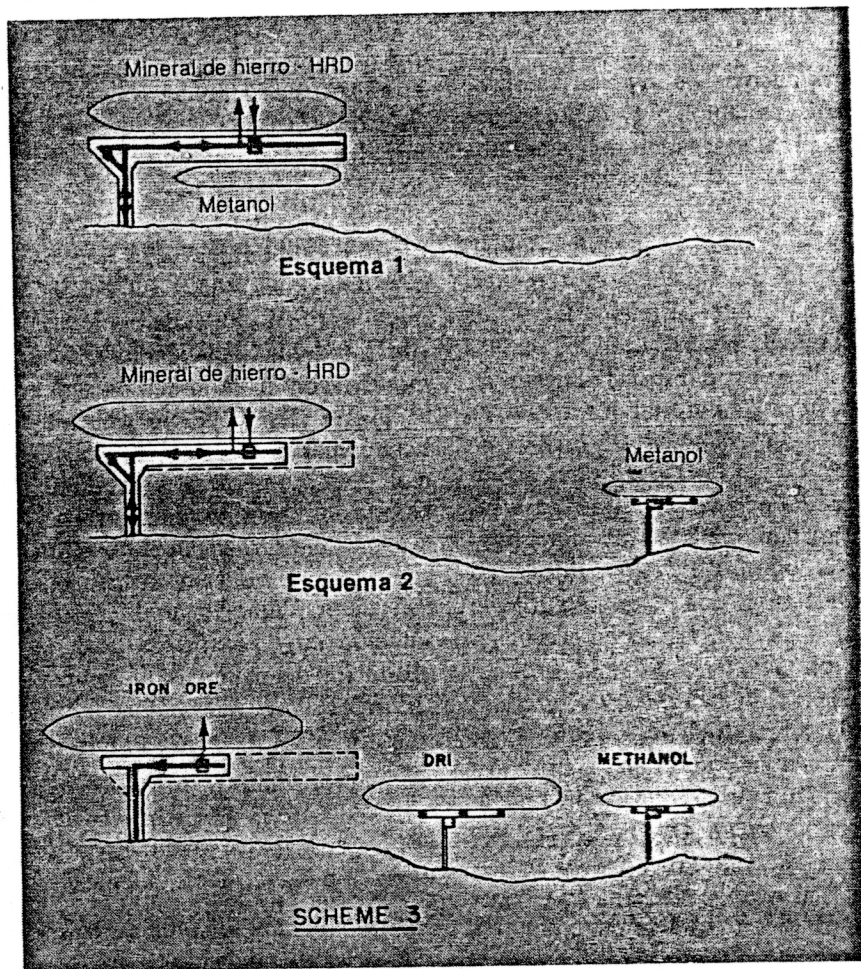
La simulación de computadora puede definir e integrar rápidamente los elementos del sistema propuesto, para máximo rendimiento total y mínimo capital y costo de operación. El método de simulación se usa para sistemas de manipulación a granel en acerías, centrales eléctricas, plantas de elaboración y terminales de carga y descarga, así como puertos y sistemas de transporte completos.

Los programas especiales de computadora para la planificación portuaria simulan actividades derivadas, dando estadísticas de buques y fondeaderos así como datos relacionados con la operación de sistemas de manipulación y almacenaje de materiales.

#### EJEMPLO DE SIMULACION DE PUERTO

Había comenzado ya la construcción de una instalación portuaria cuando los dueños comenzaron a preocuparse por posibles problemas. Con el fin de cuantificar los problemas y evaluar las posibles soluciones, se desarrolló un modelo de simulación de computadora que representaba el funcionamiento de un puerto multifuncional. El complejo portuario sirve a una planta de hierro de reducción (HRD) y una planta de metanol. Para la planta de HRD se recibía mineral de hierro y hierro peletizado y se exportaba el producto final (HRD). Para la planta de metanol se exportará metanol. El objetivo de la simulación de computadora era identificar el efecto de las diversas restricciones de operación, analizar el funcionamiento del sistema en construcción y, si fuera necesario, evaluar disposiciones alternativas.

Se investigaron diversas alternativas además del plan original. Se analizaron minuciosamente los dos esquemas más viables. El diagrama ilustra las tres disposiciones



Comparación de disposiciones portuarias.

con los navieros por cargos de estadía y despacho.

#### RECOMENDACIONES

Se recomendaron dos muelles separados, una instalación combinada para descarga de mineral y carga de HRD, y una instalación separada para la carga de metanol. Las recomendaciones se basaron en el costo del tiempo ahorrado por los buques, y también en los costos de construcción. El análisis de costos de capital indicó que con algunas modificaciones en el muelle de mineral se podían construir dos instalaciones separadas por aproximadamente el mismo costo y en el mismo tiempo que un gran sistema trifuncional, siempre que la construcción se efectuara sin interrupción.

#### IMPLEMENTACION

La simulación, que incluía investigaciones en el campo y el establecimiento de criterios de diseño, se realizó en dos meses y medio. Tres semanas más tarde se aprobó un estudio de ingeniería para confirmar el costo de construcción y la viabilidad del rediseño basado en el esquema 2, que se efectuó en mes y medio. Los dueños decidieron autorizar renegociaciones y rediseñar tres semanas después.

Las renegociaciones con el contratista y los proveedores de equipo y un esfuerzo total de rediseño del muelle principal, seguidas por el diseño del muelle de metanol, fueron iniciadas al mismo tiempo. El objetivo fue mantenerse por delante del contratista y usar todo el material de construcción existente en el lugar. El rediseño del muelle de mineral y el diseño del nuevo muelle de metanol se completaron en cuatro meses y medio, con la ayuda de la computadora de la oficina principal. El tiempo total desde el comienzo de la simulación hasta la terminación del rediseño fue de diez meses, incluyendo el tiempo que el dueño tardó en tomar la decisión. Conviene señalar que sin la competente y decisiva gerencia del dueño este proyecto no podría haberse logrado en tan breve tiempo.

hizo posible realizar la simulación en un corto plazo y a bajo costo. El método modular es también una solución muy económica para la utilización de la computadora.

#### CONDICIONES DE OPERACION

Los principales parámetros de operación fueron los siguientes:

- \* Rendimientos anuales de material para mineral de hierro peletizado, HRD, finos y metanol.
- \* Distribución de las flotas que consistía en una flota separada para cada producto. Se analizó la sensibilidad del puerto para los tamaños de buques empleando una distribución de flota MINI-MAX. La flota MINI representaba un número menor de buques, pero de un tamaño considerablemente mayor para llevar el tonelaje requerido. La flota MAXI representaba un número mayor de buques menores, que llevan el mismo tonelaje anual. Este enfoque define los dos límites de operación. Se espera que las condiciones de operación reales estén entre estos límites.
- \* Se usaron diversas velocidades de manipulación para cada producto, según fuera para buques menores o mayores. Para probar la sensibilidad del puerto para la velocidad de descarga del mineral, se emplearon dos velocidades, una alta y una baja. Las operaciones de manipulación de buques incorporaban diversos módulos que representaban condiciones poco comunes, como inspección de cubiertas de escotillas y bodegas, neutralización de nitrógeno y restricciones de espacio de operación para carga peligrosa.
- \* Disponibilidad de descargador/cargador de buques y otras máquinas. Se evaluaron tres diferentes escenarios, presentando cada uno un nivel diferente de averías y mantenimiento de equipo, tales como "medio", "mejorado" y "excelente".
- \* Prioridad de fondeo y restricciones diurnas. Estas representaron las condiciones físicas del muelle multivalente y los problemas de navegación relacionados

distintas.

El esquema 1, el plan original, tiene un muelle que presta tres servicios distintos. En la cara exterior del muelle se descargan los buques que llegan con mineral y hierro peletizado. El material descargado se guardará y se procesará finalmente en HRD. El HRD será almacenado y trasladado de nuevo a la cara exterior del muelle donde será cargado en buques. La carga y descarga se efectúa con una máquina de doble fin que trabaja en el muelle. El mineral fino, que es un producto derivado del proceso de reducción directa del mineral, se carga también en buques en la cara exterior. En la cara interior del muelle se carga metanol en buques con sistema de conductos y brazos de carga. Las medidas de espacio y seguridad dictan que el metanol sea manejado sólo cuando no tenga lugar ninguna otra operación.

El esquema 2, se caracteriza por dos muelles con una instalación de carga de metanol aparte. La descarga de mineral de hierro y la carga de HRD se efectúan en un muelle más pequeño y económico de doble fin. El metanol se manipula en un fondeadero aparte. En esta instalación el metanol puede manejarse simultáneamente con la descarga del mineral o la carga de HRD.

En el esquema 3, tres muelles confieren fondeaderos independientes, uno para la descarga de mineral y hierro peletizado, otro para la carga de HRD y otro para la carga de metanol. Las tres operaciones pueden realizarse simultáneamente.

El análisis de simulación completo de los diversos esquemas de operación requirió más de 50 simulaciones de computadora. Con el fin de acumular suficientes datos estadísticos se simuló la operación de cada esquema con sus condiciones específicas para diez años consecutivos. El modelo fue construido sobre una base "modular". La generación de buques, recepción y determinadas restricciones de operación son "módulos" independientes. Se modificaron los módulos para que reflejasen las condiciones cambiantes particulares a cada esquema. Esta construcción modular, basada en subrutinas demostradas,

con los navieros por cargos de estadía y despacho.

#### RECOMENDACIONES

Se recomendaron dos muelles separados, una instalación combinada para descarga de mineral y carga de HRD, y una instalación separada para la carga de metanol. Las recomendaciones se basaron en el costo del tiempo ahorrado por los buques, y también en los costos de construcción. El análisis de costos de capital indicó que con algunas modificaciones en el muelle de mineral se podían construir dos instalaciones separadas por aproximadamente el mismo costo y en el mismo tiempo que un gran sistema trifuncional, siempre que la construcción se efectuara sin interrupción.

#### IMPLEMENTACION

La simulación, que incluía investigaciones en el campo y el establecimiento de criterios de diseño, se realizó en dos meses y medio. Tres semanas más tarde se aprobó un estudio de ingeniería para confirmar el costo de construcción y la viabilidad del rediseño basado en el esquema 2, que se efectuó en mes y medio. Los dueños decidieron autorizar renegociaciones y rediseñar tres semanas después.

Las renegociaciones con el contratista y los proveedores de equipo y un esfuerzo total de rediseño del muelle principal, seguidas por el diseño del muelle de metanol, fueron iniciadas al mismo tiempo. El objetivo fue mantenerse por delante del contratista y usar todo el material de construcción existente en el lugar. El rediseño del muelle de mineral y el diseño del nuevo muelle de metanol se completaron en cuatro meses y medio, con la ayuda de la computadora de la oficina principal. El tiempo total desde el comienzo de la simulación hasta la terminación del rediseño fue de diez meses, incluyendo el tiempo que el dueño tardó en tomar la decisión. Conviene señalar que sin la competente y decisiva gerencia del dueño este proyecto no podría haberse logrado en tan breve tiempo.

## ANALISIS DE SENSIBILIDAD

El análisis de sensibilidad sobre el efecto de las variadas condiciones de operación produjo las conclusiones siguientes:

- \* Los factores que rebasan el control del dueño del puerto tienen un efecto importante en la operación del puerto, pero no pueden ser cambiados. Estos son: eliminación de las operaciones nocturnas que de permitirse hubieran economizado 8700 horas al año, y condiciones atmosféricas que impiden operaciones de fondeo con una pérdida anual de 7000 horas.
- \* Otros factores que están bajo el control del dueño del puerto tendrán efectos relativamente pequeños en las operaciones del puerto. Estos son la composición de la flota, velocidades de descarga de los buques, mala operación de las cubiertas de escotillas, mejor disponibilidad de equipo y variaciones en las restricciones de fondeo de buques de metanol. Los resultados indicaron que el mayor efecto en el mejoramiento de las operaciones se conseguiría separando una o dos de las funciones de manera que estas actividades tuvieran lugar simultánea e independientemente.

Las simulaciones indicaron que basándose en el tiempo total en puerto, incluyendo tiempo de espera y servicio, el esquema 2 ahorraría 10.430 horas al año sobre el esquema 1 y que el esquema 3 ahorraría 1248 horas sobre el esquema 2.

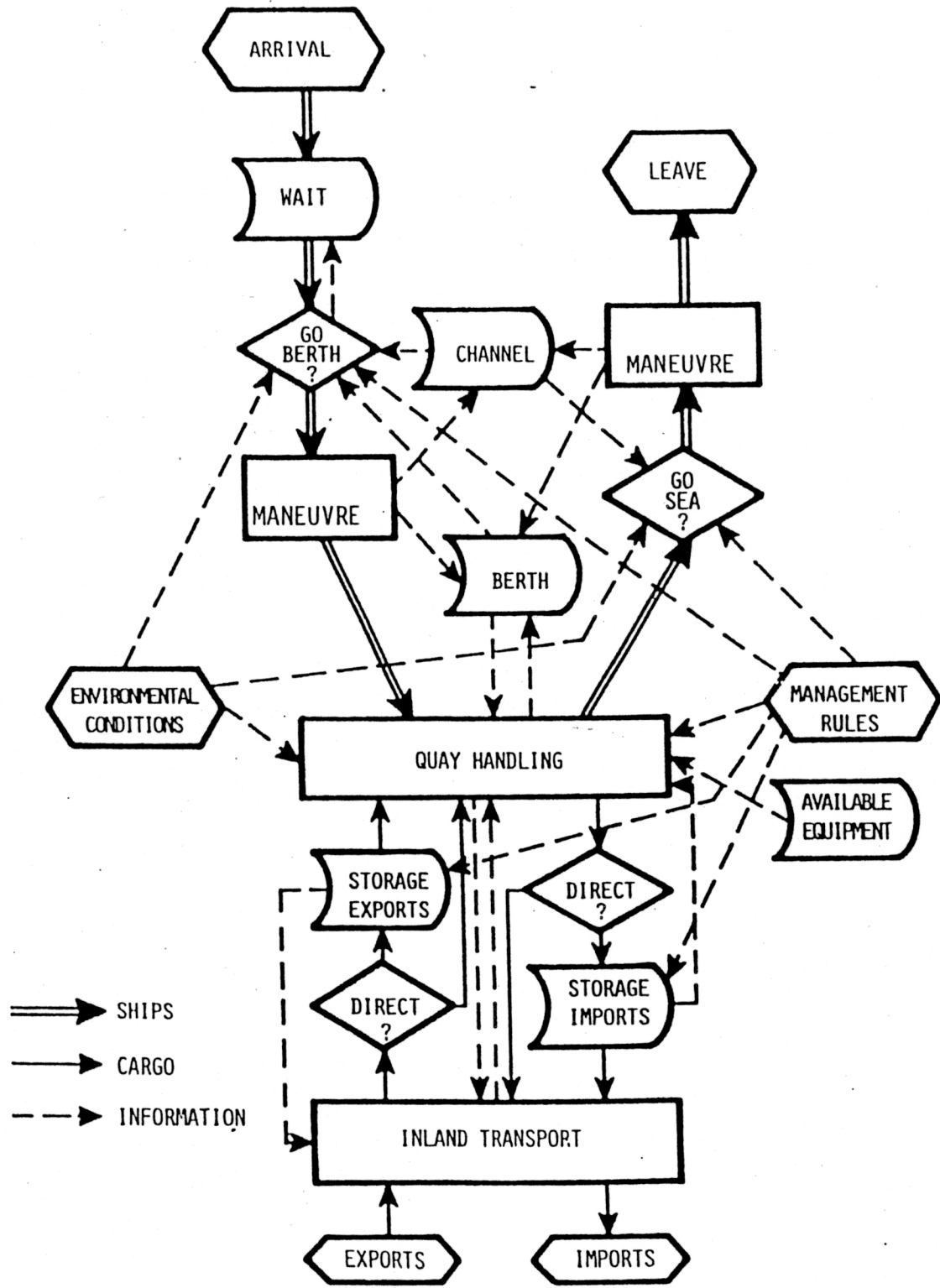
El valor de las 10.430 horas para todos los buques en un año es un gran estímulo para construir una instalación de metanol separada. Por otra parte, las 1248 horas adicionales que se ahorrarían es un estímulo mucho menor para justificar el costo adicional de tres instalaciones separadas.

El tiempo medio en puerto de cada buque bajo el esquema 2 sería también mucho menor que bajo el esquema 1. Esto es particularmente cierto para buques de HRD y de metanol. Este asunto es importante porque influye en los acuerdos contractuales que las autoridades hacen

## CONCLUSIONES

En este ejemplo, la simulación de computadora confirmó un rápido análisis confiable de los posibles problemas de operación en una instalación portuaria ya en la fase de construcción. Se cuantificaron restricciones operacionales y su impacto y se evaluaron sus alternativas. Se contestaron todas las preguntas "qué sucedería si..." La simulación de computadora, junto con los conocimientos ingenieriles y la eficaz toma de decisiones del dueño, produjeron una disposición portuaria mejorada dentro del mismo costo y marco de tiempo. El costo de la simulación de computadora en este caso práctico se pagará múltiples veces con la mayor eficiencia de operación del sistema modificado.

En la figura se presenta un diagrama de flujo genérico de un modelo de simulación portuaria que nos indica las interrelaciones a respetar en el modelo.



## **EJERCICIOS**

# PUERTOS Y VÍAS NAVEGABLES

## GUÍA PARA T.P. N° 2

1

Ejercicio N° 1 : CALCULAR LA LONGITUD Y EL NÚMERO DE ATRAQUES NECESARIOS (RENDIMIENTOS)

Datos : Mercadería : GENERAL  
Volumen Movido : 200.000 t/año  
Rendimiento : 600 t/m.año  
Eslora típica : 170 m

Se calcula la longitud necesaria como :  $L = \frac{V}{R} = \frac{200.000 \text{ t/año}}{600 \text{ t/m.año}} = 333,3 \text{ m}$

La cantidad de postas de atraque será :  $b = \frac{L}{1,2 \times E} = \frac{333,3 \text{ m}}{1,2 \times 170 \text{ m}} = 1,63$

Por lo tanto, serán necesarias dos postas ( $b=2$ ) y la longitud real es :  $L = 1,2 \times 2 \times 170 \text{ m} = 408 \text{ m}$

Variante : caso con estacionalidad marcada.

Mercadería : Cereales  
Ritmo : 70% en 120 días  
Volumen : 2.000.000 t/año  
Rendimiento : 7.500 t/m.año  
Eslora : 200 m

Se calcula igual que antes pero con los datos correspondientes a 120 días :

Volumen :  $0,7 \times 2.000.000 \text{ t} = 1.400.000 \text{ t}$   
Rendimiento :  $7500 \frac{\text{t}}{\text{m}} \times \frac{120}{360} = 2.500 \frac{\text{t}}{\text{m}}$

$$L = \frac{V}{R} = \frac{1.400.000 \text{ t}}{2.500 \text{ t/m}} = 560 \text{ m} \rightarrow b = \frac{L}{1,2 E} = \frac{560 \text{ m}}{1,2 \times 200 \text{ m}} = 2,33$$

Por lo tanto, son necesarias 3 postas y la longitud necesaria <sup>(2)</sup>

es:

$$L = 1,2 \times 3 \times 200 \text{ m} = 720 \text{ m}$$

Ejercicio N° 2: CALCULAR EL NÚMERO DE PUESTOS DE ATRAQUE NECESARIOS  
(TEORÍA DE LAS COLAS)

Datos: Mercadería: GENERAL (Función de Servicios: ERLANG-1)

Volumen: 900.000 t/año

Carga media: 3.000 t/buz (q)

Rendimiento: 1.500 t/día (m)

Días de habilitación: 300 d/año

Tiempos muertos medios:  $T_{bm} = 0,125 \text{ d/buz}$

Espera relativa admisible:  $\gamma = 0,3$

Cálculo del tiempo activo medio:  $T_{ba} = \frac{q}{m} = \frac{3000 \text{ t/buz}}{1500 \text{ t/día}} = 2 \text{ días/buz}$

El tiempo medio de servicio será entonces:  $T_b = T_{ba} + T_{bm} = 2,125 \text{ día/buz}$

y el rendimiento efectivo de cada sitio:  $m' = m \times \frac{T_{ba}}{T_b} = 1412 \text{ t/día}$

A continuación entramos en las tablas correspondientes a un modelo Poisson/ERLANG-1, con el valor de  $\gamma = 0,3$  y para diferentes números de sitios. Obtenemos allí los correspondientes factores de ocupación y el volumen que puede moverse:

N	$\rho$	$\rho N$	$Q = \rho N m' d$
1	0.280	0.280	119000
2	0.479	0.958	406000
3	0.602	1.806	765000
4	0.674	2.698	1143000

(3)

Será necesario construir 4 atraques, pues sólo así el volumen  $Q$  excede nuestra necesidad de proyecto, que es de 900.000 t/año

Ejercicio N° 3: CALCULAR LA CAPACIDAD MÁXIMA TEÓRICA DEL MUELLE CUYOS DATOS SE DETALLAN.

Datos: Mercadería: CONTENEDORES (Función de Servicios: ERLANG-1)

Volumen movido: 100.000 TEU/año ( $V$ )

N° de sitios: 2 ( $N$ )

Tiempo de servicio: 3,5 días/bug ( $T_b$ )

Tiempo de espera: 1,1 días/bug ( $T_w$ )

Calculamos la espera relativa:  $\tau = \frac{T_w}{T_b} = \frac{1,1}{3,5} = 0,314$

Con este valor entramos en la tabla correspondiente a Erlang-1 para 2 sitios y obtenemos:  $\rho = 0,488$

Por lo tanto, la capacidad máxima teórica es:  $C_{\max} = \frac{V}{\rho} \approx 205.000 \frac{\text{TEU}}{\text{año}}$

Ejercicio N° 4: CALCULAR LA VARIACIÓN DE LOS COSTOS DE PERMANENCIA EN PUERTO DE LOS BUQUES DEBIDA A UNA VARIACIÓN EN EL TIEMPO DE SERVICIO

Datos: Mercadería: CEREALES (Función de Servicios: ERLANG-1)

N° de sitios: 3 ( $N$ )

Tiempo de servicio: 3,8 días/bug ( $T_b$ )

Espera relativa: 6,92 ( $\tau$ )

Costo medio de permanencia en puerto: 9100  $\frac{\text{U\$S}}{\text{día. bug}}$  ( $\bar{c}$ )

Número de buques: 260 bug/año ( $n$ )

Variación del tiempo de servicio: -0,4 días/bug ( $\Delta T_b$ )

a) Situación original:

Calculamos el tiempo medio de espera:  $T_w = \tau \cdot T_b = 6,92 \times 3,8 \text{ días/bug} = 26,3 \text{ días/bug}$

La permanencia media en puerto es:  $T_p = T_w + T_b = 26,3 \frac{\text{días}}{\text{bug}} + 3,8 \frac{\text{días}}{\text{bug}} = 30,1 \frac{\text{días}}{\text{bug}}$

El costo total por permanencia en puerto será entonces: (4)

$$C = n \times T_p \times \bar{c} = 260 \times 30,1 \times 9100 = 71,2 \times 10^6 \text{ U\$s/año}$$

b) Situación con variantes (en este caso se trata de una mejora, ya que  $\Delta T_b < 0$ )

Calculamos el nuevo tiempo medio de servicio:

$$T_b' = T_b + \Delta T_b = 3,8 \text{ días/bug} - 0,4 \text{ días/bug} = 3,4 \text{ días/bug}$$

Considerando que el puerto opera durante 330 días/año, tendremos el factor de ocupación es:

$$\rho = \frac{n \times T_b'}{N \times d} = \frac{260 \times 3,4}{3 \times 330} = 0,893$$

De las tablas correspondientes (ERLANG-1) se obtiene:  $\tau = 2,54$

y, por lo tanto,  $T_w' = \tau \times T_b' = 2,54 \times 3,4 = 8,6 \text{ días/bug}$

La nueva permanencia en puerto resulta:  $T_p' = T_w' + T_b' = 12 \text{ días/bug}$

y los correspondientes costos:  $C' = n \times T_p' \times \bar{c} = 260 \times 12 \times 9100 = 28,4 \times 10^6 \text{ U\$s/año}$

En definitiva, se produce un ahorro en los costos por permanencia en puerto de los buques de:

$$\Delta C = C - C' = 42,8 \times 10^6 \text{ U\$s/año}$$