

# **Congreso Panamericano de Ingeniería Naval, Transporte Marítimo e Ingeniería Portuaria**

Planificación y Optimización de un  
Terminal Marítimo

Por Hugo Tobar Vega

Profesor ESPOL

Doctor en Ingeniería Marítima MIT

## A. INTRODUCCIÓN

La planificación de un Terminal Portuario, para satisfacer al tráfico marítimo que generará en el futuro su zona de influencia o “hinterland”, es de primordial importancia en la economía de un país, porque tiene que ver con su desarrollo y las tendencias de su producción y consumo.

La planificación para la disponibilidad de las facilidades portuarias, es uno de los objetivos principales de la gestión gerencial. Las malas o buenas decisiones tienen un efecto profundo y permanente en su futuro en especial en su zona de influencia; por lo tanto, la planificación de un puerto debe ser hecha por gente especializada con información, experiencia y conocimiento de esta materia.

Para una adecuada planificación portuaria, es necesario que su actividad diaria genere la información estadística que llegue a los responsables de la planificación y de la gestión administrativa, como parte de su “sistema de información gerencial”. Esta información debe incluir lo siguiente:

- a) La magnitud de las operaciones expresadas en toneladas o unidades de contenedores TEUs.; movilizadas.
- b) Los factores básicos que afectan a los ingresos, salidas, características y dimensiones de las naves, durante el período actual comparando con períodos en el pasado; y
- c) La magnitud y tendencia de ciertos criterios especializados que miden la calidad y cantidad del rendimiento del puerto expresadas en cantidades y tipo de carga y mercaderías movilizadas.

### **Espectro del Tráfico de Naves.**

El tráfico de naves a un terminal portuario es un elemento importante para conocer su capacidad y eficiencia; se debe determinar para cada terminal especializado de un puerto, el “espectro” de su tráfico. Es necesario analizar en los reportes de pilotaje y las operaciones en la bahía, la distribución y arribo de naves en un periodo que generalmente es un año. En esta forma se puede determinar un parámetro importante, la razón de llegada o arribo de naves o sea el número de naves que llegan por día, que se lo designa como “ $\lambda$ ”. Es necesario reconocer que hay días que no llegan naves; otros una, otros 2, otros 3, otros 4, etc.; así se origina una distribución, que por la naturaleza de este tráfico se ha determinado por su comportamiento real es la distribución probabilística de Poisson; dada por la siguiente formulación matemática:

$$f(x) = \frac{e^{-\lambda T} \cdot (\lambda T)^x}{x!}$$

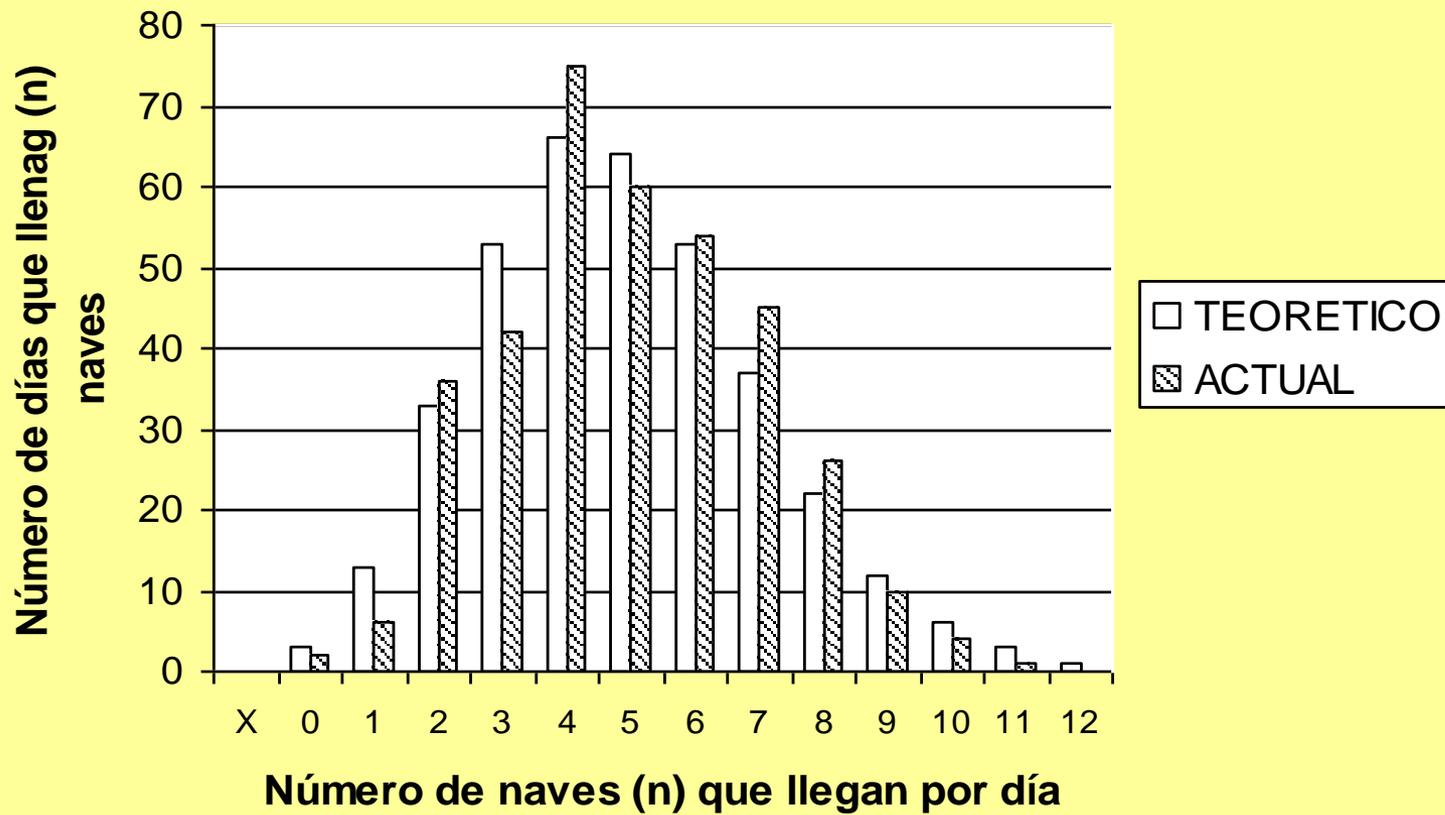
De igual forma el tiempo de servicio a la nave que se lo designe como “ $\mu$ ”, es el número de horas o días que una nave permanece en el terminal en operaciones de carga o descarga; se conoce como la razón de servicio, que es igual al número de naves que son servidas por día, que también tiene un comportamiento dado por la distribución probabilística exponencial dada por la formulación matemática:

$$f(x) = \mu T e^{-\mu T}$$

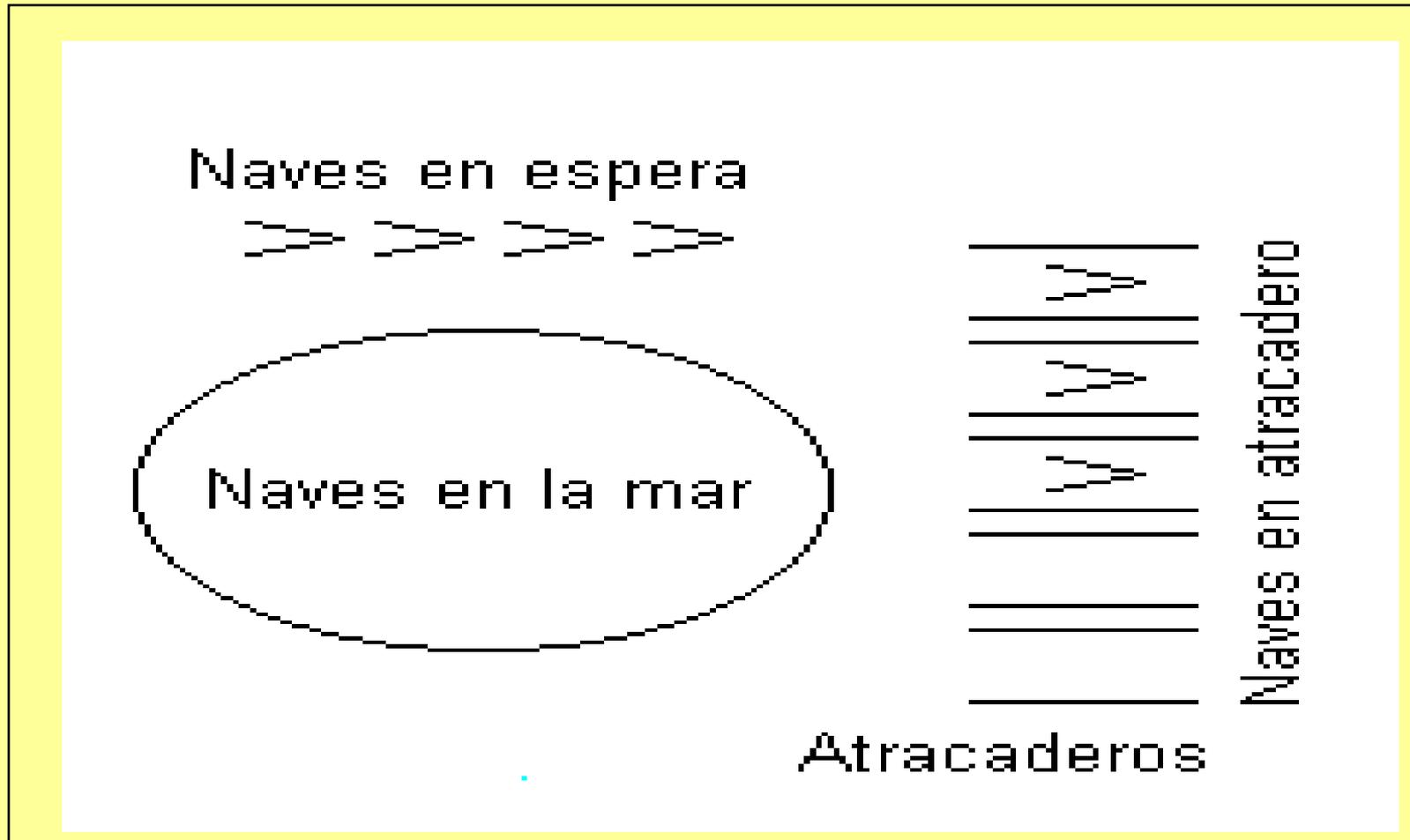
**Comparación del Valor Teorético con el Real  
Terminal 3**

<b>Número de naves (n) que llegan por día</b>	<b>Número de días que llegan (n) naves</b>	
	<b>TEORETICO</b>	<b>REAL</b>
X	Y1'	Y1
0	3	2
1	13	6
2	33	36
3	53	42
4	66	75
5	64	60
6	53	54
7	37	45
8	22	26
9	12	10
10	6	4
11	3	1
12	1	0

## Comparación del Trafico Valor Teorético con el Actual Terminal 3



## Representacion de un Puerto con Lineas de Espera



Con estas condiciones el análisis matemático de este sistema de líneas de espera, es como sigue:

$\lambda$  : Razón diaria de arribo de naves al terminal de tráfico específico.

$\mu$  : Razón diaria de servicio a las naves en el terminal.

$n$  : número de naves en el sistema, el tiempo  $t$ .

$P_n(t)$  : Probabilidad que  $n$  naves estén en el terminal al tiempo  $t$ .

Usando series infinitas:

$$P_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu}$$
$$P_n = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n$$

**Ejemplo:** si  $\lambda = 1/10$ ; y  $\mu = 1/4$

$$P_0 = (0.6) (0.4)^0 = 0.600$$

$$P_1 = (0.6) (0.4)^1 = 0.240$$

$$P_2 = (0.6) (0.4)^2 = 0.096$$

·

$$P_7 = (0.6) (0.4)^7 = 0.001$$

## Parametros Resultantes

a)  $n_m$  : Número medio de naves en el terminal

$$n_m = \sum n P_n = \sum n(1-\rho)\rho^n$$

Y luego de varios pasos algebraicos:

$$n_m = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$$

b)  $l_m$  : Longitud media de la cola (naves en espera); es igual al número de naves en el terminal, menos los que están en servicio.

$$l_m = \frac{\lambda}{\mu - \lambda} - \frac{\lambda}{\mu} = \frac{\lambda^2}{\mu \cdot (\mu - \lambda)}$$

c)  $w_m$  : Tiempo medio de espera

$$t_m = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)} + \frac{1}{\mu} = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

d)  $t_m$  : El tiempo medio en el terminal; es igual al tiempo en espera más el tiempo en servicio

$$w_m = \frac{\lambda}{\mu \cdot (\mu - \lambda)}$$

$$t_m = l_m + \frac{1}{\mu}$$

## D. OPTIMIZACIÓN DE TERMINAL CON UNA ESTACIÓN (UN ATRACADERO)

### 1. Factor Costos

Un buen terminal portuario, es aquel que mantiene una relación óptima entre los costos de las naves en espera y el de los atracaderos vacíos; de tal forma que esta combinación de costos que representan pérdidas, sea lo menos posible:

$WC_w$  : Costo de espera de la nave por periodo de tiempo.

$FC_f$  : Costo del atracadero vacío por periodo de tiempo.

$TC$  : Costo total.

De tal forma que:

$$TC = WC_w + FC_f$$

$WC_w$  es igual al: costo de la nave esperando por unidad de tiempo  $C_w$ , multiplicado por el número medio de naves que llegan  $\lambda$  y por el tiempo medio que permanece en el terminal  $t_m$ . Se tiene de las anteriores ecuaciones.

Del mismo modo, el costo del atracadero es igual al: costo del atracadero vacío por unidad de tiempo  $C_f$ , por la razón de servicio  $\mu$ .

Se tiene:

$$WC_w = C_w \cdot \lambda \cdot t_m = \frac{C_w \lambda}{\mu - \lambda}$$

$$FC_f = C_f \cdot \mu$$

El costo total será por lo tanto:

$$TC = C_w \frac{\lambda}{\mu - \lambda} + C_f \mu$$

Aplicando los datos del ejemplo:

$$C_w = \$ 0.100$$

$$C_f = \$ 0.165$$

$$\lambda = 0.125$$

Por lo tanto:

$$\mu = 0.125 + \sqrt{\frac{0.125 \times 0.100}{0.165}} = 0.400$$

### Calculo del Costo Total

$\mu$	$WC_w$	$FC_f$	TC
0.125	$\$ \infty$	\$0.0206	$\$ \infty$
0.150	0.5000	0.0248	0.5248
0.200	0.1667	0.0330	0.1997
0.150	0.1000	0.0413	0.1413
0.300	0.0714	0.0495	0.1209
<b>0.400</b>	<b>0.0455</b>	<b>0.0660</b>	<b>0.1115</b>
0.500	0.0333	0.0825	0.1158
0.600	0.0263	0.0920	0.1253
0.800	0.0185	0.1320	0.1505
1.000	0.0147	0.1650	0.1793

## OPTIMIZACIÓN DE TERMINAL CON VARIAS ESTACIONES (ATRACADEROS)

Este es el caso común de un terminal portuario con varias estaciones de servicio para atraque de las naves que llegan al puerto, para efectuar las operaciones de carga y descarga; estas estaciones son los atracaderos por tipo de nave; ya sea contenedores, carga general, carga al granel líquida y sólida.

El análisis introduce otra variable  $c$ , que representa el número de atracaderos; su optimización será por lo tanto determinar el óptimo valor de  $c$ , para valores establecidos de  $\lambda$  y  $\mu$ , las razones de llegada y servicio. Se tiene:

$P_{m,n}(t)$ : Probabilidad que  $n$  naves estén presentes en el terminal y  $m$  atracaderos estén ocupados en el tiempo  $t$ .  
Se define:

De la relación matemática de la ecuación anterior, se tiene:

Por lo tanto:

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

$$P_{c,n} = P_{0,0} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^c \frac{1}{c!} \rho^n$$

$$P_{m,0} = P_{0,0} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^m \frac{1}{m!}$$

$$P_{0,0} = \frac{1}{\left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^c \left( \frac{1}{c!} \right) \left( \frac{1}{1-\rho} \right) + \sum_0^{c-1} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^r \left( \frac{1}{r!} \right)}$$

## 2. Parámetros

a)  $l_m$  : longitud media de la cola, naves en espera de atracadero para recibir servicio

$$l_m = \frac{P_{0,0} \left( \frac{\lambda}{\mu} \right)^{c+1}}{(c-1)! \left( c - \frac{\lambda}{\mu} \right)^2}$$

b)  $n_m$  : naves en el terminal, igual a naves en espera más las naves en servicio:

$$n_m = l_m + \frac{\lambda}{\mu}$$

c)  $w_m$  : Tiempo medio de espera

$$w_m = \frac{1m}{\lambda}$$

d)  $t_m$  : Tiempo medio en el terminal; es igual al tiempo medio de espera, más el tiempo de servicio.

$$t_m = w_m + \frac{1}{\mu}$$

e) La probabilidad que una nave que llega tenga que esperar es:

$$\Pr\{W > 0\} = \sum P_{c,n} = P_{0,0} \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^c \frac{1}{3!} \left(1 - \frac{2}{3}\right)$$

### 3. Factor de Costos.

Para este caso como el anterior, se mantiene el principio del costo mínimo de las naves en espera y los atracaderos vacíos; el mismo modo se aplica en la ecuación (10):

Pero para este caso esos valores son diferentes, ya que se aplican los parámetros encontrados para varias estaciones de servicio; por lo tanto:

Donde:  $l_m$  es el número medio de naves en espera; y  $( )$  representa el número de atracaderos vacíos.

$$TC = WC_w + FC_f$$

$$c - \frac{\lambda}{\mu}$$

$$TC = C_w l_m + C_f \left( c - \frac{\lambda}{\mu} \right)$$

## 4. Optimización

Para un terminal en particular, si está establecida  $\lambda$  la razón de arribo al terminal y también la razón de servicio  $\mu$ ; la optimización consiste en determinar el óptimo número de atracaderos  $c$ , en este terminal. Esto es la base para la planificación de un puerto, pero teniendo en cuenta lo siguiente:

a) El cambio en el tráfico futuro al puerto por el desarrollo de su hinterland; que es el crecimiento natural de su producción y consumo, que se traduce en una variación de  $\lambda$ , la razón de arribo de naves al terminal.

b) El mejoramiento o cambios en los sistemas y tecnología de servicio a las naves, que incluye nuevos y mejores equipos, métodos operacionales y una eficiente acción administrativa que incrementará el valor  $\mu$ , la razón de servicio.

Con estos antecedentes la determinación de la optimización de la ecuación anterior, está dada por:

$$\frac{\partial TC}{\partial c} = 0$$

Significa que la derivada del costo total TC con respecto al número de atracaderos  $c$ , está en su punto de inflexión; es decir igual a 0.

El manipuleo matemático de esta ecuación es muy complicado y está fuera del alcance de este análisis, por lo tanto la resolución de esta ecuación para encontrar el mínimo se realiza en forma iterativa.

## 5. Caso Típico

Se tiene un terminal con los siguientes parámetros operacionales y se quiere encontrar su número óptimo de atracaderos,  $c$ :

Razón media de arribo de naves

$$\lambda = 3.35 \text{ naves / día}$$

Razón media de servicio a las naves

$$\mu = 1.24 \text{ naves / día}$$

Costo medio de nave por día

$$C_w = \$ 2.500/\text{día}$$

Costo medio de muelle por día

$$C_f = \$ 750/\text{día}$$

$$\frac{\lambda}{\mu} = 2.7 ; \quad \rho = \frac{2.7}{c}$$

Se tiene los siguientes valores operacionales:

$$P_{0,0} = \frac{1}{2.7^3 \frac{1}{3!} \left(1 - \frac{2.7}{3}\right) + \sum_0^2 2.7^r \frac{1}{r!}}$$

$$l_m = P_{0,0} \frac{2.7^2}{2! \left(3 - 2.7\right)}$$

En este caso

$$TC = C_w P_{0,0} \frac{2.7^2}{2! \left(3 - 2.7\right)} + C_f \left(3 - 2.7\right)$$

La diferenciación de esta ecuación con respecto a  $c$ , como se indicó anteriormente dará el valor óptimo de  $c$ ; este cálculo se lo realiza en la tabla siguiente:

**Calculo del Parámetro  $P_{0,0}$**

<b>c</b>	<b><math>(2.7)^c</math></b>	<b><math>1/c!</math></b>	<b><math>1-2.7/c</math></b>	<b><math>\Sigma (2.7)^r(1/r!)</math></b>	<b><math>P_{0,0}</math></b>
3	19.683	0.1670	0.100	7.3450	0.130
4	53.154	0.0420	0.325	10.625	0.088
5	143.489	0.0800	0.460	12.839	0.075
6	387.420	0.0014	0.550	13.105	0.074
7	1046.035	0.0002	0.614	13.643	0.073

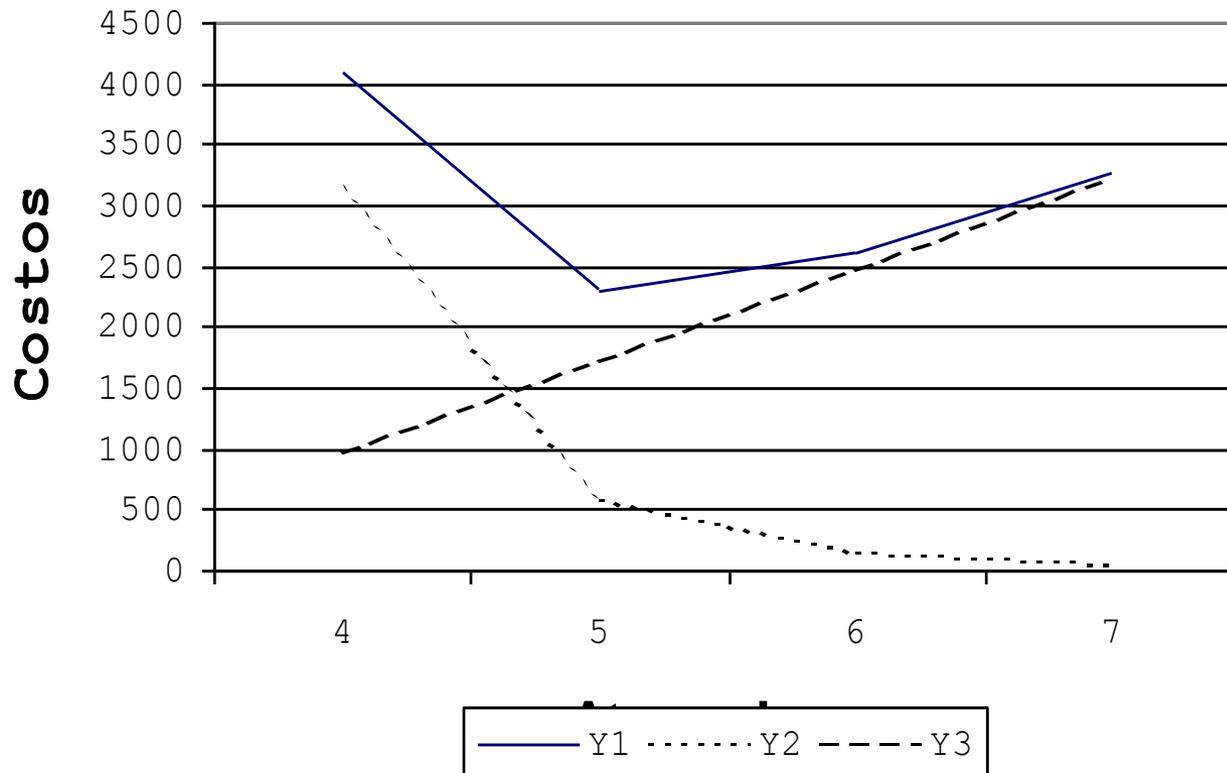
Cálculo de TC:

Una vez calculado  $P_{0,0}$ , se procede a calcular el costo óptimo o mínimo de las naves en espera y los atracaderos vacíos, en la siguiente tabla y para diferentes valores de  $c$ , desde 3 hasta 7.

**CALCULO del Costo Total, TC**

<b>c</b>	<b><math>P_{0,0}</math></b>	<b><math>(2.7)^{c+1}</math></b>	<b><math>(c-1)!</math></b>	<b><math>(c-2.7)^2</math></b>	<b>Cw.lm</b>	<b>Cf(c-2.7)</b>	<b>TC</b>
3	0.130	53	2	0.09	95.955	225	\$96.180
4	0.088	143	6	1.69	3.113	975	4.088
<b>5</b>	<b>0.075</b>	<b>387</b>	<b>24</b>	<b>3.29</b>	<b>572</b>	<b>1.725</b>	<b>2.297</b>
6	0.074	1046	120	10.89	148	2.475	2.623
7	0.073	2484	720	18.49	39	3.225	3.264

# Optimo Número de Atracaderos



### Porcentaje de Utilización

Este algoritmo que se ha establecido para determinar el óptimo número de atracaderos, es hasta cierto punto empírico; por cuanto en muchos trabajos similares, los planificadores portuarios no utilizan estas herramientas matemáticas y operacionales, sino que aplican valores del porcentaje de utilización de los atracaderos, que no son una medida exacta del óptimo uso de un terminal.

El porcentaje de utilización, que se utiliza como parámetro para la determinación del número óptimo de atracaderos, lo fijan alrededor del 60%.

El porcentaje de utilización de un puerto no es otra cosa que dividir el número total de horas o fracción de tiempo que los atracaderos están ocupados en un periodo que puede ser un año, para el número total de horas que los atracaderos están disponibles. De los valores anteriores, la relación es la siguiente:

$$PU = \left( c - \frac{\lambda}{\mu} \right) \times 100$$

### Determinación del Porcentaje de Utilización del Puerto (Pu)

c	c-2.7	(c-2.7)/c	1-(c-2.7)/c	PU (%)	
3	0.3	0.10	0.90	90	
4	1.3	0.32	0.68	68	
<b>5</b>	<b>2.3</b>	<b>0.46</b>	<b>0.54</b>	<b>54</b>	<b>óptimo</b>
6	3.3	0.55	0.45	45	
7	4.3	0.61	0.39	39	

## PROYECCIÓN FUTURA

El número óptimo de atracaderos encontrados en el análisis anterior es el **número óptimo actual**, en esta fecha; pero si se va a ser una planificación futura y verdadera, se debe determinar cuantos atracaderos debe disponer un terminal para un período operacional, que puede ser de 15 ó 20 años. Por este motivo, es indispensable determinar una proyección adecuada del comportamiento de tráfico de naves al puerto y los programas del servicio a las naves que determinan la razón de servicio; es decir, se debe conocer la proyección de los valores de  $\lambda$  y  $\mu$ ; o sean las proyecciones de arribo y de servicio.

### 1. Parámetros Operacionales.

Como ejemplo se analiza el caso para un período de 20 años y sus las proyecciones de  $\lambda$  y  $\mu$ . Con el objeto de presentar esta herramienta técnica se procede **como sigue**:

**Se asume un incremento porcentual anual constante del incremento del trafico  $\lambda$  del 3.5%**, considerando además que las naves aumentan en tamaño y capacidad de carga; del mismo modo también se considera que los mejores métodos de movilización y manejo de carga en el puerto, producirán una reducción en la estadía de las naves; por lo tanto aumentando la razón de servicio  **$\mu$  en 1% anual**.

**Los otros parámetros  $C_w$  y  $C_f$ , se mantienen constantes; es decir se asume que sus valores son unidades de valor constantes (UVC); ya que el poder adquisitivo actual en relación con los proyectados, compensan la inflación futura.**

### Proyección Futura de los Parámetros Operacionales del Puerto

Año	$\lambda$	$\mu$	$C_w$ \$	$C_f$ \$	$\lambda/\mu$
Actual	3.35	1.24	2500	750	2.70
+5	3.94	1.30	2500	750	3.03
+10	4.52	1.36	2500	750	3.32
+15	5.10	1.43	2500	750	3.57
+20	5.70	1.49	2500	750	3.83

### Parámetro TC

Año	TC: Ecuación (20)
5	$C_w \cdot P_{0,0}(3.03)^{c+1}/(c-1)!(c-3.03)^2 + C_f(c-3.03)$
10	$C_w \cdot P_{0,0}(3.32)^{c+1}/(c-1)!(c-3.32)^2 + C_f(c-3.32)$
15	$C_w \cdot P_{0,0}(3.57)^{c+1}/(c-1)!(c-3.57)^2 + C_f(c-3.57)$
20	$C_w \cdot P_{0,0}(3.83)^{c+1}/(c-1)!(c-3.83)^2 + C_f(c-3.83)$

### Calculo TC (Año 5)

<b>C</b>	<b>P<sub>0,0</sub></b>	<b>(3.03)<sup>c+1</sup></b>	<b>(C-1)!</b>	<b>(C-3.03)<sup>2</sup></b>	<b>C<sub>w</sub>.lm</b>	<b>C<sub>f</sub>(c-3.03)</b>	<b>TC</b>
5	0.0568	774	24	3.88	\$ 1180	\$ 1477	2657
<b>6</b>	<b>0.0515</b>	<b>2.348</b>	<b>120</b>	<b>8.82</b>	<b>286</b>	<b>2227</b>	<b>2513</b>
7	0.0494	7.105	720	15.76	77	2977	3054
8	0.0487	21.528	5040	24.70	21	3727	3748

**Calculo TC (Año 10)**

<b>C</b>	<b>P<sub>0,0</sub></b>	<b>(3.32)<sup>c+1</sup></b>	<b>(C-1)!</b>	<b>(C-3.32)<sup>2</sup></b>	<b>C<sub>w</sub>·lm</b>	<b>Cf(c-3.32)</b>	<b>TC</b>
5	0.0459	1291.5	24	2.89	2137	1275	3412
<b>6</b>	<b>0.0405</b>	<b>4261.8</b>	<b>120</b>	<b>7.29</b>	<b>493</b>	<b>2025</b>	<b>2518</b>
7	0.0382	14064.1	720	13.69	136	2775	2911
8	0.0373	46411.5	5040	22.09	39	3525	3564

**Calculo  $P_{0,0}$  (Año 15)**

<b>C</b>	<b><math>(3,57)^c</math></b>	<b><math>1/c!</math></b>	<b><math>1-(3.57/c)</math></b>	<b><math>\Sigma(3.57)^r(1/r!)</math></b>	<b><math>P_{0,0}</math></b>
5	579.9	0.008300	0.286	25.294	0.0375
6	2070.2	0.001300	0.405	30.126	0.0320
7	7390.6	0.000200	0.490	33.001	0.0296
8	26384.3	0.000025	0.554	34.468	0.0287

**Calculo TC (año 20)**

<b>C</b>	<b><math>P_{0,0}</math></b>	<b><math>(3,83)^{c+1}</math></b>	<b><math>(C-1)!</math></b>	<b><math>(C-3.83)^2</math></b>	<b><math>C_w \cdot Im</math></b>	<b><math>C_f(C-3.83)</math></b>	<b>TC</b>
5	0.0312	3156	24	1.369	\$ 7492	878	8370
6	0.0257	12089	120	4.709	1374	1628	3002
<b>7</b>	<b>0.0233</b>	<b>46301</b>	<b>720</b>	<b>10.049</b>	<b>373</b>	<b>2378</b>	<b>2751</b>
8	0.0223	177333	5040	17.389	112	3128	3240

## Resultado

Si se inicia la construcción de un número de atracaderos o estaciones de servicio, los valores encontrados por las proyecciones sirven para definir lo siguiente:

Cuantos atracaderos se deben construir hoy, para que el proyecto sea lo más óptimo en este caso en los próximos 20 años; de acuerdo al análisis del lugar y las condiciones óptimas se determinó el tiempo de duración del proyecto.

En este caso se tienen 20 años y se encontró lo siguiente:

Año	No. óptimo de Atracaderos
Actual	5
5	6
10	6
15	6
20	7

**Suma del Costo Total TC en Periodo de 20 Años**

<b>c</b>	<b>Actual</b>	<b>Año 5</b>	<b>Año 10</b>	<b>Año 15</b>	<b>Año 20</b>	<b>Suma Total En 20 años</b>
5	\$ 2297	\$ 2657	\$ 3412	\$ 5037	\$ 8370	\$ 21773
<b>6</b>	<b>2623</b>	<b>2513</b>	<b>2518</b>	<b>2638</b>	<b>3002</b>	<b>13294</b>
7	3264	3054	2911	2804	2751	14784



**OBRAS DE LA AMPLIACION**  
**Terminal de Contenedores y Granel**