

MODELIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN DE LA GESTIÓN DE LOS SERVICIOS PORTUARIOS EN LA TERMINAL DE CONTENEDORES DEL PUERTO DE MONTEVIDEO

Autores: Federico Hornes¹ ; Hugo Roche²

RESUMEN

Este documento subraya la importancia de la teoría de colas en el análisis del problema de la congestión a nivel de los sistemas portuarios y contribuir al desarrollo sostenible del Puerto de Montevideo. El movimiento de tráfico a través de un puerto es un fenómeno complejo debido a la naturaleza aleatoria de la llegada y tiempo de servicio de los buques. Esto requiere un enfoque sistemático en el puerto de planificación y gestión. Se realiza una revisión de la literatura disponible sobre la aplicación reciente de los Modelos de Cola a los sistemas portuarios. En particular se analizan y se revisan los resultados obtenidos en investigaciones anteriores sobre la problemática de congestión en la Terminal de Contenedores TCP del Puerto de Montevideo y las Terminales que opera MONTECON (ver Gorriti, M.J., C. Hornes y M. Pereyra "Análisis de Desempeño del Proceso de Carga y Descarga de Contenedores en el Puerto de Montevideo. FCEyA, 2010). Se incorpora nueva información sobre las tendencias futuras en la operativa de contenedores y de las inversiones e innovaciones tecnológicas incorporadas en estos últimos años a nivel de la terminal TCP. A la luz de los nuevos datos disponibles se revisa la tendencia y la modelización de los procesos de llegada de los buques al Puerto de Montevideo, del tiempo de servicio en las Terminales de TCP y MONTECON, y la distribución del número de buques en la Terminal del puerto. Se han identificado nuevas direcciones de investigación que apuntan, a la integración de los modelos de Colas (MC) con los modelos de optimización en un sistema integrado de apoyo a la decisión. De esta manera los MC pueden ser empleados en la estimación de la capacidad requerida a nivel de la Terminal de Contenedores, contribuyendo a determinar el nivel óptimo de operaciones requeridas para el funcionamiento eficiente del sistema portuario.

Palabras Clave. *Teoría de Colas; Modelo de Colas; Gestión de Sistema Portuario; Terminal de Contenedores; Logística; Optimización; Modelos de Simulación.*

¹ Docente de la Cátedra *Organización y Métodos*, Departamento de Administración. federicohornes@gmail.com

² Profesor titular de la Cátedra *Métodos Cuantitativos Aplicados a la Administración*; Departamento de Administración. hugo.roche@gmail.com

INTRODUCCION

La optimización de la línea de atraque de la TC es el problema fundamental al que deben enfrentarse los operadores de los SP.

La metodología empleada se apoya en la teoría de colas y las técnicas de simulación. Los parámetros del modelo de colas se estimaron en base a la información disponible sobre los procesos de llegadas a Puerto y los tiempos de servicio de buques en los muelles respectivos.

En esta investigación se ha realizado una primera revisión actualizada del Estado del Arte en Modelos de Desempeño de Terminales de Contenedores (Dragovic, 2011; Taha, HA, 2010; Wen-Chih, 2007 ; Branislav, 2006) y en particular sobre la relevancia de los Modelos de Colas y los Modelos de Simulación en el análisis de los Sistemas Portuarios y las terminales de Contenedores.

En este documento se actualiza al año 2011 y se compara los resultados obtenidos en (Gorriti, J et al, 2010) donde se estimó un modelo de Colas del tipo M/M/s a partir de la información correspondiente a la operativa del año 2008 del Muelle de Escala operado por TCP y de los Muelles operados por MONTECON.

La comparación se realiza a partir de los parámetros “grado de ocupación”, “tiempo de espera” y “tasas de arribo”. En esta investigación se incorpora una nueva variable de análisis, como la “Probabilidad de que “n” buques se encuentren en el sistema portuario” que permite completar el análisis de desempeño.

Los resultados obtenidos muestran que los MC no solo permiten reproducir los datos observados sino que representan un modelo de simulación de escenarios futuros permitiendo dimensionar las necesidades futuras de ampliación de la infraestructura o los esfuerzos por incrementar la eficiencia en la operativa de los servicios en las terminales de contenedores.

1. Puerto de Montevideo 2008-2011: mejora de la infraestructura e incremento de su capacidad de operaciones

Infraestructura en las Terminales de Contenedores del Puerto de Montevideo

La infraestructura del Puerto de Montevideo dispone de 2 Terminales de Contenedores gestionados por dos operadores independientes: TCP y MONTECON.

La Terminal Cuenca del Plata TCP es una instalación especializada en la operación de contenedores. La Terminal funciona desde 2002, y en los últimos años ha desarrollado una inversión de ampliación y de equipamiento significativa que prácticamente ha duplicado su longitud de atraque, hoy de 638 mts. (288,25 mts en 2008). Unos 350mts de esta Línea de atraque permitirán operar con buques de hasta 14 mts de calado. Aparte de esta ampliación de muelle, se ha ampliado la superficie terrestre en 30 Ha para playa de operaciones y almacenamiento. También se ha duplicado el equipamiento, incorporando 4 Gruas pórticos adicionales del tipo Super PostPanamax que puede operar con buques de 22 filas de contenedores de ancho.

La capacidad operativa del TCP alcanza actualmente los 900.000 TEUs y se ha duplicado la productividad (contenedores operados p/mt de muelle y p/Ha) operando 100 movimientos de contenedores por buque y por hora. Estas mejoras en la TCP han permitido mejorar el desempeño de la Terminal de Contenedores, reduciendo el tiempo de estadía del buque en la terminal y minimizando costos operativos

**Tabla 1 Infraestructura y Equipamiento de las Terminales de Contenedores:
Puerto de Montevideo.**

MUELLE	OPERADOR	DESTINO	DIMENSIONAMIENTO		EQUIPAMIENTO	
			Longitud Linea de Atraque	Calado pie de Muelle	Gruas Porticos	Carretillas Pórtico
M. de Escala	T.C.P	Contenedores	350mt 288mt	14mts 10 mts	8 (4PPnmx)	28
M. Central D1 Atraques: 3, 4 y 5	MONTECON	Contenedores	492mt	10mt		
M. "B " D2 Atraques: 8 y 9		Contenedores Vehic. + Granel	327mt	10mt		

Fuente: ANP

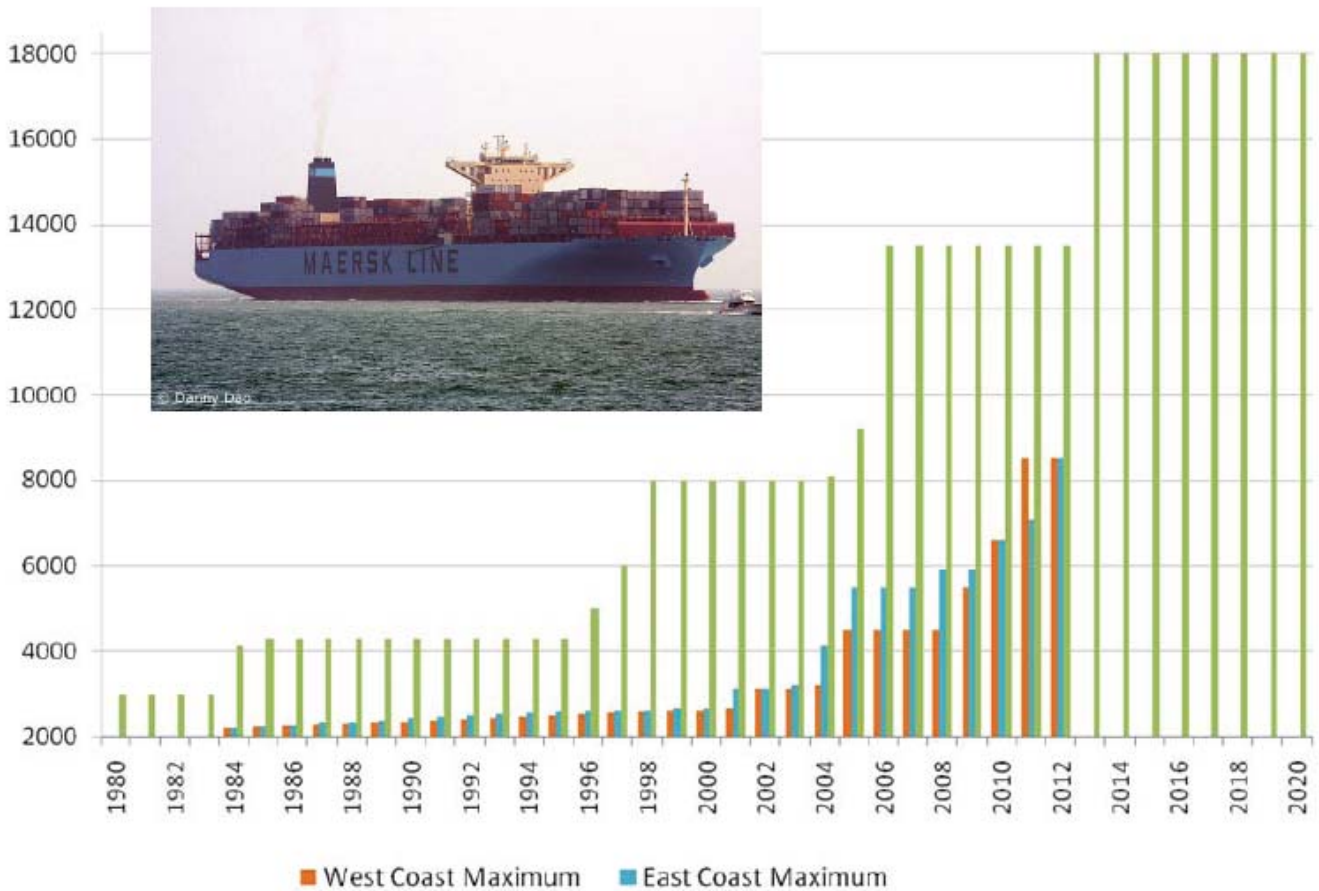
Por otro lado, en 2013 estará disponible el Muelle C, una terminal multipropósito que incluirá una terminal de contenedores. El mismo tendrá una longitud de atraque de 333 mts y también podrá operar con buques de hasta 14 mts de calado. Esta terminal tendrá disponible una playa pavimentada de 30.400 m2.

1.1 Las Tendencias actuales en el Transporte marítimo: economías de escala y nueva generación de buques portacontenedores

En el marco de la Conferencia anual del IAME 2011-CEPAL, el especialista R. Sanchez (2011) ha señalado que los puertos de América del Sur necesitarán importantes inversiones para adaptar su infraestructura a las tendencias en el tamaño de los buques que actualmente circulan por las principales rutas navieras del mundo. Se calcula que entre 2016 y 2019, numerosos buques cargando un promedio de 13.000 TEUS empezarán a arribar a los puertos sudamericanos.

Actualmente, en 2011 los buques más grandes que recalán en los puertos de la región no sobrepasan los 8.000 TEUS. Sin embargo, la tendencia hacia buques de mayor porte empuja a la necesidad de realizar nuevas e importantes inversiones que permitan aumentar la capacidad de los terminales marítimos, en particular en relación con la profundidad de los canales de acceso y el calado al pie de muelle. Según R. Sanchez, el aumento en el tamaño de los buques responde a la tendencia que se observa a nivel global en el comercio internacional de búsqueda de economías de escala y concentración económica.

Figura 1 Tendencias en el tamaño de los Buques Portacontenedores



Fuente: Sanchez, R (2011) "Expected maximum fullcontainerships size in South America 2011-2020" Proceedings of the Annual Conference -IAME 2011, Santiago de Chile.

1.2 Puerto de Montevideo: Tendencias en el tráfico marítimo y en la movilización de Contenedores.

La tendencia del total de buques que llegaron al Puerto de Montevideo desde 2008 a 2011 no se ha modificado sustancialmente, como lo muestra la Tabla 2. Sin embargo el número de Portacontenedores ha aumentado en un 25%, pasando de 819 buques en 2008 a 1027 buques en 2011. Este incremento en cantidad, también se ve reflejado en un incremento de las dimensiones promedio del mismo: incremento del 29% en el TRBp/buque, 11% en la Eslora y 6% en el Calado.

**Tabla 2 Arribos de Buques por Categoría de interés
(Comparativo 2007-2011)**

CATEGORIA	2007	2008	2009	2010	2011
Barcaza	142	113	63	74	76
Cabotaje	323	288	172	175	202
Carga general	213	223	197	155	197
Contenedores	731	819	976	913	1027
Crucero	94	103	89	96	99
Granelero	116	111	102	111	135
Reefer	65	58	51	27	25
Ro/Ro	43	48	45	64	88
TOTAL	1.727	1.763	1.695	1.615	1.849

Fuente ANP

**Tabla 3 Arribos de Portacontenedores y Movimiento de Contenedores
(Comparativo 2007-2011)**

CATEGORIA	2007	2008	2009	2010	2011
Buques(PortaContenedores)	731	819	976	913	1027
TEUs	596.487	675.273	588.410	671.952	861.164
Contenedores movilizados	352.737	401.675	351.067	405.593	518.121
Contenedores/Buque	482,54	490,45	359,70	444,24	504,50

Fuente ANP

**Tabla 4 Tendencia en porte de los Buques Portacontenedores
(Comparativo 2007-2011)**

	2007	2008	2009	2010	2011
Buques(PortaContenedores)	731	819	976	913	1027
TRB p/buque	30.989	29.475	30.534	35.596	38.153
ESLORA mts/buque	210,28	205,66	211,93	227,89	228,99
CALADO mts /buque	11,22	10,86	11,11	11,7	11,51

Fuente ANP

En la Tabla 5 se resume las estadísticas de Tasa de Ocupación para el año 2011 en los Terminales de Contenedores, donde la Ocupación se calcula de la manera siguiente:

$$\text{Ocupación} = (\text{la sumatoria de esloras} \times \text{Minutos atracados}) / (\text{Longitud total de muelles} \times \text{Minutos del período})$$

En el caso de la terminal TCP, la tasa de ocupación varía entre 34% y 50%, dependiendo del mes. Los valores máximos se observan en el periodo Marzo-Junio cuando el promedio alcanza el 47%.

En el caso de la Terminal multipropósito operada por MONTECON, la tasa de Ocupación en general varía entre 37% y 75%, con un promedio del 55,5%. Pero la tasa de ocupación, relacionada directamente con la operativa de Contenedores varía entre 14% 39,9%.

Tabla 5. % de Ocupación de los Terminales de Contenedores (Comparativo 2007-2011)

		TCP	MONTECON			
			3, 4 y 5	8 y 9	3, 4 y 5	8 y 9
		Contenedores	Total		Contenedores	
ene-11	% Ocupacion	36,4%	50,7%	50,3%	23,4%	28,1%
	Total Buques	77	103	40	45	22
feb-11	% Ocupacion	40,7%	45,6%	62,4%	22,9%	18,8%
	Total Buques	71	80	47	37	17
mar-11	% Ocupacion	46,7%	42,6%	65,9%	27,8%	17,1%
	Total Buques	81	101	26	60	11
abr-11	% Ocupacion	44,3%	48,2%	55,8%	26,0%	16,3%
	Total Buques	83	72	28	45	15
may-11	% Ocupacion	48,7%	75,0%	71,7%	28,7%	20,0%
	Total Buques	76	59	38	37	15
jun-11	% Ocupacion	50,0%	60,6%	52,9%	23,7%	39,6%
	Total Buques	80	56	50	32	25
jul-11	% Ocupacion	40,6%	54,2%	66,9%	23,3%	34,3%
	Total Buques	79	48	32	26	22
ago-11	% Ocupacion	35,3%	63,2%	37,4%	14,1%	34,7%
	Total Buques	66	44	37	22	31
set-11	% Ocupacion	38,5%	66,2%	44,2%	16,0%	39,9%
	Total Buques	78	29	37	18	26
oct-11	% Ocupacion	33,6%	53,2%	43,5%	19,2%	38,8%
	Total Buques	75	66	41	28	27

Fuente: ANP, elaborado por Gabriel Canale

**2. Modelo de desempeño de una Terminal de Contenedores:
el Modelo de Fila de Espera (Teoría de Colas) y los Modelos de Simulación**

La disponibilidad de sitio de atraque para los buques portacontenedores y la capacidad de la Terminal para movilizar los contenedores es un elemento crítico en la operativa de las terminales de contenedores. Las demoras en atracar en muelle para movilizar los contenedores (carga/descarga) o la demora en el servicio afectan a los buques incrementando sus costos de estadía o los costos de oportunidad por pérdida de conexiones con feeders. Pero, esas demoras también afectan a los operadores de las terminales incrementando sus costos directos por unidad de contenedores movilizados como también los costos de oportunidad asociados al incremento en la congestión de la terminal.

La mejora en el desempeño de las TC requiere necesariamente de información y análisis adicional sobre el funcionamiento de estas Terminales.

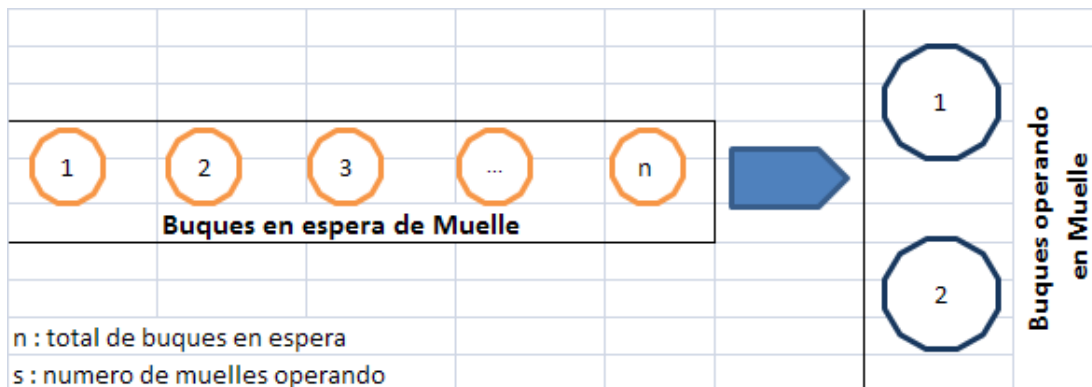
Un parámetro importante que mide el desempeño en una TC es el tiempo promedio que un buque tiene que esperar para atracar en muelle y ser servido.

Dos factores afectan este parámetro:

- Ritmo de llegada/arribos de buques al puerto
- Tiempo del servicio al buque en Muelle.

El arribo de un buque a Puerto se realiza de manera aleatoria y una vez en Puerto, el buque puede desplazarse directamente hasta el Muelle especializado o esperar hasta que este se desocupe. El tiempo en muelle para servir a un Buque es variable y depende del volumen de la carga a movilizar y la capacidad instalada en el Muelle para operar el servicio.

Figura 2 Fila de Espera de Buques en Puerto



El análisis de estos comportamientos aleatorios en el Puerto y en el Muelle son complejos, pero puede ser fácilmente implementado mediante un Modelo de Colas/Fila de Espera.

Los MC son una de las herramientas clásicas y de gran utilidad para analizar el comportamiento de las unidades en situación de espera por el servicio (buques en espera de Muelle para cargar/descargar contenedores).

Revisión del State of the Art en aplicación de Modelo de Colas en Terminales Portuarias.

Existe una extensa y creciente literatura especializada relacionada con la aplicación de los Modelos de Colas (MC) y Modelos de Simulación (MS) para simular y analizar el funcionamiento de los sistemas portuarios y en particular las Terminales de contenedores. (Dragovic, 2011; Taha, HA, 2010; Wen-Chih,2007 ; Branislav, 2006).

En particular, Dragovic, 2011 en el marco de la Conferencia Latinoamericana de Economistas Marítimos (IAME-2011) llevada a cabo en octubre 2001 en Santiago de Chile, presentó una extensa y exhaustiva revisión de la literatura especializada en modelización del desempeño de los sistemas portuarios y la aplicación de los modelos de colas y otros instrumentos de la Investigación de Operaciones, con el objetivo de analizar los resultados recientes e identificar los actuales programas de investigación en los temas más relevantes para la gestión portuaria.

Esta revisión muestra, que numerosos modelos de Investigación de Operaciones (OR) han sido utilizados con el objetivo de modelizar la operativa portuaria. En este contexto, los Modelos de Colas juegan un rol referente, especialmente en el caso de las nuevas terminales portuarias especializadas en movilización de contenedores.

La mayor parte de los papers que implementan los MCs publicados entre 1991-2010 se apoyan en varios supuestos básicos considerados como clásicos:

- La Llegada/Arribos de los Buques se ajustan a una Distribución probabilística de POISSON
- El Tiempo de Servicio es ajustado a una Distribución probabilística ERLANG (K) donde se discute el grado (k) que mejor se adapta a los datos observados. Numerosas son las investigaciones que terminan asumiendo (K=1) es decir ajustando una función de probabilidad EXPONENCIAL,
- El numero de buques en el sistema se ajustan a una distribución probabilística POISSON
- Las funciones de los Muelles son servidores independientes
- Existe infinitos Buques que pueden llegar-servidos-se van

Los MC han sido empleados para determinar los requerimientos de capacidad a nivel de las terminales de Contenedores con el objetivo de balancear/equilibrar el flujo de contenedores y las capacidades de los Sistemas de TC. Como el enfoque de Optimización – incluye técnicas analíticas y de simulación, en numerosas investigaciones donde se aplican los MC con los supuestos clásicos, también se incluye la implementación de modelos de Simulación que permita validar los resultados obtenidos con el MC.

Las nuevas direcciones de investigación buscan actualmente profundizar el análisis, apuntando a Modelos que toman en cuenta la complejidad de algunos Sistemas Portuarios, combinando los MC con los MS y Modelos de optimización y de Optimización combinatoria. De esta manera, se busca integrar los MCs a un modelo de optimización en el marco de un sistema de apoyo a la decisión. (Canonaco et al., 2008; Legato, P., 2009; Sacone et al., 2009).

2.1 Los elementos básicos para la implementación del Modelo de Colas a nivel de una Terminal de Contenedores.

Dos elementos son necesarios para la aplicación/implementación de un Modelo de Colas a un problema de fila de espera: una función de llegada/arribos y una función de servicio.

Estas funciones serán modeladas en una primera etapa y una vez los modelos validados con los datos observados podrán ser empleados en una segunda etapa para simular el tráfico y los tiempos de espera y de servicio en el futuro.

Para poder proceder al análisis del movimiento de los buques en Puerto mediante un Modelo de Colas es necesario asumir los siguientes supuestos como validos:

- El arribo de los buques y el tiempo de servicio se comportan de manera aleatoria
- Los buques son atendidos con una disciplina de fila de espera del tipo FCFS (First-come first-served)
- La fila de espera no tiene limites, es decir que se asume que cuando un buque llega a Puerto y se encuentra con la fila de espera, en lugar de retirarse del puerto el buque se instala en la fila

2.2 Modelo del Arribo de los Buques a Puerto.

El comportamiento de Arribo de un Buque a Puerto puede ser aleatorio o estar agendado de antemano. Para poder predecir el número de buques presentes en Puerto en un determinado momento, el comportamiento de arribo puede ser aproximado por una función de distribución POISSON, como lo sugiere la literatura especializada. En este caso, la Probabilidad $P(n)$ del arribo de " n " buques en Puerto en un momento determinado se escribe

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

Donde

λ = tasa de llegada promedio de buques por unidad de tiempo (por ejemplo: buques por día)

e = 2,71828

$n!$ = factorial de n

En el caso de asumir una función de distribución de Poisson, la distribución del arribo de buques a Puerto puede ser estimada a partir de la tasa promedio de llegadas/arribos durante el horizonte de tiempo analizado.

La frecuencia esperada F_n de n buques en el periodo T será:

$$F_n = T P_n$$

Donde

T = periodo de tiempo considerado (un año)

2.3 Modelo del tiempo de Servicio en el Muelle.

La duración de la estadía del buque en el Muelle para movilizar los contenedores es generalmente descrita mediante una función de probabilidad del tipo Erlang(k)

$$t \sim Erlang(R; k)$$

Cuando “R” representa el parámetro de escala ($1/R =$ valor esperado) , y “k” el parámetro correspondiente a la forma de la curva, entonces la función de probabilidad Erlang se puede describir como:

$$P_t = \frac{R(Rt)^{k-1}}{(k-1)!} e^{-Rt} \quad \text{si } t \geq 0$$

La función de Erlang se apoya en el supuesto de que el tiempo de servicio puede ser separado en 2 o más fases operativas de manera secuencial, y que el Buque no deja el Muelle hasta que todas las fases no hayan sido completadas. El número de fases corresponde con el parámetro “k”. Cuando el parámetro $k=1$, la función de Erlang es equivalente a la función de distribución Exponencial (λ). Si “k” se incrementa, el tiempo total de servicio se va uniformizando, hasta alcanzar la situación límite cuando $k \sim \infty$, donde todos los servicios tienen la misma duración

De esta manera, según el valor seleccionado para “k” tenemos:

- Si $k=1$ entonces el tiempo del servicio “t” es puramente aleatorio y sigue un función de probabilidad Exponencial
- Si $k \sim \infty$ entonces el tiempo del servicio es constante y similar

2.4 Modelo de Fila de Espera para la Terminal de Contenedores TCP y MONTECON (M/M/1)

De acuerdo a las observaciones disponibles sobre el tiempo entre las Llegadas/Arribos a Puerto y al tiempo de servicio en Muelle y basándonos en los antecedentes (Wen-Chi et al. 2007) y de los antecedentes en Uruguay (Gorriti, J et al, 2010) se asumieron los siguientes supuestos:

- Servicio multicanal ($s=2$)
- La Llegada de Buques a Puerto sigue una función de probabilidad Poisson(λ)
- El tiempo de Servicio sigue una función de probabilidad Erlang($k=1$) es decir que se reduce a una Exponencial(μ)
- λ = Tasa media de llegadas (número de buques por día)
- $1/\mu$ = Tiempo esperado del servicio

3. Datos observados para el año 2011 y análisis descriptivo de las estadísticas del Sistema Portuario

A partir de los datos suministrados por la ANP, se revisó la información del tráfico en ambas Terminales de Contenedores, analizándose las tendencias recientes en el movimiento de buques portacontenedores y en la operativa de contenedores.

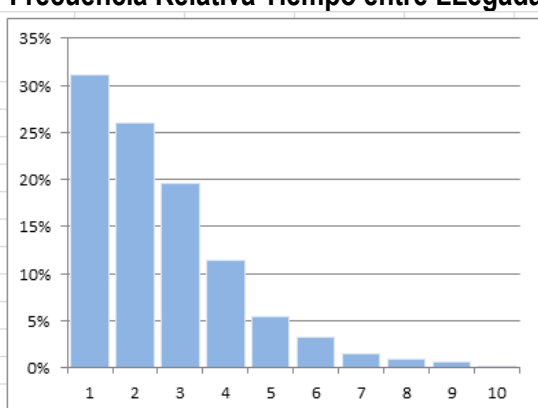
Para ello se contó con una actualización a 2011 de la base de datos de la operativa de Buques en el puerto de Montevideo, y en particular se dispuso de la información siguiente:

- Nombre del buque
- Fecha y horario detallado de arribo y salida de la terminal de contenedores
- Identificación de la Terminal de Contenedores
- Tiempo de servicio en Muelle
- Intervalo de tiempo entre llegadas consecutivas

Tabla 6 Terminal TCP (Año 2011)
Tiempo entre Dos Llegadas

No. de intervalo	Desde	Hasta	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa	Frecuencia Relativa (Acum)
1	0:00	4:59	266	31,11%	31,11%
2	5:00	9:59	222	25,96%	57,08%
3	10:00	14:59	167	19,53%	76,61%
4	15:00	19:59	98	11,46%	88,07%
5	20:00	24:59	46	5,38%	93,45%
6	25:00	29:59	28	3,27%	96,73%
7	30:00	34:59	12	1,40%	98,13%
8	35:00	39:59	8	0,94%	99,06%
9	40:00	44:59	5	0,58%	99,65%
10	45:00	49:59	1	0,12%	99,77%
11	50:00	54:59	2	0,23%	100,00%
			855	100%	

Gráfico1: Terminal TCP (Año 2011)
Frecuencia Relativa Tiempo entre Llegadas

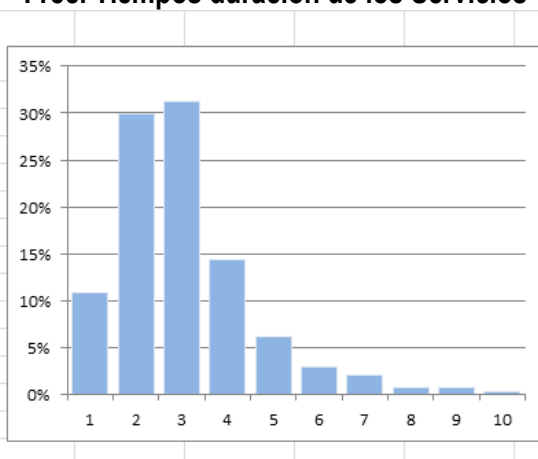


Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la ANP.

Tabla 7 Terminal TCP (Año 2011)
Tiempos duración de los Servicios

No. de intervalo	Desde	Hasta	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa	Frecuencia Relativa (Acum)
1	0:00	4:59	93	10,86%	10,86%
2	5:00	9:59	256	29,91%	40,77%
3	10:00	14:59	267	31,19%	71,96%
4	15:00	19:59	123	14,37%	86,33%
5	20:00	24:59	53	6,19%	92,52%
6	25:00	29:59	25	2,92%	95,44%
7	30:00	34:59	18	2,10%	97,55%
8	35:00	39:59	7	0,82%	98,36%
9	40:00	44:59	7	0,82%	99,18%
10	45:00	49:59	3	0,35%	99,53%
11	50:00	54:59	1	0,12%	99,65%
12	55:00	59:59	1	0,12%	99,77%
13	60:00	64:59	2	0,23%	100,00%
			856	100%	

Gráfico 2: Terminal TCP (Año 2011)
Frec. Tiempos duración de los Servicios

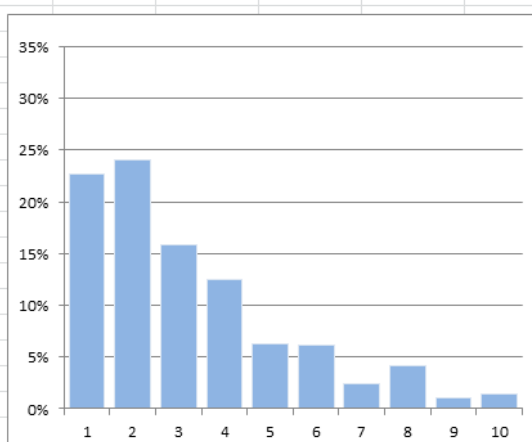


Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la ANP.

**Tabla 8 Terminal MONTECON (Año 2011)
Tiempo entre Dos Llegadas**

No. de intervalo	Desde	Hasta	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa	Frecuencia Relativa (Acum)
1	0:00	4:59	129	23%	22,63%
2	5:00	9:59	137	24%	46,67%
3	10:00	14:59	90	16%	62,46%
4	15:00	19:59	71	12%	74,91%
5	20:00	24:59	36	6%	81,23%
6	25:00	29:59	35	6%	87,37%
7	30:00	34:59	14	2%	89,82%
8	35:00	39:59	24	4%	94,04%
9	40:00	44:59	6	1%	95,09%
10	45:00	49:59	8	1%	96,49%
11	50:00	54:59	2	0%	96,84%
12	55:00	59:59	4	1%	97,54%
13	60:00	64:59	2	0%	97,89%
14	65:00	69:59	2	0%	98,25%
15	70:00	74:59	5	1%	99,12%
16	75:00	79:59	2	0%	99,47%
17	80:00	84:59	1	0%	99,65%
18	85:00	89:59	1	0%	99,82%
19	90:00	94:59	1	0%	100,00%
			570	100%	

**Gráfico 3: Terminal MONTECON (Año 2011)
Frecuencia Relativa Tiempo entre Llegadas**

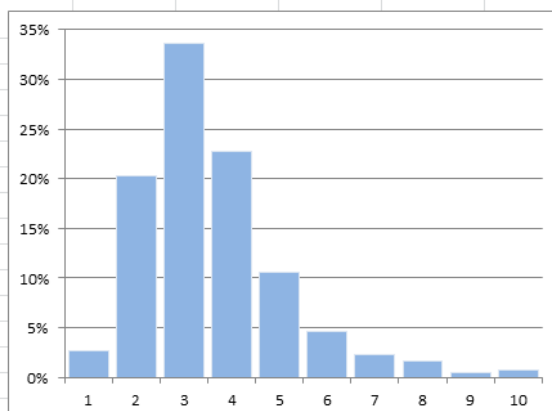


Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la ANP.

**Tabla 9 Terminal MONTECON (Año 2011)
Tiempos duración de los Servicios**

No. de intervalo	Desde	Hasta	Frecuencia Absoluta	Frecuencia Relativa	Frecuencia Relativa (Acum)
1	0:00	4:59	15	3%	2,63%
2	5:00	9:59	116	20%	22,94%
3	10:00	14:59	192	34%	56,57%
4	15:00	19:59	130	23%	79,33%
5	20:00	24:59	60	11%	89,84%
6	25:00	29:59	26	5%	94,40%
7	30:00	34:59	13	2%	96,67%
8	35:00	39:59	9	2%	98,25%
9	40:00	44:59	3	1%	98,77%
10	45:00	49:59	4	1%	99,47%
11	50:00	54:59	2	0%	99,82%
12	55:00	59:59	0	0%	99,82%
13	60:00	64:59	0	0%	99,82%
14	65:00	69:59	0	0%	99,82%
15	70:00	74:59	1	0%	100,00%
			571	100%	

**Gráfico 4: Terminal MONTECON (Año 2011)
Frecuencia de Tiempos duración de los Servicios**



Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la ANP.

La tabla 10 resume la información sobre arribo de buques y sobre movilización de contenedores en cada una de las Terminales de Contenedores. La Tabla 12 incluye una información sobre tiempos promedios (esperados) de Llegadas y tiempo del servicio en la Línea de atraque.

Tabla 10 Operativa y Total de Buques y Arribos a cada Terminal

	T.C.P.	MONTECON	TOTAL
Total Buques operaron en la Terminal	156	125	256
Total Arribos en la Terminal	856	571	1.427
Promedio Arribo/Buque	5,5	4,6	5,6
Contenedores (cargados)	160.393	1	160.394
Contenedores (descargados)	167.227	89.995	257.222
Contenedores (Total movilizados)	330.580	183.932	514.512

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la ANP.

Tabla 11 Tiempo entre Llegadas y Tiempo de Servicios (horas p/buque)

(en horas p/buque)	T.C.P.	MONTECON
Tiempos entre Llegadas (promedio)	10,5	15,5
Tiempo del Servicio (promedio)	12,9	15,6

Fuente: Elaboración propia a partir de los datos de la ANP.

4. Modelo de Sistema de operación de las 2 Terminales de Contenedores: TCP y MONTECON

El modelo empleado asume un escenario que representa las actividades del año 2011 desarrolladas en cada terminal de contenedores, el cual supone seleccionar una distribución de probabilidad para las Llegadas a Puerto y función de distribución para el tiempo de servicio en Muelle y el número “s” de servicios de atraque.

Para el año 2011, el numero “s” de servicios no se ha modificado para la terminal de contenedores de MONTECON (s=2) en relación a 2008. Sin embargo las inversiones realizadas entre 2009-2010 en la terminal TCP, implica que desde 2011 se requiere manejar un número s=2 de servicios o canales.

Los inputs del modelo de colas son los siguientes:

- Distribución de tiempos entre llegadas y tasa media : λ = cantidad esperada/promedio de buques que Llegan a Puerto por día
- Distribución de tiempos de Servicio en la Terminal y tasa media de servicio: μ = cantidad esperada/promedio de buques servidos por día
- Cantidad de Servicios por terminal igual a s=2

En relación con las Llegadas a Puerto se ha asumido los supuestos clásicos de las mismas son aleatorias y siguen una Distribución de Probabilidad de tipo Poisson. Esto significa, que la distribución del tiempo entre dos llegadas consecutivas se ajusta a una función de probabilidad Exponencial (equivalente a una Función de probabilidad de Erlang (k=1)).

Para los tiempos de servicio en las Terminales de Contenedores donde existe una relativa programación de la operativa de contenedores, se analizó la posibilidad de emplear una Función

de Erlang de grado superior a 1. Finalmente, se asumió una distribución de Erlang (K=1) que no es rechazado por los datos observados y por otro lado permite emplear métodos analíticos.

Los outputs del Modelo son:

- Tiempo esperado/promedio del buque en el sistema : W
- Tiempo esperado/promedio del buque en la fila de espera/cola : W_q
- Numero esperado/promedio de buques en el sistema: L
- Numero esperado/promedio de buques en la fila de espera/cola: L_q
- Factor de Utilización/Grado de ocupación del muelle/servicio: ρ
- Probabilidad de que "n" buques se encuentren en el sistema: P_n

Figura 3 Formulas para el Calculo de los Parámetros de los Modelos M/M/1 Y M/M/2

M/M/1	M/M/s
$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$	$\rho = \frac{\lambda}{s\mu}$
$P_0 = 1 - \frac{\lambda}{\mu}$	$P_0 = \frac{1}{\sum_{n=0}^{s-1} \frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} + \frac{(\lambda/\mu)^s}{s!} \left(\frac{s\mu}{s\mu - \lambda} \right)}$
$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$	$L_q = \left(\frac{(\lambda/\mu)^s \lambda \mu}{(s-1)! (s\mu - \lambda)^2} \right) P_0$
$L_s = L_q + \frac{\lambda}{\mu} = \dots = \frac{\lambda}{(\mu - \lambda)}$	$L_s = L_q + \frac{\lambda}{\mu}$
$W_q = \frac{L_q}{\lambda} = \dots = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$	$W_q = \frac{L_q}{\lambda}$
$W_s = W_q + \frac{1}{\mu} = \dots = \frac{1}{(\mu - \lambda)}$	$W_s = W_q + \frac{1}{\mu}$
$P_w = \frac{\lambda}{\mu}$	$P_w = \frac{1}{s!} \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^s \left(\frac{s\mu}{s\mu - \lambda} \right) P_0$
	$P_n = \left(\frac{(\lambda/\mu)^n}{n!} \right) P_0 \quad \text{si } n \leq s$
$P_n = \left(\frac{\lambda}{\mu} \right)^n P_0$	$P_n = \left(\frac{(\lambda/\mu)^n}{s! s^{(n-s)}} \right) P_0 \quad \text{si } n > s$

4.1 Validación

La validación del Modelo se realiza mediante la comprobación de que la predicción del modelo se ajusta adecuadamente con los datos observados. Los parámetros empleados para esta validación son los siguientes:

- Espera relativa promedio por buque
- Tiempo de servicio promedio por buque
- Promedio de llegadas diarias a la TC

5. Análisis de los Resultados

La Tabla 12 resume la tendencia creciente en la movilización de contenedores en el Puerto de Montevideo y por Terminal: TCP y MONTECON. En total la operativa de carga/descarga se incrementa significativamente en el año 2011 con respecto al 2008 en un 29% a nivel todo el Puerto, pero el crecimiento es aún mayor en el caso de la TCP, cuyo crecimiento es particularmente importante en 2011, cuando en 2010 se había contraído. En buena medida, este crecimiento en 2011 tiene dos componentes, por un lado la situación de los puertos marítimos en la Región y por otro el incremento de la capacidad de la Terminal, que prácticamente duplica la longitud atraque y duplica la cantidad de grúas pórticos.

5.1 Desempeño de la Terminal TCP

Este crecimiento de la actividad portuaria en los 2 Terminales, y particularmente en la TCP forma parte del marco sectorial, el cual está impactando en los resultados del desempeño del sistema portuario en 2011.

Tabla 12 Movilización de Contenedores por Terminal: TCP y MONTECON

MES	TERMINAL DE CONTENEDORES		OTROS MUELLES		TOTAL	
	Cantidad	%	Cantidad	%	Cantidad	%
2007	214.314	87,7%	138.423	88,1%	352.737	87,8%
2008	244.500	100,0%	157.175	100,0%	401.675	100,0%
2009	199.660	81,7%	151.407	96,3%	351.067	87,4%
2010	229.272	93,8%	176.321	112,2%	405.593	101,0%
2011	326.821	133,7%	191.300	121,7%	518.121	129,0%

Fuente: Elaboración propia a partir de los Datos de ANP

La Tabla 13 resume las estimaciones de los parámetros del Modelo de Colas y los indicadores de desempeño para los años 2008 (Gorriti, J 2010) y 2011. También se incluye la proyección para el año 2015 hecha a partir de los datos del 2008 y con la información de Escenarios futuros en base a datos de la ANP, TCP y Palma,L (2007).

De acuerdo a estos resultados, el parámetro λ (Tasa de arribos buques p/día) prácticamente duplica entre 2008 y 2011 reflejando el incremento significativo de la movilización de contenedores en la Terminal TCP. Sin embargo, el Factor de Utilización que depende de la cantidad de canales/servidores ("s") si bien se incrementa en 2011, no lo hace en la proporción del incremento al flujo de contenedores. Esto es así porque en el interim, TCP ha duplicado su Infraestructura de Muelle, y de playa de maniobras y almacenamiento. Mientras que en 2008, solamente existía un canal/servidor, desde 2011 el 2do servidor ya está activo como resultado de los esfuerzos de inversión de la empresa. Los indicadores reflejan este incremento de los servicios.

Por otro lado la Terminal TCP registra en 2011 una leve reducción de la tasa de servicio, que quizás esté relacionada con la mayor cantidad de carga/descarga de contenedores por buque, al observarse también un incremento en las dimensiones (mayor TRB promedio) y mayor cantidad de contenedores.

Los indicadores de desempeño del Modelo de Colas para la terminal TCP muestran una mejora significativa, no solamente a nivel del Factor de Utilización, sino también a nivel del tiempo promedio/esperado que un buque debe permanecer en la fila de espera, W_q se reduce a la mitad entre 2008 y 2011. Esta reducción compensa en parte el incremento observado en el tiempo de servicio en la Línea de Atraque.

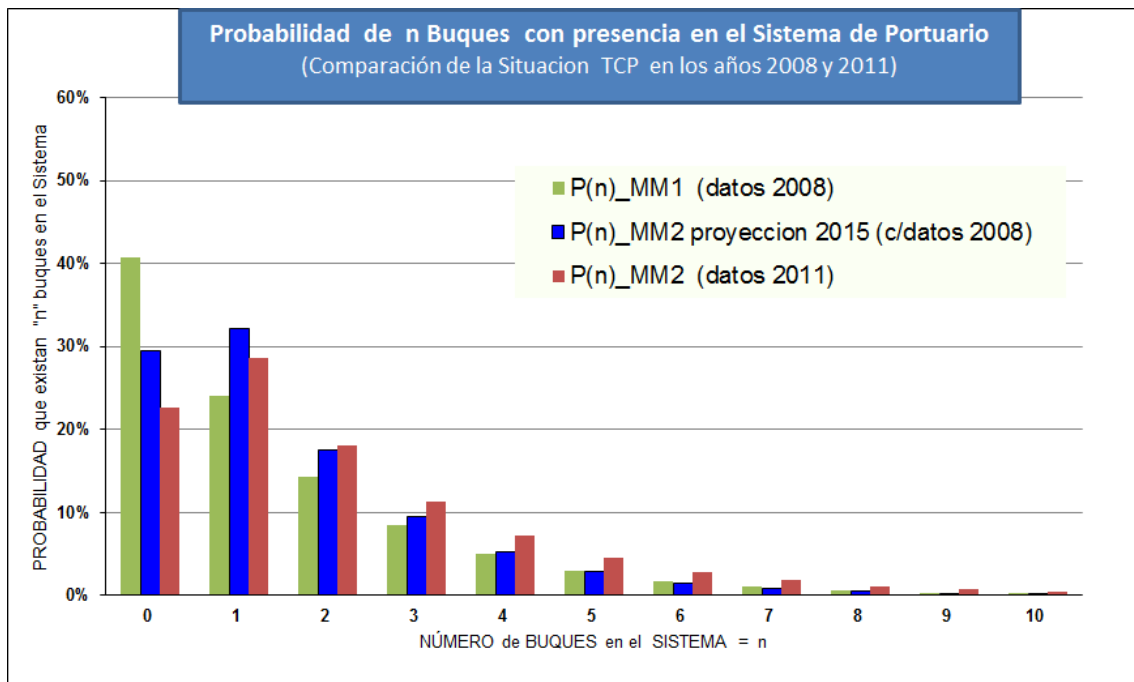
Tabla 13 Parámetros (Inputs) y Resultados para la Terminal TCP

Terminal TCP			M/M/1 2008	M/M/2 Proy a 2015	M/M/2 2011
λ	Tasa de arribos (lambda)	buques/día	1,21	1,85	2,34
μ	Tasa de servicio (mu)	buques/día	2,04	1,70	1,86
s	Número de servidores		1	2	2
$\rho = \lambda/s\mu$	Factor de utilización	%	59%	54%	63%
	Unidad de tiempo	día			
Factor de Utilización		%	59,31%	54,41%	63,05%
P(0), probabilidad que el sistema esté vacío		%	0,4069	0,2952	0,2266
Lq, longitud esperada de la cola		buq/día	0,8647	0,4577	0,8319
Ls número esperado en el sistema		buq/día	1,4578	1,5459	2,0928
Wq, tiempo esperado en la cola		días	0,7146	0,2474	0,3548
Ws tiempo total esperado en el sistema		días	1,2048	0,8356	0,8927
Probabilidad de que un buque espere		%	59,31%	38,35%	48,76%
Probabilidad de 5 buques en el sistema		%	2,99%	2,82%	4,52%

Estos parámetros de desempeño del sistema se complementan con la Probabilidad de observar "n" Buques en la Línea de Atraque de la Terminal TCP. El Gráfico 5 permite la comparación por años. En el año 2008, la Probabilidad de no encontrar ningún buque en el la Terminal TCP era de 40,7% sin embargo la misma se reduce prácticamente a la mitad $P(0)=22,7\%$ en 2011. Esta reducción tiene su contracara en el incremento de la Probabilidad de encontrar más buques en el Sistema, y por lo tanto un aumento en el tráfico marítimo.

Los parámetros e indicadores de desempeño del Modelo de Cola permite comparar también la situación del Año 2011 con el Escenario de la proyección para 2015 hecho a partir de la información de 2008 y 2010. Esta comparación muestra, que si bien la Proyección permitió simular un Escenario que se aproxima a los datos observados del 2011, por otro lado subestima el incremento del desempeño en el sistema como consecuencia de solamente proyectar el 50% del incremento real que se observó en 2011. De todas maneras, muestra la relevancia de estos Modelos de Cola para simular Escenarios futuros y contribuir al dimensionamiento de las inversiones futuras en ampliación de la Infraestructura o en la mejora en la eficiencia de los servicios de movilización de contenedores.

Grafico 5



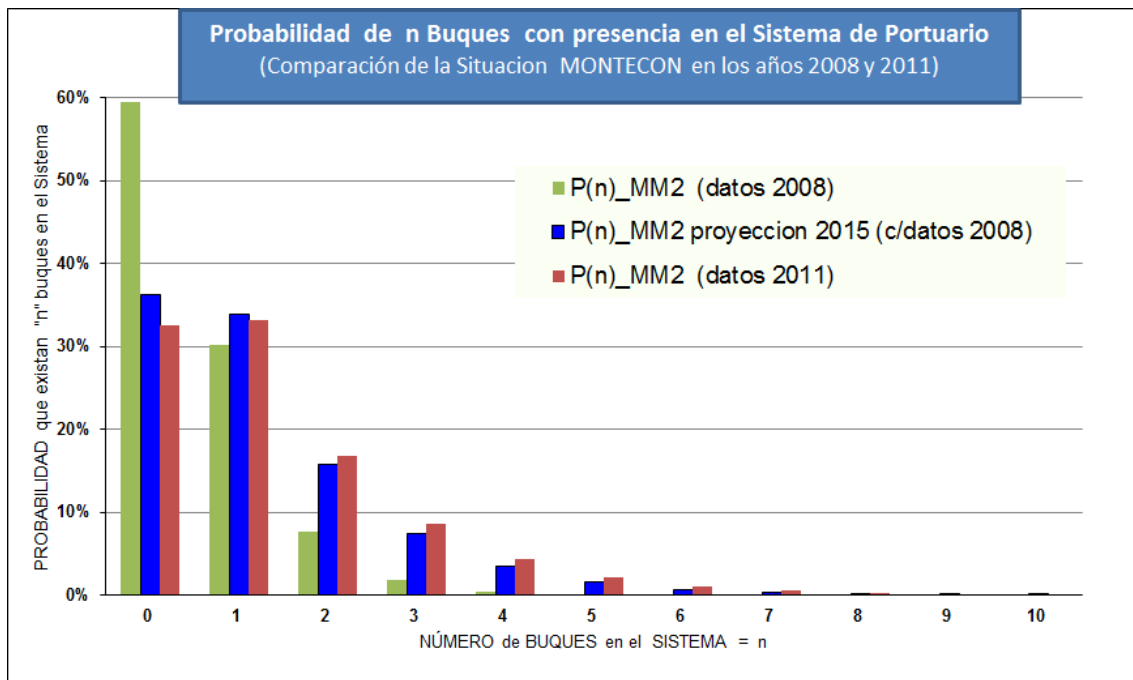
5.2 Desempeño de la Terminal MONTECOM

La Tabla 14 resume los parámetros e indicadores de desempeño correspondientes a la Terminal MONTECOM. Entre el año 2011 y 2008 se mantiene el número de Servicios. Por otro lado esta Terminal es del tipo multipropósito, y no es utilizada únicamente para carga/descarga de Contenedores. Sin embargo, el incremento de la Tasa de Arribos (λ) también impacto en el desempeño del sistema de la Terminal, pero de manera menos significativa. El Factor de Utilización se duplica, pero el tiempo promedio/esperado de un Buque en la Cola y en el Sistema no se reduce en ningún caso. Por otro lado, la Probabilidad de no encontrar ningún Buque en el Sistema de la Terminal que era muy elevada en 2008 ($P(0)= 59,5\%$), se reduce en 2011 a $P(0)=32,6\%$ pero sigue siendo relativamente alto.

Tabla 14 Parámetros (Inputs) y Resultados para la Terminal MONTECON

Terminal MONTECON			M/M/1 2008	M/M/2 Proy a 2015	M/M/2 2011
λ	Tasa de arribos (lambda)	buques/dia	1,04	1,59	1,57
μ	Tasa de servicio (mu)	buques/dia	2,05	1,70	1,54
s	Número de servidores		2	2	2
$\rho = \lambda/s\mu$	Factor de utilización	%	25%	47%	51%
	Unidad de tiempo	dia			
Factor de Utilización		%	25,37%	46,76%	50,83%
P(0), probabilidad que el sistema esté vacío		%	0,5953	0,3627	0,3260
Lq, longitud esperada de la cola		buq/dia	0,0349	0,2618	0,3542
Ls número esperado en el sistema		buq/dia	0,5422	1,1971	1,3708
Wq, tiempo esperado en la cola		dias	0,0335	0,1647	0,2260
Ws tiempo total esperado en el sistema		dias	0,5213	0,7529	0,8748
Probabilidad de que un buque espere		%	10,26%	29,80%	34,26%
Probabilidad de 5 buques en el sistema		%	0,13%	1,62%	2,21%

Grafico 6



6. Conclusiones.

Esta investigación tiene varios objetivos de complementación y actualización con respecto al trabajo realizado en 2010 por Gorriti, J et al (2010).

Por un lado, revisar la literatura reciente sobre el empleo de los Modelo de Colas y Modelos de Simulación a nivel del análisis de desempeño de los Sistemas Portuarios y Terminales de Contenedores. De dicha revisión, surge que los resultados obtenidos en la modelización del Puerto de Montevideo resultan comparables a los presentados en las Revistas especializadas. También, se han identificado líneas de trabajo que permiten mejorar el ajuste de los Modelos de Colas a la realidad de los Sistemas Portuarios, particularmente complejos, al proponerse integrar dichos Modelos con Modelos de optimización en el marco de Sistemas integrados de Apoyo a la toma de Decisiones.

Por otro, lado este trabajo es una actualización al año 2011 de los Modelos de Colas para las Terminales TCP y MONTECON estimados a partir de los datos del 2008. Esta comparación resulta muy informativa, en la medida que el año 2011 es un año en el que se observa un incremento significativo del Trafico Marítimo a nivel global del puerto de Montevideo, pero particularmente a nivel de la Terminal Cuenca del Plata, la cual acaba de duplicar su Infraestructura de Servicios de Carga/Descarga de contenedores. En este contexto, los Modelos de Colas clásicos M/M/s permiten un ajuste razonable a los datos observados. Se ha mostrado la relevancia de los mismos para contribuir al dimensionamiento de las Inversiones futuras en infraestructura y Equipamiento Portuario, como en mejoras de gestión, a partir de su capacidad para realizar simulaciones de Escenarios futuros para cada una de las Terminales.

Las proyecciones de los Modelos de Colas realizadas en 2010 con datos del 2008 e información de Escenarios futuros, si bien subestimaron el incremento del tráfico marítimo del año 2011 y su impacto en los indicadores de desempeño, resultan relevantes en la medida que apuntan en la buena dirección. Dicha subestimación no es atribuible al Modelo de Colas, en realidad la información de los Escenarios resulto ser relativamente “conservadora” en relación a la realidad del trafico marítimo en la Región y en la tendencias de las actividades portuarias del Puerto de Montevideo.

Referencias Bibliográficas

- Agerschou, H., Dand, I., Ernst, T., Ghoo, H., Jensen O. J., Korsgaard, J., Land, J., McKay, S T., Oumeraci, H., Peterson, J.B., Schmidt, L. R., Svendsen, H.L., Planning and design of ports and marine terminals, Thomas Telford Ltd, 2nd Edition, London, 2004.
- Branislav D, Nam KP. Modeling of shipberth yard lnk performance and throuput optimization. IAME Conference Proceedings, Melbourne, Australia, 2006.
- Canonaco, P., Legato, P., Mazza, R., Musmanno, R., A queuing network model for the management of berth crane operations, Computers & Operations Research, 2008, 35, 2432-2446.
- Dragović B., Zrnić Dj. N., Skurić M., Comparison of new and old queuing theory results for Container terminal performance, accepted for publication in "Proceedings of the Annual Conference – The International Association of Maritime Economists", IAME 2011, Santiago de Chile, Chile, 2011, 1-19.
- El-Naggar, M.E., Application of queuing theory to the container terminal at Alexandria seaport, Journal of Soil Science and Environmental Management, 2010, 1(4), 77-85.
- Frankel, G.E., Port Planning and Development, New York, John Wiley and Sons, 1987.
- Gorriti, J., Hornes, F., Pereyra M. Análisis de desempeño del Proceso de Carga y Descarga de Contenedores en el Puerto de Montevideo. Mimeo. Facultad de Ciencias Económicas y Administración, UDELAR. Montevideo, 2010
- Hillier, F. y Lieberman, G., Investigación de Operaciones, Mc Graw-Hill, Mexico DF, 2002.
- Legato, P., Canonaco P., Mazza, R., Yard crane management by simulation and optimization, Maritime Economics & Logistics, 2009, 11(1), 36–57.
- Noritake, M., Kimura, S., Optimum number and capacity of seaport berths, Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering, 1983,109(3): 323-339.
- Saccone, S., Siri, S., An integrated simulation-optimization framework for the operational planning of seaport container terminals, Mathematical and Computer Modeling of Dynamical System, 2009, 15, 275-293.
- Taha, H. A., Operations research – an introduction, 9th edition, Prentice-Hall, Inc., 2010.
- Wen-Chih H, T-Cheng K, Sheng-Chieh W. A comparison of analytical methods and simulation for container terminal planning. Journal of the Chinese Institute of Industrial Engineers, 2007, 24(3), 200-209.