

## **APLICACIÓN DE LA TEORÍA DE COLAS Y DE LA SIMULACIÓN AL EMBARQUE DE MINERAL DE HIERRO Y MANGANESO EN LA TERMINAL MARÍTIMA DE PONTA DA MADEIRA**

### **APPLICATION OF QUEUEING THEORY AND SIMULATION TO SHIPMENT OF IRON ORE AND MANGANESE IN THE PONTA DA MADEIRA MARITIME TERMINAL**

Gustavo Rossa Camelo<sup>1</sup>; Antônio Sérgio Coelho<sup>2</sup>; Renata Massoli Borges<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – Florianópolis – Brasil  
[gustavorcamelo@hotmail.com](mailto:gustavorcamelo@hotmail.com)

<sup>2</sup>Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC – Florianópolis – Brasil  
[coelho@deps.ufsc.br](mailto:coelho@deps.ufsc.br)

<sup>3</sup>Universidade do Sul de Santa Catarina – UNISUL – Florianópolis – Brasil  
[renata@fama.br](mailto:renata@fama.br)

#### **Resumen**

*De entre las principales técnicas disponibles utilizadas en procesos de análisis y resolución de problemas sobresalen la Teoría de Colas y la Teoría de la Simulación: aquella, un método analítico para abordaje del asunto; esta, una técnica de modelaje que busca mejor representar el sistema en estudio. El uso de estas técnicas de modelaje, para resoluciones de problemas complejos y dinámicos, tiene crecido mucho en los últimos años, aunque, hay una carencia perceptible en la literatura de aplicaciones en situaciones reales. En contribución, este trabajo investiga el uso de la Teoría de Colas y de la Simulación aplicadas al embarque de mineral de hierro y manganeso en la Terminal Marítima de Ponta da Madeira - TMPM, perteneciente a Vale. Con la Teoría de Colas se pretende analizar características de atendimento a los buques que atracan en el Pier I y Pier III para cargamento de mineral de hierro y manganeso, tales como: número medio de buques en la cola y en el sistema, tiempo medio durante el cual el buque permanece en la cola y en el sistema etc. Y, con la técnica de la Simulación se pretende simular la operación del Pier IV, que consumirá R\$ 2 mil millones en inversión, aumentará la capacidad de la terminal en 100 millones de toneladas al año y que tendrá capacidad de cargar 53 buques por mes.*

**Palabras-clave:** Teoría de Colas. Simulación. TMPM.

#### **1. Introducción**

En la actual coyuntura económica el Brasil es una de las economías que más crecen en el mundo. Esta ascensión brasileña en los últimos años coloca el país como uno de los grandes destaque del actual escenario económico mundial. De acuerdo con analistas, la ascensión de Brasil, Rusia, India y China – el llamado BRIC, grupo de países que forman el pelotón de elite de las economías emergentes – cambiará el rumbo de la economía mundial.

En el Brasil, empresas y sectores enteros tiene se beneficiado con la onda de prosperidad que el país tiene pasado en los últimos años. La Vale, empresa de minería privatizada en 6 de mayo de 1997, fue una de las inúmeras empresas brasileñas que supieron tirar provecho de este actual momento, transformándose en el mayor fenómeno del capitalismo brasileño, presentando un ritmo avasallador de crecimiento.

La Vale es la mayor empresa privada de la América Latina y mayor productora de mineral de hierro del mundo. Su estructura integrada de logística es formada por cerca de 10 mil kilómetros de malla ferroviaria, cinco terminales portuarios – localizados en Espírito Santos, Sergipe y Maranhão – y una terminal carretera-ferrocarril.

En números, la Vale es responsable por 16% del movimiento de cargas en el Brasil y 30% del movimiento portuario brasileño. El sistema logístico de la Vale se divide en: Sistema Sur, compuesto por la Ferrovia Vitória a Minas (EFVM), Ferrovia Centro Atlántica (FCA), Puertos Sur – en Vitória (ES), la Terminal de Productos Diversos (TPD), la Terminal de Graneles Líquidos (TGL) y la Terminal de Praia Mole (TPM) y en Barra dos Coqueiros (SE), la Terminal Marítima Inácio Barbosa (TMIB); y, el Sistema Norte, compuesto de la Ferrovia Carajás (EFC), Ferrovia Norte Sul (FNS) y Terminal Marítima de Ponta da Madeira (TMPM).

En el Sistema Sur el mineral de hierro producido en el Cuadrilátero Ferrífero, en Minas Gerais es transportado para el Complejo Portuario de Tubarão, en Vitória (ES), y para el Puerto de Itaguaí, en el Rio de Janeiro (RJ); mientras, en el Sistema Norte el mineral producido en Carajás, en el Pará, es transportado para la Terminal Marítima de Ponta da Madeira, en São Luís (MA).

La TMPM, objeto de estudio de este trabajo, es el segundo en movimiento de cargas en el Brasil, con un flujo anual de 72.941.142 toneladas, atrás apenas del puerto de Tubarão también administrada por la Vale, de acuerdo con el Anuario EXAME de Infra-Estructura 2008-2009.

Este artículo pretende a través de la Teoría de Colas analizar características de atendimento a los buques que atracan para cargamento de mineral de hierro y manganeso. Para tal operación tiene disponible tres muelles, uno en el Pier I con capacidad de cargamento de 16.000 ton/h y dos en el Pier III con capacidad de 8.000 ton/h cada.

Conjuntamente, a través de la teoría de la Simulación, este artículo pretende simular la operación del Pier 4, que está en fase de implantación y que consumirá R\$ 2 mil millones en inversión, aumentará la capacidad de la terminal en 100 millones de toneladas por año y que tendrá capacidad de cargar 53 buques por mes.

## **2. Terminal marítima de ponta da madeira**

Inaugurado en 1986 fue inicialmente proyectado para operar con mineral de hierro y manganeso principalmente destinado a la exportación, mas desde temprano demostró su inclinación

para ser grande (VALE, 2005).

Escogido como término del Ferrocarril Carajás, es responsable por el transporte de mineral de hierro, pelotas, cobre, manganeso, hierro gusa y soya para el exterior, principalmente para la Europa y el Asia Oriental.

La TMPM es responsable por el transporte de 86% de toda la carga movida en el Maranhão. Son tres pieres, con profundidades de 23m (Pier I - uno de los más profundos del mundo), 18m (Pier II) y 21m (Pier III). Es el único del País capaz de cargar totalmente el mayor granelero del mundo, el Berge Stahl, con capacidad para transportar 364.767 toneladas (ABRETI, 2007).

Es considerado el mejor puerto del país de acuerdo con investigación realizada por COPPEAD/UFRJ junto a las empresas industriales exportadoras, agentes y armadores, terminales y administraciones portuarias. Según usuarios oídos por la investigación, su profundidad y la agilidad de las operaciones están entre los motivos que colocaron la Ponta da Madeira en lugar de destaque. Es una isla de excelencia en medio al caos que puede provocar el naufragio del sistema portuario brasileño (EXAME, 2007).

Para hacer justicia al título de mejor del País, el puerto recibirá inversiones de peso en la expansión de la capacidad que deberá en 2011 alcanzar 200 millones de toneladas.

### **3. Teoría de colas**

Todas las personas ya pasaran por el aborrecimiento de tener que esperar en colas para un atendimento. Las colas pueden ocurrir en el desenvolvimiento de cualquier actividad humana y todos nosotros, por experiencias cotidianas, las conocemos. Inclusive, las colas representan un de los síntomas más visibles de funcionamiento deficiente de un sistema. A pesar de causar enfado y prejuicios, tenemos que convivir con colas en la vida real, visto que es económicamente inviable súper dimensionar un sistema para que nunca existan colas. Lo que se pretende es obtener un balanceo adecuado que permita un atendimento aceptable que satisfaga la relación costo-beneficio (ANDRADE, 2004; COSTA, 2004; PORTUGAL, 2005; PRADO, 2006).

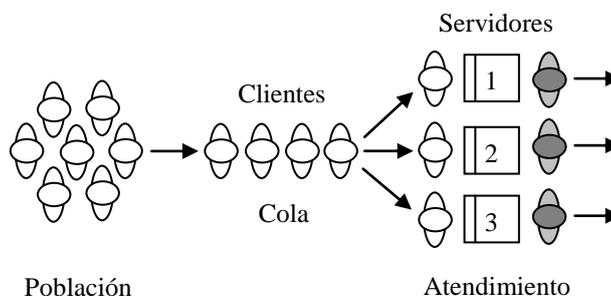
Ejemplos reales de aplicación de esa técnica pueden ser encontrados en las más diversas áreas, tales como telecomunicaciones; ingeniería de tráfico; bancos; *call center*; hospitales; aeropuertos; restaurantes; supermercados; programación de ómnibus (por ejemplo, BROWN et al., 2002; BRUIN et al., 2005; GREEN, 2006; JOSHI et al., 1992; MORE, 1977; XIAO e ZHANG, 2010).

Las formaciones de colas ocurren cuando la procura por determinado servicio es superior a la capacidad de atendimento del sistema. De esta forma, la Teoría de Colas por medio de fórmulas matemáticas tiente encontrar un punto de equilibrio que satisfaga el cliente y que sea económicamente viable para el prestador del servicio.

La Teoría de Colas es un método analítico, desarrollado por A. K. Erlang (1909), que estudia la formación de colas y sus características por medio de fórmulas matemáticas.

Un sistema de colas puede ser descrito como clientes llegando a la procura de un servicio, esperando en cola, si no fueren atendidos inmediatamente, y saliendo del sistema después de atendidos.

Figura 1 - Representación de un sistema de colas



La Tabla 1 presenta y evalúa los principales elementos de un sistema de colas en observación:

Tabla 1 - Elementos de un sistema de colas

Cliente	Es la unidad que requiere atendimento, pudiendo ser máquina, personas, y en este trabajo específico, buques.
Cola	Representa los clientes que esperan para ser atendidos. Normalmente no incluyen los clientes siendo atendidos.
Canal de atendimento	Proceso o sistema que realiza el atendimento al cliente. Puede ser un canal múltiplo o único.

### 3.1. Características básicas

En general, son seis características básicas del proceso de colas (ABAD, 2002; ANDRADE, 1994; BANKS et al, 1999; FARRERO et al, 2009; GROSS; HARRIS, 1974; MIRANDA, 2005; MIRSHAWKA, 1979; PRADO, 1999): proceso de llegada de los clientes; patrones de servicios de los asistentes; disciplina de cola; número de canales de servicios; capacidad de almacenamiento del sistema; número de etapas del servicio.

#### 3.1.1. Proceso de llegada de los clientes

El proceso de llegada del cliente o entrada en el sistema de colas es medido en razón del número medio de llegadas por una dada unidad de tiempo ( $\lambda$  – tasa media de llegada) o por el tiempo medio entre llegadas sucesivas (IC – intervalo medio de tiempo entre llegadas).

#### 3.1.2. Patrones de servicio de los asistentes

El patrón de servicio es descrito por la tasa de servicio ( $\mu$  – número de clientes en atendimento en un determinado intervalo de tiempo) o por el tiempo de servicio (TA – tiempo necesario para atender el cliente).

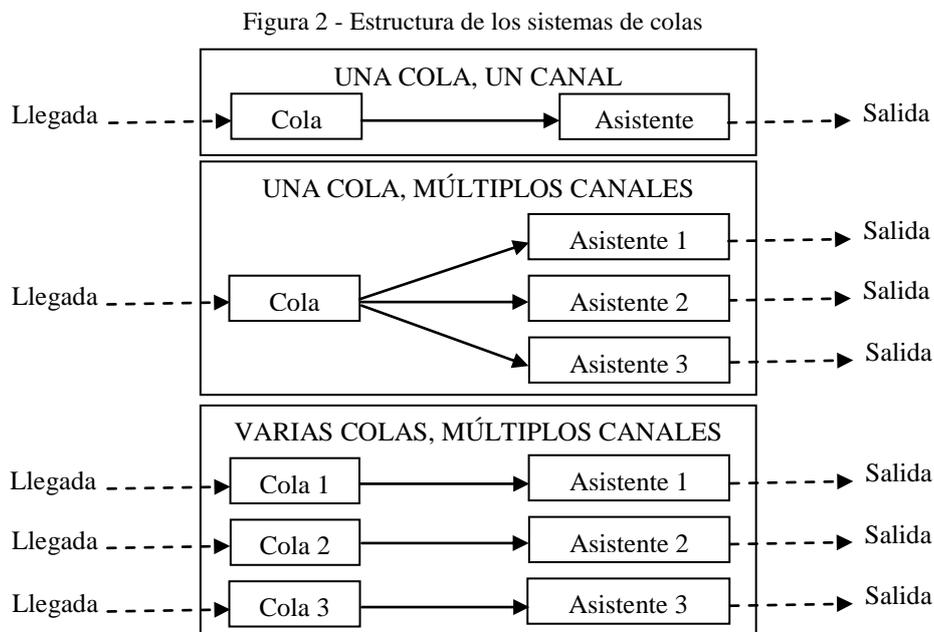
### 3.1.3. Disciplina de Cola

Se refiere a la manera como los clientes son escogidos para entrar en servicio después de una cola ser formada. La disciplina más común se da por la orden de llegada, en la cual el primero que llega es el primero a ser atendido (*First in, First out* - FIFO o PLPS). Otras alternativas son: el último a llegar es el primero a ser atendido (*Last in, First out* - LIFO o ULPS); por el atendimento con prioridad para ciertas clases de clientes, independiente de la hora de llegada en el sistema, muy común para viejos y grávidas (*Priority service* – PRI); y por la selección de atendimento de forma aleatoria, independiente de la orden de llegada en la cola (*Service in random order* – SIRO).

### 3.1.4. Número de canales de servicios

Se refiere al número de servidores en paralelo que prestan servicios simultáneos a los clientes. Un sistema de colas puede presentar un o múltiples canales de atendimento, operando independiente uno del otro. En ese último caso, puede tener una cola única o una cola para cada canal.

La Figura 2 y Figura 3 presentan las estructuras típicas de sistemas de colas:



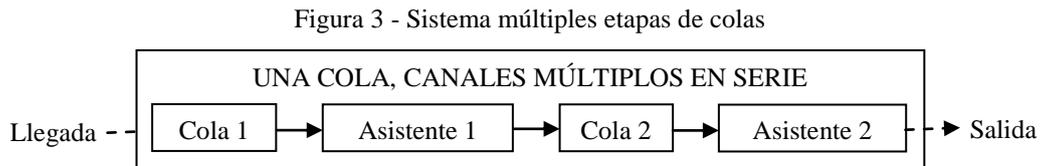
### 3.1.5. Capacidad de Almacenamiento del Sistema

Es el número máximo de usuarios, tanto aquellos siendo atendidos cuanto aquellos en las

colas, permitidos en el establecimiento de prestación de servicios al mismo tiempo, pudiendo ser finito o infinito.

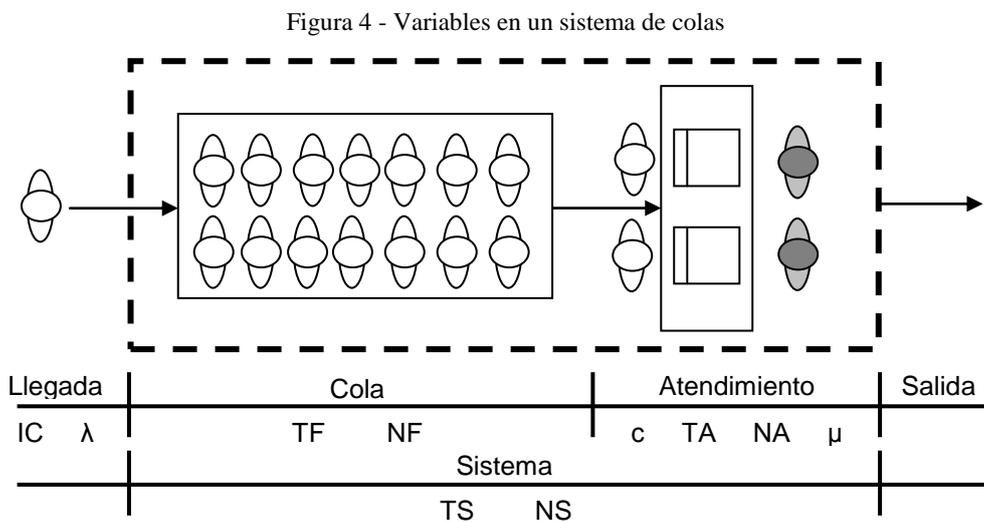
### 3.1.6. Etapas del Servicio

Un sistema de colas puede tener apenas una única etapa de atendimento, como en el caso de supermercados y peluquerías, o puede tener varias etapas. En ese caso, denominado de múltiples etapas, el cliente precisa pasar por varias etapas hasta dejar el sistema.



### 3.2. Variables aleatorias fundamentales

Un sistema de colas, en situación estable, en la cual clientes llegan y esperan para ser atendidos por “c” servidores, conforme representado por la Figura 4, presenta las siguientes variables aleatorias:



Fuente: Adaptado de Prado (2006, p. 39).

– Variables referentes al proceso de llegada

$\lambda$  = tasa media de llegada o ritmo medio de llegada;

IC = intervalo medio entre llegadas.

– Variables referentes con la cola

TF = tiempo medio de permanencia en la cola;

NF = número medio de clientes en la cola.

– Variables referentes al proceso de atendimento o de servicio

TA = tiempo medio de atendimento o de servicio;

c = capacidad de atendimento o cantidad de servidores (asistentes);

NA = número medio de transacciones o clientes que están siendo atendidos;

$\mu$  = tasa media de atendimento o ritmo medio de atendimento de cada servidor.

– Variables referentes al sistema

TS = tiempo medio de permanencia en el sistema;

NS = número medio de transacciones o clientes en el sistema.

La Tabla 2 muestra las relaciones básicas entre las variables de un sistema de colas:

Tabla 2 - Relaciones básicas entre variables

VARIABLES	FÓRMULA
Intervalo entre Llegadas	$IC = 1 / \lambda$
Tiempo del Atendimento	$TA = 1 / \mu$
Tasa de Utilización de los Asistentes	$\rho = \lambda / c \mu$
Intensidad del Tráfico	$i =  \lambda / \mu  =  TA / IC $
Relaciones entre Cola, Sistema y Atendimento	$NS = NF + NA$ $NA = \lambda / \mu$ $NS = NF + \lambda / \mu = NF + TA / IC$ $TS = TF + TA$ $NA = \rho = \lambda / c \mu$
Fórmulas de Little	$NF = \lambda \cdot TF$ $NS = \lambda \cdot TS$
Ciclo	$Ciclo = TS + TFS$ $Ciclo = \text{Tamaño da Población} / \lambda$

Fuente: Prado (2006, p. 43).

### 3.3. Medidas de desempeño

Son tres las medidas de desempeño que buscan reflejar la eficiencia de un sistema de colas en estudio: 1) las relacionadas al tiempo de espera del cliente en la cola y en el sistema; 2) las relacionadas al número de clientes en la cola y en el sistema; 3) las asociada con el uso y tiempo de inactividad de los servidores. Estas medidas son las siguientes:

Tabla 3 - Relaciones básicas entre variables

<b>Referentes al sistema</b>
TS = Tiempo medio que el cliente gasta en el sistema NS = Número medio de clientes en el sistema
<b>Referentes a la fila</b>
TF = Tiempo medio que el cliente gasta en la cola de espera NF = Número medio de clientes en la cola o tamaño medio de la cola
<b>Referente a utilización y al tiempo ocioso de los servidores</b>
$P_0$ = Índice de ociosidad de las instalaciones $\rho$ = Tasa de utilización de los asistentes

Fuente: Prado (2006, p. 43).

### 3.4. Modelos de colas

En general, un modelo de colas puede ser descrito por la notación de Kendall: A/B/c/K/m/Z, conforme la tabla 4, en que: A describe la distribución de los intervalos entre llegadas; B describe la distribución del tiempo de servicio; c es el número de canales de servicios o capacidad de atendimento; K es el número máximo de clientes permitidos en el sistema; m es el tamaño da población que proveer clientes y Z es la disciplina de la cola.

Tabla 4 - Procesos de colas

Características		Símbolos	Explicación
A	Distribución de tiempo entre llegadas	M	Ley de Poisson (Markoviano)
		D	Determinística
		E $\delta$	Erlang $\delta$ ( $\delta = 1,2,\dots$ )
		GI	Independencia General
B	Distribución de tiempo de servicio	M	Ley de Poisson (Markoviano)
		D	Determinística
		E $\delta$	Erlang $\delta$ ( $\delta = 1,2,\dots$ )
		GI	Independencia General
c	Número de canales de servicios	1,2,..., infinito	-
K	Capacidad del sistema	1,2,..., infinito	-
m	Tamaño da población	1,2,..., infinito	-
Z	Disciplina de cola	FIFO	1° que llega es el 1° en ser atendido
		LIFO	Ultimo que llega es el 1° en ser atendido
		SIRO	Servicio con orden aleatoria
		PRI	Prioridad

Fuente: Adaptado de Portugal (2005, p. 20).

Así, por ejemplo, la notación M/E5/1/10/ $\infty$ /FIFO indica un proceso con llegadas Marcoviana (Exponencial negativa o Poisson), atendimento Erlang de quinto grado, 1 asistente, capacidad máxima del sistema igual a 10 clientes, población infinita y el primero que llega es el primero en salir del sistema.

### 4. Simulación

La simulación es una técnica de la Investigación Operativa que permite “imitar” el funcionamiento de un sistema real. Simular significa reproducir el funcionamiento de un sistema, con el auxilio de un modelo.

Para Prado (2006, p. 19): “[...] la modelaje de colas puede ser analizada por el ángulo de la simulación, en que no más se usan fórmulas matemáticas, pero apenas trata de imitar el funcionamiento de un sistema real a través de recursos computacionales”.

La simulación es una herramienta poderosa de análisis que pretende determinar el mejor sistema para ser implementado o mejorado, permitiendo cuantificar los efectos de varias mudanzas en el sistema, siendo muy usado en situaciones en que es muy caro o difícil el experimento en la situación real.

Para Andrade (2004, p. 113), se puede enumerar diversas razones para justificar el uso de la simulación en las más diversas áreas. Entre ellas se destacan:

1. Por medio de la simulación pueden ser estudiadas algunas variaciones en el medio ambiente y verificados sus efectos en todo el sistema;
2. La simulación posibilita el estudio y la experimentación de complejas interacciones internas de un determinado sistema;
3. Algunas técnicas analíticas exigen un avanzado conocimiento matemático, tanto para uso cuanto para comprensión. Una simulación de computador puede exigir poca o ninguna matemática compleja y, por lo tanto, puede ser intuitivamente fácil de comprender;
4. La simulación de sistemas complejos puede fornecer valiosa introyision en el sentido de descubrir las variables más importantes del sistema y la manera cómo interactúan;
5. La simulación permite la inclusión de complicaciones del mundo real;
6. La simulación no interfiere con los sistemas del mundo real;
7. Puede servir como un primero test para delinear nuevas políticas y reglas de decisión para la operación de un sistema, antes de experimentar en el sistema real.

Cuanto a la forma de uso, la simulación normalmente está relacionada al empleo de ordenadores, aunque, también puede ser desarrollada manualmente y sin el uso de ese equipamiento.

Algunos lenguajes son mundialmente conocidas, como ARENA, AUTOMOD, CINEMA, GASP, GPSS, HOCUS, SIMAN, SIMSCRIPT, PROMODEL, TAYLOR, etc.

## **5. Estudio de caso: embarque de mineral de hierro y manganeso en la terminal marítima de ponta da madeira**

El embarque de mineral de hierro (*pellet feed*, *sinter feed*, granulado y pelota) y manganeso por la Vale, en el corredor Norte (Carajás – São Luís) es realizado en tres muelle, un en el Pier I con capacidad de cargamento de 16.000 ton/h y dos en el Pier III (apodado de Norte y Sur) con capacidad de 8.000 ton/h cada. El Pier II, localizado dentro de la estructura del Puerto del Itaquí, es destinado para el embarque de soya y gusa.

La TMPM tiene tres canales de servicios con características de cola en paralelo, pues, cada muelle presenta características únicas de: Longitud, Calado, *Air draft* (distancia entre la línea de agua y la lanza del cargador de buques), TPB máximo, Capacidad de embarque etc. De esta forma, este trabajo irá analizar caso por caso (muelle por muelle) la capacidad de atendimento a los buques.

Tabla 5 - Características de la TMPM

Características	Pier I	Pier II	Pier III
Longitud:	490 m	280 m	571 m
Calado:	23 m	18 m	21 m
Air Draft:	22,4 m	18 m	22.4 m
TPB Máximo:	420.000	150.000	200.000
Capacidad de Embarque:	16.000 t/h	1.500 t/h (soya) 2.00 t/h (gusa)	8.000 t/h

Fuente: VALE (2009).

Con base en los datos de atraques y desatraques de la Terminal Marítima de Ponta da Madeira durante los meses de agosto, setiembre, octubre de 2009, se puede considerar que:

Tabla 6 - Datos de atraques y desatraques (en días)

	Pier I	Pier III - Norte	Pier III - Sur
Ritmo Medio de Llegada ( $\lambda$ )	0,63	0,59	0,58
Intervalo Medio entre Llegadas (IC)	1,59	1,69	1,73
Ritmo Medio de Atendimento ( $\mu$ )	0,74	0,73	0,69
Tiempo Medio de Atendimento (TA)	1,36	1,37	1,44

Fuente: VALE (2009).

Con base en los datos obtenidos se puede definir el problema de colas como siendo del tipo M/M/1/ $\infty$ / $\infty$ /FIFO, o sea, las llegadas y lo atendimento son marcovianos (siguen la Distribución de Poisson o la Exponencial Negativa), hay apenas un único canal de atendimento, no hay restricción de capacidad y de población y la orden de atendimento del tipo FIFO.

La Tabla 7 presenta las principales variables utilizadas como medidas de desempeño en un sistema de colas con un único asistente.

Tabla 7 - Fórmulas para un único asistente

Nombre	Descripción	Fórmula
$\rho$	Tasa de Utilización	$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$
NF	Número Medio de Clientes en la Cola	$NF = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$
NS	Número Medio de Clientes en el Sistema	$NS = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$
TF	Tempo Medio durante o cual o Cliente permanece en la Cola	$TF = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$
TS	Tempo Medio durante el cual el Cliente permanece en el Sistema	$TS = \frac{1}{\mu - \lambda}$
$P_0$	Probabilidad de existieren n Clientes en el Sistema	$P_n = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n$

Con la posesión de los datos de atraques y desatraques se aplicó estos a las fórmulas presentadas y los resultados obtenidos son presentados en la Tabla 8.

Tabla 8 - Resultado Obtenido

MEDIDAS DE DESEMPEÑO – TERMINAL MARÍTIMA DE PONTA DA MADEIRA			
Medida	Pier I	Pier III – Norte	Pier III - Sur
$\rho$	0,854 $\cong$ 85%	0,813 $\cong$ 81%	0,836 $\cong$ 84%
NF	5,0	3,5	4,3
NS	5,9	4,3	5,1
TF	8,0	5,9	7,4
TS	9,3	7,3	8,8
$P_0$	15%	19%	16%

Al analizar los resultados obtenidos es evidente la eficiencia del terminal, que presenta una tasa media de ocupación ( $\rho$ ) de los muelles superior al 80%. La mayor tasa de ocupación es observada en lo Pier I. Este, debido a sus características, es el único con capacidad de recibir los grandes graneleros (de más de 200.000 TPB). Al concentrar la demanda de los grandes buques que cargan en el terminal, el Pier I presenta las siguientes medidas de desempeño: mayor tasa de ocupación (85%), mayor tiempo medio en el cual el cliente permanece en la cola (8 días) y en el sistema (9,3 días), y la menor probabilidad de no existir ningún cliente en el sistema (15%).

El Pier III - Norte tiene una tasa de ocupación de 81%. Esto presenta un número medio de 3,5 buques en la cola y 4,3 buques en el sistema aguardando por atendimento y el tiempo medio gasto por un buque en la cola y en el sistema es respectivamente, 5,9 e 7,3 días.

El Pier III – Sur tiene una tasa de ocupación de 84%. Esto presenta un número medio de 4,3 buques en la cola y 5,1 en el sistema. Un buque programado para atracar en el Pier III - Sur gasta en media 7,4 días en cola y 8,8 días en el sistema.

A través del uso de la simulación computacional tiene que para el período de un año 661 buques pasaran por el sistema, resultando una media de 55 buques por mes. El Pier I fue responsable por el cargamento de 218 buques aunque el Pier III – Norte cargó 235 y el Pier III – Sur cargó 219.

Con una tasa de ocupación muy alta, la terminal está operando en el límite de la su capacidad operacional. De esta forma para garantizar la producción y transporte de los minerales en el medio y largo plazo la Vale irá ampliar la capacidad actual de la Terminal Marítima de Ponta da Madeira. Para tal, irá construir un nuevo Pier para cargamento de mineral de hierro y manganeso, el Pier IV.

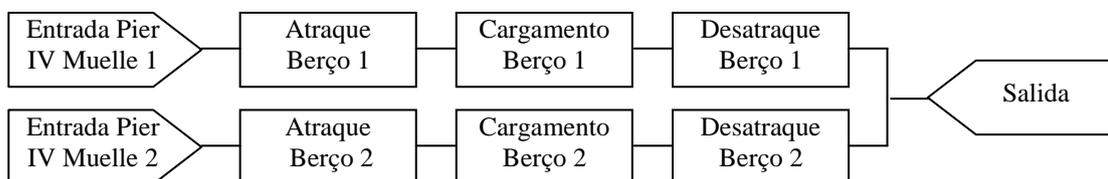
El objetivo de la mineradora es ampliar en 100 millones de toneladas al año la capacidad de la terminal. Con profundidad mínima de 25 metros, el Pier IV tendrá dos muelles para atraque y capacidad para recibir buques hasta 400 mil toneladas de porte bruto (TPB). Con una puente de acceso de 1.620 metros, tendrá capacidad de cargamento de dos buques simultáneamente en un total de 53 buques por mes (EXAME, 2009).

El Pier IV tendrá estructura similar al Pier III, poseyendo dos muelles para atraques y

desatraques, pero, con características del Pier I, con cargadores con capacidad para 16 mil ton/hora y pudiendo recibir buques hasta 400 mil toneladas para porte bruto.

A través del uso de la simulación computacional, software Arena 12.0, se pretende simular la operación del nuevo Pier para cargamento de mineral de hierro y manganeso.

Figura 5 - Modelo del Pier IV



En la aplicación de la Teoría de Colas se utilizó el modelo M/M/1 con atendimento obedeciendo a la distribución de la Exponencial Negativa. Aunque, muy utilizado en la Teoría de Colas, este modelo no dimensiona colas correctamente, existiendo otros modelos que presentan mejores resultados. El Arena permite el uso de diversos tipos de distribución de frecuencia, tal como mostrado en la Tabla 9.

Tabla 9 - Modelo del Pier IV

Distribución	Abrev.	Parámetros	Mejor aplicación
<b>Poisson</b>	<b>POIS</b>	<b>Media</b>	<b>Llegada</b>
Exponencial	EXPO	Media	Llegada
Triangular	TRIA	Min/Media/Max	Atendimento (aproximación inicial)
Uniforme	UNIF	Min/Media/Max	Atendimento (aproximación inicial)
Normal	NORM	Media/Desvio	Atendimento (tiempos de máquina)
Johnson	JOHN	G, D, L, X	Atendimento
Log Neperiano	LOGN	Media Logarítmica	Atendimento
Weibull	WEIB	Beta, Alfa	Atendimento (tiempo de vida de equipamientos)
Discreta	DISC	P1, V1, ...	Llegada/Atendimento
Continua	CONT	P1, V1, ...	Llegada/Atendimento
<b>Erlang</b>	<b>ERLA</b>	<b>Media/K</b>	<b>Atendimento</b>
Gamma	GAMM	Beta, Alfa	Atendimento (tiempos de reparo)

Fuente: Prado (2008, p. 70).

De esta forma, para mejor dimensionar el sistema en análisis se utilizo el modelo M/Ek/1/∞/∞/FIFO, en que: Llegadas siguen Poisson y Atendimientos siguen la Distribución Erlang de grado k.

Para simular la operación del Pier IV se utilizó los datos colectados de atraques y desatraques del Pier I ya que tiene características similares al Pier que será construido. A través de la simulación en el software Arena se obtuvieron los siguientes resultados demostrados en la Tabla 10.



tasa de utilización, encima del 80%. De esta forma, para garantizar la demanda creciente, principalmente de la Asia y del Oriente Medio, la Vale precisará invertir en la ampliación de la capacidad de la terminal.

De acuerdo con la empresa minera serán invertidos R\$ 2 mil millones en la construcción de un nuevo Pier que elevará la capacidad de la terminal en 100 millones de toneladas al año y tendrá capacidad de cargar un total de 53 buques al mes.

El Pier IV tendrá características operacionales parecidas con el Pier I, con cargadores de 16 mil toneladas/hora, profundidad mínima de 25 metros y capacidad para cargar buques hasta 400 mil toneladas de porte bruto (TPB).

A través de la Teoría de la Simulación y del uso del simulador Arena 12.0 darse cuenta que para cargar 53 buques al mes el nuevo Pier, deberá recibir también las demandas de buques de pequeño y medio porte. Si el nuevo Pier operar sólo buques de gran porte, esto cargará aproximadamente 38 buques al mes. Para cargar 53 buques, como preterido por la mineradora, el Pier IV tendrá que operar un máximo de 75% dos grandes graneleros.

Esto será posible, pues, con la entrada del nuevo Pier, la demanda por mineral de los grandes buques que antes era concentrada en lo Pier I, por ser el único con capacidad de recibir buques de más de 200.000 TPB, será distribuida para los dos nuevos muelles con capacidad para operar tales buques, en el Pier IV.

De esa forma, el Pier I también se beneficiará con la construcción del Pier IV, teniendo un aumento significativo del número de buques que pasarán por el sistema, una vez que los buques de gran portes serán más bien distribuidos entre los tres muelles.

Con la entrada en operación del Pier IV, la Terminal Marítima de Ponta da Madeira tendrá 5 muelles para cargamento de mineral de hierro y manganeso y 1 muelle (arrendado del Puerto de Itaqui) para cargamento de soya y gusa. Con estas inversiones en ampliación la TMPM será no sólo el mejor más el mayor puerto del Brasil.

## **Abstract**

Among the available techniques used in key processes of analysis and resolution of outstanding problems of queuing theory and simulation theory: that an analytical method to approach the matter, this, a modeling technique that seeks to better represent the system study. Using these modeling techniques for complex problem solving and dynamic, has grown significantly in recent years, though, there is a perceptible gap in the literature of applications in real situations. In contribution, this work explores the use of queuing theory and simulation applied to the shipment of iron ore and manganese in the maritime terminal of Ponta da Madeira - TMPM, owned by Vale. Queuing Theory With one tries to analyze characteristics of services rendered to vessels berthing at Pier Pier I and III for shipment of iron ore and manganese, such as average number of vessels in the queue and the system, average time for which the vessel remains in the queue and the system etc. And with the technique of simulation is to simulate the operation of the Pier IV, which consume R \$ 2 billion investment, will increase the terminal capacity by 100 million tons per year and will be able to load 53 ships per month.

**Key-words:** queuing theory; simulation; TMPM.

## Referencias

- ABAD, R. C. **Introducción a la simulación y a la teoría de colas**. London: Netbiblo, 2002.
- ANDRADE, E. L. **Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões**. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2004. 192 p.
- BANKS, J.; CARSON, J. S.; NELSON, B L.. **Discrete-event system simulation**. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- BROWN, L. et al. Statistical analysis of a telephone call center: a queueing-science perspective. **Wharton Financial Institutions Center**, Working Paper, 03 – 12, Nov 9, 2002.
- BRUIN, A. M.; KOOLE, G. M.; VISSER, M. C.. Bottleneck analysis of emergency cardiac in-patient flow in a university setting: an application of queueing theory. **Clinical and Investigative Medicine**, v. 28, p. 316-317, 01 jul. 2005.
- COSTA, L. C. **Teoria das Filas**. Disponible en: <[http://www.deinf.ufma.br/~mario/grad/filas/TeoriaFilas\\_Cajado.pdf](http://www.deinf.ufma.br/~mario/grad/filas/TeoriaFilas_Cajado.pdf)>. Acceso en 20 out. 2009.
- FARRERO, J. M. C.; TARRÉS, L. G. **La empresa de servicios y la teoría de colas**. New York: Uoc/digitalia, 2009.
- GREEN, L. V.. Using queueing theory to increase the effectiveness of emergency department provider staffing. **Academic Emergency Medicine**, v. 13, p. 61-68, 01 jan. 2006.
- GROSS, D.; HARRIS, C. M.. **Fundamentals of queueing theory**. 2. ed. New York: John Wiley & Sons, 1985.
- JOSHI, P. L. et al. Application of queueing theory in hospital management. **Indian journal of community medicine**. Allahabad, v. 17, p. 102-108, 01 jul. 1992.
- MIRSHAWKA, V. **Pesquisa operacional**. 3. ed. São Paulo: Nobel, 1979.
- MOORE, B. J.. Use of queueing theory for problem solution in Dallas, Tex., Bureau of Vital Statistics. **Public health reports**, v. 92, p. 171-175, 01 jan. 1977.
- REDONDO, R. P. D.; ARIAS, J. J. P.; GONZALEZ, A. S. **Teoría de colas y simulación de eventos discretos**. London: Pearson, 2004.
- MIRANDA, M. **Teoría de colas**. Buenos Aires: Educa, 2005.
- O CUSTO da ineficiência. **PORTAL EXAME**. Disponible en: <<http://portalexame.abril.com.br/revista/exame/edicoes/Infra2008/especiais/custo-ineficiencia-410882.html>>. Acceso en: 30 set. 2009.
- O RISCO do apagão portuário. **PORTAL EXAME**. Disponible en: <[http://portalexame.abril.com.br/static/aberto/infraestrutura/edicoes\\_2007/m0143169.html](http://portalexame.abril.com.br/static/aberto/infraestrutura/edicoes_2007/m0143169.html)>. Acceso en: 01 out. 2009.
- PORTUGAL, L. da S. **Simulação de tráfego: conceitos e técnicas de modelagem**. Rio de Janeiro: Interciência, 2005.
- PRADO, D. S. do. **Teoria das filas e da simulação**. Nova Lima (MG): INDG, 2006.
- \_\_\_\_\_. **Usando o arena em simulação**. Belo Horizonte: INDG, 2008.
- RANKING expõe deficiências e deixa Porto de Santos entre piores do País. **ABRETI**. Disponível em: <[http://abreti.org.br/news/30\\_07\\_07.htm](http://abreti.org.br/news/30_07_07.htm)>. Acceso en: 4 nov. 2009.
- TERMINAL marítimo de Ponta da Madeira é o melhor do Brasil. **VALE**. Disponible en: <<http://www.vale.com/saladeimprensa/pt/releases/release.asp?id=17661>>. Acceso en: 4 nov. 2009.
- XIAO, H.; ZHANG, G. The queueing theory application in bank service optimization. In. **INTERNATIONAL CONFERENCE ON LOGISTICS SYSTEMS AND INTELLIGENT MANAGEMENT**, 24. 2010, Harbin. **Anais...** Harbin: ICLSIM, 2010.

## **Dados dos autores:**

Nome completo: **Gustavo Rossa Camelo**

Filiação Institucional: Universidade Federal de Santa Catarina

Departamento: Engenharia de Produção – DEPS/UFSC

Função ou cargo ocupado: Mestrando em Engenharia de Produção (Bolsista CNPq)

Endereço para correspondência (bairro, cidade, estado, país e CEP): Marcus Aurélio Homem, 250, Apto. 7 – Trindade, CEP: 88040440

Telefones para contato: (48) 3721-7313 / 96294689

e-mail: [gustavorcamelo@hotmail.com](mailto:gustavorcamelo@hotmail.com)

Nome completo: **Renata Massoli Borges**

Filiação Institucional: Universidade do Sul de Santa Catarina

Departamento: Administração

Função ou cargo ocupado: Mestranda em Administração

Endereço para correspondência (bairro, cidade, estado, país e CEP): Servidão Dionizio Raphael Ignácio, 99, Apto 302 – Campeche, CEP: 88063315

Telefones para contato: (48) 99051431

e-mail: [renata@fama.br](mailto:renata@fama.br)

Nome completo: **Antônio Sérgio Coelho**

Universidade Federal de Santa Catarina

Departamento de Engenharia de Produção – DEPS/UFSC

Professor Adjunto do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Endereço para correspondência (bairro, cidade, estado, país e CEP): Deputado Antônio Edu Vieira, 434, Parco Reale, Bloco B, Apto. 102 – Pantanal, CEP: 88040-000

Telefones para contato: (48) 3721-7058

e-mail: [coelho@deps.ufsc.br](mailto:coelho@deps.ufsc.br)

***Recebido para publicação em: 27/08/2010***

***Aceito para publicação em: 05/10/2010***