

# TEORIA DAS FILAS E DA SIMULAÇÃO APLICADA AO EMBARQUE DE MINÉRIO DE FERRO E MANGANÊS NO TERMINAL MARÍTIMO DE PONTA DA MADEIRA

**Gustavo Rossa Camelo (UFSC)**

gustavorcamelo@hotmail.com

**Antônio Sérgio Coelho (UFSC)**

coelho@deps.ufsc.br

**RENATA MASSOLI BORGES (UNISUL)**

renata@fama.br

**Rosimeri Maria de Souza (UFSC)**

meri@deps.ufsc.br



*Dentre as principais técnicas disponíveis utilizadas em processos de análise e resolução de problemas sobressaem a Teoria das Filas e a Teoria da Simulação: aquela, um método analítico para abordagem do assunto; esta, uma técnica de modelagem que busca melhor representar o sistema em estudo. O uso destas técnicas de modelagem, para resoluções de problemas complexos e dinâmicos, tem crescido muito nos últimos anos, muito embora, há uma carência perceptível na literatura de aplicações em situações reais. Em contributo, este trabalho investiga o uso da Teoria das Filas e da Simulação aplicadas ao embarque de minério de ferro e manganês no Terminal Marítimo de Ponta da Madeira - TPM, pertencente a Vale. Com a Teoria das Filas pretende-se analisar características de atendimento aos navios que atracam no Píer I e Píer III para carregamento de minério de ferro e manganês, tais como: número médio de navios na fila e no sistema, tempo médio durante o qual o navio permanece na fila e no sistema etc. E, com a técnica da Simulação pretende-se simular a operação do Píer IV, que consumirá R\$ 2 bilhões em investimento, aumentará a capacidade do terminal em 100 milhões de toneladas por ano e que terá capacidade de carregar 52 navios por mês.*

*Palavras-chaves: Teoria das Filas, Simulação, TPM*

## 1. Introdução

Na atual conjuntura econômica o Brasil é uma das economias que mais crescem no mundo. Esta ascensão brasileira nos últimos anos coloca o país como um dos grandes destaques do atual cenário econômico mundial. De acordo com analistas, a ascensão de Brasil, Rússia, Índia e China – o chamado BRIC, grupo de países que formam o pelotão de elite das economias emergentes – irá mudar o rumo da economia mundial.

No Brasil, empresas e setores inteiros tem se beneficiado com a onda de prosperidade que o país tem passado nos últimos anos. A Vale, mineradora privatizada em 6 de maio de 1997, foi uma das inúmeras empresas brasileiras que souberam tirar proveito deste atual momento, transformando-se no maior fenômeno do capitalismo brasileiro, apresentando um ritmo avassalador de crescimento.

A Vale é a maior empresa privada da América Latina, maior produtora de minério de ferro do mundo, e a segunda maior exportadora brasileira. Sua estrutura integrada de logística é formada por cerca de 10 mil quilômetros de malha ferroviária, cinco terminais portuários – localizados em Espírito Santos, Sergipe e Maranhão – e um terminal rodo-ferroviário.

Em números, a Vale é responsável por 16% da movimentação de cargas no Brasil e 30% da movimentação portuária brasileira. O sistema logístico da Vale divide-se em: **Sistema Sul**, composto pela Estrada de Ferro Vitória a Minas (EFVM), Ferrovia Centro Atlântica (FCA), Portos Sul – em Vitória (ES), o Terminal de Produtos Diversos (TPD), o Terminal de Granéis Líquidos (TGL) e o Terminal de Praia Mole (TPM) e em Barra dos Coqueiros (SE), o Terminal Marítimo Inácio Barbosa (TMIB); e, o **Sistema Norte**, composto da Estrada de Ferro Carajás (EFC), Ferrovia Norte Sul (FNS), Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (TMPM).

No Sistema Sul o minério produzido no Quadrilátero Ferrífero, em Minas Gerais é transportado para o Complexo Portuário de Tubarão, em Vitória (ES), e para o Porto de Itaguaí, no Rio de Janeiro (RJ); enquanto, no Sistema Norte o minério produzido em Carajás, no Pará, é transportado para o Terminal Marítimo de Ponta da Madeira, em São Luís (MA).

O TMPM, objeto de estudo deste trabalho, é o segundo maior porto do país em fluxo anual de carga, atrás apenas do porto de Tubarão também administrado pela Vale, e, é considerado o melhor porto do país de acordo com pesquisa realizada pela COPPEAD/UFRJ junto às empresas industriais exportadoras, agentes e armadores, terminais e administrações portuárias.

Este artigo pretende através da Teoria das Filas analisar características de atendimento aos navios que atracam no porto para carregamento de minério de ferro e manganês. Para tal operação tem-se disponível três berços, um no Píer I com capacidade de carregamento de 16.000 ton/h e dois no Píer III com capacidade de 8.000 ton/h cada.

Conjuntamente, através da teoria da Simulação, este artigo pretende simular a operação do Píer 4, que está em fase de implantação e que consumirá R\$ 2 bilhões em investimento, aumentará a capacidade do terminal em 100 milhões de toneladas por ano e que terá capacidade de carregar 52 navios por mês.

## 2. Terminal Marítimo de Ponta da Madeira

O Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (TMPM) é um porto privado de propriedade da mineradora Vale e localizado próximo ao porto público de Itaquí, na margem leste da Baía de

São Marcos, na Ilha São Luís, Nordeste do Brasil.

Inaugurado em janeiro de 1986 foi inicialmente projetado para operar com minérios de ferro e manganês principalmente destinado à exportação, mas desde cedo demonstrou a sua inclinação para ser grande (VALE, 2005).

Escolhido como término da Estrada de Ferro Carajás, é responsável pelo escoamento de minério de ferro, pelotas, cobre, manganês, ferro gusa e soja para o exterior, principalmente para a Europa e a Ásia Oriental.

O porto é o segundo em movimentação de cargas no Brasil, com um fluxo anual de 72.941.142 toneladas, ficando atrás apenas do Porto de Tubarão, também de propriedade de Vale, de acordo com o Anuário EXAME de Infra-Estrutura 2008-2009.

O TPM é responsável pelo escoamento de 86% de toda a carga movimentada no Maranhão. São três píeres, com profundidades de 23 m (píer I - um dos mais profundos do mundo), 18 m (píer II) e 21 m (píer III), e seis silos de estocagem de grãos, com capacidade estática de 122.500 toneladas. É o único do País capaz de carregar totalmente o maior graneleiro do mundo, o Berge Stahl, com capacidade para transportar 364.767 toneladas. Isso porque tem um calado entre 21 (Píer III) e 23 (Píer I) metros, o que o coloca entre os portos de maior profundidade do mundo (ABRETI, 2007).

É considerado o melhor porto do país de acordo com pesquisa realizada pela COPPEAD/UFRJ junto às empresas industriais exportadoras, agentes e armadores, terminais e administrações portuárias. Segundo usuários ouvidos pela pesquisa, sua profundidade e a agilidade das operações estão entre os motivos que colocaram o Ponta da Madeira em lugar de destaque. Trata-se de uma ilha de excelência em meio ao caos que pode provocar o naufrágio do sistema portuário brasileiro (EXAME, 2007).

Para fazer jus ao título de melhor do País, o porto receberá investimentos de peso na expansão da capacidade que deverá em 2011 atingir 200 milhões de toneladas.

### 3. Teoria das filas

Todas as pessoas já passaram pelo aborrecimento de ter que esperar em filas para um atendimento. As filas podem ocorrer no desenvolvimento de qualquer atividade humana e todos nós, por experiências cotidianas, as conhecemos. Inclusive, as filas representam um dos sintomas mais visíveis de funcionamento deficiente de um sistema. Apesar de causar enfado e prejuízos, temos que conviver com filas na vida real, visto que é economicamente inviável superdimensionar um sistema para que nunca existam filas. O que se pretende é obter um balanceamento adequado que permita um atendimento aceitável que obedeça a relação custo-benefício (ANDRADE, 2004; COSTA, 2004; PORTUGAL, 2005; PRADO, 2006).

As formações de sistemas ocorrem quando a procura por determinado serviço é superior a capacidade do sistema em atender esta procura. Desta forma, a Teoria das Filas por meio de fórmulas matemáticas tenta encontrar um ponto de equilíbrio que satisfaça o cliente e que seja economicamente viável para o prestador do serviço.

A Teoria das Filas é método analítico, desenvolvido por A. K. Erlang (1909), que estuda a formação de filas e suas características por meio de fórmulas matemáticas.

Um sistema de filas, como o representado na Figura 1, pode ser descrito como clientes chegando à procura de um serviço, esperando em fila, se não forem atendidos imediatamente, e saindo do sistema após serem atendidos.

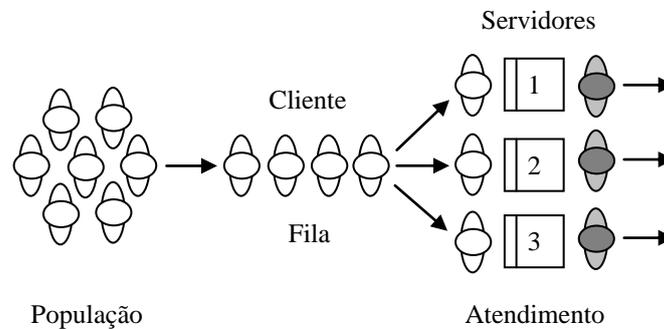


Figura 1 - Representação de um sistema de filas.  
Fonte: O autor.

A Tabela 1 apresenta e conceitua os principais elementos de um sistema de filas em observação:

Elemento	Descrição
Cliente	É a unidade que requer atendimento, podendo ser máquina, pessoas, e neste trabalho específico, navios.
Fila	Representa os clientes que esperam para serem atendidos. Normalmente não incluem os clientes sendo atendidos.
Canal de atendimento	Processo ou sistema que realiza o atendimento do cliente. Pode ser um canal múltiplo ou único.

Fonte: O autor

Tabela 1 – Elementos de um sistema de filas

### 3.1 Características Básicas

No geral, para a maioria dos autores, são seis características básicas do processo de filas, a saber:

#### 3.1.1 – Processo de chegada dos clientes

O processo de chegada do cliente ou entrada no sistema de filas é medido em termos do número médio de chegadas por uma dada unidade de tempo ( $\lambda$  – taxa média de chegada) ou pelo tempo médio entre chegadas sucessivas (IC – intervalo médio de tempo entre chegadas).

#### 3.1.2 – Padrões de serviço dos atendentes

O padrão de serviço é descrito pela taxa de serviço ( $\mu$  – número de clientes em atendidos em um dado intervalo de tempo) ou pelo tempo de serviço (TA – tempo necessário para atender o cliente).

#### 3.1.3 – Disciplina da Fila

Refere-se à maneira como os clientes são escolhidos para entrar em serviço após uma fila ser formada. A disciplina mais comum se dá pela ordem de chegada, na qual o primeiro que chega é o primeiro a ser atendido (*First in, First out* - FIFO ou PEPS). Outras alternativas são: o último a chegar é o primeiro a ser atendido (*Last in, First out* - LIFO ou UEPS); pelo

atendimento com prioridade para certas classes de clientes, independente da hora de chegada no sistema, muito comum para idosos e grávidas (*Priority service – PRI*); e pela seleção de atendimento de forma aleatória, independente da ordem de chegada na fila (*Service in random order – SIRO*).

### 3.1.4 – Número de canais de serviços

Refere-se ao número de servidores em paralelo que prestam serviços simultâneos aos clientes. Um sistema de filas pode apresentar um ou múltiplos canais de atendimento, operando independentemente um do outro. Nesse último caso, pode-se ter uma fila única ou uma fila para cada canal.

A Figura 2 e Figura 3 apresentam as estruturas típicas de sistemas de filas:

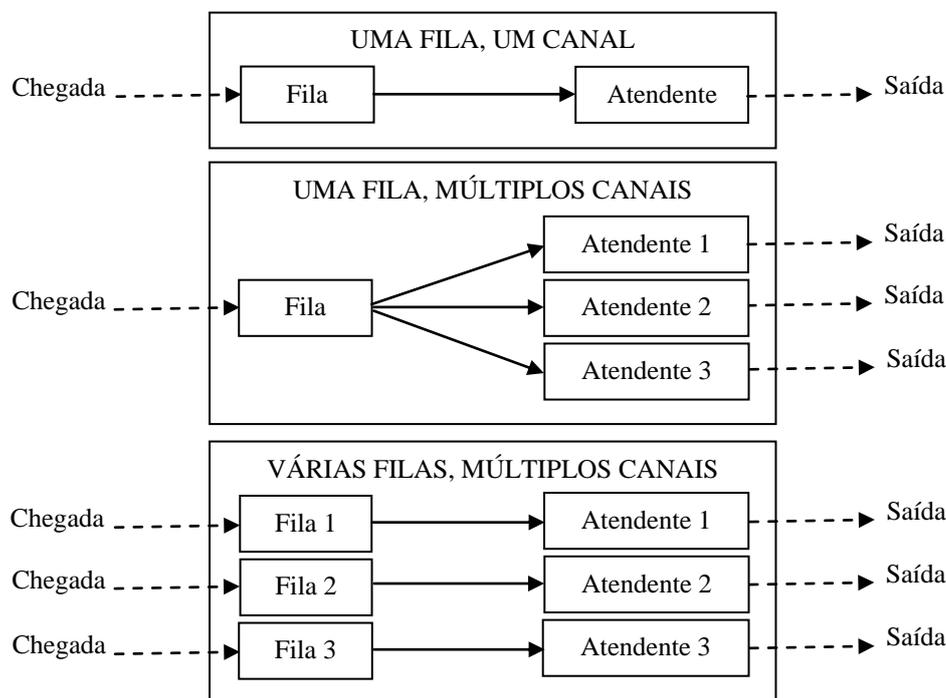


Figura 2: Estrutura dos sistemas de filas.

Fonte: O autor.

### 3.1.5 – Capacidade de Armazenamento do Sistema

É o número máximo de usuários, tanto aqueles sendo atendidos quanto aqueles nas filas, permitidos no estabelecimento de prestação de serviços ao mesmo tempo, podendo ser finito ou infinito.

### 3.1.6 – Etapas do Serviço

Um sistema de filas pode ter apenas um único estágio de atendimento, como no caso de supermercados e barbearias, ou pode ter vários estágios. Nesse caso, denominado de multi-estágio, o cliente precisa passar por vários estágios até deixar o sistema.

A Figura 3 apresenta um sistema de filas com múltiplos estágios.

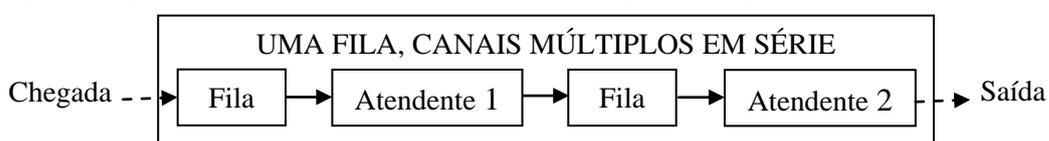


Figura 3: Sistema multi-estágio de filas.  
 Fonte: O autor.

### 3.2 Variáveis aleatórias fundamentais

Um sistema de filas, em situação estável, na qual clientes chegam e esperam para serem atendidos por “c” servidores, conforme representado pela Figura 4, apresenta as seguintes variáveis aleatórias:

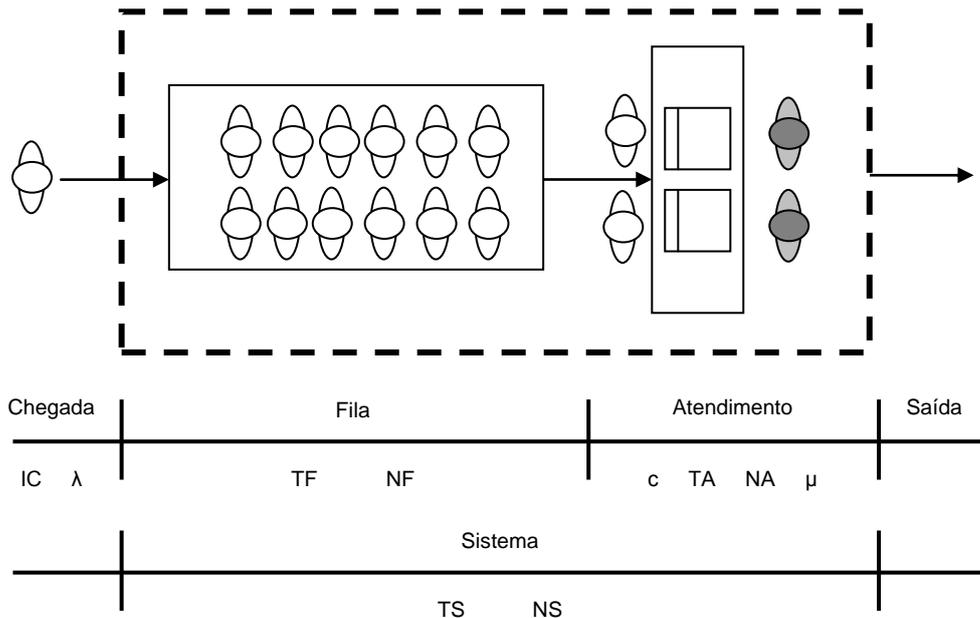


Figura 4: Variáveis num sistema de filas.  
 Fonte: Adaptado de Prado (2006, p. 39).

- a) Variáveis referentes ao processo de chegada
  - $\lambda$  = taxa média de chegada ou ritmo médio de chegada;
  - IC = intervalo médio entre chegadas.
- b) Variáveis referentes à fila
  - TF = tempo médio de permanência na fila;
  - NF = número médio de clientes na fila.
- c) Variáveis referentes ao processo de atendimento ou de serviço
  - TA = tempo médio de atendimento ou de serviço;
  - c = capacidade de atendimento ou quantidade de servidores (atendentes);
  - NA = número médio de transações ou clientes que estão sendo atendidos;
  - $\mu$  = taxa média de atendimento ou ritmo médio de atendimento de cada servidor.
- d) Variáveis referentes ao sistema
  - TS = tempo médio de permanência no sistema;
  - NS = número médio de transações ou clientes no sistema.

A Tabela 2 demonstra as relações básicas entre as variáveis de um sistema de filas:

VARIÁVEIS	FÓRMULA
Intervalo Entre Chegadas	$IC = 1 / \lambda$
Tempo do Atendimento	$TA = 1 / \mu$
Taxa de Utilização dos Atendentes	$\rho = \lambda / c \mu$

Intensidade de Tráfego	$i =  \lambda / \mu  =  TA / IC $
Relações entre Fila, Sistema e 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	$Ciclo = TS + TFS$ $Ciclo = Tamanho\ da\ População / \lambda$

Fonte: Prado (2006, p. 43)

Tabela 2 - Relações básicas entre variáveis

### 3.3 Medidas de desempenho

No estudo de um sistema de filas, podem ser determinadas várias medidas da efetividade do sistema, com a finalidade de indicar seu desempenho (ANDRADE, 2004).

São três as medidas de desempenho que buscam refletir a eficiência de um sistema de filas em estudo: 1) as relacionadas ao tempo de espera do cliente na fila e no sistema; 2) as relacionadas ao número de clientes na fila e no sistema; 3) as associada a utilização e ao tempo ocioso dos servidores. Estas medidas são listadas a seguir:

<b>Referentes ao sistema</b>
TS = Tempo médio que o cliente gasta no sistema NS = Número médio de clientes no sistema
<b>Referentes à fila</b>
TF = Tempo médio que o cliente gasta na fila de espera NF = Número médio de clientes na fila ou tamanho médio da fila
<b>Referente à utilização e ao tempo ocioso dos servidores</b>
$P_0$ = Índice de ociosidade das instalações $\rho$ = Taxa de utilização dos atendentes

Fonte: Prado (2006, p. 43).

Tabela 3 – Medidas de desempenho

### 3.4 Modelos de Fila

De uma maneira geral, um modelo de filas pode ser descrito pela notação de Kendall: A/B/c/K/m/Z, conforme mostrada na tabela 4, em que: A descreve a distribuição dos intervalos entre chegadas; B descreve a distribuição do tempo de serviço; c é o número de canais de serviços ou capacidade de atendimento; K é a número máximo de clientes permitidos no sistema; m é o tamanho da população que fornece clientes e Z é a disciplina da fila.

Características		Símbolos	Explicação
A	Distribuição de tempo entre chegadas	M	Lei de Poisson (Markoviano)
		D	Determinística
		E $\delta$	Erlang $\delta$ ( $\delta = 1, 2, \dots$ )
		GI	Independência Geral
B	Distribuição de tempo de serviço	M	Lei de Poisson (Markoviano)
		D	Determinística
		E $\delta$	Erlang $\delta$ ( $\delta = 1, 2, \dots$ )
		GI	Independência Geral
c	Número de canais de serviços	1, 2, ..., infinito	-
K	Capacidade do sistema	1, 2, ..., infinito	-

m	Tamanho da população	1,2,..., infinito	-
Z	Disciplina da fila	FIFO LIFO SIRO PRI	1º que chega é o 1º a ser atendido Ultimo que chega é o 1º a ser atendido Serviço com ordem aleatória Prioridade

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

Tabela 4 - Processos de filas

Assim, por exemplo, a notação M/E5/1/10/∞/FIFO indica uma processo com chegadas Marcoviana (Exponencial negativa ou Poisson), atendimento Erlang de quinto grau, 1 atendente, capacidade máxima do sistema igual a 10 clientes, população infinita e o primeiro que chega é o primeiro a sair do sistema.

#### 4. Simulação

A simulação é uma técnica da Pesquisa Operacional que permite “imitar” o funcionamento de um sistema real. Simular significa reproduzir o funcionamento de um sistema, com o auxílio de um modelo.

Para PRADO (2006, p. 19): “[...] a modelagem de filas pode ser analisada pelo ângulo da simulação, em que não mais se usam fórmulas matemáticas, mas apenas tenta-se imitar o funcionamento do sistema real através de recursos computacionais”.

Esta técnica está presente em inúmeras aplicações do mundo real, nas áreas mais diversas. Comenta-se que “tudo que pode ser descrito pode ser simulado” (PRADO, 2006).

A simulação é um instrumento poderoso de análise que pretende determinar o melhor sistema a ser implementado ou melhorado, permitindo quantificar os efeitos de várias mudanças no sistema, sendo muito usado em situações em que é muito caro ou difícil o experimento na situação real.

Para ANDRADE (2004, p. 113), podem-se enumerar diversas razões para justificar o uso da simulação nas mais diversas áreas. Entre elas destacam-se:

- Por meio da simulação podem ser estudadas algumas variações no meio ambiente e verificados seus efeitos em todo o sistema;
- A simulação possibilita o estudo e a experimentação de complexas interações internas de um dado sistema;
- Algumas técnicas analíticas exigem um avançado conhecimento matemático, tanto para uso quanto para compreensão. Uma simulação de computador pode exigir pouca ou nenhuma matemática complexa e, portanto, pode ser intuitivamente fácil de compreender;
- A simulação de sistemas complexos pode fornecer valiosa intuição no sentido de descobrir as variáveis mais importantes do sistema e a maneira como elas interagem;
- A simulação permite a inclusão de complicações do mundo real;
- A simulação não interfere com os sistemas do mundo real;
- Pode servir como um primeiro teste para se delinearem novas políticas e regras de decisão para a operação de um sistema, antes de experimentá-las no sistema real.

Quanto à forma de uso, a simulação normalmente está relacionada ao emprego de computadores, embora, também possa ser desenvolvida manualmente e sem o uso desse equipamento.

Algumas linguagens são mundialmente conhecidas, como ARENA, AUTOMOD, CINEMA, GASP, GPSS, HOCUS, SIMAN, SIMSCRIPT, PROMODEL, TAYLOR, etc.

## 5. Estudo de caso: embarque de minério de ferro e manganês no terminal marítimo de ponta da madeira

O embarque de minério de ferro (*pellet feed*, *sinter feed*, granulado e pelota) e manganês pela Vale, no corredor Norte (Carajás – São Luís) é realizado em três berços, um no Píer I com capacidade de carregamento de 16.000 ton/h e dois no Píer III (cognominados de Norte e Sul) com capacidade de 8.000 ton/h cada. O Píer II, localizado dentro da estrutura do Porto do Itaqui, é destinado a embarque de soja e gusa.

O TMPM possui três canais de serviços com características de fila em paralelo, pois, cada berços apresenta características únicas de: Comprimento, Calado, *Air draft* (distância entre a linha d'água e a lança do carregador de navios), TPB máximo, Capacidade de embarque etc. Destarte, este trabalho irá analisar caso a caso (berço a berço) a capacidade de atendimento aos navios.

A Tabela 5 apresenta as principais características de cada Píer do TMPM.

Características	Píer I	Píer II	Píer III
Comprimento:	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
Capacidade de Embarque:	16.000 t/h	1.500 t/h (soja) 2.00 t/h (gusa)	8.000 t/h

Fonte: VALE (2009).

Tabela 5 - Características do TMPM

Com base nos dados de atracações e desatracações do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira durante os meses de agosto, setembro, outubro de 2009, pode-se tirar que:

	Píer I	Píer III - Norte	Píer III – Sul
Ritmo Médio de Chegada ( $\lambda$ )	0,63	0,59	0,58
Intervalo Médio entre Chegadas (IC)	1,59	1,69	1,73
Ritmo Médio de Atendimento ( $\mu$ )	0,74	0,73	0,69
Tempo Médio de Atendimento (TA)	1,36	1,37	1,44

Fonte: VALE (2009).

Tabela 6 - Dados de atracações e desatracações

Durante o trabalho de coleta observou-se que alguns valores medidos não obedeciam à tendência dominante. Como estes valores que fogem à tendência não podem ser descartados sem que haja um critério consistente de eliminação, utilizou-se o critério de Chauvenet que permite determinar se um valor amostral (resultante de uma medida) é anormal em relação aos valores restantes da amostra. Com a utilização deste critério foram eliminados dois valores amostrais, relacionados ao Pier 1, não condizente com a tendência.

Com base nos dados obtidos pode-se definir este problema de filas como sendo do tipo M/M/1/ $\infty$ / $\infty$ /FIFO, ou seja, as chegadas e o atendimento são marcovianos (seguem a Distribuição de Poisson ou a Exponencial Negativa), há apenas um único canal de

atendimento, não há restrições de capacidade e de população e a ordem de atendimento do tipo FIFO.

A Tabela 7 apresenta as principais variáveis utilizadas como medidas de desempenho em um sistema de filas com um único atendente.

Nome	Descrição	Fórmula
$\rho$	Taxa de Utilização	$\rho = \frac{\lambda}{\mu}$
NF	Número Médio de Clientes na Fila	$NF = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$
NS	Número Médio de Clientes no Sistema	$NS = \frac{\lambda}{\mu - \lambda}$
TF	Tempo Médio durante o qual o Cliente fica na Fila	$TF = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$
TS	Tempo Médio durante o qual o Cliente fica no Sistema	$TS = \frac{1}{\mu - \lambda}$
$P_0$	Probabilidade de existirem n Clientes no Sistema	$P_n = \left(1 - \frac{\lambda}{\mu}\right) \left(\frac{\lambda}{\mu}\right)^n$

Fonte: O autor.

Tabela 7 - Fórmulas para um único atendente

Com a posse dos dados de atrações e desatrações aplicou-se estas as fórmulas apresentadas e os resultados obtidos são apresentados na Tabela 8.

MEDIDAS DE DESEMPENHO – TERMINAL MARÍTIMO DE PONTA DA MADEIRA			
Medida	Pier I	Pier III – Norte	Pier III - Sul
$\rho$	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%

Fonte: O autor.

Tabela 8 - Resultado Obtido

Ao analisar os resultados obtidos fica evidente a eficiência do terminal, que apresentar uma taxa média de ocupação ( $\rho$ ) dos berços superior a 80%. A maior taxa de ocupação é observada no Pier I. Este, devido as suas características já apresentadas, é o único com capacidade de receber os grandes graneleiros (acima de 200.000 TPB). Por concentrar a demanda dos grandes navios que carregam no terminal, o Pier I apresenta as seguintes medidas de desempenho: maior taxa de ocupação (85%), maior tempo médio no qual o cliente permanece na fila (8 dias) e no sistema (9,3 dias), e a menor probabilidade de não existir nenhum cliente no sistema (15%).

O Píer III - Norte tem uma taxa de ocupação de 81%. Este apresenta um número médio de 3,5 navios na fila e 4,3 navios no sistema aguardando por atendimento e o tempo médio gasto por um navio na fila e no sistema é respectivamente, 5,9 e 7,3 dias.

O Píer III – Sul tem uma taxa de ocupação de 84%. Este apresenta o maior número médio de navios na fila e no sistema dentre os berços analisados, com 4,3 e 5,1. Um navio programado para atracar no Píer III - Sul gasta em média 7,4 dias em fila e 8,8 dias no sistema.

Através do uso da simulação computacional tem-se que para o período de um ano 661 navios passaram pelo sistema, resultando uma média de 55 navios por mês. O Píer I foi responsável pelo carregamento de 218 navios enquanto o Píer III – norte carregou 235 e o Píer III – sul carregou 219.

Com uma taxa de ocupação muito alta, o terminal está operando no limite da sua capacidade operacional. Desta forma para garantir a produção e transporte dos minerais no médio e longo prazo a Vale irá ampliar a capacidade atual do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira. Para tal, irá construir um novo píer para carregamento de minério de ferro e manganês, o píer IV.

O Píer IV faz parte do programa de capacitação do sistema logístico da Vale, na região Norte/Nordeste do país, um investimento total de 2 bilhões de dólares. O objetivo da mineradora é ampliar em 100 milhões de toneladas por ano a capacidade do terminal. A previsão é que a nova unidade entre em operação a partir de 2012.

Com profundidade mínima de 25 metros, o Píer IV terá dois berços de atracação e capacidade para receber navios de até 400 mil toneladas de porte bruto (TPB). Com uma ponte de acesso de 1.620 metros, terá capacidade de carregamento de dois navios simultaneamente num total de 53 navios por mês (EXAME, 2009).

O Píer IV terá estrutura similar ao Píer III, possuindo dois berços para atracações e desatracações, porém, com características de Píer I, com carregadores com capacidade para 16 mil ton/hora e podendo receber navios até 400 mil toneladas para porte bruto.

Dados do Píer IV: Previsão de início das obras: Outubro de 2009; Previsão de início da operação: Em 2012 um dos berços entra em operação; Previsão de operar com capacidade plena em 2015; Incremento na capacidade de embarque: 100 milhões de toneladas/ano; Profundidade mínima: 25 metros; Ponte de acesso: 1.620 metros; Capacidade para carregar dois navios simultaneamente; Carregadores de navios com capacidade para 16 mil ton/hora; Capacidade para receber navios de 150 mil até a 400 mil toneladas para porte bruto; Contratação de mão-de-obra durante implantação: 2.500 trabalhadores no pico das obras; Prioridade de contratação de trabalhadores locais; Capacitação dos trabalhadores, por meio de parcerias com o governo do estado e SENAI (FATORBRASIL, 2009).

Através o uso da simulação computacional, *software* Arena 12.0, pretende-se simular a operação do novo píer para carregamento de minério de ferro e manganês.



Figura 5: Modelo do píer IV

Fonte: O autor

Na aplicação da Teoria das Filas utilizou-se o modelo M/M/1 com atendimento obedecendo à distribuição da Exponencial Negativa. Embora, muito utilizado na Teoria das Filas, este modelo não dimensiona filas corretamente, existindo outros modelos que apresentam melhores resultados. O Arena permite o uso de diversos tipos de distribuição de frequência, tal como mostrado na Tabela 9.

<b>Distribuição</b>	<b>Abrev.</b>	<b>Parâmetros</b>	<b>Melhor aplicação</b>
<u>Poisson</u>	<u>POIS</u>	<u>Média</u>	<u>Chegada</u>
Exponencial	EXPO	Média	Chegada
Triangular	TRIA	Min/Media/Max	Atendimento (aproximação inicial)
Uniforme	UNIF	Min/Media/Max	Atendimento (aproximação inicial)
Normal	NORM	Média/Desvio	Atendimento (tempos de máquina)
Johnson	JOHN	G, D, L, X	Atendimento
Log Neperiano	LOGN	Média Logarítmica	Atendimento
Weibull	WEIB	Beta, Alfa	Atendimento (tempo de vida de equipamentos)
Discreta	DISC	P1, V1, ...	Chegada/Atendimento
Contínua	CONT	P1, V1, ...	Chegada/Atendimento
<u>Erlang</u>	<u>ERLA</u>	<u>Média/K</u>	<u>Atendimento</u>
Gamma	GAMM	Beta, Alfa	Atendimento (tempos de reparo)

Fonte: Prado (2008, p. 70).

Tabela 9 - Modelo do píer IV

Desta forma, para melhor dimensionar o sistema em análise utilizou-se o modelo M/Ek/1/∞/∞/FIFO, em que: Chegadas seguem Poisson e Atendimentos seguem a Distribuição Erlang de grau k.

Para simular a operação do píer IV utilizaram-se os dados coletados de atracções e desatracções do Píer I já que este possui características similares ao píer que será construído.

Através da simulação no aplicativo Arena obtiveram-se os seguintes resultados demonstrados na Tabela 10 a seguir.

<b>Modelo</b>	<b>Navios de grande porte</b>							
	100%		90%		80%		75%	
	<b>Navios operados</b>							
	Ano	Mês	Ano	Mês	Ano	Mês	Ano	Mês
M/M/1/∞/∞/FIFO	456	38	507	42	577	48	624	52
M/E2/1/∞/∞/FIFO	461	38	509	42	574	47	637	53
M/E5/1/∞/∞/FIFO	456	38	497	41	563	46	638	53

Fonte: O autor.

Tabela 10 - Resultados Obtidos com a Simulação

Ao analisar os resultados obtidos com a simulação do Píer IV tem-se que este só conseguirá operar um total de 53 navios por mês, conforme previsto em seu plano de construção, se até 75% da sua capacidade for utilizada para navios de grande porte. Atualmente o Píer I concentra toda a demanda dos grandes navios por ser o único com capacidade de carregar navios acima de 200.000 toneladas de porte bruto. Com a entrada do Píer IV, serão três berços que poderão carregar os grandes graneleiros. Desta forma, entende-se que haverá uma distribuição de navios entre estes berços, que não carregarão apenas navios de grande porte, mais atenderam também as demandas de navios de pequeno e médio porte. Acontecendo esta melhor distribuição tanto o Píer IV quanto o Píer I terão aumento significativo no número de navios que passarão pelo sistema.

Através do uso do simulador Arena pode-se gerar as principais medidas de desempenho do sistema em análise, tais como as apresentadas na Tabela 11.

<b>Relatório Arena – Píer IV</b>	
Tempo Médio na Fila (TF)	3,77 dias
Tempo na Fila – Valor Mínimo	0,00 dias
Tempo na Fila – Valor Máximo	14,80 dias
Tamanho Médio da Fila (NF)	4,79 dias
Tamanho da Fila – Mínimo	0,39 dias
Tamanho da Fila – Máximo	15,97 dias
Quantidade de navios que entraram no sistema	648 navios
Quantidade de navios que saíram do sistema	638 navios

<b>Relatório Arena detalhado por Entidade (em dias)</b>		
<b>Variáveis</b>	<b>Berço I</b>	<b>Berço II</b>
Quantidade em uso	0,85	0,93
Taxa de Utilização	0,85	0,93
Número de vezes que o recurso foi utilizado	311,00	329,00
Tamanho Médio da Fila (NF)	1,87	4,79
Tempo Médio na Fila (TF)	2,19	5,26

Fonte: O autor.

Tabela 11 - Relatório Arena para o modelo do Píer IV

## 6. Conclusão

Com os resultados obtidos, após a aplicação da Teoria das Filas, pôde-se ver a eficiência do Terminal Marítimo de Ponta da Madeira para embarque de minério de ferro e manganês. Os três berços destinados ao carregamento de navios com estes minerais apresentam alta taxa de utilização, acima de 80%. Desta forma, para garantir a demanda crescente, principalmente da Ásia e do Oriente Médio, a Vale precisará investir na ampliação da capacidade do terminal.

De acordo com a mineradora serão investidos R\$ 2 bilhões na construção de um novo Píer que elevará a capacidade do terminal em 100 milhões de toneladas por ano e terá capacidade de carregar um total de 53 navios por mês.

O Píer IV terá características operacionais parecidas com o Píer I, possuindo carregadores de 16 mil toneladas/hora, profundidade mínima de 25 metros e capacidade para carregar navios de até 400 mil toneladas de porte bruto (TPB).

Através da Teoria da Simulação e do uso do simulador Arena 12.0 percebe-se que para carregar 53 navios por mês o novo Píer, deverá receber também as demandas de navios de pequeno e médio porte. Se o novo Píer operar apenas navios de grande porte, este carregará aproximadamente 38 navios por mês. Para carregar 53 navios, como preterido pela mineradora, o Píer IV terá que operar um máximo de 75% dos grandes graneleiros.

Isto será possível, pois, com a entrada do novo píer, a demanda por minério dos grandes navios que antes era concentrada no Píer I, por ser o único com capacidade de receber navios acima de 200.000 TPB, será distribuída para os dois novos berços com capacidade para operar tais navios, no Píer IV.

Dessa forma, o Píer I também se beneficiará com a construção do Píer IV, tendo um aumento significativo do número de navios que passarão pelo sistema, uma vez que os navios de grandes portes serão mais bem distribuídos entre os três berços.

Com a entrada em operação do Píer IV, o Terminal Marítimo de Ponta da Madeira terá 5 berços para carregamento de minério de ferro e manganês e 1 berço (arrendado do Itaqui) para carregamento de soja e gusa. Com estes investimentos em ampliação o TMPM será não apenas o melhor mais o maior porto do Brasil.

## Referências Bibliográficas

**ANDRADE, Eduardo Leopoldino de.** *Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e Modelos para Análise da Decisão.* Rio de Janeiro: LTC, 2004.

**PORTUGAL, Licínio da Silva.** *Simulação de tráfego: conceitos e técnicas de modelagem.* Rio de Janeiro: Interciência, 2005.

**PRADO, Darci Santos do.** *Teoria das Filas e da Simulação.* Nova Lima (MG): INDG, 2006.

**PRADO, Darci Santos do.** *Usando o Arena em Simulação.* Belo Horizonte: INDG, 2008.

**COSTA, Luciano Cajado.** *Teoria das Filas.* Disponível em: [http://www.deinf.ufma.br/~mario/grad/filas/TeoriaFilas\\_Cajado.pdf](http://www.deinf.ufma.br/~mario/grad/filas/TeoriaFilas_Cajado.pdf). Acesso em 20 out. 2009.

**TERMINAL marítimo de Ponta da Madeira é o melhor do Brasil.** *VALE.* Disponível em: <http://www.vale.com/saladeimprensa/pt/releases/release.asp?id=17661>>. Acesso em: 4 nov. 2009.

**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)>. Acesso em: 4 nov. 2009.

**O CUSTO da ineficiência.** *PORTAL EXAME.* Disponível em: <http://portalexame.abril.com.br/revista/exame/edicoes/Infra2008/especiais/custo-ineficiencia-410882.html>>. Acesso em: 30 set. 2009.

**O RISCO do apagão portuário.** *PORTAL EXAME.* Disponível em: [http://portalexame.abril.com.br/static/aberto/infraestrutura/edicoes\\_2007/m0143169.html](http://portalexame.abril.com.br/static/aberto/infraestrutura/edicoes_2007/m0143169.html)>. Acesso em: 01 out. 2009.

**VALE obtém licença para implantar Píer IV.** *REVISTA FATOR BRASIL.* Disponível em: [http://www.revistafatorbrasil.com.br/ver\\_noticia.php?not=84399](http://www.revistafatorbrasil.com.br/ver_noticia.php?not=84399)>. Acesso em: 02 out. 2009.