

**SEIS SIGMA NA OPERAÇÃO E LOGÍSTICA PORTUÁRIA DA VALE: ESTUDO DE CASO NO
TERMINAL MARÍTIMO PONTA DA MADEIRA**

**SIX SIGMA IN VALE PORT OPERATION AND LOGISTICS: CASE STUDY AT THE PONTA DA
MADEIRA MARITIME TERMINAL**

**SEIS SIGMA EN LA OPERACIÓN Y LOGÍSTICA DE PUEROS DE LA EMPRESA VALE: ESTUDIO DE
CASO EN LA TERMINAL MARÍTIMA PONTA DA MADEIRA**

Sérgio Sampaio Cutrim

Doutorando em Engenharia Naval e Oceânica pela Universidade de São Paulo (USP)
Professor do Departamento de Contabilidade e Administração da Universidade Federal do Maranhão
Endereço: Av. dos Portugueses, n.1966, Vila Bacanga, CEP: 65065-545. São Luís, MA, Brasil
Telefone: (98) 3272-8000. E-mail: sergio.cutrim@ufma.br

Luís Carlos Carvalho Nunes

Especialista em Gestão da Manutenção – Universidade Federal de Ouro Preto
Supervisor de Processos de Operações - VALE
Endereço: Av. dos Portugueses, s/n, Anjo da Guarda, CEP: 65085-581. São Luís, MA, Brasil
Telefone: (98) 99995-5005. E-mail: luis.nunes@vale.com

Leo Tadeu Robles

Doutor em Administração pela Faculdade de Economia e Administração (FEA) da USP
Professor na Universidade Federal do Maranhão (UFMA)
Endereço: R. Cel. Oscar Porto, n. 713, Paraíso, CEP: 04003-003. São Paulo, SP, Brasil
Telefone: (11) 99992-7761. E-mail: leotadeurobles@uol.com.br

Walter Carvalho Pinheiro Filho

Especialista em Gestão de Negócios – Fundação Dom Cabral
Gerente de Operações Portuárias - VALE
Endereço: Av. dos Portugueses, s/n, Anjo da Guarda, CEP: 65085-581. São Luís, MA, Brasil
Telefone: (98) 98802-7353. E-mail: walter.pinheiro@vale.com

Newton Narciso Pereira

Doutor em Engenharia Naval e Oceânica pela USP
Professor na Universidade Federal Fluminense (UFF)
Endereço: R. José da Silva Ribeiro, n. 120, São Paulo, SP, Brasil
Telefone: (11)99630-8789. E-mail: newtonpereira@id.uff.br

Roberto Di Biase Sampaio

MBA em Gestão de Negócios pela Fundação Getúlio Vargas (FGV)
Gerente Executivo de Operações - VALE
Endereço: Av. dos Portugueses, s/n, Anjo da Guarda, CEP: 65085-581. São Luís, MA, Brasil
Telefone: (98) 98882-2595. E-mail: roberto.di.biase@vale.com

Artigo recebido em 25/01/2017. Revisado por pares em 07/02/2017. Reformulado em 28/03/2017.
Recomendado para publicação em 25/03/2016. Publicado em 30/04/2017. Avaliado pelo Sistema
double blind review.



RESUMO

O artigo analisa a utilização do método do Seis Sigma aplicado na gestão do sistema de embarque de minério, especificamente na aplicação do indicador de parada operacional. A metodologia aplicada é de estudo de caso, a unidade de análise é o processo de operação de embarque do Terminal Marítimo Ponta da Madeira (TMPM) da Vale, localizado em São Luís-MA. Foi identificada, como principal causa das paradas, a falha por entupimento. Constatou-se sistemática de análise, planejamento e intervenção bem estruturada com participação dos diversos níveis da empresa e boas práticas gerenciais de tratamento dos desvios dos indicadores.

Palavras-chave: Paradas Operacionais; Eficiência Portuária; Seis Sigma; Gestão Portuária; Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (TMPM).

ABSTRACT

The paper approaches Six Sigma method applied to ore boarding system management, specifically the operational stop indicator use. The methodology comprises a case study focusing on the embarking process in Vale's Ponta da Madeira Maritime Terminal (TMPM), located in São Luís (MA), Brazilian northeast. The data gathered identified as system stops causes the equipment failure by obstruction. The solution involved, as verified, systematic procedures composed by analyzing, planning and acting resulting in well-structured interventions with the participation of different company levels and, as well, characterizing good management practices in problems solving. Management tools use is supported by company excellence strategy.

Keywords: Operational Stops; Port Efficiency; Six Sigma; Port Management; Maritime Terminal of Ponta da Madeira (TMPM).

RESUMEN

El artículo analiza la utilización del método Seis Sigma aplicado en la gestión del sistema de salida de carga de mineral, específicamente en la aplicación del indicador de parada operacional. La metodología aplicada es el estudio de caso, la unidad de análisis es el proceso de operación de salida de Terminal Marítimo Ponta da Madeira (TMPM) de la empresa Vale, ubicada en São Luís-MA. Fue identificada, como principal causa de paradas, la falla por obstrucción. Se ha constatado sistemática de análisis, planeamiento e intervención bien estructurada, con participación dos diversos niveles de la empresa y buenas prácticas gerenciales del tratamiento de los desvíos de indicadores.

Palabras clave: Paradas Operacionales; Eficiencia de los puertos; Seis Sigma; Gestión de puertos; Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (TMPM).

1 INTRODUÇÃO

No cenário globalizado atual, o comércio exterior é muito importante para a economia brasileira. Em 2014, representou a relação de 19,3% do PIB, mesmo considerando a relativamente pequena participação do país (1,2%) no fluxo de comércio (valores de exportações e importações) internacional (ROBLES; NOBRE, 2015). No ano de 2016 exportamos cerca de US\$185.235.400.805,00 e importamos US\$137.552.002.856,00, e o transporte marítimo correspondeu a 80,36% do fluxo da exportação do nosso comércio exterior em valor (ALICEWEB, 2017).

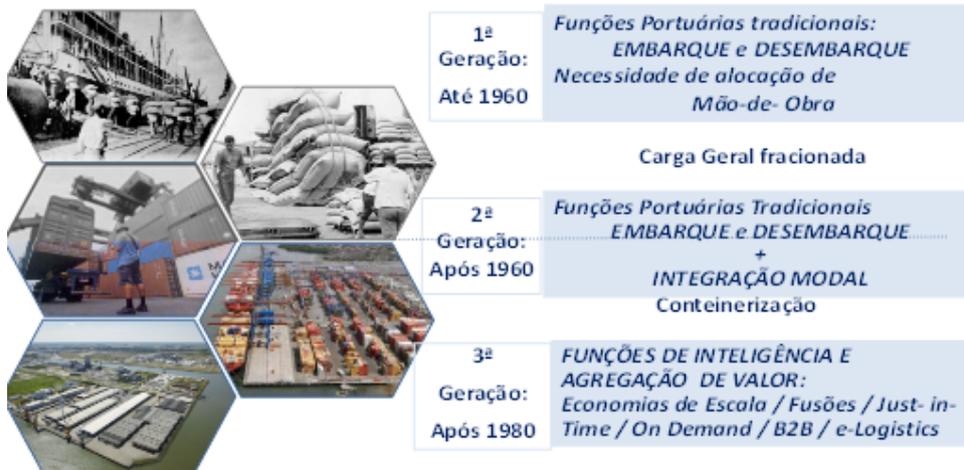
Do ponto de vista institucional, os portos brasileiros podem ser considerados em duas configurações, a saber, portos públicos (PP) e terminais de uso privativos (TUP). Estes últimos, em geral, são portos dedicados a um tipo de produto, ligados a cadeias de suprimentos de seus proprietários e, como tal, apresentam sistemas de gestão bastante avançados e eficientes.

Em um ambiente econômico internacional desfavorável, que tem agravado a crise política e econômica no Brasil, em 2015, a movimentação portuária cresceu 4,08% em relação ao ano anterior, atingindo 1,008 bi de t, com os TUP correspondendo a 65,1% dessa movimentação (ANTAQ, 2016). Já em 2016, a movimentação foi de 917, 031 mil de t, uma redução de 9,06%, com os TUP movimentando cerca de 65,5% do total (ANTAQ, 2017).

O anuário da UNCTAD indicou uma movimentação global de 9,8 bilhões de t em 2015, sendo 6,0 bilhões de t granéis sólidos (61%), dos quais, aproximadamente 1,28 bilhões de t de minério de ferro (13% do total), principal granel sólido movimentado por mar (UNCTAD, 2015).

No início dos anos 2000, órgão da ONU, a Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento (UNCTAD), elaborou um relatório que se tornou clássico do setor ao descrever e analisar o desenvolvimento dos papéis das organizações portuárias nas cadeias logísticas globais. O estudo dividiu a evolução dos portos em gerações, conforme ilustra a Figura 1.

Figura 1 - Evolução da Organização dos Portos



Fonte: Adaptado de UNCTAD, 1990.

A evolução dos portos ocorreu rapidamente a partir da década de 60 do século passado, de local básico de troca modal de mercadorias para a evolução da contêinerização, atuando como elo de integração modal e componente de cadeias logísticas locais e globais. A partir dos anos 80, os portos passam a realizar funções de agregação de valor. Os sistemas de informação sobre o trânsito de mercadorias fundamentais para ação de portos, inclusive, passam a contar com instalações industriais em suas proximidades (MCLAUGHLIN; FEARON, 2013; LI; DONG; SUN, 2015; DOOMS; VAN DER LUGT; DE LANGEN, 2013; PALLIS *et al.*, 2011).

Essa evolução não parou, e diversos autores, referindo-se a ela, têm abordado com a configuração de portos de quarta geração (PAIXÃO; MARLOW, 2003) e de quinta geração (LEE; LAM, 2016; LAM; NG; FU, 2013). Esta última mais associada a portos dedicados à movimentação de contêineres, tendo em vista sua integração às cadeias globais de suprimento. Desse modo, adaptando as considerações de estudo da ESCAP (2002), três direções gerais das atividades empresariais impactam as atividades portuárias, a saber:

- Logística integrada: portos atuando na integração dos componentes logísticos assumindo mais funções na integração modal, com suas instalações de armazenagem atuando como pulmão (*buffer*) na compatibilização entre os fluxos de entrada e saída de mercadorias;
- Produção: Portos como centros de adição de serviços em complementação ao processamento de produtos. Esses serviços podem se referenciar, por exemplo, à

postergação da configuração final dos produtos para consumidores, ou seja, ao *blending* e à agregação de serviços de valor logístico. As áreas portuárias (primárias e secundárias) convertem-se em centros regionais de distribuição e de prestação de serviços especializados;

- Serviços relacionados à gestão e operações do terminal portuário em si: No desempenho de sua função nas cadeias de suprimentos, a racionalização de custos e otimização de atividades apresentam-se como básicas. Esta dimensão, como veremos adiante, diz respeito ao foco do presente artigo.

Os portos podem ser classificados, também, em relação ao tipo de mercadoria que movimentam, em portos multipropósitos e dedicados. Um exemplo claro de porto multipropósito é o Porto de Santos.

Este artigo focaliza um porto dedicado, o Terminal Marítimo de Ponta da Madeira (TMPM), TUP localizado na Baía de São Marcos, na cidade de São Luís, no estado do Maranhão, e voltado para a exportação de minério de ferro de manganês e operado pela Vale.

A Vale é uma das maiores empresas de mineração do mundo. Presente nos cinco continentes, em 26 países, com sede no Brasil. Suas operações correspondem a um sistema integrado e complexo mina-ferrovia-porto e representam a principal operação portuária do país. Em 2016 movimentou cerca de 14,6% das mercadorias no Brasil em t (ANTAQ, 2017).

Na exploração de um dos maiores depósitos de minério de ferro do mundo, localizado na Serra do Carajás, no estado do Pará, o sistema compreende a ligação ferroviária ao litoral pela Estrada de Ferro Carajás (EFC), sistema de alta capacidade que acessa o TMPM, onde o minério de ferro é embarcado para clientes mundiais. Assim, o TMPM faz parte do Sistema Norte da VALE, juntamente com as minas a céu aberto da Serra de Carajás (PA), uma usina de beneficiamento de minério de ferro e pela Estrada de Ferro Carajás (EFC).

O presente trabalho aplica um estudo de caso com um recorte no sistema de gestão do TMPM ao analisar as ferramentas de gestão utilizadas para identificar causas que interferem na operação, mais especificamente, a metodologia Seis Sigma aplicada ao Revista Eletrônica de Estratégia & Negócios, Florianópolis, v.10, Edição Especial 1, Abril 2017.

indicador de paradas operacionais. O objetivo desta aplicação é de reduzir e estabilizar o modo de falha relativa a entupimentos na operação de embarque de minério do TMPM e, assim, aumentar sua produtividade e reduzir os custos de embarque no Porto.

2 SISTEMA E OPERAÇÃO PORTUÁRIA

É interessante notar que a grande maioria de publicações acadêmicas relativas à gestão portuária é voltada para terminais de movimentação de contêineres, e os terminais dedicados a granéis líquidos e sólidos são menos estudados. Uma das explicações é a disponibilidade de informações, uma vez que estes terminais, em grande parte, são privados, com restrições na disponibilidade de informações.

No caso brasileiro, pode se destacar os trabalhos realizados por grupo de pesquisadores vinculado à Universidade Federal do Maranhão, que tem produzido artigos apresentados em congressos especializados e publicações acadêmicas, abordando a gestão de operação de terminais de granéis sólidos, a saber, Adriano, Robles e Cultrim (2013); Cutrim *et al.* (2013a, 2013b, 2013c, 2013d, 2013e, 2014a e 2014b); Galvão, Robles e Guerise (2013); Mendes, Cutrim e Robles (2013); Pereira, Robles e Cutrim (2013); Robles *et al.* (2012, 2013a, 2013b, 2013c, 2016); Santana, Cutrim e Robles (2015); Silva, Cutrim e Robles (2013) e Unes *et al.* (2015). O presente artigo desenvolve-se nesse conceito e pretende contribuir para o entendimento da aplicação de conceitos usuais nas operações industriais e de serviços à gestão portuária, com foco nos procedimentos do TMPM.

Dessa forma, abordaram-se os conceitos fundamentais da operação portuária, entendida com um sistema, a exemplo dos sistemas de produção, identificando indicadores de eficiência. Esses conceitos foram pesquisados em publicações acadêmicas e outros especializados. Também as características fundamentais de sistemas portuários, focalizando terminais de movimentação de produtos sólidos a granel, especificamente o minério de ferro.

A aplicação das ferramentas gerenciais de controle foi referenciada à literatura relativa ao desenvolvimento de processos gerenciais de operação e da gestão da qualidade (Seis Sigma) em serviços.

A prestação de serviços de movimentação de mercadorias, especialmente nesse tipo de terminal portuário, envolve um processo produtivo bastante sofisticado em que interagem equipamentos físicos de grande porte e sistemas de informação de rastreamento e acompanhamento dos processos de movimentação, armazenagem, recuperação e encaminhamento para embarque e o desembarque, propriamente dito.

2.1 O SISTEMA PORTUÁRIO E SEUS SUBSISTEMAS

Um dos conceitos básicos a considerar é que o porto é entendido como um sistema composto por subsistemas de acesso terrestre, de estruturas de retroárea, de estruturas de atracação e de acesso marítimo (PEIXOTO, 2011).

O subsistema acessibilidade terrestre diz respeito à integração das instalações portuárias aos modos de transporte terrestres, basicamente ferrovia e hidrovia. O subsistema estrutura de retroárea compreende as instalações utilizadas para compatibilizar fluxos de entrada e saída entre os modos terrestres e aquaviários, e seu projeto depende das características (granel, acondicionada, solta, especial) e volume de carga movimentada, características geotécnicas, físicas e climáticas do local de implantação do terminal, sistemas adotados para a movimentação de cargas e correspondentes especificações de equipamentos (PEIXOTO, 2011).

O subsistema estruturas de atracação refere-se à transição entre a navegação e as operações dos navios e encaminhamento dos produtos no porto. Por fim, o subsistema acessibilidade marítima refere-se às condições de navegabilidade, canal de acesso (largura e profundidade) e às manobras do navio para os cais de atracação (PEIXOTO, 2011).

Outra classificação de sistema portuário é quanto a sua natureza, localização e utilização. Quanto à natureza podem ser naturais ou artificiais, dependendo das características principais de abrigo e acessibilidade (ALFREDINI; ARASAKI, 2009). Este é o caso do TUPM. Em relação à localização, apresentam portos externos, interiores e ao largo, em função do posicionamento geográfico do terminal. O TUPM é um porto externo. A utilização refere-se às cargas movimentadas e aos tipos de equipamentos utilizados, classificando-os como portos de carga geral, multipropósitos ou portos dedicados. O TUPM é um TUP dedicado.

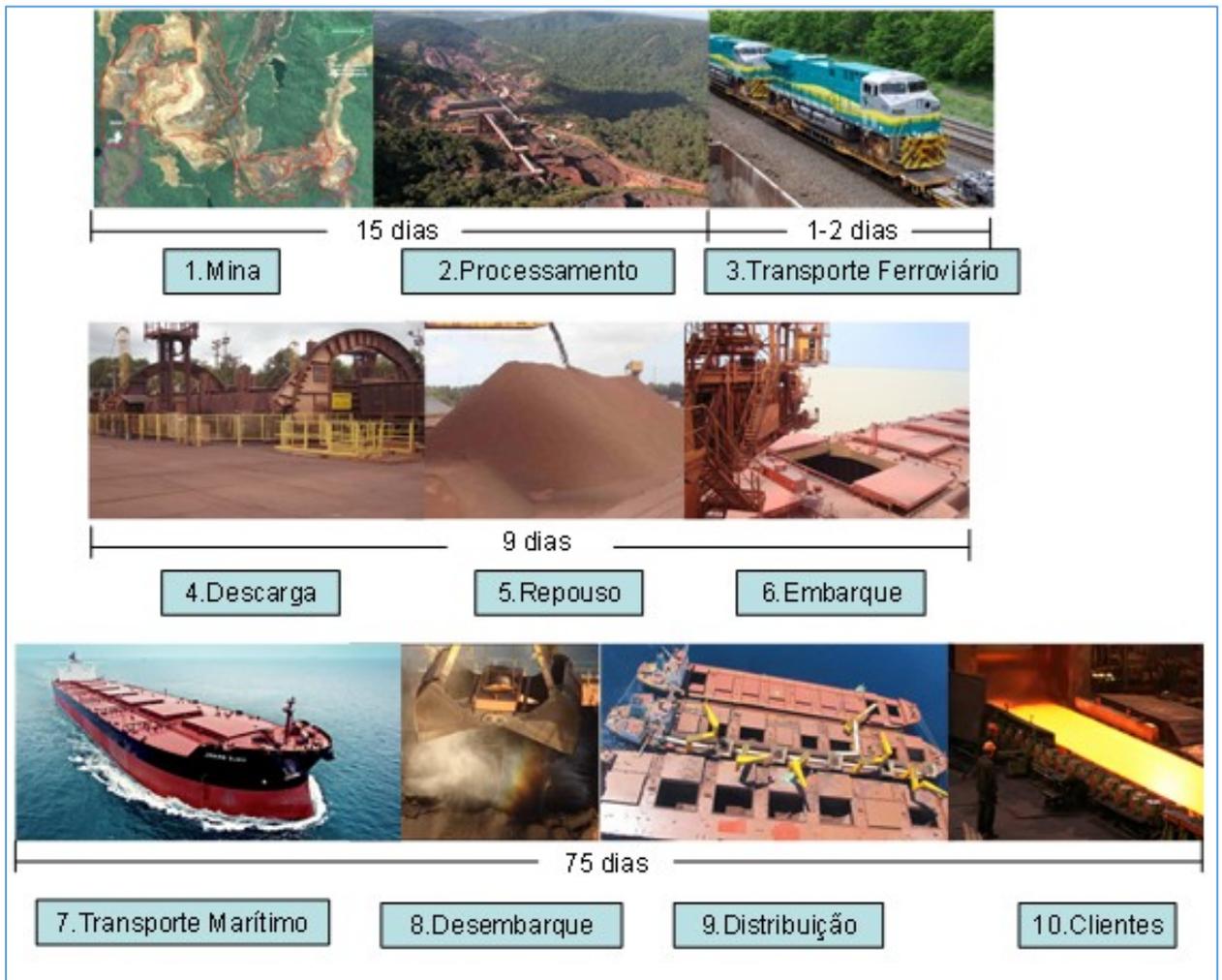
2.2 OPERAÇÃO PORTUÁRIA

A gestão da operação portuária consiste na interação efetiva dos subsistemas portuários e compreende um conjunto de atividades e de processos sequenciais, desde a chegada/saída das cargas via terrestre até seu embarque/desembarque nos navios.

Para tanto, no caso do TMPM, TUP dedicado a um tipo de produto específico, o minério de ferro, tem-se como principais processos operacionais e meios de apoio: os processos de programação; processos de operação; apoio/suporte de operação e o apoio/suporte de programação (VALE, 2008a).

Deve-se destacar que o TMPM, assim como o Porto de Tubarão, localizado em Vitória (ES), compreende a cadeia logística de exportação de minério de ferro da Vale em um sistema integrado mina-ferrovia-porto, e envolve instalações e equipamentos de grande porte e de operação automatizada, conforme ilustra a Figura 2, referente ao sistema mina-ferrovia-porto-embarque-navegação-desembarque-entrega aos clientes. Este artigo focaliza a operação no TMPM, denominada na figura de descarga, repouso e embarque, as quais, em condições ideais, duram nove dias.

Figura 2 – Cadeia Produtiva da Vale



Fonte: Vale (2015a).

As três operações básicas do TPM, ou seja, descarga e recepção do minério de ferro; encaminhamento para os pátios de estocagem para aguardar embarque; e recuperação e traslado para embarque nos navios são realizadas por quatro conjuntos de equipamentos, quais sejam: viradores de vagões; recuperadoras e empilhadeira recuperadora; correias transportadoras e os carregadores de navio, como segue.

Viradores de Vagão (VV): O TPM conta com seis viradores de Vagão com capacidade de manuseio de 8.000 t/h. O minério de ferro é descarregado na estação de VV, chegando ao terminal em trens com mais de 300 vagões. Moura (2011) apresenta que os VV giram em até 180° conjuntos de dois vagões, o engate entre os vagões é fixo, e eles contam com engates móveis na extremidade, o que torna o giro possível. Cada vagão tem capacidade de até 120 t de minério de ferro (VALE, 2008a).

Empilhadeira, Recuperadora (RP) e Empilhadeira Recuperadora (ER): A partir da estação de VV, o minério é transportado por correias até os pátios de estocagem, compostos por 11 áreas de depósito do minério, em um total de 625.000 m³, cuja capacidade estática é de 10,5 milhões de t. O empilhamento apresenta técnicas próprias de realização e é realizado por duas empilhadeiras com capacidade de 16.000 t/h e uma de 8.000 t/h. Sua operação é automatizada a partir do Centro de Controle e Operações do Porto, localizado junto ao pátio. O mesmo acontece com as três recuperadoras (RP), com capacidade de 8.000 t/h cada, e as quatro empilhadeiras/recuperadoras (ER) de 8.000 t/h (VALE, 2008a).

Correia transportadora (CT): este sistema utilizado para movimentação e elevação de cargas é amplamente utilizado em terminais de minérios (ZHANG; XIA, 2011).

Carregador de Navio (CN): “[...] máquina utilizada nas atividades de operação em geral, destinada ao carregamento de granéis sólidos em navios” (MOURA, 2011). Os carregadores de navios constituem-se em grandes lanças que se movimentam ao longo dos píeres para carregamento dos porões dos navios. O TMPM conta com um CN com capacidade de 16.000 t/h e três com velocidade de descarga de produto de 8.000 t/h. É nesta condição que o TMPM se destaca ao apresentar profundidade natural de até 25 m, permitindo a operação dos maiores navios mineraleiros do mundo, de até 400.000 t (VALE, 2008a).

2.3 O SISTEMA DE GESTÃO DA VALE E O TMPM

A Vale, a exemplo de outras empresas de classe mundial, baseia os fundamentos de seu sistema de operação e gestão no Sistema Toyota de Produção (STP), replicado, adaptado e aprimorado no denominado VPS – Vale *Production System*, com conceitos difundidos para praticamente todos os seus setores, inclusive para a setor portuário e marítimo (PEREIRA; ROBLES; CUTRIM, 2013). Assim, o VPS garante uma padronização de suas operações, de forma que a Vale possa operar e produzir em todas as unidades presentes em 37 países (VALE, 2011).

Neste sentido, o regulamento estabelece:

O VPS é o caminho oficial definido pela Vale para o alcance da excelência operacional, visando a maior eficiência e o menor custo por unidade. Esse sistema de gestão de processos tem a ambição de levar a Vale não apenas a ser a maior mineradora do mundo, mas também a ser uma referência global (benchmark) na gestão operacional (VALE, 2011, p. 23).

Pereira, Robles e Cutrim (2013) identificaram a inter-relação da estrutura do VPS e o conceito do STP, por exemplo, na adoção e prática de ferramentas de gestão da qualidade, como a da Manutenção Produtiva Total (MPT), por meio da ênfase no comprometimento de pessoas (equipes envolvidas). Outra ferramenta utilizada refere-se à aplicação do ciclo PDCA, o qual é definido como um método de gerenciamento de processos ou de sistemas que auxilia o atendimento de metas associadas a resultados de sistemas empresariais. O método PDCA compreende quatro fases básicas: planejar (*plan*), executar (*do*), verificar (*check*) e atuar corretivamente (*action*) (CAMPOS, 1999).

O ciclo PDCA, de acordo com o regulamento VPS Vale (2011), é utilizado na gestão da empresa para padronizar e melhorar seus processos de forma contínua, apoiando os gestores com informações para tomadas de decisão. O ciclo PDCA é uma das formas mais utilizadas na melhoria de processos. Também está muito relacionado com a Gestão da Qualidade Total, que tem como abordagem sistemática a gestão de processos, que objetiva a melhoria contínua e desempenho da firma e, quando associado à inovação, proporciona vantagem competitiva (GUERRA; SEVERIANO FILHO; TONDOLO, 2015).

O método Seis Sigma iniciou na Motorola como aprimoramento do PDCA, e compreendeu quatro fases, o MAIC (Medir, Analisar, Melhorar e Controlar), após acrescentou-se a fase Definir, resultando em DMAIC, como ferramenta de melhoria de desempenho utilizada no Seis Sigma. O DMAIC compreende (PANDE *et al.*, 1998, *apud* LIMA *et al.*, 2009):

- *Define* (Definir): especificação precisa do escopo de um projeto ou processo;
- *Measure* (Medir): determinação do foco e localização do problema;
- *Analyze* (Analisar): determinação das causas do problema prioritário;

- *Improve* (Melhorar): proposição, avaliação e implantação de soluções relativas ao problema prioritário;
- *Control* (Controlar): garantia que o atendimento da meta seja de longo prazo.

Outra importante ferramenta contextualizada no VPS é o Seis Sigma. É um instrumento de melhoria da qualidade e de apoio aos resultados. A letra grega sigma – 18ª letra do alfabeto grego – representa um símbolo matemático de medida de variação, ou seja, mede a distribuição de resultados em torno da meta de qualquer processo ou procedimento.

Existem duas abordagens para o Seis Sigma, a estratégica e estatística. A primeira representa a compreensão por parte das empresas da aplicação do método no atendimento da estratégia de qualidade com melhoria de resultados e redução de custos. A segunda abordagem focaliza a quantificação da variação, por meio das quantidades de desvios padrões associados à variável aleatória de interesse no estudo de um processo crítico. Esta abordagem relaciona-se com os controles estatísticos de processos (CEP), sendo o Seis Sigma descrito pela relação dos índices de capacidade de processo ao padrão 6σ , e pela origem do valor 3,4 PPM (partes por milhão), como indicador da quase perfeição e do padrão de qualidade 6σ (SANTOS; MARTINS, 2008).

Assim, tem-se a definição de defeito como qualquer coisa que insatisfaça o cliente, por exemplo, produto não conforme com as especificações, serviço deficiente ou um preço muito alto. Entende-se que, se a organização reduzir a média de desvios de seus produtos, menor quantidade deles apresentará defeitos com economia de custos. Em termos estatísticos, Sigma (desvio-padrão) é uma medida que quantifica a variação existente entre os resultados (produtos) de qualquer processo ou procedimento. Quanto menor o valor do desvio-padrão, melhor o processo. A escala Sigma é utilizada para medir o nível de qualidade associado a um processo. Quanto maior o valor alcançado na escala Sigma, melhor. Um processo Seis Sigma corresponde a não se ter mais do que 3,4 produtos defeituosos por milhão de unidades produzidas, conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1 – Nível de Qualidade *versus* (%) de Conformidades

Nível de qualidade	Defeito por milhão	Percentual de
--------------------	--------------------	---------------

	(ppm)	conformidades
2 sigma	308.537	69,15
3 sigma	66.807	93,32
4 sigma	6.210	99,379
5 sigma	233	99,9767
6 sigma	3,4	99,99966

Fonte: Adaptado de Vale (2015b).

Este artigo analisa a aplicação do método do Seis Sigma no processo de gestão do embarque por meio do indicador de paradas operacionais na linha de embarque do TMPM.

3 METODOLOGIA DO ESTUDO

O estudo compreendeu revisão de literatura sobre avaliação de desempenho de operações portuárias de movimentação de granel sólidos e tem como origem estudos realizados no programa de pós-graduação *lato sensu* em gestão portuária da Universidade Federal do Maranhão. Em relação a sua natureza, o estudo pode ser considerado do tipo qualitativo, na medida em que se desenvolve em uma situação natural, focalizando as operações do embarque de minério de ferro no TMPM. Para tanto, foram coletados relatórios e dados estatísticos disponibilizados pelo TMPM, de modo a analisar a realidade complexa desse processo (LUDKE,1986).

Em relação ao objetivo, o estudo pode ser considerado exploratório, ao se trabalhar um tema, conforme mencionado, pouco estudado na academia brasileira. Principalmente relativamente ao caso analisado, terminal portuário dedicado à movimentação de carga a granel, o minério de ferro e à utilização de ferramentas gerenciais aplicadas a processos operacionais desse tipo de terminal portuário (CERVO *et al.*, 2007).

Quanto aos meios, classifica-se como um estudo de caso. O método do estudo de caso refere-se ao uso de evidências qualitativas e quantitativas na investigação de fenômeno contemporâneo dentro do seu contexto real, no qual os limites entre o fenômeno e o contexto não são claramente percebidos (YIN, 2001). As evidências foram coletadas por

meio de entrevistas junto a especialistas e profissionais do TMPM, arquivos e documentos disponibilizados, e observações empíricas por parte dos pesquisadores em visitas orientadas ao sítio do TMPM.

Em relação ao caráter meramente qualitativo dos estudos de caso, o uso simultâneo de dados quantitativos e qualitativos nesses trabalhos acaba gerando um efeito sinérgico, aliando o rigor das evidências quantitativas com o maior nível de detalhe das evidências qualitativas (EISENHARDT, 1989). Considera-se que o presente estudo de caso atende as conceituações propostas pelos autores citados, ao aplicar métodos e técnicas de tratamento de dados com base na identificação, análise e diagnóstico de base teórica, a partir artigos, livros, relatórios e visitas a sítios eletrônicos especializados.

A pesquisa propriamente dita desenvolveu-se em quatro fases distintas: revisão da literatura; análise de relatórios gerenciais fornecidos pela companhia, visitas técnicas e entrevistas semiestruturadas com gestores do TMPM. A revisão da literatura envolveu a análise de livros, artigos, apostilas da especialização em engenharia portuária e dados publicados no sítio da Vale. No entanto, há que se ressaltar que os relatórios gerenciais disponibilizados restringiram-se aos anos entre 2013 e 2015, os responsáveis pelas áreas solicitaram e foi aceito pelos pesquisadores a não divulgação, mesmo acadêmica, de informações mais recentes.

As visitas técnicas foram realizadas no ano de 2015 na área de pátios e embarque do TMPM. As entrevistas focalizaram o processo de embarque de minério de ferro. A unidade de análise macro foi o TMPM, e como unidade de análise micro, o setor de embarque de navios, com os respondentes participando da gestão desse processo e, mais especificamente, no tratamento das ocorrências de falhas nas operações de embarque.

O percurso metodológico descrito está direcionado para o objetivo específico da pesquisa, que é demonstrar a implantação da metodologia Seis Sigma, para melhoria de resultados operacionais com foco nas paradas operacionais do embarque. Por razões estratégicas, a Vale não autorizou a divulgação de dados globais dos indicadores de paradas operacionais, apenas dados específicos das paradas operacionais e o modo de falha priorizada referente aos entupimentos do sistema, objeto do artigo.

4 ESTUDO DE CASO

O TMPM é um porto privado, pertencente à Vale, inaugurado no ano de 1985 e localizado no Complexo Portuário de Itaqui, à margem leste da Baía de São Marcos, na ilha de São Luís-MA. O terminal movimenta minério de ferro, manganês, concentrado de cobre e ferro-gusa e grão de soja de terceiros. A Figura 3 destaca, no TMPM, as áreas de descarga de minérios, pátio de armazenagem e empilhamento do minério, a recuperação de minério para embarque nos navios, píeres de atracação e carregamento dos navios.

Figura 3 – Terminal Marítimo de Ponta da Madeira - TMPM

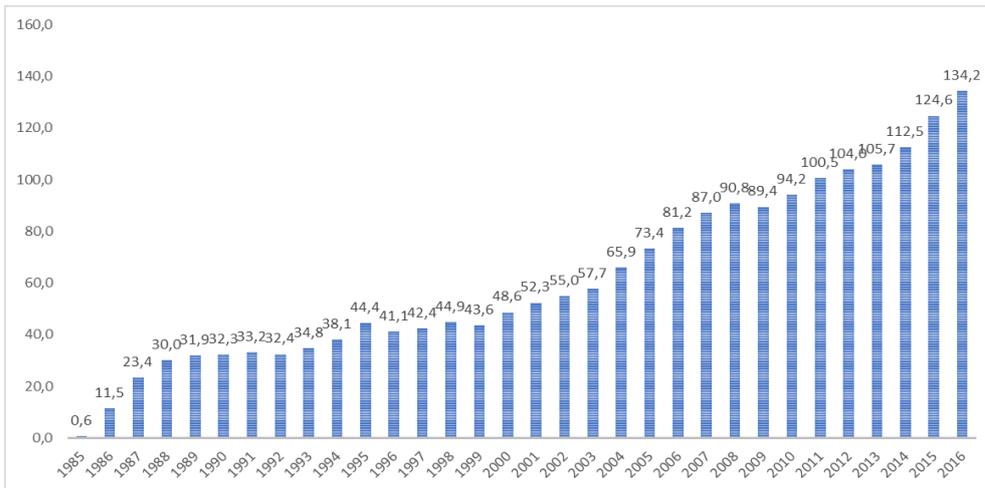


Fonte: *Google Earth (2012)*.

O local do TMPM apresenta largura e profundidade naturais adequadas à operação de grandes navios graneleiros. Seu canal de acesso natural permite o tráfego simultâneo desses navios com boa visibilidade, grande profundidade e a posição geográfica favorável (VALE, 2015a). Essas condições mais que compensaram a incidência de marés de grande amplitude (de até mais de 7 m na sizígia e velocidade das correntes até 3 m/s).

O Gráfico 1 mostra a evolução da movimentação de minério de ferro pelo TMPM no período 1985 a 2016, saindo de 0,6 milhões de t em sua fase de início de operação, atingindo 48,6 milhões de t em 2000, ultrapassando mais de 100 milhões de t em 2011 e até 134 milhões de t em 2016.

Gráfico 1 – Evolução de volume embarcado no TMPM (milhões de t/ano)



Fonte: Vale (2015a) e ANTAQ (2017).

O TMPM, conforme pode ser visto, consiste em operações complexas e de grande volume. A Vale tem, em fase final de implantação, um grande projeto de expansão desse sistema, o projeto S11D, que inclui, na sua dimensão logística, ramal ferroviário no sudeste do Pará com 101 km de extensão; duplicação de 570 km da Estrada de Ferro Carajás; e expansão dos terminais Ferroviário e Marítimo de Ponta da Madeira, em São Luís. O projeto deverá elevar a capacidade de transporte do Sistema Norte dos atuais 150 milhões de t/ano (Mtpa) para 230 Mtpa, a partir de 2018 (VALE, 2016).

No TMPM, o minério é transferido dos viradores de vagões para os pátios de estocagem, a céu aberto, localizados relativamente próximos aos berços de embarque, por esteiras transportadoras. Então, o minério é recuperado e também por correias transportadoras é transferido aos carregadores de navios, localizados nos píeres, onde são depositados nos porões dos grandes navios graneleiros. Esta última fase, a de embarque, é foco deste artigo.

5 DISCUSSÃO E RESULTADOS

A foco do artigo é análise da eficiência portuária a partir do indicador de paradas operacionais na linha de embarque do TMPM. A base são informações disponibilizadas para uso acadêmico pela Vale.

O indicador de paradas operacionais mede todas as paralisações da operação que impactam na Taxa Comercial de Embarque, excluindo as de responsabilidade da área de

manutenção. Os dados básicos sobre as paradas operacionais referem-se ao período de 2013 e 2014. A taxa comercial de embarque concerne ao desempenho global de um navio, equipamento, linha, berço ou porto. Em relação ao embarque, ela por ser calculada pela relação entre a carga movimentada pelo tempo total de horas corridas de embarque, conforme a expressão (UNES *et al.*, 2015):

$$T_{CB} = \frac{CM}{TOD} \quad (1)$$

Onde:

CM = carga movimentada em t;

TOD = tempo operacional disponível, ou seja, é o tempo total de horas corridas de operação do embarque [PRO 000197] (VALE, 2011).

A movimentação de minério de ferro pode implicar em vários problemas operacionais. Na primeira etapa do estudo, focalizou-se a *identificação do problema*, utilizando o gráfico de Pareto construído para o período de janeiro de 2013 a junho de 2014, o qual identifica qual o modo de falha mais frequente e, assim, estabelecer uma prioridade de intervenção, tendo em vista a capacidade de atuação no modo de falha.

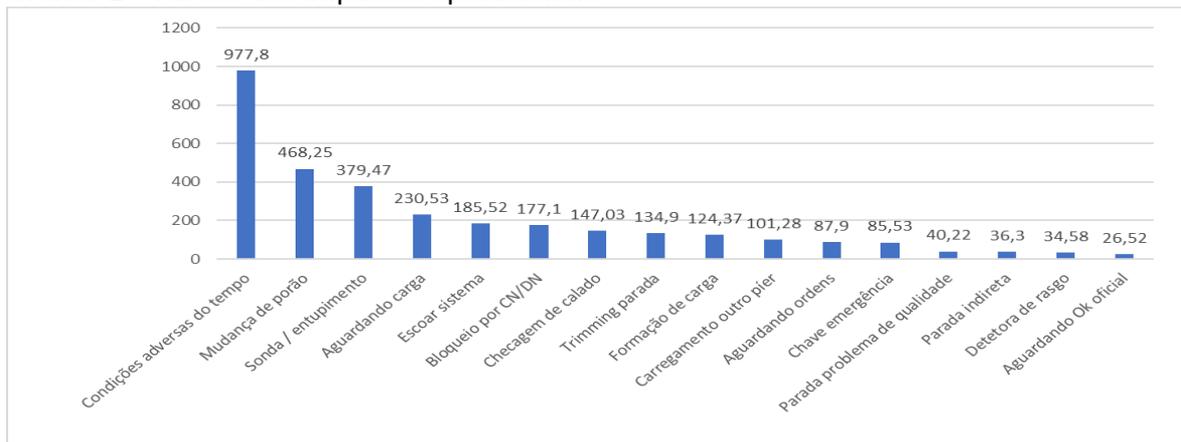
O Gráfico 2 identifica que os modos de falhas mais frequentes referem-se a condições adversas de tempo, mudanças de porão e paradas por entupimentos. As mudanças de porão fazem parte do processo de embarque pela necessidade de garantir a integridade do navio na estivagem da carga entre os porões. Condições adversas de tempo não são gerenciáveis e apresentam sazonalidade, dependendo de condições regionais de clima. Assim sendo, foi definido como objeto de estudo o modo de falha de paradas operacionais por entupimento.

Problema identificado, foi necessário *definir qual seria o indicador* que poderia evidenciar resultados esperados, uma vez que a simples quantidade absoluta de horas não retrataria o real impacto da menor utilização de alguns berços e de correias transportadoras em uma rota pela restrição de manobras de atracação. O indicador a ser medido foi definido

como a razão entre as horas de paralisação e a quantidade de volume movimentado na operação, e calculado pela fórmula:

$$\text{Impacto} = \text{horas de impacto por entupimentos} / \text{volume movimentado.}$$

Gráfico 2 – Pareto dos impactos operacionais



Fonte: Vale (2015b).

Na definição da meta utiliza-se o método da lacuna e tomado como a diferença entre o valor médio atual do indicador e seu valor esperado, tendo em vista um histórico de referência. Desse modo, calculou-se o valor médio de quantidade de paralizações de eventos de entupimento por volume movimentado como de 8,15 h/mt, sendo seu valor de referência 4,22 h/mt. A meta foi estabelecida pela metade da lacuna, correspondendo a um valor esperado ao final do trabalho de 6,19 h/mt, conforme mostra o quadro 1.

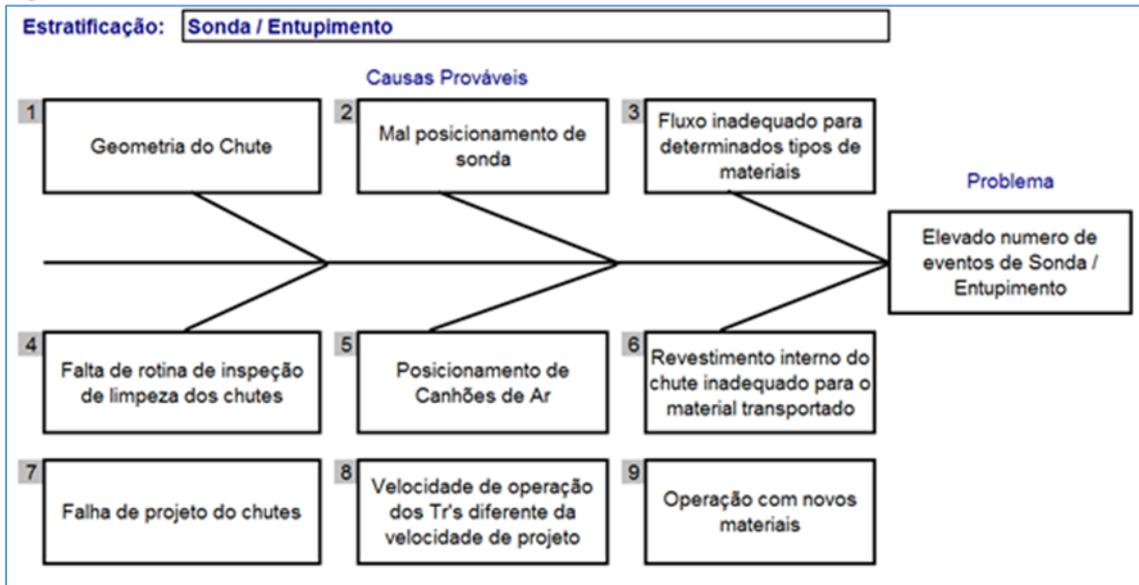
Quadro 1 – Definição da meta

Método da Lacuna	
Valor médio	8,15 h/mt
Valor de referência	4,22 h/mt
Lacuna	3,93 h/mt
Lacuna / 2	1,97 h/mt

Fonte: Vale (2015b).

Em seguida, na fase de análise do processo foi realizada uma reunião do tipo *brainstorming* para identificar possíveis causas do problema do indicador, utilizando um diagrama de causa e efeito para organizar as alternativas para visualizar o efeito da causa apontada, conforme mostra a Figura 4.

Figura 4 – Análise de causas



Fonte: Vale (2015b).

Após este procedimento, passou-se à *fase de dar prioridade às causas*, utilizando uma matriz de prioridade, que considera a quantidade de vezes que a causa mostrou-se no evento de entupimentos, o esforço necessário para sua eliminação e a autonomia que se teria para eliminar ou mitiga-la. Com as causas priorizadas foi possível identificar onde será importante investir esforços para reduzir o problema (Quadro 2).

Quadro 2 – Priorização das causas

Entupimento 1401	Entupimento 1503	Entupimento 2601	Entupimento 2603	Causas Levantadas	Critérios de Priorização			TOTAL
					Qt. entupimento	Esforço de eliminação da causa	Autonomia	
				Peso do Critério	10	8	7	
-	X	X	X	Geometria do chute inadequada	5	5	3	111
X	X	X	X	Má posicionamento da sonda	5	1	5	93
X	X	X	X	Posicionamento da bancada inadequada	5	3	3	95

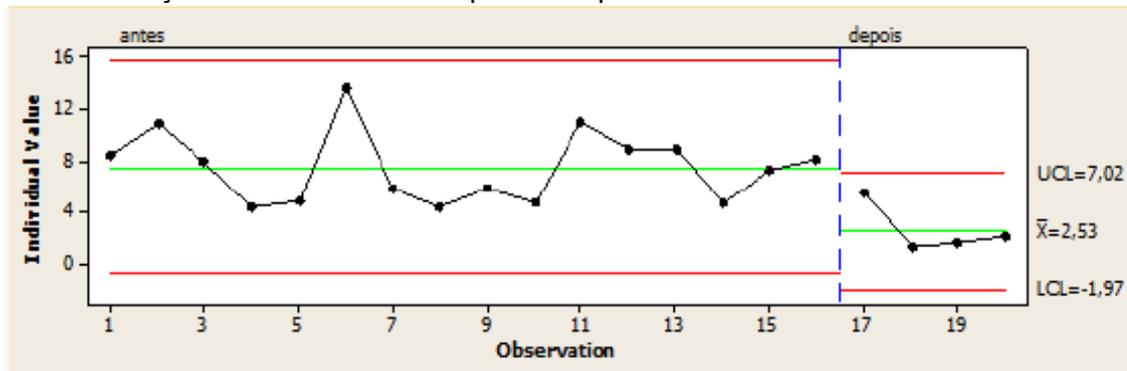
Fonte: Vale (2015b).

Em seguida apresenta-se a etapa de prioridade das soluções e estabelecimento de planos de ação relacionados às causas prioritárias. Para tanto, foi feito um levantamento de

soluções para sua eliminação ou mitigação, as quais foram dispostas em uma matriz, onde se identifica a melhor solução para cada causa, considerando seu impacto sobre a causa, sua complexidade de implantação da solução, seu custo e o prazo necessário para efetivá-la.

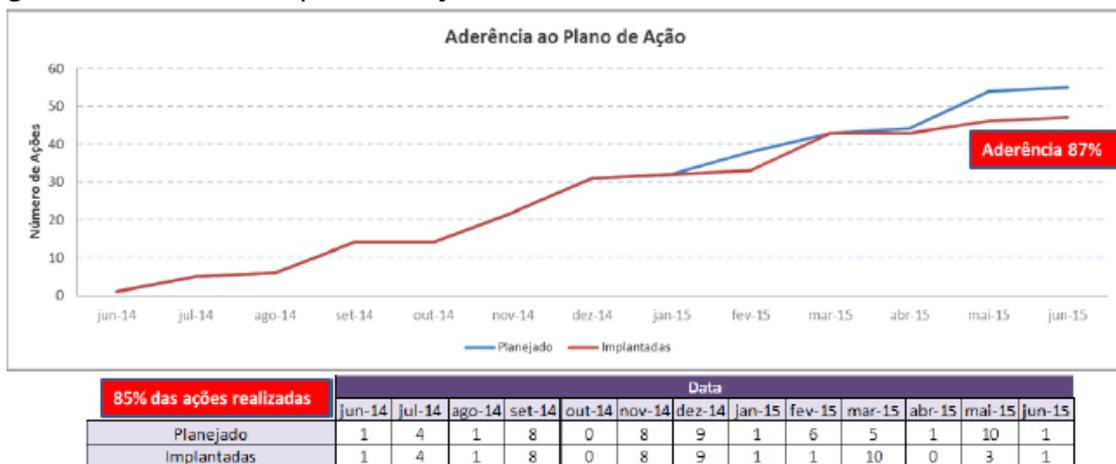
Após o levantamento das causas e das suas soluções, tem-se a etapa de implantação dos planos de ação estabelecidos com prazos e medidas voltadas para as causa relativas a cada transportador de correias. No final do plano verificam-se os resultados alcançados em relação à definição da meta e se a sua aderência ao plano foi favorável (Figuras 5 e 6).

Figura 5 – Redução da variabilidade de paradas operacionais



Fonte: Vale (2015b).

Figura 6 – Aderência ao plano de ação



Fonte: Vale (2015b).

Na conclusão das ações, foi verificado que a média de horas por milhão de toneladas foi de 2,53, contrapondo a meta de 6,19 h/mt, considerando que os planos de ação alcançaram o esperado e as metas propostas foram superadas. A carta de controle do

período demonstrou os ganhos obtidos pelo deslocamento da média de 8,15 h/mt para 2,53 h/mt, ou seja, um limite superior de controle menor que a média da situação prévia.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo de caso analisou a eficiência e o gerenciamento do indicador de parada nas operações do embarque do TMPM, sendo identificados procedimentos de classificação de seus problemas em relação a seu histórico e às metas empresariais (Gráfico de Pareto). Essas ocorrências foram analisadas pela metodologia DMAIC (Seis Sigma) com a determinação das causas por meio do gráfico de causa e efeito (espinha de peixe), e a determinação de suas prioridades, resultado de reuniões gerenciais.

As prioridades de causas/impactos resultaram em planos de ação para solução dos problemas e resultados acompanhados por meio de relatórios e reuniões gerenciais. A lição aprendida foi formalizada e as ações divulgadas institucionalmente para proveito de outras áreas do porto ou outros portos da Vale.

Foi possível, aos pesquisadores, acesso ao sítio do TMPM e aplicação de questionários com perguntas semiabertas para entendimento do processo e das particularidades dessa operação complexa. Pode-se concluir que o estudo contribuiu para o conhecimento da aplicação de ferramentas de gestão que visam a contribuir para a melhoria do indicador de paradas operacionais e, especificamente, no modo de falha por entupimentos, que reduziu da média 8,15h/mt para 2,53h/mt em 2015.

No entanto, cabe a realização de novos estudos em outros setores do TMPM, em outros portos da Vale, de modo a contribuir para comparação desses procedimentos com portos semelhantes.

REFERÊNCIAS

ADRIANO, F. F.; ROBLES, L. T.; CUTRIM, S. S. Afretamento de Navios Grande Porte no Transporte de Minério de Ferro: Estudo de Caso da Vale S/A. Anais... **XXXVII Encontro da ANPAD – EnANPAD**. Rio de Janeiro: 2013.

ALFREDINI, P.; ARASAKI, E. **Obras e Gestão de Portos e Costas**. São Paulo: Editora Blucher, 2009.

ALICEWEB. **Sistema de Análise das Informações de Comércio Exterior do Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior**. Disponível em:

<<http://aliceweb.desenvolvimento.gov.br/>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

ANTAQ. **Movimentação portuária 2014 e 2015**. 2016. Disponível em:

<<http://www.antaq.gov.br/anuario>>. Acesso em: 30 ago. 2016.

ANTAQ. **Movimentação portuária 2016**. 2017. Disponível em:

<<http://www.antaq.gov.br/anuario>>. Acesso em: 24 jan. 2017.

CAMPOS, V. F. **TQC – Controle da Qualidade Total (no estilo japonês)**. 8 ed. Belo Horizonte, MG: Editora de Desenvolvimento Gerencial, 1999.

CERVO, A. L.; BERVIAN, P. A.; SILVA, R. **Metodologia Científica**. 6 ed. São Paulo: Person Prentice Hall, 2007.

CUTRIM, S. S.; ALBURQUERQUE, R. M.; ROBLES, L. T.; ARAUJO, T. A. L. Gestão de Perdas do Processo de Recuperação de Minérios no Terminal Marítimo de Ponta da Madeira. Anais... **IX Congresso Nacional de Excelência em Gestão - CNEG**, Niterói: 2013a.

CUTRIM, S. S.; BARROS, D. A.; ROBLES, L. T. Produtividade no Processo de Embarque no Terminal de Minério do Porto de Tubarão. Anais... **IX Congresso Nacional de Excelência em Gestão - CNEG**, Niterói: 2013b.

CUTRIM, S. S.; DIAS, C. J.; ROBLES, L. T. Integração Vertical em Cadeia Logística como Vantagem Competitiva: Caso de Exportação de Carvão em Beira Moçambique. Anais... **XVI Simpósio de Administração da Produção**, Logística e Operações Internacionais SIMPOI, São Paulo: 2013c.

CUTRIM, S. S.; PARENTE, F. R. F.; ROBLES, L. T. Gestão de Recursos Hídricos em um Terminal Portuário. **Revista Tecno-lógica** (Santa Cruz do Sul-RS). Online, v. 18, p. 24-36, 2014/a.

CUTRIM, S. S.; PIANCASTELLI, A. D. ROBLES, L. T. Aspectos Logísticos na Exportação de Grãos no Porto de Vitória: Análise de Avarias na Descarga de Vagões Graneleiros. Anais... **IX Congresso Nacional de Excelência em Gestão - CNEG**, Niterói: 2013/d.

CUTRIM, S. S.; ROBLES, L. T.; ROMA NETO, P.; CUTRIM, S. J. Gestão de falhas na descarga de minérios no terminal marítimo de Ponta da Madeira. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v.17, p.27 - 50, 2014/b.

CUTRIM, S. S.; ROBLES, L. T.; MERIGUETI, B. A.; ASSIS, K. M. M. **Port efficiency analysis: Port of Tubarão's Pier I case study**. The IAME2013 Annual Conference Proceedings, Marseille – France, 2013e.

DOOMS, M.; VAN DER LUGT, L.; DE LANGEN, P. W. **International strategies of port authorities: The case of the Port of Rotterdam Authority**. Research in Transportation Business and Management, v. 8, p. 148–157, 2013.

EISENHARDT, K. M. Building Theories from Case Study Research. **Academy of Management Review**, v. 14, n. 4, p. 532-550, 1989.

ESCAP - Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. **Commercial Development of Regional Ports as Logistics Centres**. UN (2002).

GALVÃO, C. B.; ROBLES, L. T.; GUERISE, L. C. The Brazilian seaport system: A post-1990 institutional and economic review. **Research in Transportation Business & Management**, v. 8, p. 17–29, 2013.

GOOGLE EARTH. **Terminal Marítimo de Ponta da Madeira**. [Website]. 2012. Disponível em: <www.googleearth.com>. Acesso em: 10 fev. 2016.

GUERRA, R. M. A.; SEVERIANO FILHO, C.; TONDOLO, V. A. G. Sobre a lógica das relações entre TQM e inovação: insights e proposições teóricas. **Revista Eletrônica de Estratégia & Negócios**, v.8, n.3, set./dez. Florianópolis, 2015.

LAM, J. S. L.; NG, A. K. Y.; FU, X. **Stakeholder management for establishing sustainable regional port governance**. *Research in Transportation Business and Management*, v. 8, p. 30–38, 2013.

LEE, P. T.; LAM, J. S. L. **Developing the Fifth Generation Ports Model in Dynamic Shipping and Port Development in the Globalized Economy**. Editors Lee, P. T.; Culliname, K. UK: Palgrave Macmillan, p. 186-210, 2016.

LI, Y.; DONG, Q.; SUN, S. Dry Port Development in China: Current Status and Future Strategic Directions. **Journal of Coastal Research**, v. 73, p. 641–646, 2015.

LUDKE, M. **Pesquisa em educação: abordagens qualitativas**. São Paulo: EPU, 1986.

MCLAUGHLIN, H.; FEARON, C. Understanding the development of port and regional relationships: a new cooperation/competition matrix. **Maritime Policy & Management**, v. 40, n. 3, p. 278–294, 2013.

MENDES, J. M. A.; CUTRIM, S. S.; ROBLES, L. T. Análise Estratégica no Setor Portuário: aplicação da matriz SWOT no Porto do Itaqui. Anais... **XVI SEMEAD Seminários em Administração FEA/USP**. São Paulo: 2013.

MOURA, J. P. **Operação portuária: operação de carregador de navio**. Apostila elaborada para o curso de Especialização em Engenharia Portuária, UFMA -VALE. São Luís: 2011.

PAIXÃO, A. C.; MARLOW, P. B. Fourth generation ports--a question of agility? **International Journal Of Physical Distribution & Logistics Management**, v. 33, n. 4, p. 355-376. Bradford, 2003.

PANDE, S.; NEUAM, P.; CAVANAGH, R. **Estratégia Seis Sigma**. Qualitymark, RJ, 1998 apud LIMA, E. P.; GARBUIO, P. A.; COSTA, S. E. G. Proposta de Modelo Teórico-conceitual utilizando a Lean Seis Sigma na Gestão da Produção. Anais... **XXIX Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP**, Salvador: 2009.

PALLIS, A. A. et al. Port Economics, Policy and Management: Content Classification and Survey. **Transport Reviews**, v. 31, n. 4, p. 445–471, 2011. Disponível em: <www.vliz.be/imisdocs/publications/248322.pdf>. Acesso em: 10 abr. 2016.

PEIXOTO, G. S. S. **Estrutura portuária**. Apostila do Curso de Especialização em Engenharia Portuária, UFMA-VALE. São Luís: 2011.

PEREIRA, F. G. G.; ROBLES, L. T.; CUTRIM, S. S. Análise da Utilização da Ferramenta Overall Equipment Effectiveness (OEE) na Produtividade de Máquinas de Pátio: Estudo de Caso no Terminal Portuário Ponta da Madeira (TPPM). Anais... **XVI Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais SIMPOI**, São Paulo: 2013.

ROBLES, L. T.; CUTRIM, S. S.; MARCOS, N. S. Fatores Intervenientes na Operação e Logística Portuária: Estudo de Caso do Processo de Embarque e Descarga do Terminal Portuário Ponta da Madeira -TPPM. Anais... **IX Congresso Nacional de Excelência em Gestão - CNEG**, Niterói: 2013a.

ROBLES, L. T.; CUTRIM, S. S.; RIBEIRO, A. R. C.; MENEZES, B. E. Aplicação de Técnicas de Medição da Produtividade da Manutenção em Portos: O Caso do Porto de Tubarão (ES). Anais... **IX Congresso Nacional de Excelência em Gestão - CNEG**, 2013b, Niterói: 2013b.

ROBLES, L. T.; MERIGUETI, B. A.; CUTRIM, S. S. Eficiência Global da Operação Portuária: Estudo de Caso do Pier I do Porto de Tubarão em Vitória - ES. **Revista Organizações em Contexto (Online)**, v.8, p.195 - 221, 2012.

ROBLES, L. T.; NOBRE, M. **Logística Internacional**. Curitiba: Intersaberes, 2015.

ROBLES, L. T.; PARENTE, F. R. F.; CUTRIM, S. S. Gestão de Recursos Hídricos em Terminais Portuários. Anais... **XV Encontro Internacional sobre Gestão Empresarial e Meio Ambiente**. São Paulo: XV Engema, 2013c.

ROBLES, L. T.; RIBEIRO, A. R. C.; CUTRIM, S. S. Maintenance productivity management in ports applying measurement techniques. **S & G. Sistemas & Gestão**, v. 10, p. 633-643, 2016.

SANTANA, M. M. A.; CUTRIM, S. S.; ROBLES, L. T. Gestão de Operações Portuárias: Conflitos, sobreposições e disfunções. Anais... **XVIII Simpósio de Administração da Produção, Logística e Operações Internacionais**, São Paulo, 2015.

SANTOS, A. B.; MARTINS, M. F. Modelo de referência para Estruturar o Seis Sigmas nas Organizações. **Revista Gestão da Produção**, v. 15, n. 1, p. 43-53, jan./abr. São Carlos, 2008.

SILVA, R. T.; CUTRIM, S. S.; ROBLES, L. T. Análise do Planejamento de Manutenção: Estudo de Caso do Terminal Marítimo da Ponta da Madeira. Anais... **XXXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção - ENEGEP**, Salvador: 2013.

UNCTAD. **Port Marketing and the Challenge of the Third Generation Port**. (1990). Disponível em: <http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/tdc4ac7_d14_en.pdf>. Acesso em: 15 ago. 2016.

UNCTAD. **Review of Maritime Transport**, 2015. Disponível em

<http://unctad.org/en/PublicationsLibrary/rmt2015_en.pdf>. Acesso em Agosto de 2016.

UNES, L. C. C.; PINHEIRO FILHO, W. C.; CUTRIM, S. S.; ROBLES, L. T.; BOTTER, R. C. Eficiência Portuária: Estudo de caso no Terminal Marítimo Ponta da Madeira. Anais...II CIDESPORT - **Congresso Internacional de Desempenho Portuário**. Florianópolis: 2015.

VALE. Book Portuário. **Principais processos necessários para a operação portuária**. [S. l.]: Gerência de Gestão Portuária, 2008a.

VALE. **Regulamentos VPS. Dimensão Operacional**. VALER – Educação VALE. 2011.

VALE. **Nossa História**. Quem somos. Disponível em: <www.vale.com.br>. Acesso em: 01 nov. 2016.

VALE. **Boletim trimestral 2015**. Disponível em:

<<http://www.antaq.gov.br/Portal/pdf/BoletimPortuario/BoletimPortuarioPrimeiroTrimestre2015.pdf>>. Acesso em: 18 ago. 2015, 2015b.

VALE. **Sala de imprensa**. Logística. Disponível em:

<http://saladeimprensa.vale.com/Paginas/Releases.aspx?r=Vale_inaugura_Terminal_Ferrovuario_de_Ponta_da_Madeira_em_Sao_Luis&s=Logistica&rID=1785&sID=7>. Acesso em: 10 ago. 2016.

YIN, R. K. **Estudo de Caso: planejamento e métodos**. Porto Alegre: Bookman, 2001.

ZHANG, S.; XIA, X. **Modeling and energy efficiency optimization of belt conveyors**. Applied Energy, v. 88, p. 3061-3071, 2011.