

# Planejamento de um sistema integrado pátio-porto na cadeia do minério de ferro utilizando simulação

1<sup>st</sup> Marisa Matedi Alves  
Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Vitória, Brasil  
[marisamatedi@gmail.com](mailto:marisamatedi@gmail.com)

4<sup>th</sup> Helder Roberto de Oliveira Rocha  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Vitória, Brasil  
[helder.rocha@ufes.br](mailto:helder.rocha@ufes.br)

2<sup>nd</sup> Paulo Elias Gualandi Filho  
Departamento de Engenharia de  
Produção  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Vitória, Brasil  
[pegualandi@gmail.com](mailto:pegualandi@gmail.com)

5<sup>th</sup> Marta Monteiro da Costa Cruz  
Departamento de Engenharia de  
Produção  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Vitória, Brasil  
[marta.cruz@ufes.br](mailto:marta.cruz@ufes.br)

3<sup>rd</sup> José Leandro Félix Salles  
Departamento de Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Vitória, Brasil  
[jleandro@ele.ufes.br](mailto:jleandro@ele.ufes.br)

6<sup>th</sup> Heitor Guzzo de Faria  
Egresso Programa de Pós-Graduação  
em Engenharia Elétrica  
Universidade Federal do Espírito Santo  
Vitória, Brasil  
[hgfaria90@gmail.com](mailto:hgfaria90@gmail.com)

**Resumo** — A indústria de mineração brasileira tem grande importância para a economia do país, sendo responsável por grande parte das exportações e pela geração de empregos. Com as mudanças ocorridas no cenário econômico mundial e crises que afetaram o Brasil, cresce necessidade de utilização de tecnologias para guiar o planejamento e direcionar os investimentos em melhorias, de modo que as empresas possam aumentar a produtividade e eficiência e se tornarem mais competitivas. Por esse motivo, este trabalho propõe o desenvolvimento de um modelo de simulação de eventos discretos, simplificado, para análise de melhorias na gestão do sistema pátio-porto, com o objetivo de auxiliar tomadas de decisão em nível tático e operacional. Utilizou-se o software Arena para desenvolvimento do modelo e análise de giro de estoque mensal, quantidade de produtos embarcados e tempo em fila do navio para atracar no porto.

**Palavras chave** — Simulação, Sistema pátio-porto, Cadeia de minério de ferro, Logística.

## I. INTRODUÇÃO

A indústria do minério tem um importante papel na economia brasileira, tanto para o abastecimento do mercado interno, quanto o mercado externo (exportações), sendo responsável por 1,4% do PIB, considerando que toda a atividade industrial brasileira representa uma porção de 23,8% do PIB. Além disso, a mineração corresponde a 13% de todas as exportações do país e também tem o papel de geração de empregos diretamente e indiretamente. Dentre os produtos minerais exportados no ano de 2017, por este seguimento, o ferro é o principal, representando 62% dos minérios exportados [1].

Nos últimos anos, a economia mundial tem passado por várias mudanças e crises, e o Brasil não deixou de sofrer esses efeitos, seja por fatores externos ou internos. Segundo [2], a China é o principal importador de minério de ferro brasileiro, com cerca de 61% das exportações deste mineral. Segundo [3], a China teve redução no PIB a partir de 2010, desacelerando não só a economia do próprio país, mas também a economia mundial e afetando diretamente as exportações de minério brasileiras. Nesse contexto de instabilidade, a indústria do minério tem sido impactada pelos efeitos das mudanças no mercado mundial nos últimos anos, como pode ser visto no gráfico da Fig. 1, que de acordo com [4] mostra a queda no preço do minério de ferro, iniciada em 2014, alcançando valores muito baixos em 2016,

e oscilando em um patamar mais baixo nos últimos anos, quando comparado aos anos anteriores. Nota-se que o preço que estava em torno de 130 US\$/dmt, tem oscilado em torno de 70 US\$/dmt.



Fig. 1. Histórico de preço do minério de ferro (62% Fe). Fonte: [5]

Também deve ser ressaltado o efeito na Produção Mineral Brasileira (PMB) que sofre um efeito similar ao preço do minério de ferro, como pode ser visto na Fig. 2. Segundo [1], a produção, em bilhões de dólares americanos, caiu em 2015 e 2016, se recuperando em 2017 e 2018 (estimado), porém, assim como na Fig. 1, mantém um patamar inferior ao apresentado em anos anteriores.

Segundo [6], o Brasil perdeu a liderança do mercado mundial de exportação de minério de ferro para a Austrália em 2009. Essa situação se mantém até hoje, apesar do aumento nos investimentos nos últimos anos [7]. Nesse contexto de disputa pela liderança no mercado mundial de exportação de minério e a redução de preço e da PMB, destaca-se a necessidade de implementação de melhorias na estrutura existente, levando em consideração as possíveis limitações, e também de um melhor planejamento nos níveis estratégico, tático e operacional, de modo que a empresa consiga aumentar a produtividade, lucros e se tornar mais competitiva.

Através dos dados apresentados e do cenário em que se encontra a indústria de mineração brasileira, a busca por ferramentas que auxiliem no planejamento e implementação de melhorias é de grande relevância. Uma dessas ferramentas é a simulação computacional, amplamente utilizada para este propósito. Contudo, esta ferramenta deve ser aplicada de maneira correta, seguindo uma metodologia para evitar erros

e para que esta possibilite o desenvolvimento de um modelo próximo ao real, [8] e [9]. Através da simulação, pode-se construir uma representação do sistema real, em um ambiente virtual, onde a situação atual do sistema pode ser examinada de maneira plausível, a fim de identificar: falhas, gargalos e limitações. Além disso, também podem ser feitas projeções, análises de cenários com o objetivo de verificar a viabilidade e os possíveis ganhos, em caso de implementação de melhorias, de maneira segura e prática. A simulação também pode ser utilizada em conjunto com técnicas de otimização para construir soluções e melhorias baseadas nos cenários atuais das empresas.

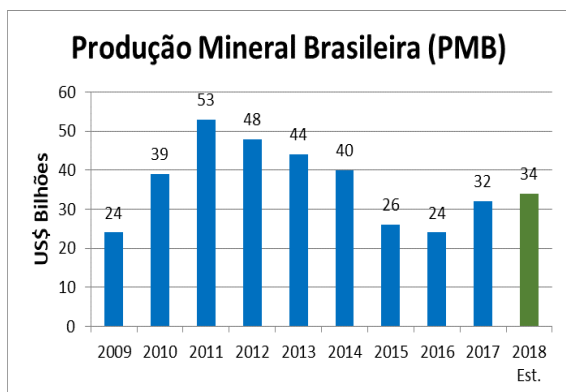


Fig. 2. Produção Mineral Brasileira. Fonte: [1]

Uma revisão bibliográfica foi feita por [10], abordando diversas pesquisas, entre os anos de 1998 e 2008, que utilizaram simulação, otimização e outros algoritmos para resolver problemas relacionados à logística e transporte de diferentes produtos. Cada artigo utilizava diferentes técnicas com foco nas diferentes áreas da cadeia de transporte de *commodities*, sendo que o autor em questão desenvolveu sua pesquisa com o objetivo de construir uma ferramenta de simulação que auxiliasse no dimensionamento de um sistema pátio-porto da indústria de minério de ferro, similar ao presente trabalho.

Trabalhos mais recentes também utilizaram a simulação como ferramenta para analisar a cadeia de minério de ferro, como por exemplo, [6], que analisou cenários na distribuição de lotes de minério na rota ferrovia-porto, com o objetivo de auxiliar as equipes no planejamento tático da ferrovia. Em [11], o objeto de estudo foi a área portuária da cadeia do minério. A autora utilizou a simulação de eventos discretos para analisar a capacidade dos equipamentos instalados no pátio, a alocação de materiais nos pátios e outros elementos relacionados ao porto para verificar a possibilidade de aumentar a capacidade de embarque de minério no terminal portuário.

Muitos dos autores citados até o momento utilizaram a simulação a eventos discretos como ferramenta para o planejamento da cadeia logística do minério de ferro, como por exemplo, o software Arena cujas aplicações são descritas em [12] e [13]. O software Arena é uma ferramenta para construção de modelos e simulação que utiliza um ambiente gráfico e fluxogramas para construção dos sistemas.

Além de todos os fatores e dados citados até o momento em relação ao mercado brasileiro e mundial de mineração, sabe-se que a China é o principal importador de minério brasileiro, sendo responsável por mais da metade das

importações. Através de visitas técnicas em uma empresa de mineração, verificou-se que o tempo total desde a produção até o desembarque do produto nos portos da China é de aproximadamente 45 dias. Nesse cenário de intensa competição, é de grande importância a verificação de gargalos e de possíveis melhorias e também a redução desse tempo.

Diante dessa situação, no presente trabalho, o objetivo é desenvolver uma simulação no software Arena para auxiliar no planejamento tático (médio prazo) e operacional (curto prazo) de um sistema integrado pátio-porto da cadeia de minério de ferro da principal empresa de mineração brasileira, através da análise de cenários, verificação de possíveis melhorias e aumento do giro de estoque.

## II. REVISÃO DE LITERATURA

### A. Logística e planejamento

O conceito de logística evoluiu historicamente, ao mesmo passo, que a evolução da gestão industrial. Segundo [14], o desenvolvimento da logística passou por etapas, assim sendo, em 1960 o enfoque era na integração da logística interna com ênfase ao custo e a atividade sistêmica. A partir de 1980, o foco é no cliente, e a ênfase é na produtividade e nos custos de estoque.

Ainda, conforme [14] a última etapa, que corresponde a atualidade, é a “logística como elemento diferenciador”, pois é vista como forma de obter vantagem competitiva. Nota-se, também, o conceito de gerenciamento da cadeia de suprimentos (*supply chain management*). E, é nesse contexto de mudanças, que na década de 2000, o *Council of Logistical Management* - CLM, muda o nome da organização para o *Council of Supply Chain Management Professionals* – CSCMP, mais precisamente, segundo [15], a partir de 1º de janeiro de 2005. A definição de logística, conforme o novo conselho passa a ser como a parte da gestão da cadeia de suprimentos que planeja, implementa e controla o fluxo eficiente e efetivo para atender aos clientes de maneira satisfatória [16].

De acordo com [17], “hoje em dia a logística é muitas vezes uma parte importante do programa estratégico de uma empresa e uma fonte potencial de vantagem competitiva.” Acrescenta-se ainda, que a logística é uma imensa massa de produtos de uma empresa, movendo-se por meio de caminhões, trens, aviões e navios. Com isso, a competição dos dias atuais, citada na Introdução, é baseada no tempo, o que coloca na logística o seu papel de importância frente a redução do tempo de manufatura e de apressar a entrega dos produtos até os clientes. A velocidade é essencial, pois a qualidade dos produtos já é atingida pelos grandes concorrentes, mas o tempo transformou-se em vantagem competitiva crucial para atingir a liderança do mercado [17].

No caso do transporte de cargas, em particular, [18] dizem que é uma das atividades de maior importância da atualidade, não apenas pela sua parcela referente ao produto nacional bruto de uma nação, mas também pelo aumento da influência que o transporte e a distribuição de mercadorias tem no desempenho de praticamente todos os outros ramos econômicos. A indústria do transporte de cargas, assim como todos os outros setores da economia devem atingir altos níveis de desempenho. Diminuir custos, aumentar os lucros, ao mesmo tempo em que compete em um mercado cada vez

mais aberto e competitivo. Sendo assim, um aumento na ênfase da qualidade, confiabilidade, tempo reduzido do serviço de transporte oferecido, as exigências do cliente, além do alto investimento requerido e planejamento de longo prazo para a implantação mostra o quanto é complexo o sistema, e o quanto se exige em termos de níveis de decisão. E, diante dessa realidade, faz-se necessário o uso de ferramentas mais precisas e eficientes e ou modelos mais realistas, capazes de auxiliarem no planejamento e nos processos de tomada de decisão.

De acordo com [19] o planejamento é uma atividade gerencial que pode facilitar a tomada de decisão e melhorar o desempenho do sistema. Ainda segundo [17], [18] e [19] existem três níveis de planejamento, que dependem do nível de decisão que se deseja tomar:

O planejamento estratégico visa tomada de decisão para os objetivos e estratégias de longo prazo e assim envolve as partes principais da organização, isto é, os altos níveis de gestão. O plano estratégico deve ser desenvolvido tendo como visão o futuro da organização, ou seja, o que se referem à sobrevivência a longo prazo, ao valor e ao crescimento e a formulação da operação de um sistema de transporte. As ações, ou exemplos de estratégias que a organização pode implementar devem ser direcionadas em áreas que satisfaçam as necessidades dos consumidores, como: localização de terminais de carga, centros de distribuição, aquisição de equipamentos diversos, como: vagões e guindastes. Portanto, deve-se ter cautela neste planejamento, pois altos investimentos e com prazos maiores podem impactar negativamente nas mudanças estruturais, se não forem vislumbrados com antecedência à sua preparação.

O planejamento tático e operacional possuem objetivos mais específicos e períodos de tempo mais curtos. O planejamento tático está relacionado às decisões de médio prazo de uma empresa, sendo responsável por traduzir os objetivos e planos estratégicos, aplicando-os em áreas de atuação mais específicas e funcionais. Além disso, propõe a utilização racional e eficiente dos recursos envolvidos. Alguns exemplos de planejamento tático relacionados à área de transporte são: rota de transporte, disponibilidade de ativos e controle de tráfego. O planejamento operacional é ainda mais específico e trabalha com prazos curtos, visando identificar os processos requeridos nos níveis baixos da organização, por exemplo, decisões relacionadas às tarefas rotineiras da produção. Neste tipo de planejamento um dos fatores mais importantes é o tempo, pois as decisões tem que ser tomadas com maior urgência. Alguns exemplos relacionados à área de transporte são as especificidades dos equipamentos através das manutenções programadas e até mesmo escalas de trabalho.

### B. Simulação usando Arena

A simulação computacional possui várias definições que podem ser encontradas em livros como [8], [9], [12] e [13]. De maneira geral, trata-se da construção de uma representação virtual de um processo real, utilizando equações, algoritmos ou construções gráficas (blocos e fluxogramas). Essa representação tem o objetivo de reproduzir o comportamento do processo ou sistema de maneira mais próxima possível. A essa representação geralmente é dado o nome de modelo computacional.

A simulação possui várias funções, entre elas: descrever o comportamento de um sistema, o estudo e a análise de um processo, a construção de teorias e hipóteses, a prevenção ou planejamento de situações futuras e os efeitos de modificações inseridas no sistema. Dessa maneira, a simulação pode ser utilizada para identificar e resolver problemas, ou até para testar e implementar melhorias em processos reais de maneira segura [20]. As áreas de aplicação da simulação são diversas e uma das mais relevantes é a de logística, como no caso do presente trabalho.

Os modelos construídos para simulação podem ser divididos em duas categorias quanto às suas características estatísticas: estocástico e determinístico. Um modelo determinístico é aquele que não possui variáveis aleatórias, utiliza um conjunto de dados conhecidos e definidos como entrada. O modelo estocástico é o que possui variáveis aleatórias como entrada, gerando saídas também aleatórias. Por esse motivo, as saídas de um modelo estocástico são estimativas das características do sistema original, real [20].

O software Arena é uma ferramenta de simulação de eventos discretos, amplamente utilizado, que se baseia na modelagem por fluxogramas. Ao realizar as simulações é possível utilizar indicadores para verificar o comportamento de variáveis e, ao final da simulação, são emitidos relatórios contendo os dados e informações das simulações. O software é utilizado tanto por empresas quanto para área acadêmica (ensino e pesquisa).

## III. CASO ESTUDADO

O sistema analisado, no presente trabalho, é parte de uma cadeia logística de minério de ferro. Foi considerada uma versão simplificada da cadeia, com o objetivo de planejar melhorias relacionadas à estocagem dos produtos no pátio e embarque dos mesmos nos navios. Essas situações podem produzir gargalos de escoamento, atrasos e perda de produtividade. Essa versão simplificada do sistema foi baseada em trabalhos de [6], [10] e [11] que desenvolveram simulações da cadeia (ou parte dela) de duas empresas brasileiras do ramo de extração de minério. Dados e informações do sistema foram obtidos a partir das referências, memorial descritivo disponível no site da empresa, visitas técnicas e reuniões realizadas com colaboradores da empresa do ramo.

A cadeia completa inicia-se na extração de minério de ferro (MF) nas minas, processamento, transporte através de ferrovias, descarregamento dos vagões nos viradores, transporte através de correias transportadoras até o pátio de estocagem, ou transporte para usina, onde ocorre a pelotização (formação de pelotas, com diâmetros específicos de cada indústria) com posterior estocagem nos pátios e, por último, o embarque dos produtos nos navios, onde serão enviados para os clientes. O minério de ferro extraído das minas passa por processamento e em seguida é transportado pela ferrovia, como exemplo de dois tipos de produtos: finos (*sinter feed*) e super finos (*pellet feed*). Para a análise deste estudo, chamaremos ambos os tipos apenas de minério de ferro. Esse produto chega pelas ferrovias passando por viradores de vagões, que são equipamentos responsáveis pelo descarregamento do minério em correias transportadoras [21] e [22]. No modelo em questão serão considerados 5 viradores de vagões.

A partir dos viradores, o MF pode ter dois destinos: aproximadamente 70% é encaminhado para os pátios de estocagem, onde são construídas pilhas de minérios que aguardam para serem carregadas nos navios e aproximadamente 30% deve ser encaminhado para as 8 usinas de pelletização, onde o MF serve de principal matéria prima para a fabricação de pelotas, segundo [23]. Portanto, a maior parte do produto embarcado no porto é de MF, levando em consideração a demanda individual de cada cliente. A Fig. 3 mostra um diagrama do modelo simplificado, baseado em informações de visitas técnicas em empresa de mineração e informações de [24].

O estoque é composto pelos pátios onde os produtos ficam armazenados aguardando o embarque nos navios de acordo com a demanda de cada navio. A área do estoque possui um total de 11 pátios onde são estocadas as pilhas de minério de ferro e de pelotas (4 pátios, que em geral, possuem menor capacidade e constituem a área velha, e 7 pátios, que em geral, possuem maior capacidade, localizados em uma região chamada de área nova). Os pátios da área velha são nomeados de A até D e os pátios da área nova são nomeados de E até J (e um pátio adicional nomeado como P). O pátio A possui capacidade de 270 mil toneladas, o pátio B possui capacidade de 250 mil toneladas, o pátio C possui capacidade de 240 mil toneladas, o pátio D possui capacidade de 200 mil toneladas, o pátio E possui capacidade de 227 mil toneladas, os pátios F a I possuem capacidade de 353 mil toneladas e os pátios J e P possuem capacidade de 154 mil toneladas. As pilhas são formadas nos pátios através de equipamentos que se movimentam entre os pátios e nem sempre estão disponíveis para todos os pátios, pois são compartilhados. A Tabela I mostra a produtividade de cada equipamento.

TABELA I. LOCALIZAÇÃO E A PRODUTIVIDADE DOS EQUIPAMENTOS

Equipamento	Pátios	Área	Produt.(ton./h)
Empilhad./Recup.(ER01)	E/F	Nova	8000
Empilhad./Recup.(ER02)	J/E	Nova	8000
Empilhad./Recup.(ER03)	I/P	Nova	8000
Recup.(RC01)	A/B	Velha	6000
Recup.(RC02A)	C/D	Velha	6000
Recup.(RC03)	B/C	Velha	8000
Recup.(RC04)	F/G	Nova	8000
Recup.(RC05)	H/I	Nova	8000
Empilhad. Escrava (EE01)	F	Nova	16000
Empilhad. Escrava (EE02)	I	Nova	16000
Empilhad. (EP01)	A/B	Velha	6000
Empilhad. (EP02)	C/D	Velha	6000
Empilhad. (EP03)	G/H	Nova	16000
Empilhad. (EP04)	A	Velha	6000

<sup>a</sup>. Fonte: [25]

O procedimento de formação das pilhas é feito por um equipamento chamado empilhadeira e o procedimento de recuperação (retirada) das pilhas para embarque é feito por um equipamento chamado recuperadora. Existe um

equipamento que executa as duas funções, chamado de empilhadeira-recuperadora. As empilhadeiras escravas dependem da empilhadeira mestre (EP03) para operar, ou seja, as três empilhadeiras funcionam em conjunto e atendem aos pátios F, G, H e I, representando grande parte da movimentação de produtos na área nova. Porém, neste modelo simplificado, optou-se por inserir as empilhadeiras escravas como empilhadeiras de funcionamento independente por falta de detalhes do sistema real. As Figuras 4, 5 e 6 mostram *layouts* contendo a posição dos equipamentos nos pátios e também da área portuária.

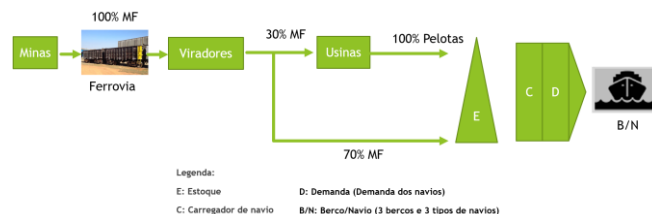


Fig. 3. Digrama do modelo simplificado

A área portuária possui 3 berços distribuídos em 2 píeres, onde os navios atracam para carregamento dos produtos. Um píer comporta navios maiores (apenas 1 por vez), possui 2 carregadores e o outro píer possui 2 carregadores e comporta 2 navios menores ao mesmo tempo. Um total de três tipos de navios podem atracar no porto, o maior tipo que utiliza apenas o Píer 2 é do tipo Valemax (390mil toneladas), já os navios que utilizam o Píer 1, Norte (esquerda) e Sul (direita), são, respectivamente, os do tipo Capesize (180mil toneladas) e Panamax (90mil toneladas).

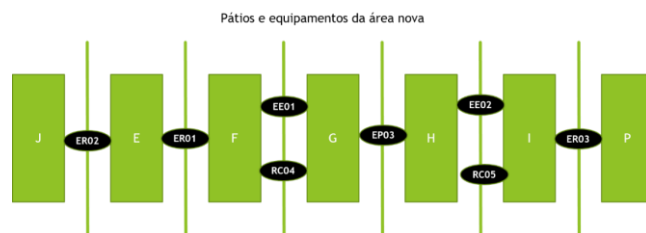


Fig. 4. Layout dos pátios e equipamentos na área nova

As variáveis independentes (entradas) e dependentes (saídas) utilizadas no modelo simulado foram baseadas em [6] e [10], e dados fornecidos pela empresa em visitas técnicas, aplicados ao problema do pátio-porto.

- Variáveis independentes e dados (entrada): quantidade de navios por dia, percentual de demanda para descarga (minério x pelota), taxa de produtividade de cada equipamento e das usinas (tonelada/h), percentual de navios (Panamax, Capesize e Valemax) e capacidade dos pátios.
- Variáveis dependentes: número de navios que desatracam, por tipo (e tipos de produtos que carregam), quantidade de produtos embarcados (minério e pelota), fila média de espera para atracar, percentual de utilização dos equipamentos e usinas, tempo médio de permanência dos navios no berço e giro de estoque (total de toneladas embarcadas/estoque estático). Considerou-se o estoque estático como sendo o estoque residual que permaneceu nos pátios após o fim da simulação.

Para realizar as simulações, foi utilizado o software Arena versão 15.1, instalado em um computador com sistema operacional Windows 10 64bits, com processador core i7 modelo 7700K com CPU de 4,20GHz, 16GB de memória RAM e HD de 1 TB de armazenamento.

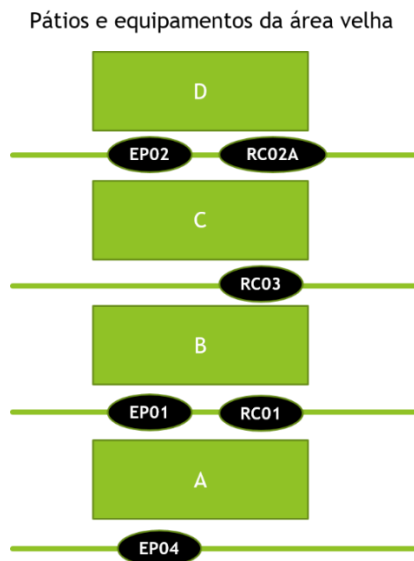


Fig. 5. Layout dos pátios e equipamentos na área velha

Diante dos cenários descritos, foram realizadas simulações com as seguintes características: 20 replicações, tempo de aquecimento de 1 dia, duração de uma replicação de 31 dias (descontando o tempo de aquecimento, chega-se a 30 dias), cada dia era composto de 24h de operação.

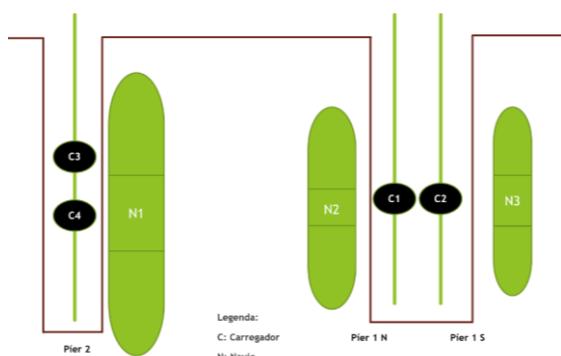


Fig. 6. Layout da área portuária

#### IV. CENÁRIOS E RESULTADOS

Nos projetos do mercado transoceânico de minério de ferro, os investimentos relacionados as melhorias no pátio e na área portuária representam 5% do total de capital empregado, o que ressalta a importância não só de realização desses investimentos, mas também de um bom planejamento do impacto e dos custos dos mesmos [10] e [26]. Uma importante ferramenta para alcançar esse objetivo e dar suporte na tomada de decisões é a simulação, através da construção do modelo e de cenários que visam investigar e analisar a situação atual da empresa com relação a capacidade de estoque e de escoamento, equipamentos e estrutura (*layout*), bem como verificar hipóteses, cenários em que se apresentam problemas e também possíveis melhorias.

Os cenários desenvolvidos para este trabalho foram obtidos através de mudanças relacionadas ao modo de operação do sistema integrado pátio-porto. O cenário 1 é o cenário de referência, ou seja, os demais cenários são modificações realizadas no cenário 1 (padrão), e são os que seguem:

- Cenário 1 (Berço): Considere apenas navios do tipo Panamax atracando no berço sul do Píer 1 (1S) e somente navios do tipo Capesize no berço norte do Píer 1 (1N), com o objetivo de avaliar o ganho de embarcar apenas navios deste tipo em cada berço 1S e 1N, uma vez que navios Panamax necessitam de berços menores. No píer 2 continuará atracando somente navios do tipo Valemax.
- Cenário 2 (Berço): Considere apenas navios Capesize atracando no Píer 1 (Norte e Sul), com o objetivo de avaliar o ganho de embarcar apenas navios deste tipo, uma vez que possuem maiores capacidades de embarque comparados aos navios Panamax. No Píer 2 continuarão atracando somente navios do tipo Valemax.
- Cenário 3 (Empilhadeira parada): A empilhadeira de maior importância EP03 está em falha, devido à realização de manutenção corretiva, ou em parada devido a manutenção preventiva (programada). Ela é a de maior capacidade. Dessa forma, a EP03 em situação de “parada” ou “falha” deixará de empilhar nos pátios G e H (não recebem material), que não possuem outras empilhadeiras. Os materiais deverão seguir para o próximo pátio, respeitando a capacidade e a disponibilidade das empilhadeiras, conforme a sequência de empilhamento dos pátios.
- Cenário 4 (Recuperadora parada): A recuperadora RC04 está em falha, por manutenção corretiva, ou em parada, por manutenção preventiva. Ela recupera os produtos dos pátios F e G. Dessa forma, a RC04 em situação de “parada” ou “falha” deixará de recuperar nos pátios F e G. O pátio F possui outro equipamento, a ER01, que empilha/recupera, mas o pátio G depende da RC04 para retirada do produto, permanecendo sem ter produtos recuperados.

As Tabelas III e IV resumem os resultados obtidos nos quatro cenários. Algumas conclusões podem ser obtidas a partir dos resultados.

Comparando-se o cenário 1 com o cenário 2, quando deixou de ser utilizado o navio do tipo Panamax, a quantidade de navios Capesize que desatracou, quase dobrou e, com esta alteração, a quantidade de minério e de pelotas embarcadas aumentou também, porém, o tempo de espera (fila) dos berços 1S e 2 cresceu muito, mostrando que foi possível aumentar um pouco a quantidade de minério e de pelota embarcados, devido à maior capacidade dos navios Capesize, com o prejuízo para a gestão de pátio (queda no giro de estoque mensal).

A Tabela II mostra as variáveis independentes e dados (entrada) utilizados nas simulações.

TABELA II. VARIÁVEIS INDEPENDENTES E DADOS (ENTRADA)

Variáveis independentes/dados (entrada)	Valores
Nº de navios / dia	1
(%) Demanda minério	70
(%) Demanda pelotas	30
Taxa produtividade equipamentos (ton./h)	Ver Tabela I
Taxa produtividade das usinas (ton./h)	670
Taxa produtividade dos viradores (ton./h)	8000
Taxa produtividade dos carregadores (ton./h) Píer 1 (ton./h)	13350
Taxa produtividade dos carregadores (ton./h) Píer 2 (ton./h)	16000
(%) chegada de navios Panamax	25
(%) chegada de navios Capesize	35
(%) chegada de navios Valemax	40
Produção de minério na mina (ton./h)	36000
Capacidade dos pátios (ton.)	Ver item 3

b. Fonte: Próprio autor e [22]

Os resultados estão apresentados nas Tabelas III e IV e, os valores apresentados são valores médios, baseados nas 20 replicações que foram realizadas.

TABELA III. RESULTADOS DAS VARIÁVEIS ANALISADAS (I)

Variáveis dependentes	Cenário 1	Cenário 2
Nº de navios Panamax	10,95	-
Nº de navios Capesize	12,5	23,25
Nº de navios Valemax	7,15	6
Qtd de minério embarc. (ton.)	4,29 Mi	4,7 Mi
Qtd de pelotas embarc. (ton.)	1,73 Mi	1,83 Mi
Fila média Píer 1S (h)	12,54	27,03
Fila média Píer 1N (h)	32,32	28,7
Fila média Píer 2 (h)	73,48	87,18
Giro de estoque (30 dias)	15,31	9,72

c. Fonte: Próprio autor.

No comparativo entre os cenários 1 e 3, quando ocorre a falha da empilhadeira EP03 e os pátios G e H ficam sem produtos, há uma queda significativa na quantidade de minério e de pelotas embarcados e no giro de estoque. Apesar da EP03 ter uma alta taxa de produtividade, ela não foi privilegiada na divisão de prioridade. Por esse motivo, mesmo quando a empilhadeira está operando, os pátios G e H tem uma baixa utilização, com isso, nota-se que com a empilhadeira parada (cenário 3), a quantidade de navios que desatracou no porto não foi muito afetada, em comparação com o cenário 1, com exceção do número de Valemax (um navio que necessita de muito material para ser carregado).

O cenário 4 apresenta uma situação em que a recuperadora RC04, que opera nos pátios F e G, está inoperante. Novamente, nota-se um grande prejuízo no giro de estoque, quando comparado ao cenário 1. Pode-se

observar, também, que foram obtidos resultados melhores que no cenário 3, pois a RC04 é o único equipamento que recupera material do pátio G, porém, existe outro equipamento que retira material do pátio F (ER01)

TABELA IV. RESULTADOS DAS VARIÁVEIS ANALISADAS (II)

Variáveis dependentes	Cenário 3	Cenário 4
Nº de navios Panamax	11,2	11,1
Nº de navios Capesize	12,05	11,6
Nº de navios Valemax	5,4	6,2
Qtd de minério embarc. (ton.)	3,74 Mi	3,93 Mi
Qtd de pelotas embarc. (ton.)	1,55 Mi	1,57 Mi
Fila média Píer 1S (h)	13,33	20,74
Fila média Píer 1N (h)	41,88	40,58
Fila média Píer 2 (h)	99,89	71,69
Giro de estoque (30 dias)	5,05	6,09

d. Fonte: Próprio autor.

## V. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A indústria de minério é de grande importância para a economia brasileira, e necessita de soluções que possam melhorar a eficiência do sistema integrado pátio-porto e aumentar a sua produtividade, para que se torne mais competitiva no cenário mundial. E, tem-se buscado a redução de custos para a melhoria da produtividade da cadeia de minério de ferro. Nesse sentido, as tecnologias e inovações podem ser aliadas nesse processo de implementação de melhorias, bem como podem fazer parte de um sistema integrado de gerenciamento e parte da indústria 4.0, que vem ganhando espaço nas empresas de mineração brasileiras.

Por esse motivo, a simulação pode trazer grandes benefícios para o planejamento tático e operacional, guiando as equipes nas decisões que devem ser tomadas no médio e curto prazo dentro da empresa.

Tendo como base os resultados obtidos a partir dos cenários propostos, é possível concluir que as simulações possibilitaram uma análise de como o sistema se comporta em situações de parada de equipamentos (empilhadeira e recuperadora) e qual o impacto que tiveram na quantidade de minério e de pelotas embarcados, no giro de estoque, na quantidade de navios que desatracaram carregados com produtos e também nos tempos de fila no berço. Também foi verificada uma situação hipotética interessante, na qual apenas navios do tipo Capesize, com capacidade de 180 mil toneladas, atracaram no Píer 1. Verificou-se que, neste cenário, houve um aumento na quantidade de minério embarcada, mas não houve aumento no giro de estoque.

O trabalho apresentado neste artigo é uma etapa de um projeto em desenvolvimento. As próximas etapas vão contemplar melhorias no modelo desenvolvido no Arena, para que fique mais detalhado e ainda mais próximo da realidade da empresa de mineração que serviu como base para o estudo, podendo incluir também regras de restrições. Além disso, podem ser feitas comparações entre a simulação desenvolvida no Arena e resultados obtidos através de heurísticas e meta-heurísticas, bem como a utilização de

algoritmos de otimização para identificar outros pontos em que se pode implementar melhorias.

#### AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio da Vale/Fapes edital n. 01/2015, termo de outorga 529/2016.

#### REFERÊNCIAS

- [1] IBRAM – Instituto Brasileiro de Mineração, “Relatório anual de atividades”, Disponível em: <[http://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2018/07/Diagramação\\_RelatórioAnual\\_versãoweb.pdf](http://portaldamineracao.com.br/ibram/wp-content/uploads/2018/07/Diagramação_RelatórioAnual_versãoweb.pdf)>. Acesso em 20 set. 2018.
- [2] O Petróleo. “As exportações brasileiras de minério de ferro para a China aumentaram 1,5% em 2017”. Disponível em: <<https://www.opetroleo.com.br/as-exportacoes-brasileiras-de-minerio-de-ferro-para-china-aumentaram-15-em-2017/>>. Acesso em 20 set. 2018.
- [3] INDEX MUNDI. “Dados históricos gráficos – Produto Interno Bruno”. Disponível em: <<https://www.indexmundi.com/g/g.aspx?v=66&c=ch&l=pt>>. Acesso em 20 set. 2018.
- [4] INDEX MUNDI. “Minério de ferro – Preço mensal”. Disponível em: <<https://www.indexmundi.com/pt/precos-de-mercado/?mercadoria=minerio-de-ferro&meses=60>>. Acesso em 20 set. 2018.
- [5] Vale, “Índices de minério de ferro”. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/iron-ore-pellets/Paginas/Iron-Ore-Indices.aspx>>. Acesso em 20 set. 2018.
- [6] R. M. Vieira and M.M.C. Cruz. “Uma análise da distribuição de lotes carregados de minério de ferro ferroviário-porto: uma abordagem por simulação a eventos discretos.” *XLVIII Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*: 1661-1672, 2016.
- [7] DCI – Diário Comércio Indústria & Serviços, “Investimento volta, mas Brasil perde liderança global”, Disponível em: <<https://www.dci.com.br/impreso/investimento-volta-mas-brasil-perde-lideranca-global-1.685788>>. Acesso em 20 set. 2018.
- [8] J. Banks, J.S. Carson II; B.L. Nelson, “Discrete-event system simulation”, 5. ed. Upper Saddle River, N.J.: Pearson Prentice Hall, 2009.
- [9] C. D. Pedgen, R. E. Shannon, R. P. Sadowski, “Introduction to simulation using SIMAN”, 2<sup>nd</sup> ed. New York: McGraw-Hill, 1995.
- [10] A. F. Juliá, “Desenvolvimento de um modelo de simulação para dimensionamento de um sistema integrado pátio-porto na cadeia do minério de ferro”, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.
- [11] Zampirolli, J.M., “Alternativas para aumento de capacidade de um Terminal Portuário de Minério de Ferro”, *Revista Eletrônica de Estratégia & Negócios*, 10, pp.80-102, 2017.
- [12] Kelton, D. W., Sadowski, R. P., Sturrock, D. T., “Simulation with Arena”, 3<sup>rd</sup> ed. McGraw-Hill, 2003.
- [13] D. S. Prado, “Usando o ARENA® em Simulação”. Belo Horizonte: INDG Tecnologia e Serviços, 5<sup>a</sup> ed., 2014.
- [14] G.L. Jamil; A.L. Soares; C.R.M. Pessoa, “Handbook of Research on Information Management for Effective Logistics and Supply Chains. Hershey”, PA, USA: IGI Global, 2016.
- [15] *Jornal do Comércio Online*, “Alteração de nome para o Conselho de Gerenciamento Logístico”, Disponível em: <[https://www.joc.com/economy-watch/name-change-council-logistics-management\\_20040714.html](https://www.joc.com/economy-watch/name-change-council-logistics-management_20040714.html)>. Acesso em 25 set. 2018.
- [16] Council of Supply Chain Management Professionals - CSCMP. *Educating and Connecting the World’s Supply Chain Professional*. 2018. Disponível em: <[https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms/CSCMP/Educate/SCM\\_Definitions\\_and\\_Glossary\\_of\\_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921](https://cscmp.org/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms/CSCMP/Educate/SCM_Definitions_and_Glossary_of_Terms.aspx?hkey=60879588-f65f-4ab5-8c4b-6878815ef921)>. Acesso em: 25 de set. 2018.
- [17] T.S. Bateman; S.A. Snell, “Administração: construindo vantagem competitiva”. 1. ed. São Paulo: Atlas, 1998.
- [18] T.G. Crainic, G. Laporte, “Planning models for freight transportation”, *European Journal of Operational Research.*, v. 97, p. 409-438, 1997.
- [19] M. Marinov; I. Sahin; S. Ricci; G. Vasic-Franklin, “Railway operations, time-tabling and control”. *Research in Transportation Economics*, v. 41, p. 59-75, 2013.
- [20] Paragon. “O que é simulação?”. Disponível em: <<http://www.paragon.com.br/academico/o-que-e-simulacao/>>. Acesso em 20 set. 2018.
- [21] E. F. Moraes. “Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina Cauê da CVRD”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2005.
- [22] Vale. “Carajás”, Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/business/mining/iron-ore-pellets/Documents/carajas/index.html>>. Acesso em 30 set. 2018.
- [23] R.M.T. Vieira, “Distribuição de lotes carregados de minério de ferro ferroviário-porto: uma abordagem por simulação a eventos discretos”. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2018.
- [24] M.C. Santoro, “Gestão de cadeia de suprimentos”. Apresentação na empresa Vale, Vale, Espírito Santo, 2017.
- [25] Vale, “Memorial Descritivo do Terminal de Tubarão”. Disponível em: <[http://www.vale.com/pt/business/logistics/ports-terminals/documents/pdf/memorial\\_descritivo\\_terminal\\_tubarao.pdf](http://www.vale.com/pt/business/logistics/ports-terminals/documents/pdf/memorial_descritivo_terminal_tubarao.pdf)>. Acesso em 20 set. 2018.
- [26] M. Geerdes et al., “Modern Blast Furnace Ironmaking”, Verlag Stahleisen GmbH, p17-32, 2004.