

SISTEMA DE GESTÃO DE ESTOQUE EM TEMPO REAL PARA PÁTIOS DE MINÉRIO*

Murilo R. Ferreira¹
Antônio César Freitas²

Resumo

Este artigo apresenta um sistema de gerenciamento de pátio de estocagem, com o objetivo de aumentar a eficiência do movimento de estoques utilizando dados de aquisição e rastreamento em tempo real para simulação e geração de planos ótimos para armazenamento e recuperação de materiais. Um dos maiores desafios para o gerenciamento de pátios de produtos estocados em pilhas de minério é planejar melhorempilhamento do produto e uso de seus equipamentos, a fim de tornar a operação o mais eficiente possível dentro dos requisitos contratuais. Um modelo de programação linear foi desenvolvido em conjunto com um sistema de rastreamento de qualidade do material armazenado e uma visualização tridimensional da qualidade do material das pilhas que permite aos usuários responsáveis pelo controle de qualidade fazer simulações com uma função objetivo para redução do desvio de qualidade e redução do movimento de máquinas. Os resultados apresentados mostram que é possível obter ganhos na redução do deslocamento da máquina e redução na variabilidade de qualidade do material recuperado. Outros ganhos também podem ser obtidos com o uso do sistema, como o inventário instantâneo do volume armazenado, o monitoramento on-line das operações em andamento e a automação do processo de empilhamento e recuperação.

Palavras-chave: Estocagem de minério, Qualidade em tempo real, Programação linear, Mapeamento de volume..

REAL-TIME STOCKYARD MANAGEMENT SYSTEM FOR ORE

Abstract

This paper presents a wide system for stockyard managing of ore, in order to increase inventory movement efficiency using acquisition and tracking data in real-time for simulation and generation of optimal plans for storage and recovery of material. One of the biggest challenges for the management of product courtyards stocked in ore stack is to plan the best distribution of the product and the best use of their equipment, in order to make the operation as efficient as possible within the specified contractual requirements. A linear programming model was developed in joint with a quality tracking system of the stored material and a three-dimensional visualization of the material quality of the stacks that allows users responsible for quality control, make simulations with an objective function for reduction of the quality deviation and reduction of the machinery movement. The results presented show that it is possible to obtain gains in reduction of machine displacement and reduction in the quality deviation of the recovered material. Other gains can also be obtained with use of the system, such as the inventory of the stored volume instantly, online monitoring of ongoing operations and automation of the stacking and recovery process.

Keywords: Stockyard management, Real-time quality control, Linear programming, Stacks volume mapping..

- ¹ *Engenheiro de Controle e Automação, Diretor de P&D, LynxProcess, Belo Horizonte, MG, Brasil*
- ² *Engenheiro Eletricista, Especialista em Gestão Empresarial, Diretor de Tecnologia, LynxProcess, Belo Horizonte, MG, Brasil*

1 INTRODUÇÃO

No processo de mineração, os produtos processados têm como destino os pátios de estocagem antes das operações de carga e descarga. Esses produtos são organizados em pátios de produtos ou apenas em pátios de estocagem, seguindo uma taxa que está diretamente relacionada à sua capacidade, volume de produção das plantas de processamento e demanda por minerais. Nota-se que esta operação se torna cada vez mais complexa à medida que o contexto produtivo se torna maior.

Constantemente, as empresas têm buscado otimizar seus processos de produção para aumentar sua competitividade, reduzir custos e padronizar as operações, aumentando a qualidade do produto final. Nesse contexto, o uso de sistemas que incorporam técnicas de pesquisa operacional e a aquisição de dados em tempo real são cada vez mais utilizados para atingir essas metas, obtendo monitoramento da produção e melhor gestão e tomada de decisões operacionais.

Este artigo aborda o problema de distribuição e recuperação de pilhas de minério de ferro nos pátios de estocagem e o uso de recursos disponíveis para o manuseio do material. A partir do uso de um sistema que coleta dados do processo em tempo real, que alimentam um modelo de programação linear, o sistema é capaz de gerar os melhores planos para as operações de empilhamento e recuperação, definidos na função objetivo para redução do desvio de qualidade e redução do movimento de máquinas.

Este sistema foi desenvolvido como um projeto piloto para uma empresa com 4 pátios, que serão denominados a partir de agora de "A", "B", "C" e "D".

O sistema abrange, além do modelo de programação linear, uma interface tridimensional e uma interface *web* para interação dos usuários. A interface 3D foi desenvolvida para ser utilizada como ferramenta de gerenciamento em tempo real, com monitoramento da posição das máquinas e informações gráficas da qualidade do material nas pilhas. A interface *web* é projetada para permitir que os usuários insiram dados manuais, editar parâmetros e o recurso principal, que é a execução de simulações para gerar os melhores planos de empilhamento e recuperação.

2 DESENVOLVIMENTO

O minério de ferro processado na Unidade de Beneficiamento é transportado por correias transportadoras em três rotas principais até os pátios A, B, C e D. O fluxo de material dessas três rotas é direcionado aos pátios por meio de calhas direcionais, que enviam o material às empilhadeiras EP-01, EP-03, EP-04, EP-05, EP-06 e o empilhador / recuperador ER-01, empilhando o material em áreas pré-definidas dos pátios de estocagem.

As pilhas armazenadas são recuperadas por máquinas recuperadoras de caçambas RP-01, RP-02, RP-03 e o empilhador / recuperador ER-01. O material recuperado pode ser direcionado através de calhas direcionais para três silos diferentes que são estações de carregamento de trem. A figura 1 apresenta um diagrama dos pátios com as máquinas de pátio e as rotas das correias transportadoras.

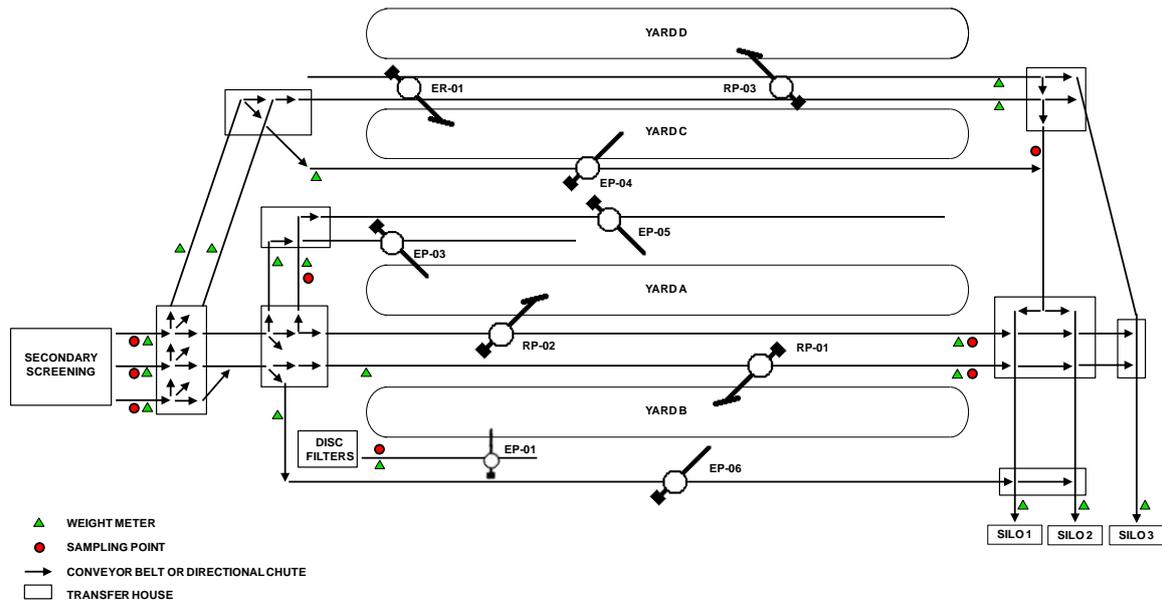


Figura 1 –Fluxo do Processo.

Os produtos resultantes do processamento de minério são categorizados em três tipos principais, de acordo com sua granulometria. Estes produtos são divididos em: granulado (tamanho de partícula maior) definido como NPCJ, *sinter feed* (tamanho médio de partícula) definido como SFCK e *pellet feed* (tamanho de partícula menor) definido como PFCJ. O granulado, de qualidade inferior, é para o mercado interno, não sendo transportado para o porto. O *sinter feed* é o principal produto e maior volume de produção e *opellet feed* é produzido em menor volume. Ambos são transportados para o porto. Além desses principais produtos que são estocados nos pátios, também temos o manganês que é transportado para o pátio D por caminhão de uma mina próxima.

Os pátios são marcados por marcos, fixados a cada dez metros ao longo do pátio. Cada pátio é dividido em áreas de acordo com o tipo de material e identificado em ordem numérica crescente, seguido da letra de identificação do pátio. Por exemplo, a área 6A é a sexta área do pátio A, conforme demonstrado na figura 2. Cada área

tem um marco de delimitação inicial e final.

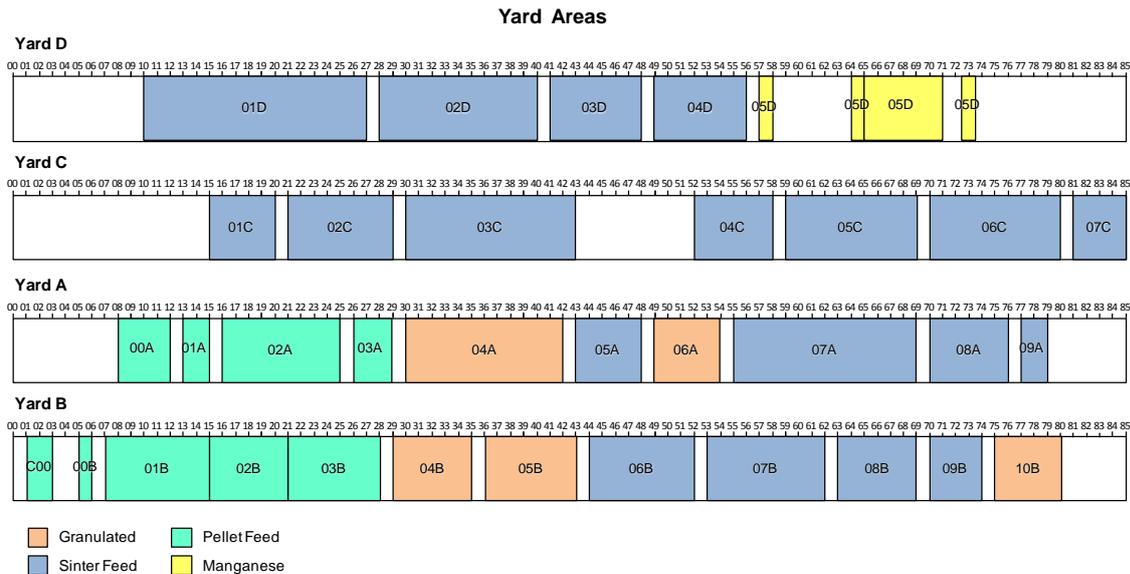


Figura 2- Distribuição dos tipos de materiais em áreas delimitadas por marcos ao longo dos pátios.

A equipe de controle de qualidade é responsável por garantir a qualidade do material armazenado e despachado. A qualidade do material empilhado e recuperado é monitorada via amostragem contínua nas correias transportadoras que alimentam os pátios de estocagem e nas correias transportadoras que alimentam os silos. As amostras são entregues ao laboratório, que emite relatórios a cada 4 horas com os resultados químicos e físicos do material. Estes resultados laboratoriais e as descrições verbais dos operadores locais das máquinas, ajudam a equipe de controle de qualidade na tomada de decisões relacionadas ao empilhamento e despacho, por exemplo, se necessário, uma realocação de uma máquina recuperadora de uma pilha pobre para uma pilha com melhor qualidade.

2.1 – Descrição do Sistema

O sistema desenvolvido inclui muitos detalhes e tecnologias que não são o foco principal deste documento. Mas é importante ter uma visão geral que permita entender o conceito do sistema sem necessariamente entender os detalhes técnicos intrínsecos. É importante notar que o sistema possui uma arquitetura cliente / servidor, que permite fornecer o uso e a interação de vários usuários em diferentes locais.

O sistema pode ser dividido em dois blocos principais:

- Módulo em tempo real: responsável pela aquisição contínua de status e dados da planta, pelo rastreamento de massa, pelo rastreamento de qualidade, pelo monitoramento da posição das máquinas e pelo processamento da interface 3D;
- Módulo de simulação: responsável pelo modelo de programação linear, para simulação de planos de empilhamento e recuperação, para a interface web inserir dados manuais e interação com os usuários e para edição dos parâmetros da

simulação.

Módulo em tempo real

O módulo em tempo real é responsável pela aquisição de dados do status da correia transportadora, medições dos medidores de peso, posição da calha, importação de dados dos resultados laboratoriais. Esses dados são gerados principalmente a partir de instrumentos ligados aos PLCs (Controladores Lógicos Programáveis) da usina e de entrada manual através da interface web. O processo mais importante no módulo em tempo real é o rastreamento do material. Consiste basicamente em uma amostragem a cada 2 segundos da massa medida por uma balança instalada em uma correia transportadora, criando uma etiqueta desta posição com registro de tempo, condicionada ao status de operação da correia transportadora. A posição da balança é a mesma posição do ponto de amostragem. Depois que os pacotes de informação rastreados "percorrem" as correias transportadoras (no sistema, uma matriz de registros), cada pacote é posicionado em uma grade 3D que representa o pátio de estocagem, de acordo com a posição real da máquina, criando uma pilha virtual no sistema. Essa pilha virtual é formada pela distribuição dos pacotes na grade 3D, considerando a projeção do material lançado pela empilhadeira, o ângulo médio de acomodação do material e o material já armazenado na pilha virtual. Após a emissão do relatório de laboratório, geralmente a cada quatro horas, os resultados são associados aos pacotes rastreados e alocados na rede, permitindo conhecer a qualidade de cada porção do material da célula virtual. É importante notar que cada pacote na pilha virtual tem 2x2 metros no mundo real. Após este evento, cada pacote rastreado na pilha virtual possui as informações de massa, teor de ferro, sílica, alumina, etc. Na figura 3, é possível ver um exemplo da interface 3D com um pacote rastreado destacado na pilha. Este pacote tem todas as informações sobre o caminho percorrido e já está associado aos resultados de qualidade emitidos pelo laboratório.

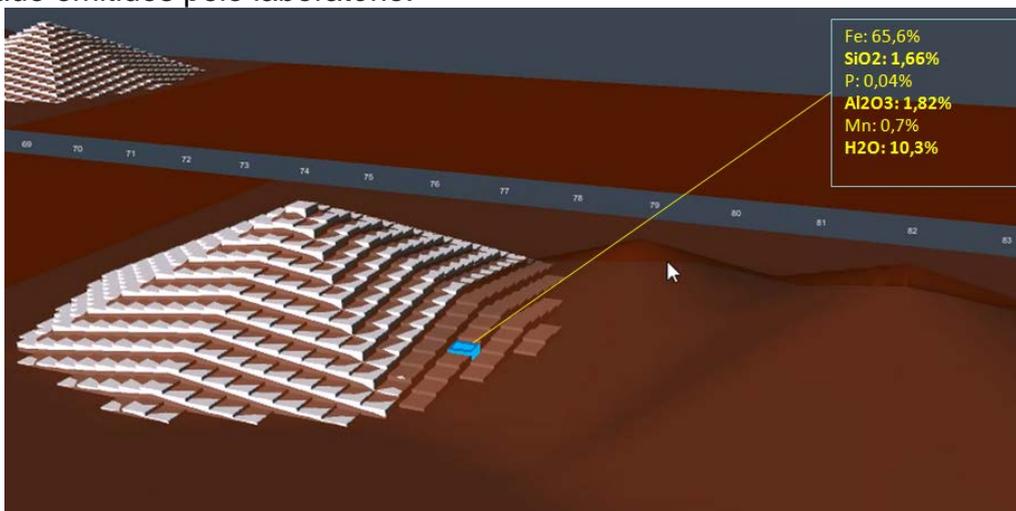


Figura 3- A interface 3D com pacote rastreado destacado, associado à informação de qualidade na pilha virtual.

Módulo de simulação

O módulo de simulação é responsável principalmente por gerar os melhores planos de empilhamento e recuperação. Além disso, este módulo é diretamente integrado à interface web, que tem uma função importante, que é a interação com o usuário para

a simulação de planos, permite a edição de parâmetros de sistema e processo e fornece uma maneira de inserir informações externas sobre o processo. e manutenção da planta. O principal objetivo do projeto é reduzir o deslocamento da máquina, sem diminuir a qualidade do produto final despachado, tentando encontrar a melhor distribuição do material ao longo dos pátios. Seguindo esta meta, foi desenvolvido um modelo da planta, considerando o maior número possível de características reais da planta, com conjuntos, parâmetros, limites e variáveis de decisão. A chave para formular a função objetivo no LP (programação linear) é a prática. No entanto, uma boa prática útil é que o objetivo comum para os LPs é minimizar o custo / maximizar o lucro. Nesse sentido, uma função objetivo foi definida para minimizar o deslocamento de máquinas e minimizar o desvio de qualidade. A equação 1 apresenta a função objetivo do modelo.

$$\begin{aligned} & \sum_{t \in T} \sum_{j \in P} \sum_{g \in E_j} f_g(q_{jg}^t) + \sum_{t \in T} \sum_{j \in P} \sum_{h \in R_j} f_h(q_{jh}^t) \quad (1) \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{g \in Ed} f_p \left(-1 + \sum_{j \in P_g} \sigma_{gj}^t \right) + \sum_{t \in T} \sum_{g \in Rd} f_p \left(-1 + \sum_{j \in P_h} \phi_{hj}^t \right) \quad (2) \\ & + \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} (ds_m^t + di_m^t) + \sum_{t \in T} \sum_{m \in M} \sum_{n \in M_m} f_{mn} i_{mn}^t \quad (3) \end{aligned}$$

Em resumo, a primeira parte da equação 1 (as duas somatórias na primeira linha) representa a soma do custo de deslocamento do movimento de deslocamento para os empilhadores e recuperadores, respectivamente. Esta parte da equação é responsável por minimizar o deslocamento ao longo dos pátios. A segunda parte da equação 1 (as duas somas na segunda linha) representa a soma do custo do movimento de giro das máquinas. Esta parte é responsável por minimizar a transição dos pátios. A terceira parte representa, respectivamente, o custo positivo e negativo de atendimento da demanda de massa (somatório à esquerda) e o custo associado ao uso de um tipo diferente de minério para atender a demanda (somatória da direita). Esta parte é responsável por minimizar o desvio de qualidade, considerando massa e qualidade, respectivamente. A parte esquerda evita que a demanda de massa não seja atendida. A parte direita evita o aumento do desvio de qualidade. As restrições reais da usina e todas as condições operacionais e características específicas devem ser convertidas em restrições matemáticas para o modelo. Avaliação de processos e padrões operacionais, e suas particularidades, bem como as muitas restrições foram definidas, por exemplo, restrição de fornecimento, restrição de empilhamento, restrição de estoque, restrição de uso das áreas, restrição de tempo de residência, restrição de reclamação, restrição de deslocamento, restrição de sobreposição de máquinas, restrição de silo e restrição de demanda.

A qualidade do minério produzido é avaliada a partir de suas propriedades físicas e químicas. Para que o modelo seja capaz de tomar decisões sobre essas informações de qualidade, é necessário traduzir as características físicas e os graus químicos em uma única pontuação de qualidade. Para tornar isso possível, o modelo usa uma referência de intervalo para a pontuação OQE - Qualidade geral de eficácia da produção usada para avaliação geral da qualidade do produto. As empresas de mineração normalmente usam o indicador OQE para medir a qualidade de seus produtos. O OQE é baseado na Função Perda de Taguchi (1978). A partir da análise física e química dos produtos, a pontuação OQE é calculada com base nos limites superiores e inferiores da especificação de minério. A tabela 1 apresenta um

exemplo de especificações de minério para SFCK, onde a LSE é o limite superior e a LIE o limite inferior especificado

Tabela 1–Especificação de qualidade SFCK de acordo com o OQE.

SFCK	Fe	SiO ₂	P	Mn	H ₂ O
LSE	65,40	3,70	1,60	1,10	13,50
Target	64,70	2,90	1,20	0,75	12,50
LIE	63,20	2,10	0,80	0,40	11,50

Para entender mais facilmente todas as variáveis e as restrições do modelo, em uma visão geral, podemos procurar os dados de entrada do modelo, onde podemos ver todas as informações que o modelo considerará para gerar a solução ótima. Um diagrama geral do modelo com todas as informações de entrada pode ser observado na figura 5. É importante observar que o modelo usa algumas informações em tempo real, adquiridas continuamente do sistema de controle da planta, por exemplo, a posição das máquinas e manual informações, inseridas pelos usuários, por exemplo, a solicitação de produção.



Figura 4 - Diagrama de visão geral do módulo de otimização com dados de entrada para funções de restrição.

2.2

Resultados

A avaliação do sistema foi dividida em duas partes, com um critério definido para o Módulo em Tempo Real e outro para o Módulo de Simulação. Para avaliação do Módulo *Real-Time* foi observada a funcionalidade do rastreamento de material e se a apresentação da qualidade nas pilhas virtuais é coerente com a qualidade real da pilha. Para verificar essa consistência, utilizou-se um critério simples que foi a consideração e comentários da equipe de analistas de qualidade, validando ou não a qualidade das pilhas virtuais. Segundo a equipe de analistas de qualidade, a qualidade das pilhas virtuais era coerente. A distribuição da qualidade nas pilhas pode ser observada na figura 6. Observando as pilhas no pátio C, a segunda jarda de cima para baixo, podemos ver que a maioria das pilhas tem uma cor azul forte, indicando que a porcentagem de Fe é alta (observe a escala do grau de Fe na parte inferior direita). Na verdade, este pátio recebe apenas SFCK e é a primeira opção das decisões de operação para empilhar o minério com alto grau

de Fe. Diferentemente do pátio C, as pilhas nos pátios A e B (respectivamente, a terceira e a quarta de cima para baixo) têm uma cor azul mais clara e cor verde, indicando que as pilhas têm uma porcentagem menor de teor de ferro. Esta informação é coerente porque este pátio recebe principalmente o NPCJ e o PFCJ, que têm uma porcentagem menor de grau Fe que o SFCK.

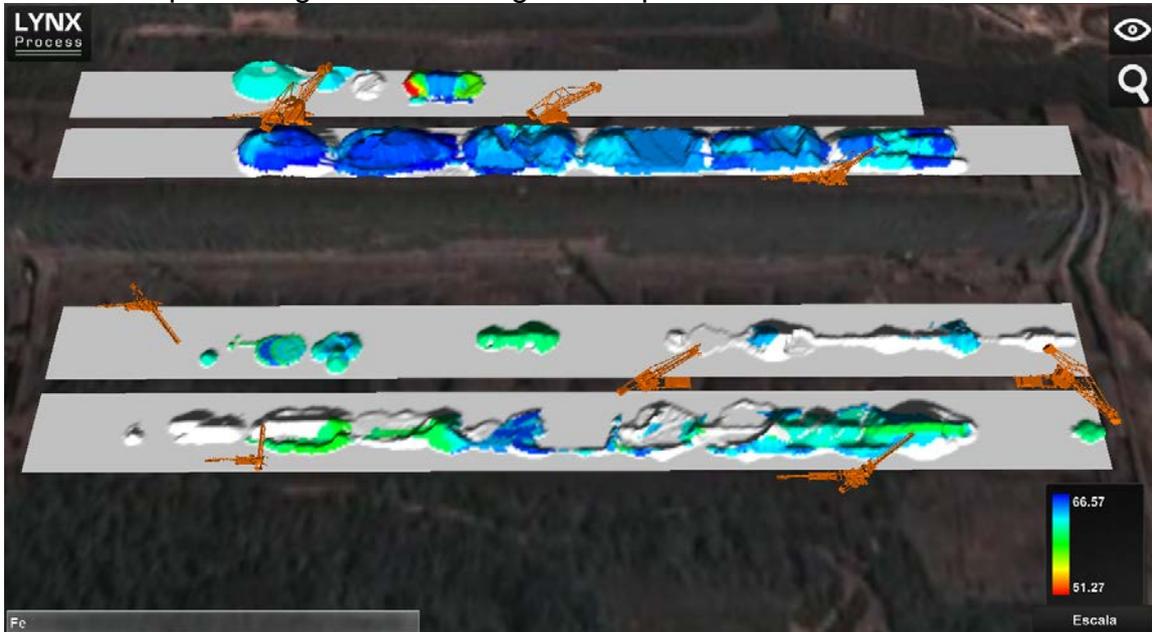


Figura 5 - Interface 3D do sistema com as pilhas virtuais e escala de cores da porcentagem de teor de Fe gerada pelo rastreamento do material em uma operação real.

Para avaliar o desempenho do Módulo de Simulação e a conformidade com os requisitos do projeto, foi proposta uma metodologia para permitir a comparação entre o cenário real de operação e o resultado da simulação, utilizando dados reais como entrada do modelo. Em outras palavras, se aplicado o plano ótimo gerado pelo sistema no cenário real, quais seriam os ganhos ou perdas resultantes do uso do plano gerado.

Para o estudo comparativo foram utilizados dados reais de um período de um mês de operação, levando em consideração principalmente o deslocamento total das máquinas de pátio e também comparando a qualidade real despachada com os resultados de qualidade da simulação. É importante notar que o usuário pode ponderar os multiplicadores de ganhos para redução de deslocamento e redução de desvio de qualidade. Neste estudo, o multiplicador para redução do deslocamento foi maior que o ganho para redução do desvio de qualidade. O ganho de qualidade foi avaliado comparando os escores OQE da operação real com os escores simulados, para o mesmo período, o que se traduz em uma redução no desvio de qualidade, pois um escore maior equivale a uma maior aproximação do valor especificado.

Comparando o deslocamento real e simulado, os resultados da simulação apresentam um deslocamento menor em quase todos os dias do período verificado, como demonstrado na figura 6 e se os planos ótimos gerados pela simulação foram utilizados nesse período, um ganho significativo em termos de redução de deslocamento de máquinas poderia ser obtida, como demonstrado na figura 7.

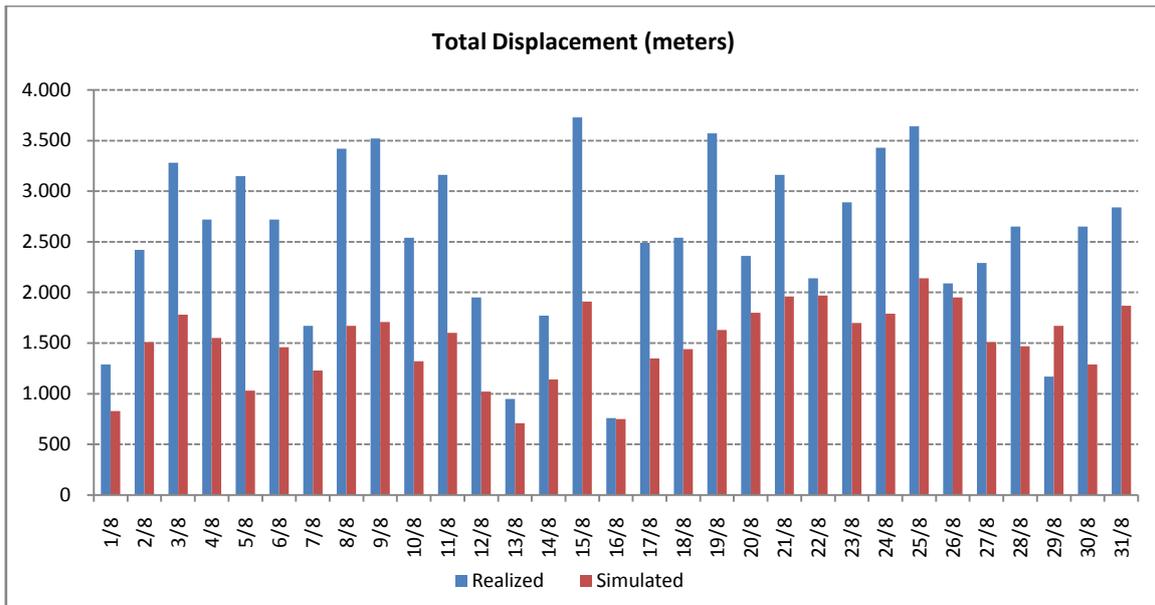


Figura 6 - Deslocamento total em metros realizado e o deslocamento total do resultado da simulação.

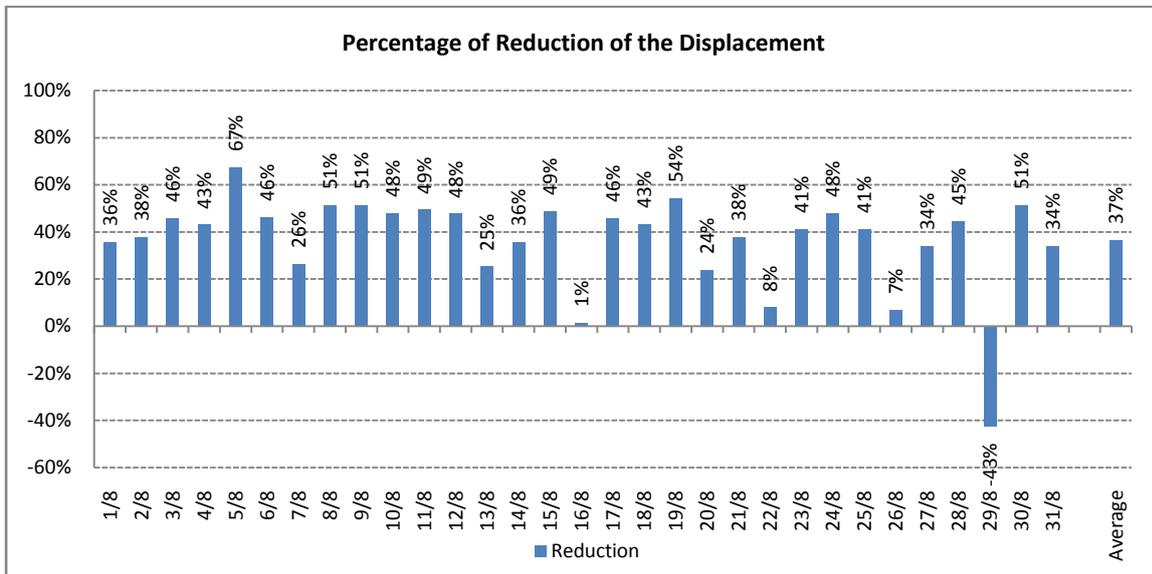


Figura 7 - Redução do deslocamento total comparando a operação real e os resultados da simulação.

Comparando a qualidade do material entre a operação realizada e os resultados da simulação, podemos ver um aumento da pontuação OQE para os resultados simulados, ou seja, uma redução do desvio de qualidade, mesmo com uma menor ponderação para a redução do desvio de qualidade na simulação, como demonstrado na figura 8. Isso demonstra um ganho expressivo na pontuação OQE para SFCK, como demonstrado na figura 9.

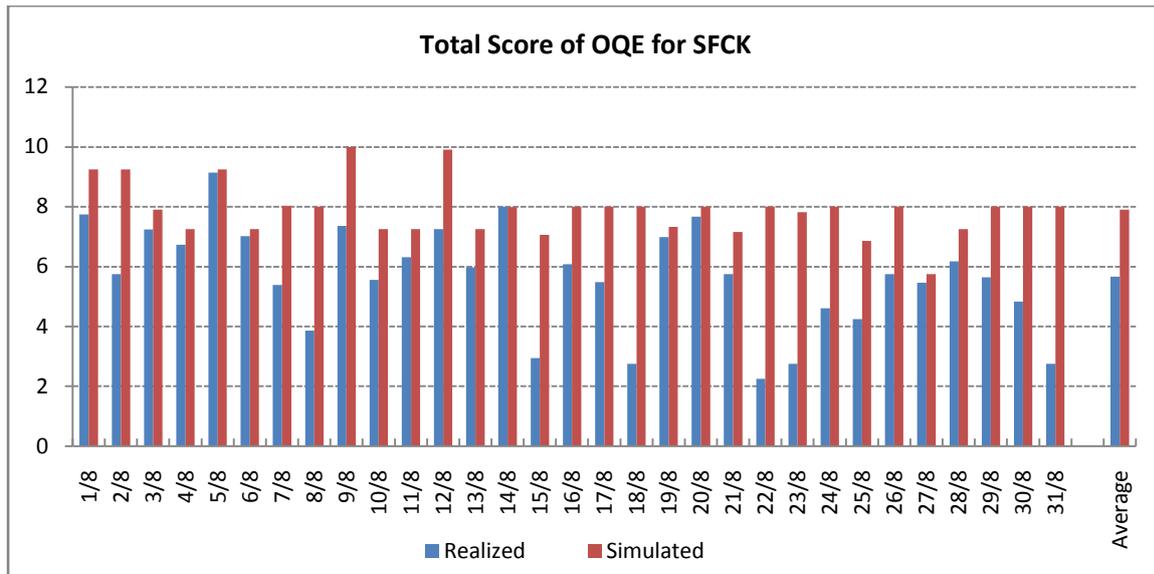


Figura 8 - Total do escore OQE para SFCK.

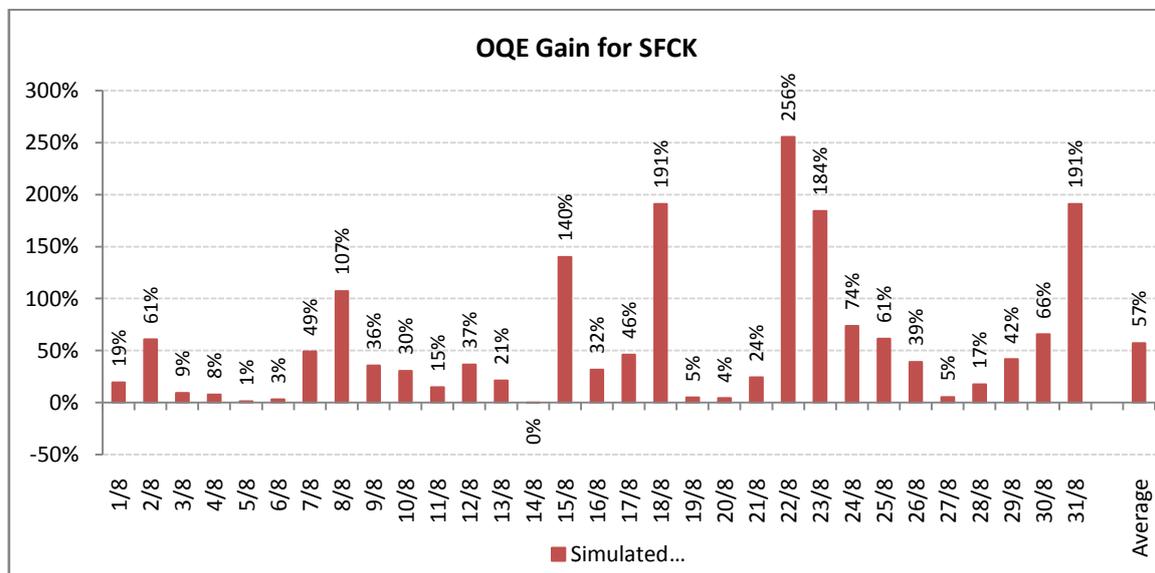


Figura 9 - Porcentagem de ganho na pontuação OQE em relação à operação real para SFCK.

Resumindo todos os resultados de comparação, obtemos o desempenho médio de todos os produtos e o resultado global para o período de um mês, como mostrado na tabela 2.

Tabela 2 - Ganhos médios da simulação por um período de um mês.

Ganho médio da simulação	Redução de deslocamento	Redução do desvio de qualidade
SFCK	-	57,24%
PFCJ	-	7,00%
NPCJ	-	11,42%
Total Average	37%	25,22%

3 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos com a simulação apresentam um ganho significativo com o uso do sistema, tanto na redução do deslocamento quanto na redução do desvio de qualidade, devido ao aumento do escore OQE. A redução do deslocamento tem como consequência, uma redução de estresse mecânico, economia de energia e redução de tempo na operação. Observando os resultados de qualidade, é claro que o sistema não pode aumentar a qualidade do beneficiamento, mas pode realizar uma busca por uma qualidade despachada com menos desvio e tentando alcançar uma maior pontuação OQE, respeitando os limites superiores.

Sobre o rastreamento de material, pode-se apontar a importância de ter informações automáticas o máximo possível. A decisão de tomada nas operações de pátio de estocagem às vezes deve ser rápida. Se houver muitas informações manuais para inserir o sistema pode ser difícil usar a simulação para uma decisão rápida.

Outra conclusão importante é sobre as perspectivas para diferentes usos da simulação. É possível fazer simulações com condições hipotéticas, por exemplo, remover máquinas ou pátios para encontrar os limites operacionais com capacidade reduzida, ou, por exemplo, adicionar um novo pátio ou máquina, para verificar quanto a taxa de produção pode ser aumentada. Em resumo, é possível fazer simulações de longo e médio prazo com o foco na estratégia operacional, ou mesmo simular mudanças na planta ou novos projetos, não necessariamente para uso dia a dia na rotina da operação.

Uma perspectiva futura interessante, pensando em um amplo uso desse tipo de sistema, são as possibilidades de novos recursos associados ao gerenciamento de pátio que podem ser integrados ao sistema. Uma lista de novas funcionalidades pode ser agregada ao sistema, como evitar colisões, operação automática da máquina, inventário de volume usando scanners a laser, mistura de minério. No futuro, pode-se ter, por exemplo, analistas de qualidade gerando os planos operacionais e enviando isso para as máquinas, que executarão uma lista de operações de empilhamento e recuperação automática.

REFERÊNCIAS

- 1 Moraes, E. F.; do Carmo Bento Alves, J. M.; Souza, M. J. F.; Cabral, I. E. & Martins, A. X. Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina Cauê da CVRD. Revista Escola de Minas, 59:299-306.
- 2 da Silva, F. D. L. (2013). Heurística de Sequenciamento para Retomada de Pilhas de Minério em Pátios de Estocagem (Dissertação de mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- 3 Juliá, A. F (2010). Desenvolvimento de um Modelo de Simulação para Dimensionamento de um Sistema Integrado Pátio-Porto na Cadeia do Minério de Ferro (Dissertação para obtenção de título de pós-graduação). Universidade de São Paulo Escola Politécnica.
- 4 Pimentel, B. S. (2011). Modelos e algoritmos para planejamento integrado na indústria da mineração (Tese de doutorado). Departamento de Ciência da Computação da Universidade Federal de Minas Gerais.
- 5 TAGUCHI, G., "Off-line and On-line Quality Control Systems." Proceedings of the International Conference on Quality Control, B4, Tokyo, Japan, 1978..