

PROGRAMAÇÃO LINEAR APLICADA À BLENDADE EM UMA EMPRESA MINERADORA

Pablo Parreira Paula

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Minas Gerais, Campus Congonhas
Av. Michel Pereira de Souza, 3007 - Campinho, Congonhas - MG
pabloppaula@gmail.com

Sílvia Maria Santana Mapa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Minas Gerais, Campus Congonhas
Av. Michel Pereira de Souza, 3007 - Campinho, Congonhas - MG
silvia.mapa@ifmg.edu.br

Luiza Bernardes Real

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Minas Gerais, Campus Congonhas
Av. Michel Pereira de Souza, 3007 - Campinho, Congonhas - MG
luiza.real@ifmg.edu.br

Luciano Wallace Gonçalves Barbosa

Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia – Minas Gerais, Campus Congonhas
Av. Michel Pereira de Souza, 3007 - Campinho, Congonhas - MG
luciano.barbosa@ifmg.edu.br

RESUMO

Este trabalho aborda a otimização da blendagem de minérios de ferro no carregamento ferroviário, relevante para alcançar as especificações contratuais e maximizar as margens comerciais. O objetivo da pesquisa foi desenvolver um modelo matemático baseado em programação linear que auxilia nas tomadas de decisões operacionais para realizar um lote de carregamento que atenda às necessidades do processo e especificações de controle do produto. Os dados e as regras foram obtidos de uma mineradora de grande porte localizada no quadrilátero ferrífero, uma das maiores exportadoras de *commodity* no Brasil. Atualmente, a blendagem é criada por meio de planos de carga baseados na técnica de ajustes progressivos, o que torna a atividade morosa e resulta em soluções com oportunidades de melhoria. O modelo matemático desenvolvido mostrou-se fidedigno ao processo, proporcionando melhorias operacionais significativas e uma redução de aproximadamente 4% no teor da sílica e promovendo maior eficiência na operação.

PALAVRAS CHAVE. Mineração, Blendagem, Programação Linear.

ABSTRACT

This paper addresses the optimization of iron ore blending during railway loading, which is crucial for meeting contractual specifications and maximizing commercial margins. The research aimed to develop a mathematical model based on linear programming to assist in operational decision-making for carrying out a loading batch that meets the process needs, with a focus on product control specifications. The data and rules were obtained from a large iron ore mining company located in the Iron Quadrangle, one of the largest exporters of this commodity in Brazil. Currently, blending is performed through loading plans based on the technique of progressive adjustments, which makes the activity time-consuming and leads to solutions with opportunities for improvement. The developed mathematical model proved to be reliable, yielding significant operational improvements and a reduction in silica content, with the element optimized by approximately 4%, promoting greater efficiency in the operation.

KEYWORDS. Mining. Blending. Linear Model.

1. Introdução

O atual cenário econômico mundial exige das organizações a busca pela excelência em seus fatores produtivos. A atividade de exploração mineral, inserida no setor primário da economia, caracteriza-se pela extração de recursos naturais não renováveis. Essa característica acentua a relevância do princípio da escassez, em que os recursos disponíveis são finitos e, muitas vezes, esgotáveis. Nesse contexto, a otimização do uso desses fatores produtivos torna-se uma estratégia sustentável para garantir a competitividade e a permanência das empresas no mercado [Luz et al., 2010].

No Brasil, o setor mineral está entre os principais exportadores e contribui expressivamente com o saldo comercial, além de gerar empregabilidade e a mineração de ferro está dentro da principal atividade mineral do país devido aos altos investimentos financeiros envolvidos [IBRAM, 2020]. Portanto, é nítida a importância do segmento para a sobrevivência econômica nacional.

O Brasil situa-se entre os principais países detentores de reservas e exportadores de minério do mundo. O nível de exportação está intrinsecamente correlacionado com as características mineralógicas e o custo de produção [IBRAM, 2020; Carvalho *et al.*, 2014]. A Austrália, principal concorrente, tem se destacado nos últimos anos em termos de produtividade, em comparação a um crescimento mais modesto do Brasil, Figura 1, [IBRAM, 2020]. Essa diferença se deve não apenas ao nível de investimento, mas também aos estímulos governamentais, evidenciando a necessidade de uma melhor gestão dos recursos minerais para manter a competitividade no âmbito internacional. Observa-se também que os principais importadores de minério de ferro estão localizados na Ásia e que a logística de países vizinhos mineradores é mais flexível em comparação com a do Brasil [IBRAM, 2020; Carvalho *et al.*, 2014].

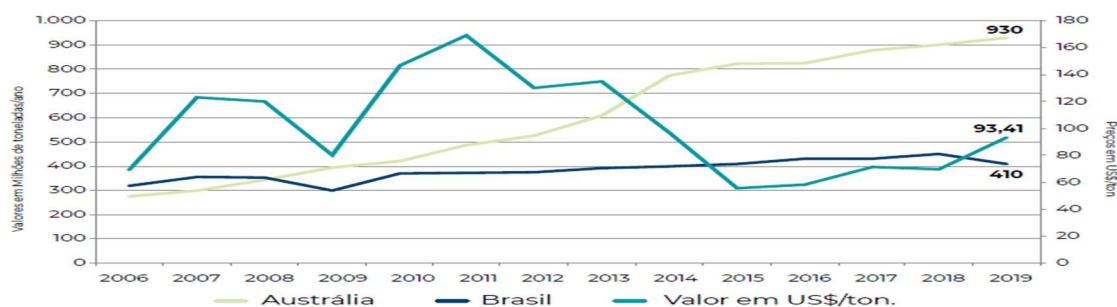


Figura 1 – Produção minério de ferro Brasil x Austrália

Fonte: IBRAM, 2020.

Dentre os desafios operacionais enfrentados por esse setor, destaca-se o processo de blendagem – a mistura de diferentes pilhas de minério com o objetivo de atender às especificações químicas e físicas dos contratos de fornecimento. A blendagem impacta diretamente a margem comercial do produto, a qualidade do ferro obtido no processo siderúrgico e a competitividade da empresa. Tradicionalmente, esse processo é conduzido com base em métodos empíricos, como os ajustes progressivos, os quais demandam tempo, são pouco precisos e abrem margem para decisões subótimas.

Diante desse cenário, a Pesquisa Operacional, especialmente a Programação Linear (PL), surge como uma ferramenta robusta e amplamente aplicada na modelagem e otimização de sistemas produtivos. A PL permite transformar problemas reais em modelos matemáticos que, ao considerar restrições operacionais e metas de qualidade, orientam a tomada de decisão com base em critérios quantitativos. Conforme destacado por Arenales et al. [2011], a Programação Linear tem se mostrado eficaz em diversos contextos industriais, sendo capaz de alocar recursos escassos de maneira ótima entre atividades conflitantes.

Neste trabalho, propõe-se o desenvolvimento de um modelo de Programação Linear aplicado à blendagem de minério de ferro no processo de formação de composições ferroviárias.

O modelo foi construído a partir de dados reais obtidos em uma grande mineradora brasileira, localizada no quadrilátero ferrífero, e implementado no suplemento Solver® do MS Excel, buscando otimizar os parâmetros de controle da carga – com foco na minimização do teor de sílica – e melhorar o desempenho operacional.

Assim, os objetivos específicos são: Mapear e compreender os fatores produtivos envolvidos no processo de carregamento; Realizar um modelo matemático compatível com o cenário produtivo; Criar uma ferramenta de fácil interação que auxilia na tomada de decisão e eliminar a aplicação da técnica de ajustes progressivos; Reduzir a variabilidade química e otimizar a utilização do recurso natural não renovável; Levantar casos de sucesso, principalmente no setor mineral, que aplicam a PO e juntamente com a revisão de literatura, identificar e desenvolver um modelo matemático que auxilia na tomada de decisão.

Esta pesquisa se justifica pela oportunidade de substituir métodos empíricos por uma abordagem analítica, sistemática e replicável, com potencial de agregar valor ao processo decisório, reduzir custos, melhorar a qualidade do produto final e contribuir com a sustentabilidade da operação. Além disso, o trabalho reforça o potencial de aplicação da Pesquisa Operacional no setor mineral, que ainda é subutilizado, apesar de suas múltiplas possibilidades de contribuição.

Esse artigo é subdividido em cinco seções, esse introdutório, seguido por uma revisão de literatura sobre mineração, blendagem e Programação Linear. No terceiro, descreve-se o estudo de caso na mineradora em questão e apresenta-se o modelo matemático. No quarto, analisam-se os dados e interpreta-se os resultados obtidos. Nessa parte são utilizadas ferramentas da qualidade para fomentar a criação dos relatórios finais. No quinto e último capítulo são trazidas as considerações finais do trabalho e sugestões de trabalhos futuros.

2. Aplicação da Pesquisa Operacional na Mineração

O beneficiamento mineral é o processo pelo qual os minerais extraídos da terra são processados para separar as substâncias valiosas das impurezas, também chamadas de ganga. Esse processo inclui operações de separação por granulometria, concentração relativa de elementos e purificação, sem alterar as propriedades químicas ou físicas dos minerais [Luz e Lins, 2010]. No caso do minério de ferro, o beneficiamento tem como principal objetivo aumentar a concentração de ferro e reduzir a presença de impurezas, como sílica (SiO_2) alumina (Al_2O_3) e fósforo (P), que podem prejudicar a qualidade do produto e aumentar os custos do processo siderúrgico [Luz e Lins, 2010].

Uma das operações mais importantes no beneficiamento do minério de ferro é a blendagem de produtos. A blendagem consiste na mistura de diferentes lotes de minério com características variadas, de forma a alcançar uma composição química específica que atenda às necessidades da indústria siderúrgica. O objetivo é ajustar o teor de elementos como ferro e sílica, a fim de maximizar a qualidade do produto e atender aos requisitos das usinas siderúrgicas, que transformam o minério de ferro em aço [Moraes *et al.*, 2006]. Além de melhorar a qualidade do produto, a blendagem também possibilita o aproveitamento de matérias-primas que, de outra forma, teriam baixo valor comercial. Isso contribui para aumentar a competitividade do produto no mercado, melhorando, assim, os resultados financeiros da empresa [Moraes *et al.*, 2006].

De acordo com Milagres [2019], a aplicação da Pesquisa Operacional (PO) na mineração ainda é menos intensiva em comparação com outros setores, embora existam estudos que busquem reduzir riscos, economizar recursos e otimizar processos. Essa constatação é reforçada por Barbosa e Mapa [2017], que, em um estudo bibliométrico, identificaram uma lacuna teórica e prática na aplicação da PO na mineração, apesar de diversos modelos já existirem para resolver problemas desse setor. A literatura sobre a aplicação da PO na mineração se concentra principalmente em duas áreas: blendagem de produtos e planejamento de lavra, como observado por Barbosa e Mapa [2017]. Essas áreas têm sido frequentemente investigadas e são consideradas as mais comuns no uso da PO no setor mineral.

No que diz respeito à blendagem de produtos, a PO tem sido aplicada para otimizar processos como a mistura de carvões e minérios, visando melhorar a qualidade do produto e a

eficiência da produção. Estudos como os de Assis *et al.* [2009] e Silva [2011] se concentram na otimização da mistura de carvões para a produção de coque metalúrgico. Além disso, Moraes *et al.* [2006] e Carvalho *et al.* [2008] desenvolveram soluções para otimizar a qualidade e a produção de carregamento no setor de minério de ferro, destacando a importância da PO no ajuste das propriedades dos minérios para atender aos requisitos de qualidade.

No campo do planejamento de lavra, a PO tem sido aplicada para otimizar a alocação de equipamentos e a movimentação de materiais, como o ROM (*Run of Mine* - Minério Bruto) e o estéril. Os trabalhos Andrade [2014], Milagres [2019] e Coutinho [2022] abordam soluções para o planejamento de lavra, com o foco em melhorar a eficiência operacional e garantir o uso eficaz dos recursos, minimizando custos e aumentando a produção.

Esses estudos ilustram como a Pesquisa Operacional tem sido utilizada para resolver desafios específicos da mineração, como a mistura de materiais e o planejamento de lavra, visando otimizar tanto a produção quanto a qualidade. No entanto, como apontado por Barbosa e Mapa [2017], ainda há um grande potencial para o uso mais aprofundado e generalizado da PO no setor mineral.

3. Metodologia

A pesquisa tem natureza aplicada, onde busca melhorar a performance e o método utilizado para planejamento de lotes de carregamento, com objetivos exploratórios, propondo identificar e mapear o processo a fim de compreender as regras e subsidiar a construção de um modelo matemático fidedigno. A abordagem classifica-se como quantitativa-qualitativa; quantitativa por analisar os dados empresariais com intuito de auxiliar nas criações das regras do modelo, e qualitativa por entender o processo por experiência de colaboradores, a fim de interligar a teoria com as práticas do processo e chegar em um cenário mais próximo da realidade. O procedimento técnico usado é a Modelagem e Simulação [Miguel *et al.*, 2012].

A obra tem como campo de atuação o estudo de uma mineradora de ferro de grande porte situada no quadrilátero ferrífero, sendo uma das maiores exportadoras da *commodity* no Brasil. Possui uma grande representatividade na região, constituindo uma das principais fontes de emprego. O estudo desenvolvido no segundo semestre de 2024 tem como abrangência o estoque de produtos e o processo de carregamento expedido por uma malha ferroviária, resultando em um modelo matemático linear.

Primeiramente, realizou-se uma pesquisa exploratória a fim de compreender a finalidade, *layout* e a logística do processo. Levantou-se o *layout* do pátio e as combinações de equipamentos de carga e transporte possíveis, e posteriormente uma análise quantitativa gerando as limitações operacionais e de qualidade, esta compreendida pela formação de lote para um determinado cliente de acordo com o mix de produção, especificação de produção. Após, o mapeamento e entendimento do processo (parâmetros, restrições e variáveis), executou-se o desenvolvimento da modelagem matemática. A Figura 2 apresenta o passo-a-passo do trabalho.



Figura 2 - Fluxo da Pesquisa
Fonte: Elaborado pelos autores.

4. Mapeamento do processo de carregamento

O pátio de estocagem e o processo de carregamento descritos no *layout* apresentado na Figura 3 operam de forma integrada e sequencial. O pátio de estocagem é estruturado em torno de dois circuitos paralelos compostos por transportadores de correia TC-1 e TC-2, com cada um atendendo um pátio específico, Pátio 1 e Pátio 2, respectivamente. A alimentação desses transportadores é feita por quatro retomadoras (RT-1, RT-2, RT-3 e RT-4), responsáveis por movimentar o material das pilhas, X1, X2, X3, X4, X5, X6 e X7. No *layout*, também pode-se observar sombras de pilhas adjacentes às mencionadas, porém são de produtos distintos do objeto em estudo.

Após o transporte nos TC-1 e TC-2, o produto é direcionado a um circuito de carregamento, que é composto por dois transportadores de correia sequenciais adicionais (TC-3 e TC-4). O produto, então, segue para o carregador de vagões (CV), que é o responsável pelo enchimento das composições. O fluxo do processo é indicado pelas setas, que mostram a trajetória do produto desde o pátio de estocagem até o carregamento final nos vagões.

Essa estrutura foi analisada a partir de observações *in loco* e entrevistas com a equipe operacional, permitindo uma visão das possibilidades operacionais para o desenvolvimento do modelo matemático.

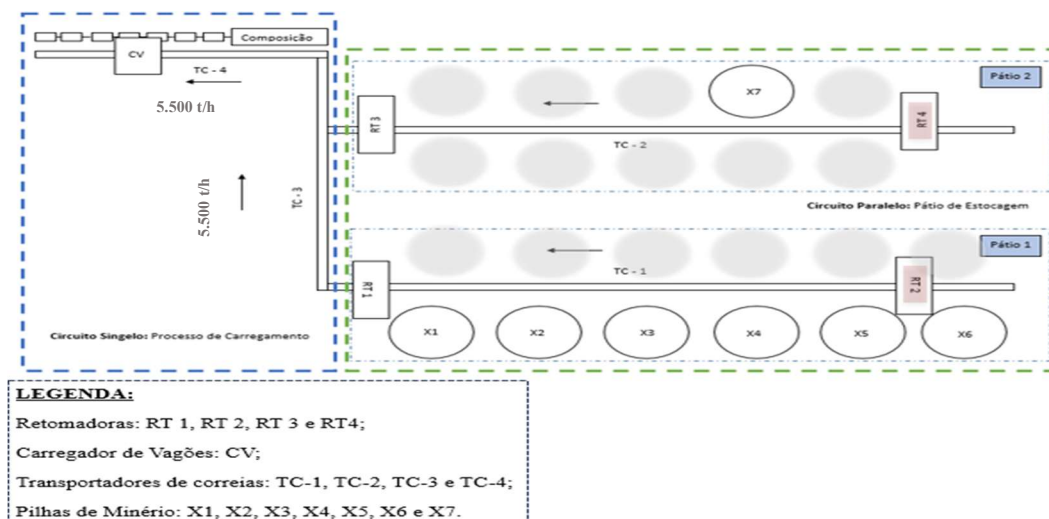


Figura 3 - Layout do Processo

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.1 Combinações de equipamentos de carga

De acordo com o fluxo apresentado na Figura 4, é possível observar as possibilidades de carga de cada retomadora, com a restrição de não recuperação simultânea na mesma pilha, a fim de mitigar colisões entre os equipamentos. Além disso, não é permitida a transferência de pátio nem a sobreposição dos equipamentos. Ou seja, a RT-1 e a RT-2 atendem apenas ao pátio 1, enquanto a RT-3 e a RT-4 atendem exclusivamente ao pátio 2. Outra restrição importante é que a RT-1 não recupera a X6 e a RT-2 não recupera a X1, devido à proximidade entre os equipamentos, o que intensifica o risco de colisões.

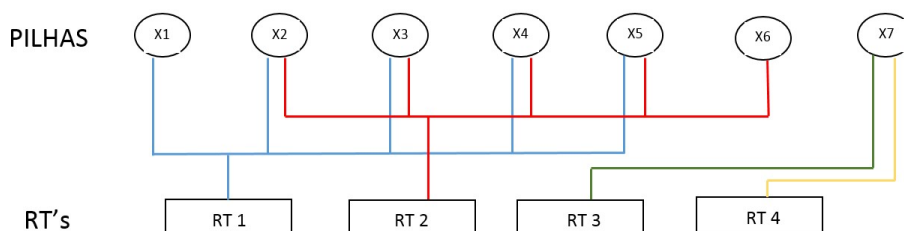


Figura 4 - Possibilidades de recuperação

Fonte: Elaborado pelos autores.

4.2 Taxa do processo de carregamento

Conforme ilustrado na Figura 3, o processo de carregamento é singelo com taxa máxima de 5.500 t/h e pode receber alimentação simultânea de dois transportadores de correias paralelos do pátio de estocagem. No entanto, gerencialmente é adotada uma taxa inferior à capacidade máxima, 4.500 t/h, visando atenuar desgastes e paradas.

4.3 Taxa dos equipamentos de carga

Após uma análise dos controles operacionais e entrevista com operadores dos equipamentos de carga, identificou-se as seguintes taxas para os equipamentos: RT1: 1.500 t/h; RT2: 4.000 t/h; RT3: 1.500 t/h; e RT4: 4.000 t/h.

A taxa dos equipamentos RT2 e RT4 são superiores por se tratar de equipamentos implantados posteriormente e de maior porte.

4.4 Parâmetros de controle

A empresa possui um mix de produção para diferentes tipos de materiais. No objeto em estudo, pode-se citar o apresentado na Tabela 1, onde o produto é simbolizado pela letra 'K', com os respectivos elementos de controle. Na análise química, são considerados os seguintes componentes: ferro (Fe), sílica (SiO₂), alumina (Al₂O₃), manganês (Mn), fósforo (P), perda por calcinação (PPC) e umidade (H₂O). Na análise física, considera-se a granulometria, com as faixas de +0,15 mm e -0,44 mm. Nas restrições, são consideradas as linhas de garantido máximo e mínimo, especificados em contrato, sendo a meta apenas uma referência.

K	Fe	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Mn	P	PPC	H ₂ O	+0,15mm	-
			3					m	0,44mm
Garantido Máximo		3,70	0,80	0,49			8,90	8,0	
Meta	65,7 5	3,00	0,75	0,25	0,08 5	1,80	8,20	6,0	44,0
Garantido Mínimo	65,3 0				0,07 0				37,0

Tabela 1 - Especificação do Produto

Fonte: Acervo da empresa em estudo.

4.5 Modelo Matemático

Para o desenvolvimento de um modelo matemático linear que satisfaça às restrições e viabilidade do processo, e alcance o objetivo do estudo, considere os conjuntos, parâmetros e variáveis de decisão.

Conjuntos:

$P = \{0, 1, \dots, \bar{i}\}$: conjunto das pilhas de minério

$T = \{0, 1, \dots, \bar{j}\}$: conjunto dos parâmetros de controle

$E = \{0, 1, \dots, \bar{k}\}$: conjunto dos equipamentos de carga

Parâmetros:

T_{MIN_j} : teor mínimo do parâmetro de controle $j \in T$
 T_{MAX_j} : teor máximo do parâmetro de controle $j \in T$
 P_{MIN_i} : recuperação mínima na pilha $i \in P$
 P_{MAX_i} : recuperação máxima na pilha $i \in P$
 Tx_{MAX_k} : capacidade máxima de taxa do equipamento de carga $k \in E$
 s_{ji} : porcentagem do parâmetro de controle $j \in T$ na pilha $i \in P$
 $massa_i$: disponibilidade de massa na pilha $i \in P$
 a : taxa meta do processo de carregamento
 b : tempo total do carregamento
 m : massa do carregamento
 $\bar{i}$: quantidade de pilhas de minério
 $\bar{j}$: quantidade de parâmetros de controle
 $\bar{k}$: quantidade de equipamentos de carga

Variáveis de decisão:

$X_i \in R^+$: massa recuperada da pilha $i \in P$
 $Tx_k \in R^+$: taxa praticada do equipamento de carga $k \in E$
 $t_k \in R^+$: tempo operacional do equipamento $k \in E$

Função Objetivo:

$$\min \frac{\sum_{i \in P} X_i \cdot s_{ji}}{m} \quad \forall j \in T \quad (1)$$

Sujeito às restrições:

$$X_i \leq massa_i \quad \forall i \in P \quad (1.1)$$

$$X_i \geq P_{MIN_i} \quad \forall i \in P \quad (1.2)$$

$$X_i \leq P_{MAX_i} \quad \forall i \in P \quad (1.3)$$

$$\sum_{i \in P} X_i = m \quad (1.4)$$

$$\frac{\sum_{i \in P} X_i \cdot s_{ji}}{m} \leq T_{MAX_j} \quad \forall j \in T \quad (1.5)$$

$$\frac{\sum_{i \in P} X_i \cdot s_{ji}}{m} \geq T_{MIN_j} \quad \forall j \in T \quad (1.6)$$

$$Tx_k \leq Tx_{MAX_k} \quad \forall k \in E \quad (1.7)$$

$$\sum_{k \in E} Tx_k \leq a \quad (1.8)$$

$$t_k \leq b \quad \forall k \in E \quad (1.9)$$

A Função Objetivo (1) minimiza um determinado teor de algum elemento no carregamento, ou seja, tem-se a flexibilidade de optar por qualquer parâmetro de controle, a depender da necessidade do momento. As restrições (1.1) garantem que as massas retiradas nas pilhas não ultrapassem o estoque disponível. As restrições (1.2) garantem que a quantidade recuperada em uma pilha seja igual ou superior a uma massa declarada. As restrições (1.3) garantem que a quantidade recuperada em uma pilha seja inferior ou igual a quantidade declarada,

uma vez que a recuperação máxima na pilha pode ser inferior à sua disponibilidade de massa. As restrições (1.4) garantem que o somatório das massas recuperadas nas pilhas seja igual à massa do lote. As restrições (1.5) e (1.6) garantem que o teor químico controlado de um determinado elemento no produto não ultrapasse o limite superior de controle e limite inferior de controle, respectivamente. Paralelamente à viabilidade do problema, as restrições (1.7) garantem que as taxas dos equipamentos de carga não ultrapassem a sua capacidade, as restrições (1.8) garantem que o somatório das taxas dos equipamentos não ultrapasse a taxa meta do processo de carregamento, e as restrições (1.9) garantem que o tempo operacional de cada equipamento não ultrapasse o tempo total do carregamento.

5. Resultados do modelo

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos por meio do modelo matemático, denominado Sistema de Apoio à Blendagem (SAB), com base em simulações representativas do ambiente da mineradora. Para a implementação do modelo, foi utilizado o suplemento Solver® do MS Excel®. Os resultados obtidos pelo SAB serão comparados com o método atualmente utilizado pela empresa (Atual).

Foram elaborados vinte cenários de disponibilidade de estoque nos pátios, aos quais foram alocadas as retomadoras, sendo proposto na Função Objetivo a minimização do parâmetro de controle Sílica (SiO_2), elemento que impacta a margem comercial do minério de ferro, além de onerar os processos siderúrgicos e afetar a qualidade do ferro fundido. Na Tabela 2 são apresentadas as massas (toneladas) e teores de sílicas (%) disponíveis nas pilhas, para cada cenário.

Pilhas	Cenário 1		Cenário 2		Cenário 3		Cenário 4	
	Massa	SiO_2	Massa	SiO_2	Massa	SiO_2	Massa	SiO_2
X1	6000	4,09	6000	3,54	6000	5,57	10000	3,24
X2	6000	5,57	0	-	6000	2,64	6000	3,52
X3	6000	3,92	6000	3,14	5000	3,4	6000	3,54
X4	6000	5,57	6000	5,57	6000	4,09	6000	3,54
X5	6000	3,52	10000	3,24	10000	3,1	15000	4,47
X6	0	-	6000	3,92	6000	3,4	0	-
X7	6000	3,14	13000	5,1	6000	3,54	6000	4,09
Pilhas	Cenário 5		Cenário 6		Cenário 7		Cenário 8	
	Massa	SiO_2	Massa	SiO_2	Massa	SiO_2	Massa	SiO_2
X1	6000	4,09	5000	3,4	6000	3,4	6000	3,4
X2	6000	5,57	0	-	13000	5,1	5500	3,1
X3	6000	3,92	13000	5,1	4500	2,94	13000	5,1
X4	6000	5,57	0	-	10000	3,1	6000	3,52
X5	6000	3,52	6000	2,64	5500	3,1	6000	3,52
X6	0	-	0	-	13000	5,1	6000	3,14
X7	6000	3,14	6000	3,52	5500	3,89	6000	5,57

Pilhas	Cenário 9		Cenário 10		Cenário 11		Cenário 12	
	Massa	SiO ₂	Massa	SiO ₂	Massa	SiO ₂	Massa	SiO ₂
X1	8000	3,08	13000	5,1	15000	4,47	0	-
X2	5000	3,4	0	-	15000	4,47	6000	3,4
X3	13000	5,1	0	-	6000	3,54	6000	3,52
X4	10000	3,1	15000	4,47	6000	3,4	6000	5,57
X5	8000	3,08	10000	3,24	10000	3,24	10000	3,24
X6	6000	3,14	15000	4,47	4500	2,94	5500	3,89
X7	10000	4,98	6000	4,09	5500	3,1	8000	3,08
Pilhas	Cenário 13		Cenário 14		Cenário 15		Cenário 16	
	Massa	SiO ₂	Massa	SiO ₂	Massa	SiO ₂	Massa	SiO ₂
X1	6000	3,4	6000	3,54	5000	3,4	6000	3,54
X2	6000	4,09	6000	2,64	5000	3,4	5500	3,89
X3	6000	3,4	6000	3,92	0	-	13000	5,1
X4	0	-	6000	3,4	6000	3,54	6000	2,64
X5	5500	3,1	5500	3,1	15000	4,47	6000	3,52
X6	0	-	6000	4,09	10000	4,98	8000	3,08
X7	6000	5,57	6000	3,92	5500	3,1	10000	4,98
Pilhas	Cenário 17		Cenário 18		Cenário 19		Cenário 20	
	Massa	SiO ₂	Massa	SiO ₂	Massa	SiO ₂	Massa	SiO ₂
X1	10000	4,98	5000	3,4	6000	3,52	6000	3,52
X2	10000	3,1	13000	5,1	0	-	6000	3,52
X3	5500	3,89	6000	4,09	6000	3,4	13000	5,1
X4	13000	5,1	6000	3,52	10000	3,1	4500	2,94
X5	10000	3,1	6000	5,57	10000	3,1	6000	3,54
X6	10000	3,1	6000	3,52	10000	4,98	8000	3,08
X7	13000	5,1	15000	4,47	15000	4,47	6000	3,4

Tabela 2 – Disponibilidade dos estoques em cada cenário

Fonte: Elaborado pelos autores.

A partir dos estoques disponíveis na Tabela 2, seguem os resultados apurados em relação ao parâmetro de controle sílica, apresentados na Figura 5.

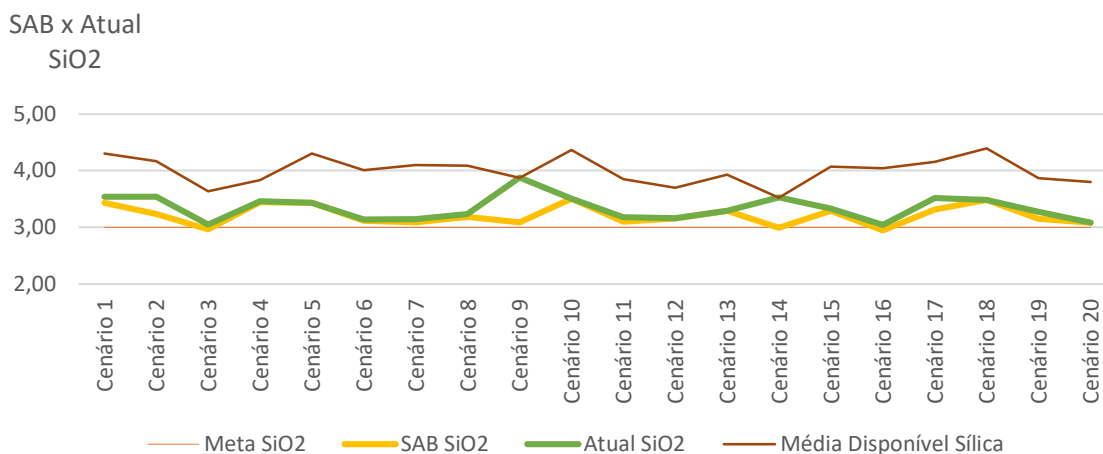


Figura 5 - Comparação dos Resultados da Sílica – SAB x Atual.

Fonte: Elaborado pelos autores.

Observa-se que a média da qualidade dos minérios disponíveis nos pátios era superior à meta do produto, conforme Tabela 2 e plotado na Figura 5, e que os resultados apurados no SAB estão mais próximos à meta, frente ao atual método adotado. Ficam nítidos os desvios quando se comparam os cenários na Figura 6.

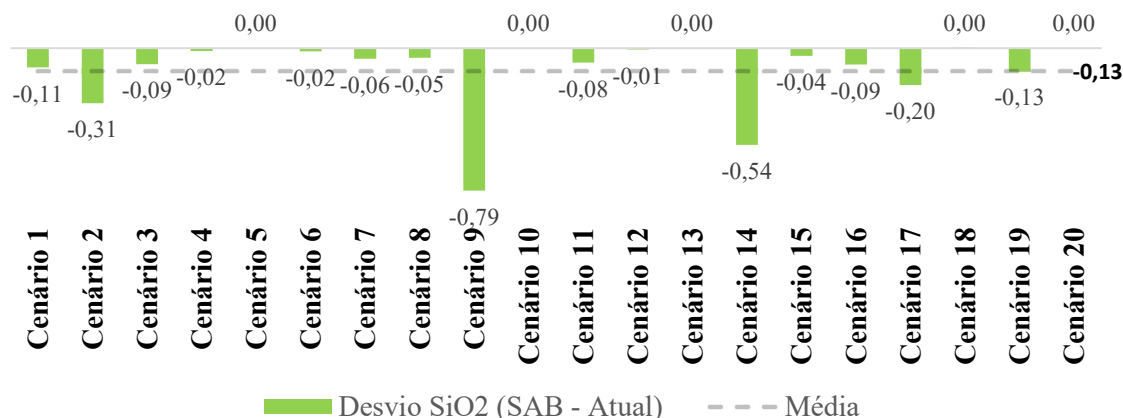


Figura 6 - Desvios na Sílica (SAB - Atual)

Fonte: Elaborado pelos autores.

Com uma média de -0,13% de sílica no produto, houve uma redução de aproximadamente 4%, comparando a média de sílica do SAB com a média da sílica do modelo atual. Além disso, destaca-se os cenários 2, 9 e 14, que apresentaram desvios de -0,31%, -0,79% e -0,54%, respectivamente. Apesar da predominância de resultados favoráveis à otimização do atendimento às especificações, no cenário 18 obteve-se um resultado ligeiramente positivo de 0,0014 para o modelo atual (valor que não aparece no gráfico da Figura 5 em relação ao modelo SAB devido à precisão do número de casas decimais apresentadas).

No entanto, ao analisar outras restrições de viabilidade e premissas do processo, verificou-se que o método atual não atendeu a todas as restrições estabelecidas, conforme pode ser observado nas Figuras 7 e 8. Na Figura 7 é possível identificar que em todos os cenários do SAB, a taxa do processo foi equivalente a taxa meta considerada (4.500 t/h), no entanto, no cenário atual, em 25% dos casos a taxa praticada foi inferior à meta. Esse fato é algo que não está diretamente relacionado com a quantidade de equipamentos utilizados, mas sim pela disposição de massa por equipamentos.

Taxa do processo

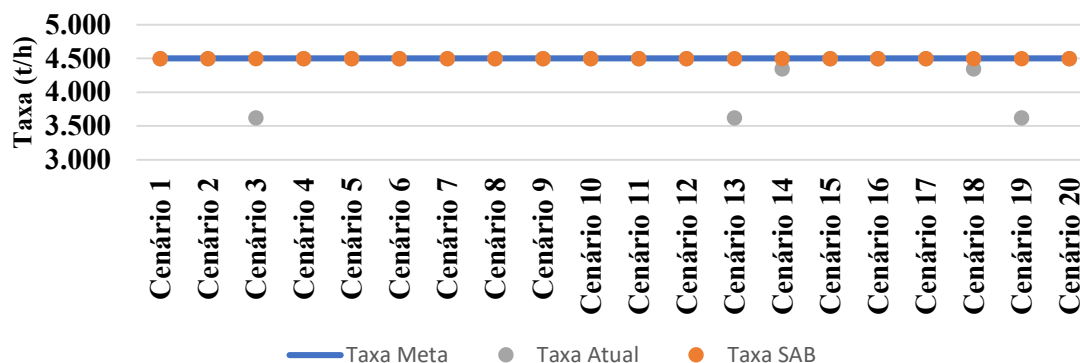


Figura 7 - Taxa do Processo SAB x Atual

Fonte: Elaborado pelos autores.

Observa-se pela Figura 8 que em 35% dos cenários, o modelo SAB trouxe como resposta a utilização de uma quantidade inferior de equipamentos, sendo positivo por permitir atenuar os desgastes dos equipamentos, o planejamento de manutenções por oportunidade e melhorar a gestão da mão de obra. Importante observar que, mesmo com utilização inferior de equipamentos, foi possível o cumprimento da taxa do processo (t/h).

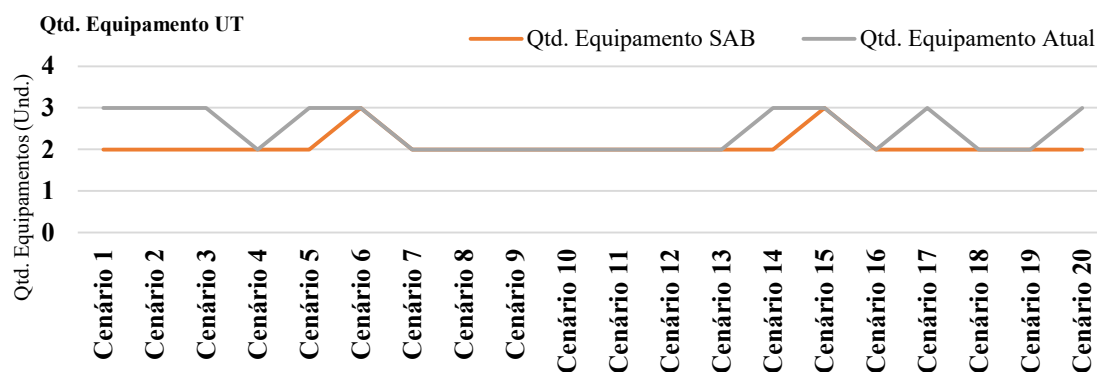


Figura 8 - Quantidade de Retomadoras
 Fonte: Elaborado pelos autores.

Embora não seja um resultado explícito advindo do modelo matemático proposto, ao analisar a proporção de massa por equipamento no método atual adotado pela empresa, há uma participação maior das retomadoras que possuem capacidade menores (RT1 e RT3), quando comparado à solução do método SAB, que além de permitir a redução do número de equipamentos, teve como ganho implícito menor utilização dessas retomadoras de menor porte.

6. Conclusão

As técnicas de Pesquisa Operacional, através da programação linear, desempenham um papel crucial na otimização de processos e no suporte à tomada de decisões. Os resultados obtidos na pesquisa indicam que o modelo proposto possui um grande potencial para melhorar o processo de blendagem de minério, sem comprometer o operacional.

Os resultados observados incluem a redução de 0,13% do teor de sílica no produto, fator essencial para a qualidade e melhoria da margem comercial do minério de ferro. Essa redução é benéfica para o processo siderúrgico subsequente, pois resulta em um produto com menor teor de sílica, gerando menor volume de escória e a produção de ferro fundido de maior qualidade.

Além disso, as performances operacionais do modelo desenvolvido no trabalho mostraram uma utilização mais eficiente das capacidades dos equipamentos: em 35% dos casos, o modelo SAB fez uso de menos equipamentos, sem comprometer a taxa de processo, enquanto no modelo atual, em 25% dos casos, a taxa meta não foi atingida.

Com base nos resultados apresentados, o método desenvolvido com o modelo de programação linear tem grande potencial, tanto para otimizar a qualidade do produto, quanto para otimizar a produtividade do processo. Os resultados demonstram que os objetivos gerais da pesquisa foram alcançados, uma vez que o modelo matemático se mostrou fidedigno ao processo e gerou resultados melhores.

Por fim, destaca-se a possibilidade de replicar este trabalho para outros produtos gerados no processo da empresa estudada, assim como a possibilidade de replicação em outras empresas com processos que possuem características semelhantes. Recomenda-se também explorar uma análise financeira que permita avaliar os ganhos monetários decorrentes da implementação do modelo matemático.

7. Referências

Andrade, A. Q. d. (2014). Sequenciamento e programação de lavra com alocação de equipamentos de carga. Tese (Doutorado) — Universidade de São Paulo.

Arenales, M.; Armentano, V. A; Morabito, R.; Yanasse, H. H. (2011). Pesquisa operacional. Rio de Janeiro: Elsevier; ABEPRO.

Assis, P. S.; Bueno, R. F. D.; Destro, E.; Silva, G. L. R. S. (2009). Otimização da Mistura de Carvões na Produção de Coque Metalúrgico. Ouro Preto / MG. Seminário Brasileiro de Minério de Ferro.

Barbosa, L. W. G.; Mapa, S. M. S. (2017). Aplicações da pesquisa operacional no setor de mineração: estudo bibliométrico no período de 2006 a 2016. Revista Latino-Americana de Inovação e Engenharia de Produção, v. 5, n. 8, p. 166–186.

Carvalho, P. S. L; Silva, M. M.; Rocio, M. A R; Moszkowicz, J. (2014). Minério de Ferro. Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social – BNDES, Rio de Janeiro.

Carvalho, R. V.; Bressan, M.; Segal, J.; Abrahão, J. G. (2008). Aplicação da Programação Linear no Problema de Origem e Destino em uma empresa de Mineração. Rio de Janeiro, RJ, ENEGEP.

Coutinho, N. S. (2022). Um Modelo de Programação Linear Inteira Mista para a Blendagem de Minérios e Alocação de Equipamentos de Carga em uma Mina de Cobre. 48f. Dissertação (Mestre em Engenharia de Controle e Automação). Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

IBRAM (2020). Informações Sobre a Economia Mineral Brasileira 2020, Brasília. Disponível em: <file:///C:/Users/mi04378/Downloads/Economia-Mineral-Brasileira-IBRAM-2020.pdf>. Acesso em: 23 dez. 2023.

Luz, A. B.; Lins, F. A. F. (2010). Introdução ao Tratamento de Minérios. Rio de Janeiro: CETEM, Centro de Tecnologia Mineral.

Luz, A. B.; Sampaio, J. A; França, S. C. A. (2010). Tratamentos de Minérios, 5º ed. Centro de Tecnologia Mineral Ministério da Ciência e Tecnologia – CETEM, Rio de Janeiro, 13 p.

Moraes, E. F.; Alves, J. M. C. B.; Souza, M. J. F.; Cabral, I. E.; Martins, A. X. (2006). Um modelo de programação matemática para otimizar a composição de lotes de minério de ferro da mina Cauê da CVRD. Revista Escola de Minas. Ouro Preto.

Miguel, P. A. C.; Fleury, A.; Mello, C. H. P.; Nakano, D. N.; Lima, E. P.; Turrioni, J. B.; Ho, L. L.; Morabito, R.; Martins, R. A.; Sousa, R.; Costa, S. E. G. C.; Pureza, V. (2012). Modelagem e simulação. Metodologia de pesquisa em engenharia de produção e gestão de operações, 2 d. Rio de Janeiro: Elsevier.

Milagres, J. M. Novo Paradigma para o Problema de Mistura de Minérios. (2019). 51 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.

Silva, G. L. R. d. (2011). Otimização da mistura de carvões na produção de coque metalúrgico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Materiais. Rede Temática em Engenharia de Materiais, Pró Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, MG.