



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MINAS



**USO DA PESQUISA OPERACIONAL PARA AVALIAR CENÁRIOS OBTIDOS COM
MODELO PARA DIMENSIONAMENTO DA FROTA DE EQUIPAMENTOS DE
CARGA E TRANSPORTE**

LUAN LUIZ OLIVEIRA MARTINS

OURO PRETO - MG
Novembro de 2022

LUAN LUIZ OLIVEIRA MARTINS

**USO DA PESQUISA OPERACIONAL PARA AVALIAR CENÁRIOS OBTIDOS COM
MODELO PARA DIMENSIONAMENTO DA FROTA DE EQUIPAMENTOS DE CARGA E
TRANSPORTE**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas. **Área de concentração:** Lavra de Minas/Planejamento de Lavra

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro
(*DEMIN/EM/UFOP*)

OURO PRETO - MG
Novembro de 2022

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

M386u Martins, Luan Luiz Oliveira.

Uso da pesquisa operacional para avaliar cenários obtidos com modelo para dimensionamento da frota de equipamentos de carga e transporte. [manuscrito] / Luan Luiz Oliveira Martins. - 2022.
46 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Elton Destro.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Minas .

1. Pesquisa operacional. 2. Minas e recursos minerais - Carregamento e transporte. 3. Otimização matemática. I. Destro, Elton. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 622.68:519.8

Bibliotecário(a) Responsável: Sione Galvão Rodrigues - CRB6 / 2526



FOLHA DE APROVAÇÃO

Autor

Luan Luiz Oliveira Martins

Título

Uso da Pesquisa Operacional para avaliar cenários obtidos com modelo para dimensionamento da frota de equipamentos de carga e transporte

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Minas.

Aprovada em 07 de novembro de 2022.

Membros da banca

Prof. Dr. Elton Destro - Orientador (UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof^a. Dr^a. Rita de Cássia Pedrosa Santos (UFOP - Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. Isabela dos Santos Stopa Almeida (Vale)

Elton Destro, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 22/11/2022.



Documento assinado eletronicamente por **Elton Destro, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 22/11/2022, às 17:25, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0430393** e o código CRC **207502A3**.

À minha querida mãe, Maria Goreti de Oliveira Guimarães Martins.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço à Deus por me conceber saúde para ter chegado até aqui, por iluminar meu caminho e ter colocado pessoas boas ao longo da minha trajetória.

A minha mãe, Maria Goreti de Oliveira Guimarães Martins, você é tudo para mim.

Ao meu amor, Ryanne Marjory, com todo suporte, carinho, cuidado e paciência, fez parte dessa jornada tornando as dificuldades diminutas.

Ao professor Elton Destro, meu orientador, por todo apoio, supervisão, contribuição e conhecimento transmitidos.

Aos meus grandes amigos Rafael Pereira, Rafael Nonato, Gustavo Ferreira, entre outros, pelo apoio e cooperação durante toda trajetória acadêmica.

Aos colaboradores da VALE que participaram, direta ou indiretamente, da minha capacitação, fortalecendo meu conhecimento e me guiando para ser um profissional exemplar

À Universidade Federal de Ouro Preto e à Escola de Minas, pelo suporte e pela indiscutível qualidade de ensino e dignificação dos seus estudantes.

“A única coisa que interfere com meu aprendizado é a minha educação” (Albert Einstein)

RESUMO

A competitividade cresce diariamente em todo o setor mineral e, para garantir a liderança, é necessário inovar e ter confiabilidade das decisões tomadas. Nesse sentido, a Pesquisa Operacional, como ferramenta de apoio a criação de modelos de otimização mostra-se eficiente para tomada de decisões a curto e longo prazo. Este estudo propõe validar e implementar um modelo de otimização, para analisar dois cenários obtidos com técnicas de dimensionamento de frotas de equipamentos de carregamento e transporte, levando em consideração metas de produção e qualidade. Para isso, utilizou-se a ferramenta Solver do *software* Excel para análise dos cenários, sendo o primeiro deles composto por 3 escavadeiras hidráulicas e 13 caminhões e, o segundo, composto por 4 escavadeiras hidráulica e 10 caminhões de capacidades iguais aos do primeiro cenário. Como resultado da implementação dos dois cenários, verificou-se que as metas, tanto de produção quanto de qualidade, foram atendidas, sendo que, no Cenário 1, obteve-se 4 caminhões não operacionais e, no Cenário 2, dois caminhões.

Palavras-chave: Pesquisa Operacional; Modelo de otimização; Plano operacional de lavra; Dimensionamento de frotas de equipamentos de carga e transporte.

ABSTRACT

Competitiveness grows daily in all mineral sector, and to ensure leadership it is necessary to innovate and have the reliability of the decisions taken. In this sense, Operations Research as a tool to support the creation of optimization models for short and long-term decision-making proves to be efficient. This study proposes to validate and implement an optimization model for analyzing two scenarios obtained with sizing techniques for loading and transport equipment fleets, considering production and quality goals. In this sense, it was used the Solver tool of the Excel software to implement the two scenarios: the first being composed of 3 hydraulic excavators and 13 trucks, and the second, composed of 4 hydraulic excavators and 10 trucks with capacities equal to the first scenario. The result of the implementation of the two scenarios met the production and quality goals and, in scenario 1, it was found 4 non-operational trucks and, in scenario 2, two trucks.

Keywords: Operations research; Optimization model; Mining operational planning; Truck-Shovel fleets sizing.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Cenários obtidos com a implementação do modelo para dimensionamento da frota de equipamentos de lavra em operação conjugada proposto por Mendonça, 2002. Núm. de Esc. = número de escavadeiras; Caminhões = número de caminhões e ProdTotal = produção total em m ³	20
Figura 2: Lançamento dos dados de entrada do modelo de otimização no Excel.....	26
Figura 3: Declaração da função objetivo e restrições de quantidade (produção) e qualidade no Excel.	26
Figura 4: Formulário Parâmetros do Solver com a indicação da célula da função objetivo e declaração das variáveis de decisão e restrições de quantidade e quantidade.....	27
Figura 5: Resultado preliminar após declaração das restrições de quantidade e qualidade no Solver.....	28
Figura 6: Declaração da variável de decisão Y no Solver.....	28
Figura 7: Processo de adição das restrições relacionadas à variável de decisão Y no Solver	29
Figura 8: Definição das quantidades mínima e máxima de material a ser lavrado se $Y_j = 1$..	30
Figura 9: Declaração da variável de decisão n no solver	31
Figura 10: Número de viagens do caminhão k por frente de lavra	32
Figura 11: Declaração da variável de decisão Z no solver	33
Figura 12: Tempo mínimo e máximo de operação do caminhão k quando utilizado	34
Figura 13: Distribuição do número de viagens por equipamento de transporte (sem arredondamento).....	34
Figura 14: Distribuição do número de viagens por equipamento de transporte (com arredondamento).....	35
Figura 15: Cálculo dos parâmetros de qualidade	35
Figura 16: Resultados obtidos com a implementação do modelo de otimização para o Cenário 1 (3 escavadeiras e 13 caminhões) - Parte 1.....	37
Figura 17: Resultados obtidos com a implementação do modelo de otimização para o Cenário 1 (3 escavadeiras e 13 caminhões) - Parte 2.....	38
Figura 18: Resultados obtidos com a implementação do modelo de otimização para o Cenário 2 (4 escavadeiras e 10 caminhões) - Parte 1.....	39
Figura 19: Resultados obtidos com a implementação do modelo de otimização para o Cenário 2 (4 escavadeiras e 10 caminhões) - Parte 2.....	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Limites máximo e mínimo dos parâmetros de controle da qualidade da mistura de minérios (dados de entrada).	19
Tabela 2: Variáveis operacionais de carga.	20
Tabela 3: Variáveis operacionais para o transporte de minério.	21
Tabela 4: Parâmetros de qualidade, em %, por frente de lavra (dados de entrada).....	21
Tabela 5: Tempo de ciclo por frente de lavra.	22
Tabela 6: Parâmetros do modelo de otimização.....	22

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	13
2.1. Objetivo geral	13
2.2. Objetivos específicos	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1. Pesquisa Operacional	14
3.2. Contextualização histórica	15
3.3. Pesquisa Operacional aplica a mineração	15
3.4. Fases de um estudo da Pesquisa Operacional	16
3.5. Programação Linear no contexto da Pesquisa Operacional	17
3.5.1. <i>Função Objetivo</i>	17
3.5.2. <i>Restrições</i>	18
3.6. Problema de Mistura de Minérios	18
4. MATERIAIS E MÉTODOS	19
4.1. Desenvolvimento	19
4.1.1. <i>Definição do cenário de estudo</i>	19
4.1.2. <i>Método para desenvolvimento do modelo de otimização</i>	22
4.1.3. <i>Definição da Variável de decisão</i>	23
4.1.4. <i>Definição da Função da Função Objetivo</i>	23
4.1.5. <i>Definição das Restrições</i>	23
4.1.6. <i>Implementação do modelo proposto</i>	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
5.1. Resultados obtidos com o modelo de otimização composto por 3 escavadeiras e 13 caminhões	37
5.2. Resultados obtidos com o modelo de otimização composto por 4 escavadeiras e 10 caminhões	39
6. CONCLUSÕES	42
SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44

1. INTRODUÇÃO

A busca pelo melhor cenário na mineração, que envolvam a redução de custos e aumento de produção, torna-se cada dia mais necessário nesse setor. Novas tecnologias estão sendo desenvolvidas rapidamente para equipamento de mineração, puxadas pela demanda de mercado. Isto inclui diversos programas e modelos que auxiliam na tomada de decisões na rotina do dimensionamento de frotas e alocação de equipamentos, facilitando e potencializando o desempenho dos processos na mineração.

Nesse sentido, a Pesquisa Operacional (PO) tem-se mostrado fundamental, colaborando na otimização dos recursos no meio empregado. E, com o advento da computação, essa ciência passou a ser difundida com maior intensidade.

Em condições apropriadas, ao se empregarem técnicas de modelagem matemática e eficientes algoritmos computacionais, a PO pode subsidiar o decisor na análise dos mais variados aspectos e situações de um problema complexo, permitindo a tomada de decisões efetivas e a construção de sistemas mais produtivos (SABROPO, 2017).

Segundo José Neto (2020), a metodologia da PO é mais indicada para solucionar problemas que podem ser representados por modelos matemáticos. Tais modelos podem ser classificados, quanto ao nível de incerteza existente entre as relações das variáveis, como determinísticos (sem incerteza: as informações relevantes são tidas como conhecidas; modelos de otimização) ou probabilísticos (quando uma ou mais variáveis de decisão não são conhecidas; modelos de simulação).

Problemas de programação são modelados tal que o melhor uso de recursos escassos possa ser determinado, conhecidos os objetivos e necessidades do analista. Problemas de programação linear compõem uma subclasse de problemas nos quais a modelagem é inteiramente expressa em termos de equações lineares. Em se tratando de programação linear, esse objetivo é expresso através de uma função linear, denominada “função-objetivo” (FOGUIATTO, s.d.).

Atualmente, foi verificada a baixa disponibilidade de estudos de PO desenvolvidos para em torno de criações de modelos de otimização que inferem o desdobramento de um planejamento de curto prazo (turno de trabalho). Neste sentido, o presente trabalho busca contribuir com um modelo de otimização para planejamento operacional de lavra a curto prazo e avaliar se as frotas dos equipamentos de carga e transporte encontradas na fase de dimensionamento atendera às metas de produção e qualidade especificadas previamente. Para isso, foi utilizada a ferramenta computacional Solver disponível no *software* Excel.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo geral

Implementar um modelo de otimização para analisar cenários obtidos com técnicas de dimensionamento de frotas de equipamentos de carregamento e transporte levando em consideração metas de produção e qualidade.

2.2. Objetivos específicos

- i) Utilizar o Solver do *software* Excel para implementar e resolver um modelo de otimização para planejamento operacional de lavra a curto prazo;
- ii) Escolher, dentre os cenários obtidos com um modelo base para dimensionamento das frotas de equipamentos de carga e transporte, aqueles que atenderão às metas de produção previamente estabelecidas;
- iii) Avaliar se os cenários escolhidos na fase de dimensionamento das frotas de equipamentos atenderão tanto às metas de produção quanto às de qualidade especificadas previamente no plano operacional de lavra.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo aborda as principais temáticas acerca dos modelos de otimização utilizados na Pesquisa Operacional (PO).

3.1. Pesquisa Operacional

Para que as empresas se mantenham no mercado diante do cenário competitivo, é necessário empregar métodos e técnicas diferenciadas a fim de obter um diferencial competitivo. Um diferencial competitivo pode ser obtido por quem gerencia melhor seus recursos empresariais, que são escassos. A PO se desenvolveu para gerenciar recursos escassos e obteve sucesso. Hoje é possível fazer usos dos métodos da PO no ambiente corporativo e, por conseguinte, obter um diferencial comparativo em relação à concorrência (JOSÉ NETO, 2020).

Do ponto de vista acadêmico, o aumento da capacidade de processamento computacional e, com isso, a possibilidade de lidar com problemas cada vez maiores, tem impulsionado o desenvolvimento de novos métodos analíticos que estão em constante evolução e propiciam uma vasta gama de aplicações. Do ponto de vista prático, a Pesquisa Operacional demanda um esforço de equipe, em geral multidisciplinar, exigindo uma estreita cooperação entre líderes (tomadores de decisão), analistas e pessoas que serão afetadas pela ação de gestão. Sendo assim, a PO demanda uma interação natural entre as áreas de administração, engenharias, computação e matemática (SABRAPO,2017).

Nota-se que a PO é uma ferramenta de grande importância na tomada de decisões, o que faz dela requerida no meio empresarial. Isso em funções de modelos que estuda, desenvolve e aplica métodos analíticos avançados para auxiliar na tomada de decisão nas mais diversas áreas de atuações, de forma a inferir em resultados ótimos proporcionando direcionamento seguro no objetivo esperado.

A Pesquisa Operacional destaca-se pelo grande número de técnicas para solução de problemas de tomada de decisão. Agrupam-se essas técnicas em três grandes grupos: os modelos determinísticos, onde as variáveis envolvidas são constantes e conhecidas; os modelos estocásticos, onde variáveis aleatórias são características definidas por meio de funções de probabilidade; e outras técnicas advindas com o desenvolvimento computacional e aplicação de técnicas de outras ciências na Pesquisa Operacional (Belfiore *et al.*, 2013 *apud* Barbosa 2017).

3.2. Contextualização histórica

O termo Pesquisa Operacional remete as origens da área, cujo interesse inicial foi a gestão eficiente de operações (basicamente de logística militar). Assim, o desenvolvimento da PO foi fruto do esforço de guerra dos Aliados no início dos anos 40 e, tal esforço, tinha por objetivo desenvolver métodos para resolver problemas de operações militares. O sucesso dessas aplicações levou o mundo acadêmico e empresarial a utilizar as técnicas, então criadas, em problemas de administração (JOSE NETO, 2020).

3.3. Pesquisa Operacional aplicada à mineração

De acordo com SABRAPO, 2017 *apud* JOSE NETO (2020), a PO é empregada em áreas consideradas estratégicas, tais como energia, prospecção e exploração de petróleo, gerência de operações, logística, finanças, marketing, planejamento e gestão de sistemas de serviços, segurança da informação, administração industrial, gestão da qualidade, análise locacional entre outros de interesse civil e militar.

Sobre o planejamento das operações de lavra, os desafios estão em atingir as metas estabelecidas para o *Run of Mine* (ROM), cuja mistura deve fornecer a qualidade requerida, muitas vezes tendo diferentes características físico-químicas analisadas (como granulometria e teor de contaminantes) além de extrair o estéril para liberar novas áreas com minério.

Outro requisito da operação de lavra que, em alguns casos, pode ser conflitante com as metas para ROM, é de evitar o estrangulamento da cava de onde, devido ao seu aprofundamento, os equipamentos de carga, por motivo de segurança, devem retirar materiais apenas do topo para irem alargando a cava em busca de minério (AMARAL, 2008 *apud* QUINTÃO, 2014).

Lidar com essas características torna o planejamento e controle operacional de lavra desafiador no que se refere, por exemplo, a determinar qual a sequência de blocos que deve ser lavrada, a quantidade ótima da composição do produto mineral e o planejamento operacional de lavra, o qual aloca os equipamentos de carga e transporte dentro da mineradora.

3.4. Fases de um estudo da Pesquisa Operacional

A Pesquisa Operacional, como definida anteriormente, aplica conceitos e métodos de outras áreas científicas para concepção, planejamento ou operação de sistemas para atingir a solução de um problema.

Segundo Taha (2008), as principais fases de implementação de PO, na prática, incluem:

. Definição do problema: envolve definir o escopo do problema sob investigação. Essa função deve ser executada por toda a equipe de PO. A meta é identificar os três elementos principais de um problema de decisão: 1) descrição das alternativas de decisão, 2) determinação do objetivo do estudo e 3) especificação das limitações sob as quais modelado funciona.

. Construção do modelo: implica na tentativa de traduzir a definição do problema em relações matemáticas. Se o modelo resultante se ajustar a um dos métodos matemáticos padrão, tal como programação linear, pode-se, geralmente, chegar a uma solução utilizando algoritmos disponíveis. Alternativamente, se as relações matemáticas forem muito complexa para permitir a determinação de uma solução analítica, a equipe de PO pode optar por simplificar utilizando simulações e modelos heurísticos que podem ser combinados para resolver o problema de decisão.

. Solução do modelo: é de longe a fase mais simples de todas as fases da PO, porque se baseia na utilização de algoritmos de otimização bem definidos. Um aspecto importante da fase de solução do modelo é a análise de sensibilidade, que trata de obter informações adicionais sobre o comportamento da solução ótima quando o modelo passa por algumas mudanças de parâmetros. A análise de sensibilidade é particularmente necessária quando os parâmetros do modelo não podem ser estimados com precisão. Nesses casos, é importante estudar o comportamento da solução ótima na vizinhança dos parâmetros estimados.

. Validação do modelo: verifica se o modelo proposto faz ou não o que diz fazer, isto é, se ele prevê adequadamente o comportamento do sistema em estudo. Inicialmente, a equipe de PO deve estar certa de que o resultado do modelo não inclua “surpresas”. Em outras palavras, se a solução faz sentido e ainda se os resultados são intuitivamente aceitáveis. Do lado formal, um método comum para verificar a validade de um modelo é comparar seus resultados com dados históricos. O modelo é válido se, sob condições similares de entradas, reproduz razoavelmente o desempenho anterior. Todavia, de modo geral, não há nenhuma garantia de que o desempenho futuro continuará a reproduzir o comportamento passado. Além disso, como o modelo costuma ser baseado no exame cuidadoso de dados passados, a comparação proposta costuma ser favorável. Se o modelo proposto representa um novo sistema (não existente), não

haverá dados históricos disponíveis. Nesses casos, pode-se usar a simulação como uma ferramenta independente para verificar os resultados do modelo matemático.

. Implementação da solução de um modelo validado: envolve a tradução dos resultados em instruções operacionais inteligíveis que serão emitidas para as pessoas que administrarão o sistema recomendado. A carga dessa tarefa cabe principalmente à equipe de PO.

3.5. Programação Linear no contexto da Pesquisa Operacional

Programação Linear (PL) é uma técnica que pressupõe a relação linear entre as características do problema, buscando a solução ótima para o problema estudado. Essas características do problema são representadas e relacionadas por meio de uma série de equações/inequações lineares (RODRIGUES, 2014).

A PL é uma técnica que busca encontrar o valor (entre uma gama de valores possíveis) máximo ou mínimo, sempre respeitando situações que restringem a obtenção de valores maiores ou menores. Apesar de não serem uma técnica exclusiva de planejamento, programação e controle da produção (PPCP), pode auxiliar muito nos seus processos decisórios (BEZERRA, 2014).

Quando se fala em maximizar ou minimizar, está se referindo diretamente com problemas de otimização. Nesse contexto, é necessário definir a função objetivo e as restrições que o sistema apresenta.

3.5.1. Função Objetivo

Segundo Barbosa (2015), a função objetivo e as restrições são sempre equações ou inequações lineares. Nesse contexto matemático, os problemas ficam com sua linguagem modificada, ou seja, passam para a linguagem matemática.

Desse modo, a função objetivo pode ser escrita de duas formas:

. Se o problema for maximizar z:

$$\max z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

. Se o problema for minimizar z:

$$\min z = c_1x_1 + c_2x_2 + \dots + c_nx_n$$

Em que c_1, c_2, \dots, c_n são números reais e x_1, x_2, \dots, x_n são variáveis do problema.

3.5.2. Restrições

Visto que a função objetivo em uma PL representa a meta a ser alcançada. Além dela, existe, também, as restrições, que são separadas em:

. Restrição de igualdade (equação):

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n} x_n = b_1$$

. Restrição de desigualdade (inequação):

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n} x_n \leq b_1$$

$$a_{11}x_1 + a_{12}x_2 + \dots + a_{1n} x_n \geq b_1$$

Sendo que b_1, b_2, \dots, b_n representam as limitações das restrições e a_{ij} são os coeficientes das equações e inequações que descrevem, no problema, os números de quantidade, valor e custo.

Para determinar as restrições do problema, primeiro é necessário verificar os fatores que limitam a produção. No caso da otimização de um plano de lavra, as restrições se referem as quantidades disponíveis de ROM, caminhão, equipamento de carga entre outros.

3.6. Problema de Mistura de Minérios

O problema de mistura de minérios consiste em encontrar as quantidades de minérios e teores dos elementos químicos ideais para otimizar o resultado dessa mistura de acordo com o objetivo determinado, respeitando as exigências do cliente como, por exemplo, redução do custo, maior aproximação das metas de produção e de qualidade, aumento do rendimento da mistura etc.

Essas metas de qualidade e produção requeridas pelos clientes normalmente não são alcançadas, devido à grande variabilidade dos minérios. A partir dessa dificuldade, são criados intervalos de tolerância para cada um dos parâmetros avaliados (MILAGRES, 2019).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os procedimentos realizados para alcançar os objetivos desta pesquisa.

4.1. Desenvolvimento

4.1.1. Definição do cenário de estudo

O presente estudo foi realizado utilizando seis frentes de trabalho, constituídas de minério de ferro.

O modelo de otimização a curto prazo levou em consideração uma produção de 27.333 t por turno de 12 horas trabalhadas.

Definiu-se como parâmetros de controle da qualidade os teores máximo e mínimo de Fe, P, SiO₂, Al₂O₃ além de um parâmetro físico (a fração granulométrica abaixo de 100#) presentes na mistura de minérios, conforme Tabela 1.

Tabela 1: Limites máximo e mínimo dos parâmetros de controle da qualidade da mistura de minérios (dados de entrada).

	Mín (%)	Máx (%)
Fe	52,0	56,0
P	0,041	0,046
SiO₂	4,1	4,9
Al₂O₃	1,22	1,36
-100#	23,0	24,0

Foram analisados dois cenários para as frotas de equipamentos da mina, os quais foram destacados na Figura 1.

Figura 1: Cenários obtidos com a implementação do modelo para dimensionamento da frota de equipamentos de lavra em operação conjugada proposto por Mendonça, 2002. Núm. de Esc. = número de escavadeiras; Caminhões = número de caminhões e ProdTotal = produção total em m³.

Núm. de Esc. = 3		Núm. de Esc. = 4	
	Caminhões/ProdTotal		Caminhões/ProdTotal
5	2106108	5	2174127
6	2486554	6	2595131
7	2838378	7	3002764
8	3148165	8	3389801
9	3415353	9	3755361
10	3641005	10	4095870
11	3823511	11	4404224
12	3962262	12	4675129
13	4060735	13	4906779
14	4126073	14	5099351
15	4166821	15	5253995
16	4190864	16	5373079

As variáveis operacionais de carga, utilizadas para implementação do modelo de otimização, são descritas na Tabela 2.

Tabela 2: Variáveis operacionais de carga.

Equipamentos de Carga	
Tipo	Escavadeira Hidráulica
Porte	9,5 jd ³
Tempo de ciclo	0,8 min
Fator de eficiência	83%
Fator de enchimento da caçamba	80%
Fator de operação conjugada	90%
Horas programada por ano	7200
Disponibilidade física	75%
Utilização	80%

Fonte: Mendonça, 2002. (adaptado)

As variáveis operacionais para o transporte do minério utilizadas na implementação do modelo de otimização são descritas na Tabela 3.

Tabela 3: Variáveis operacionais para o transporte do minério.

Equipamentos de Transporte	
Tipo	Caminhão fora de estrada basculante
Porte (capacidade)	180 t
Peso específico do material	4,1 t/m ³
Tempo de ciclo médio	18 min
Fator de eficiência	83%
Fator de enchimento da caçamba	100%
Fator de operação conjugada	90%
Horas programadas por ano	7200
Disponibilidade física	70%
Utilização física	80%

Fonte: Mendonça, 2002. (adaptado)

Na Tabela 4 são apresentados os parâmetros de qualidade por frente de lavra adotados na implementação do modelo de otimização.

Tabela 4: Parâmetros de qualidade, em %, por frente de lavra (dados de entrada).

	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6
Fe	56	62	64	43	51	49
P	0,049	0,053	0,048	0,037	0,042	0,041
SiO ₂	3,9	4,2	3,8	5,9	7,3	6,4
Al ₂ O ₃	1,70	1,03	0,92	1,76	0,82	1,55
-100#	22,6	19,5	23,9	25,8	19,3	21,4

A Tabela 5 refere-se ao tempo de ciclo médio por frente de lavra.

Tabela 5: Tempo de ciclo por frente de lavra.

Tempos de Ciclo (min)					
Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6
18	21	24	19	25	20

A Tabela 6 mostra parâmetros utilizados no modelo de otimização.

Tabela 6: Parâmetros do modelo de otimização.

Abreviação	Parâmetros do modelo	
ProdMáx	Produção máxima por turno	28.000 t
ProdMin	Produção mínima por turno	27.000 t
Q_{min_j}	Quantidade mínima de material a ser lavrado se $Y_j = 1$	5.000 t
Q_{max_j}	Quantidade máxima de material a ser lavrado se $Y_j = 1$	10.000 t
nFrentes	Número de frentes de lavra (ou equipamento de carga)	3 ou 4
M	Número elevado (utilizado no modelo de otimização)	100.000 t
T_{min_k}	Tempo mínimo de operação do caminhão k quando utilizado	200 min

4.1.2. Método para desenvolvimento do modelo de otimização

O primeiro passo para implementar um modelo de otimização é o estudo e diagnóstico do problema. É indispensável conhecer o processo que se pretende otimizar de modo a identificar as variáveis que devem ser levadas em consideração na construção do modelo.

Após o estudo e diagnóstico, foram seguidos os passos para fazer a modelagem:

- I. Definição das variáveis de decisão;
- II. Definição da função objetivo;

III. Definição das restrições.

4.1.3. Definição das Variáveis de decisão

Uma variável de decisão é uma incógnita em um problema de otimização. Ela tem um domínio, que é uma representação compacta do conjunto de todos os valores possíveis para a variável. Os tipos de variável de decisão são referências a objetos cuja natureza exata depende do otimizador subjacente de um modelo. Uma variável de decisão pode ser instanciada somente no contexto de uma determinada instância do modelo (IBM).

Para implementação do modelo de otimização aqui descrito e chegar aos objetivos almejados foram utilizadas as seguintes variáveis de decisão:

- X_j = Produção (em toneladas) na frente de lavra j
- $Y_j = \begin{cases} 1 & \text{se houver produção na frente } j \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$
- $Z_k = \begin{cases} 1 & \text{se o caminhão } k \text{ estiver em operação} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases}$
- n_{kj} = Número de viagens do caminhão k , na frente de lavra j

4.1.4. Definição da Função da Função Objetivo

- Max X_4 (maximizar o uso do minério da frente com menor teor de Fe)

4.1.5. Definição das Restrições

- Com relação ao teor mínimo na mistura, tl , do parâmetro de controle i (%)

$$\sum_{j \in F} t_{ij} - tl_i \cdot \sum_{j \in F} x_j \geq 0 \quad \forall i \in Q$$

Sendo:

F: Conjunto das frentes de lavra

Q: Conjunto dos parâmetros de controle da qualidade da mistura

t_{ij} : Teor do parâmetro de controle i na frente j (%)

tl_i : Teor mínimo na mistura do parâmetro de controle i (%)

- Com relação ao teor máximo na mistura, tu , do parâmetro de controle i (%)

$$\sum_{j \in F} t_{ij} - tu_i \cdot \sum_{j \in F} x_j \leq 0 \quad \forall i \in Q$$

Em que:

F: Conjunto das frentes de lavra

Q: Conjunto dos parâmetros de controle da qualidade da mistura

t_{ij} : Teor do parâmetro de controle i na frente j (%)

tu_i : Teor máximo na mistura do parâmetro de controle i (%)

- Quanto a produção mínima a ser lavrada no turno de trabalho

$$\sum_{j \in F} X_j \geq prodMin$$

- Quanto a produção máxima a ser lavrada no turno de trabalho

$$\sum_{j \in F} X_j \leq prodMáx$$

- Quanto a quantidade mínima lavrada por frente

$$X_j \geq Qmin_i \cdot Y_j \quad \forall j \in F$$

- Quanto a quantidade máxima lavrada por frente

$$X_j \leq Qmáx_i \cdot Y_j \quad \forall j \in F$$

- Quanto ao número de escavadeiras (ou frentes de lavra)

$$Y_j - \frac{X_j}{M} \geq 0 \quad \forall j \in F$$

$$\sum_{j \in F} Y_j = nFrentes$$

Sendo:

Se $Y_j = 0 \rightarrow X_j = 0$ (logo o material da frente de lavra j não será utilizado).

Se $Y_j = 1 \rightarrow X_j$ poderá assumir qualquer valor menor ou igual a M . Logo, o material da frente j poderá (ou não) ser utilizado.

- Quanto ao tempo mínimo de operação de um caminhão (quando utilizado)

$$TT_k \geq Tmin_k \cdot Z_k \quad \forall k \in C$$

Em que:

TT_k é o tempo de trabalho do caminhão k (em min)

C é o conjunto dos caminhões

- Quanto ao tempo máximo de operação de um caminhão (quando utilizado)

$$TT_k \leq TE_k \cdot Z_k \quad \forall k \in C$$

Sendo:

TT_k é o tempo de trabalho do caminhão k (em min)

C é o conjunto dos caminhões

TE_k é o tempo efetivo que o caminhão k deva estar em operação caso seja utilizado (em min)

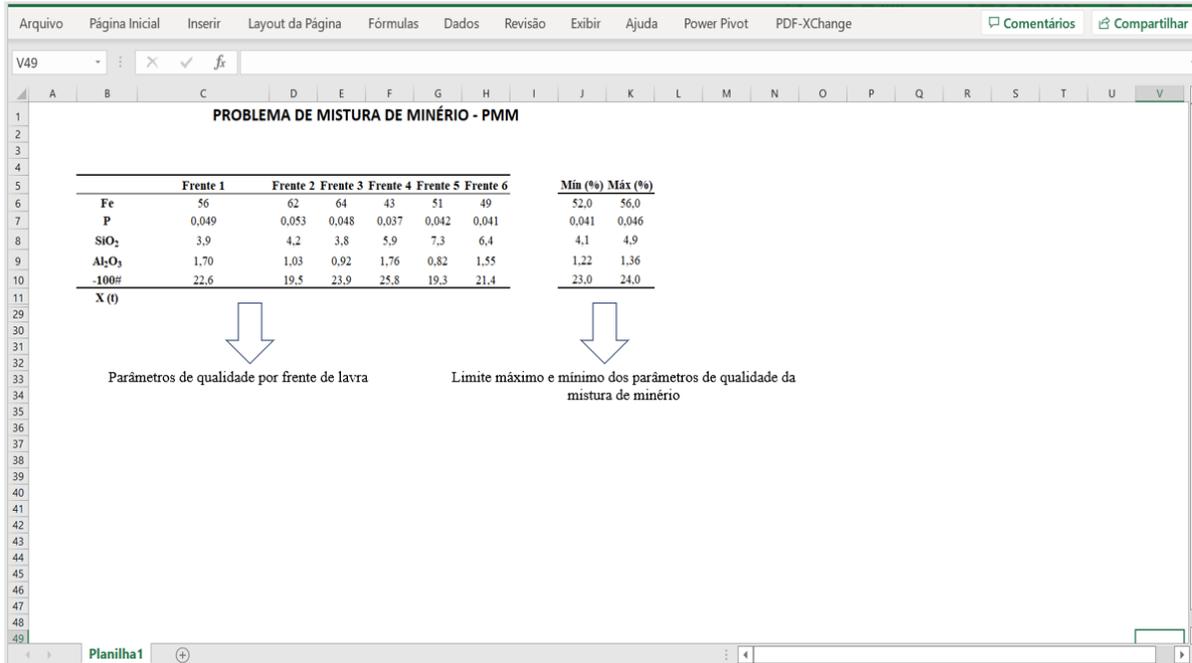
4.1.6. Implementação do modelo proposto

A implementação do modelo proposto foi realizada utilizando a ferramenta Solver do *software* Excel. O solver trabalha com um grupo de células relacionadas direta ou indiretamente com a fórmula na célula de destino.

Todas as células que influenciam no resultado da célula destino podem ser alteradas pelo próprio Excel, desde que sejam fórmulas inter-relacionadas e atinja a meta desejada, avaliando todas as restrições para chegar no resultado.

Após a definição do cenário de estudo, foi iniciado o processo de lançamento das informações para implementação do modelo de otimização no *software* Excel. Para isso o primeiro passo foi inserir os dados de entrada no Excel conforme Figura 2.

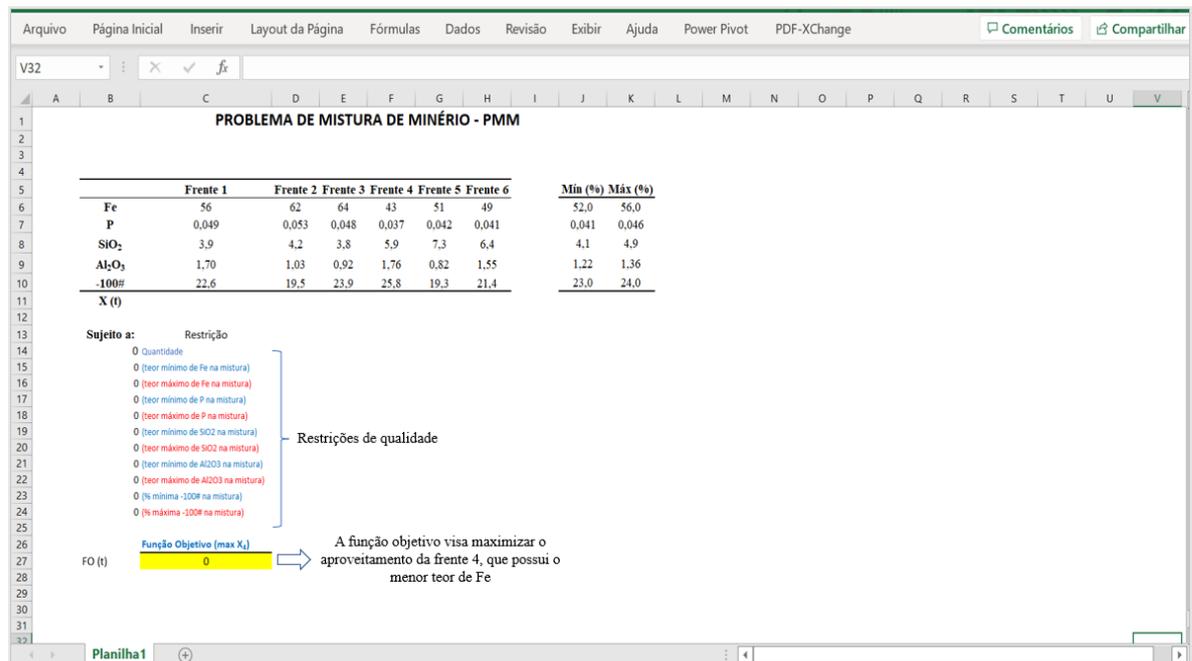
Figura 2: Lançamento dos dados de entrada do modelo de otimização no Excel.



Em seguida, inseriu-se a função objetivo e as restrições de qualidade e quantidade do modelo conforme já descritas no tópico 4.1.4 e 4.1.5.

A Figura 3 apresenta a função objetivo e as restrições de qualidade e quantidade do modelo de otimização declaradas no *software* Excel.

Figura 3: Declaração da função objetivo e restrições de quantidade (produção) e qualidade no Excel.



Na Figura 4 é detalhado o processo de declaração da função objetivo (maximizar o aproveitamento da frente de minério 4), variáveis de decisão X (produção, em toneladas, por frente de lavra) e restrições (quantidade e qualidade) no formulário do Solver.

Figura 4: Formulário Parâmetros do Solver com a indicação da célula da função objetivo e declaração das variáveis de decisão e restrições de quantidade e qualidade.

The image shows the Solver Parameters dialog box in Microsoft Excel. The background spreadsheet contains the following data:

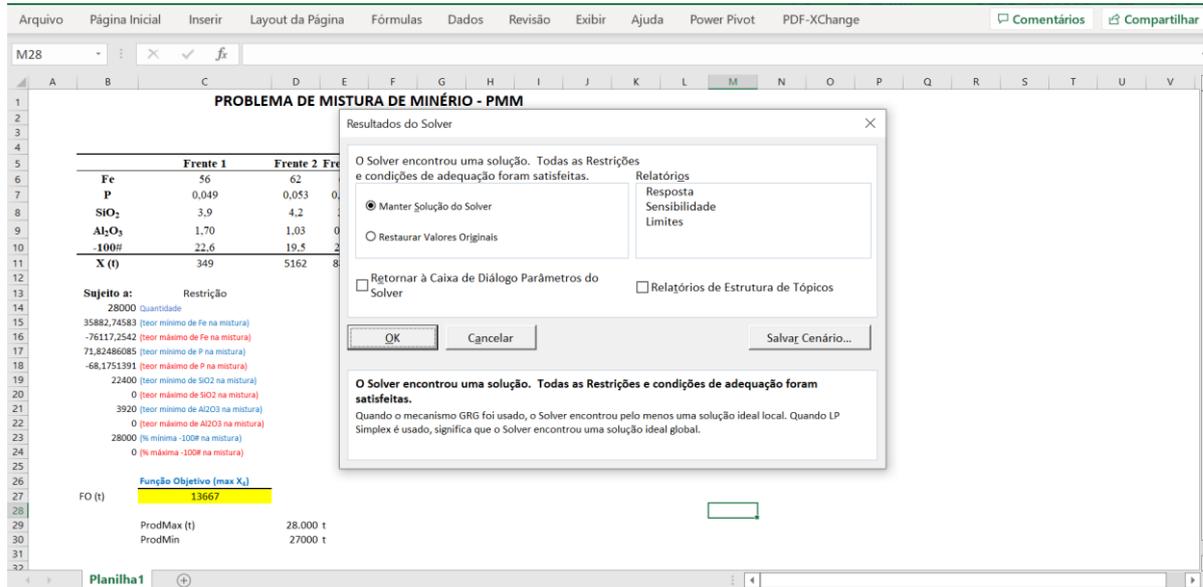
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6
Fe	56	62	64	43	51	49
P	0,049	0,053	0,048	0,037	0,042	0,041
SiO ₂	3,9	4,2	3,8	5,9	7,3	6,4
Al ₂ O ₃	1,70	1,03	0,92	1,76	0,82	1,55
-100#	22,6	19,5	23,9	25,8	19,3	21,4
X (t)	0	0	0	0	0	0

The Solver Parameters dialog box is configured as follows:

- Definir Objetivo:** \$C\$27 (Função Objetivo)
- Para:** Máx. Míd. Valor de: 0
- Alterando Células Variáveis:** \$X\$ (Variável de decisão)
- Sujeito às Restrições:**
 - \$B\$14 <= \$D\$29
 - \$B\$14 >= \$D\$30
 - \$B\$15 >= 0
 - \$B\$16 <= 0
- Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas
- Selecionar um Método de Solução:** LP Simplex

Após adicionar as demais restrições referentes à qualidade da mistura de minérios, clicou-se no botão Resolver da janela Parâmetros do Solver. Foi encontrada uma solução, chamada solução ótima, conforme mostrado na Figura 5. No entanto, trata-se de uma solução preliminar, pois ela não contempla todas as restrições utilizadas no modelo de otimização.

Figura 5: Resultado preliminar após declaração das restrições de quantidade e qualidade no Solver.



O próximo passo foi adicionar a nova variável de decisão, Y_j , a qual está relacionada ao número de frentes de lavra ou número de equipamentos de carga. Juntamente, foram adicionadas as restrições nas quais esta variável foi utilizada conforme mostrado nas Figuras 6 e 7.

Figura 6: Declaração da variável de decisão Y no Solver.

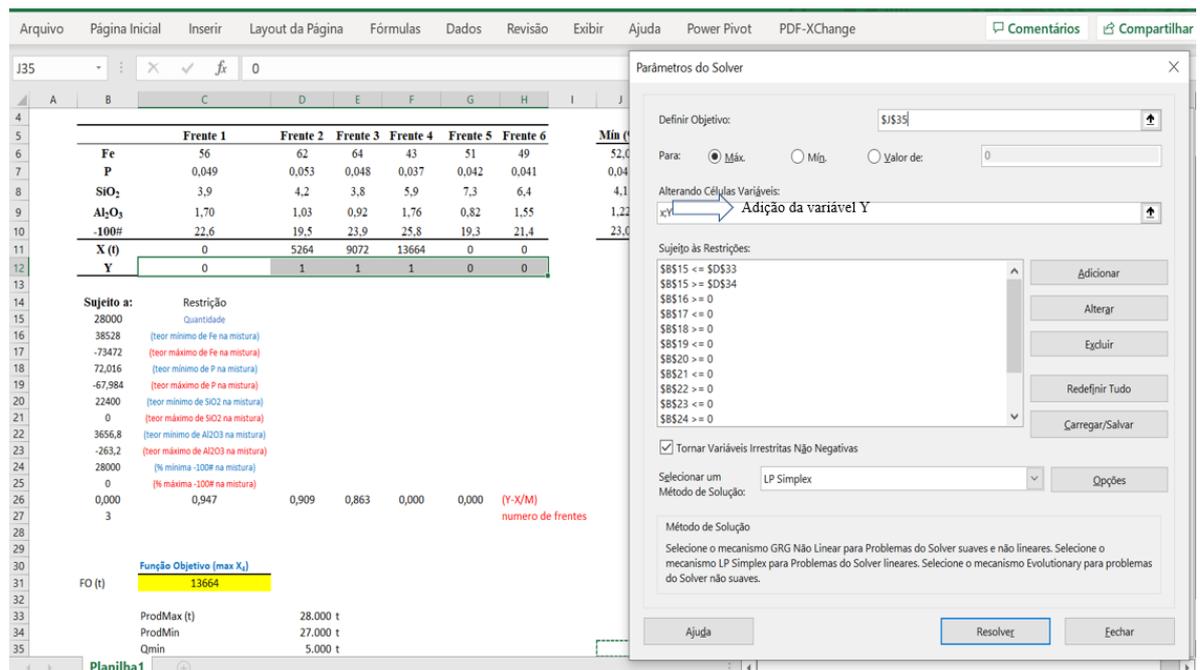


Figura 7: Processo de adição das restrições relacionadas à variável de decisão Y no Solver.

Adicionar Restrição

Referência de Célula: Restrição:

Restrição: $Y_j - \frac{X_j}{M} \geq 0 \quad \forall j \in F$

Adicionar Restrição

Referência de Célula: Restrição:

Restrição: $\sum_{j \in F} Y_j = nFrentes$

Na Figura 8, foram consideradas as quantidades mínima e máxima que devem ser lavradas de cada frente. Essa é uma situação que deve ser considerada para evitar que a quantidade de massa a ser lavrada em uma frente seja muito pequena, pois não seria interessante a alocação do equipamento de carga à frente (ele ficaria muito tempo ocioso). Por outro lado, se a quantidade a ser lavrada uma frente for maior que o limite máximo estabelecido, a capacidade produtiva da escavadeira ou a quantidade disponível de material na frente de lavra poderia ser ultrapassada.

Figura 8: Definição das quantidades mínima e máxima de material a ser lavrado se $Y_j = 1$.

The screenshot shows an Excel Solver interface with the following data and constraints:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T	U
9		Al ₂ O ₃	1,70	1,03	0,92	1,76	0,82	1,55		1,22	1,36	1,26									
10		-100#	22,6	19,5	23,9	25,8	19,3	21,4		23,0	24,0	23,01									
11		X (t)	0	10000	8000	10000	0	0													
12		Y	0	1	1	1	0	0													

Sujeito a: Restrição

- 28000 Quantidade
- 106000 (teor mínimo de Fe na mistura)
- 6000 (teor máximo de Fe na mistura)
- 136 (teor mínimo de P na mistura)
- 4 (teor máximo de P na mistura)
- 16600 (teor mínimo de SiO₂ na mistura)
- 5800 (teor máximo de SiO₂ na mistura)
- 1100 (teor mínimo de Al₂O₃ na mistura)
- 2820 (teor máximo de Al₂O₃ na mistura)
- 200 (% mínima -100# na mistura)
- 27800 (% máxima -100# na mistura)
- 0,000 0,900 0,900 0,000 0,000 (Y-X/M) número de frentes
- 3 0 5000 3000 5000 5,502E-11 0 (X-Qmin*Y)
- 29 0 -5,27507E-11 -2000 0 5,502E-11 0 (X-Qmax*Y)

Função Objetivo (max X_j)

FO (t) 10000

ProdMax (t) 28.000 t

ProdMin 27.000 t

Qmin 5.000 t

Qmax 10.000 t

nfrentes 3

M 100.000

The two dialog boxes define constraints for the number of trips (n_kj) based on the material quantity (Y_j):

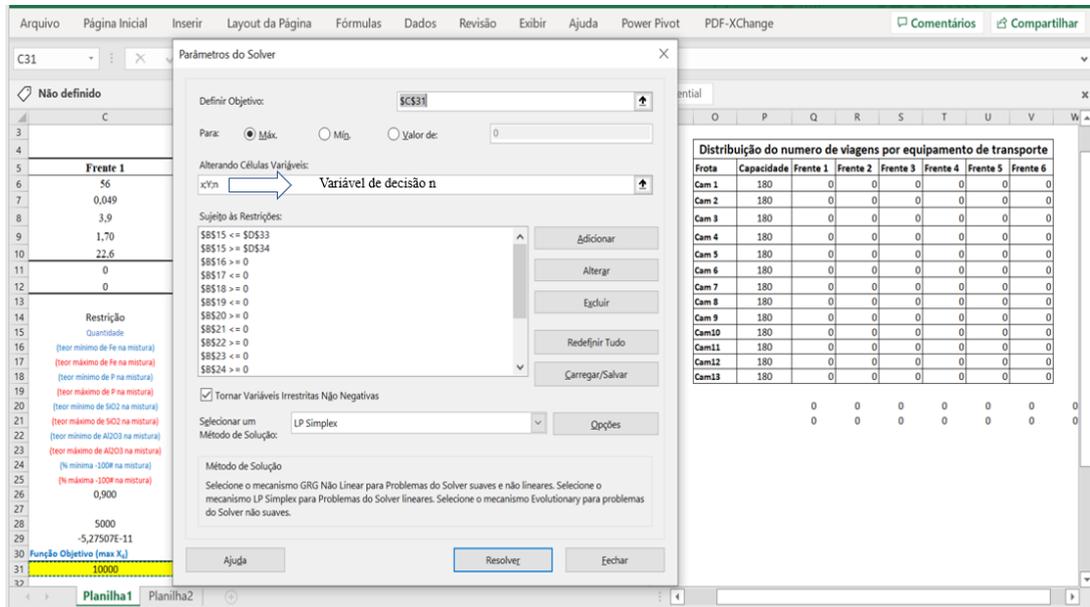
- Top dialog box: $X_j \geq Q_{min_i} \cdot Y_j \quad \forall j \in F$. Reference cell: \$B\$28:\$G\$28. Constraint: >= d.
- Bottom dialog box: $X_j \leq Q_{max_i} \cdot Y_j \quad \forall j \in F$. Reference cell: \$B\$29:\$G\$29. Constraint: <= d.

A variável de decisão n_{kj} , que remete ao número de viagens do caminhão k na frente de lavra j , é responsável por criar um ambiente de distribuição de viagens do caminhão por frente de lavra, visando o atendimento das metas de produção e parâmetros de qualidade da mistura propostas. Durante o desenvolvimento do modelo para o dimensionamento das frotas de equipamento de carga e transporte, verificaram-se limitações (relacionadas a tempo de processamento) na determinação da solução ótima.

Após avaliar as possíveis causas da solução ótima não ter sido encontrada em um tempo de processamento não muito elevado (menor que 1 minuto), confirmou-se que esta demora estava relacionada à declaração do número de viagens como sendo variáveis inteiras. Para contornar isso, utilizou-se valores de n como números reais não negativos com posterior arredondamento dos valores encontrados. Ressalta-se que a influência deste procedimento na qualidade das soluções encontradas pelo Solver foi avaliada e verificou-se, especificamente para os cenários utilizados neste estudo, não haver comprometimentos operacionais (em termos de produção e qualidade) relevantes.

A declaração da variável de decisão n no Solver é apresentada na Figura 9.

Figura 9: Declaração da variável de decisão n no solver.

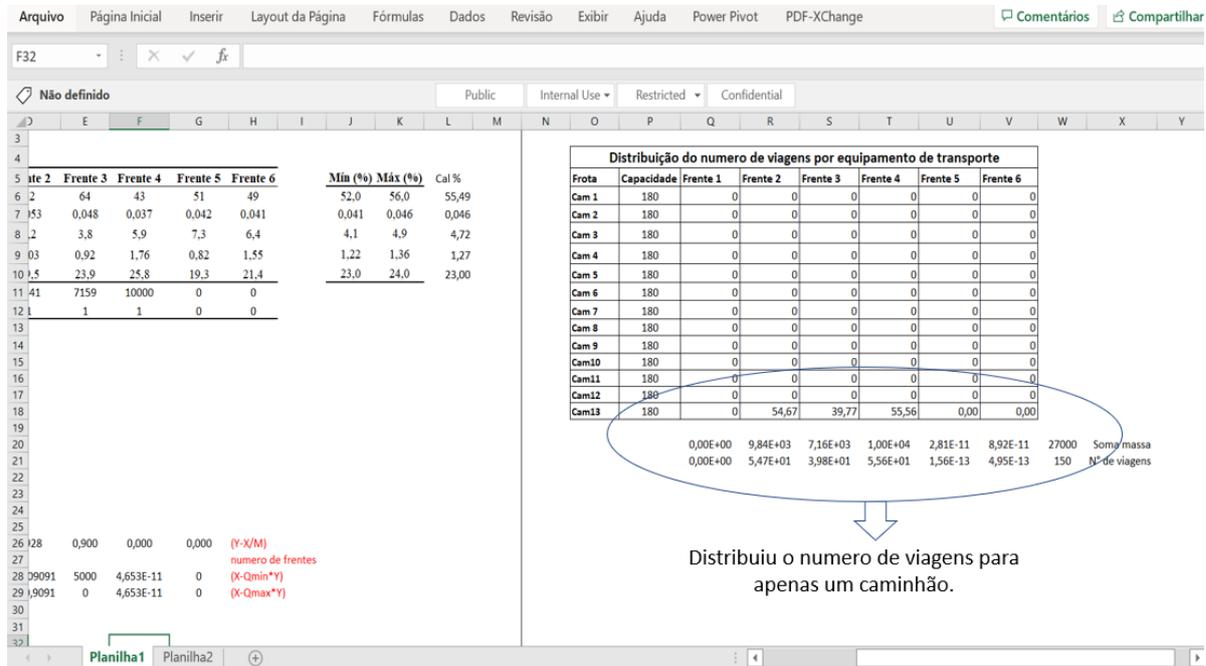


Após a declaração da variável de decisão n_{kj} , foi necessário definir a primeira restrição relacionada ao número de viagens dos caminhões. Nessa restrição, tem-se que a soma do produto entre o número de viagens à frente j pela capacidade do caminhão k deve ser igual à produção da frente X_j , ou seja:

$$\sum_{k \in C} n_{kj} \cdot \text{capacidade}_k = X_j \quad \forall j \in F$$

No entanto, por se tratar da primeira restrição relacionada ao número de viagens por caminhão, o solver direcionou todas as viagens para um único caminhão, conforme apresentado na Figura 10.

Figura 10: Número de viagens do caminhão k por frente de lavra.



Para contornar o cenário mostrado na Figura 10 e tornar o modelo mais próximo da realidade da mineração, inseriu-se a variável de decisão Z , o que também possibilitou o incremento de restrições relacionadas a tempo de ciclo e horas efetivamente trabalhadas.

O tempo efetivo de trabalho dos caminhões corresponde a 430 min e foi calculado, a partir das variáveis operacionais de transporte descrita na Tabela 3, como segue:

$$\text{Hora efetiva} = \text{Horas por turno} \times \text{Fator de eficiência} \times \text{Fator de operação conjugada} \times UF$$

Sendo a definição dos parâmetros:

Horas por turno = 12h

Fator de eficiência = 83%

Fator de operação conjugada = 90%

UF (Utilização Física) = 80%

Nesse sentido, um caminhão pode trabalhar no máximo 430 min por turno de trabalho. Assim como o Q_{\min} e o Q_{\max} , nesse momento foi necessário estipular um tempo mínimo de

operação para um caminhão caso ele fique em operação. Caso contrário, poder-se-ia ter equipamento de transporte sendo utilizado desnecessariamente para realizar, por exemplo, apenas uma ou duas viagens no turno de trabalho de 12h.

A Figura 11 apresenta a declaração da variável de decisão Z e as restrições de tempo máximo e mínimo de operação do caminhão k (quando operacional) são mostradas na Figura 12.

Figura 11: Declaração da variável de decisão Z no Solver.

Parâmetros do Solver

Definir Objetivo:

Para: Máx. Mín. Valor de:

Alterando Células Variáveis: →

Sujeito às Restrições:

- Z = binário
- $\$X\$6:\$X\$18 \leq \$E\39
- $\$Z\$6:\$Z\$18 \geq 0$
- Y = binário
- $\$B\$18 \geq 0$
- $\$B\$15 \leq \$D\33
- $\$B\$27 = n\text{Frentes}$
- $\$B\$19 \leq 0$
- $\$B\$28:\$G\$28 \geq 0$
- $\$B\$22 \geq 0$
- $\$B\$29:\$G\$29 \leq 0$

Tornar Variáveis Irrestritas Não Negativas

Selecionar um Método de Solução:

Método de Solução

Selecione o mecanismo GRG Não Linear para Problemas do Solver suaves e não lineares. Selecione o mecanismo LP Simplex para Problemas do Solver lineares. Selecione o mecanismo Evolutionary para problemas do Solver não suaves.

Ajuda Resolver Fechar

Figura 12: Tempo mínimo e máximo de operação do caminhão k quando utilizado.

Alterar Restrição

Referência de Célula: <= > Restrição:

OK Adicionar Cancelar

$\Rightarrow TT_k \leq TE_k \cdot Z_k \quad \forall k \in C$

Alterar Restrição

Referência de Célula: >= > Restrição:

OK Adicionar Cancelar

$\Rightarrow TT_k \geq T_{min_k} \cdot Z_k \quad \forall k \in C$

Ao resolver o modelo, foram encontradas limitações (com relação ao tempo de processamento) para encontrar a solução ótima quando o número de viagens dos caminhões foi declarado como variáveis inteiras, como era esperado. Para isso, utilizaram-se os valores de n como números reais não negativos e foi criada uma tabela que realiza o arredondamento dos valores de n para números inteiros.

As Figuras 13 e 14 mostram este procedimento.

Figura 13: Distribuição do número de viagens por equipamento de transporte (sem arredondamento).

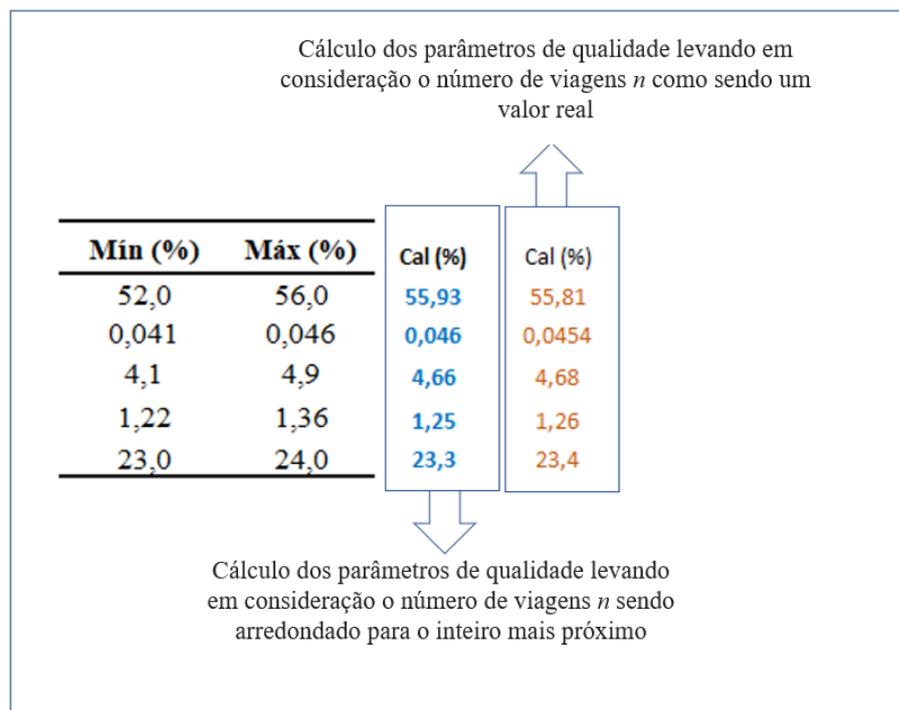
	cap (t)	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	
Cam 1	180	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cam 2	180	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cam 3	180	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cam 4	180	0,00	3,47	0,00	18,81	0,00	0,00	
Cam 5	180	0,00	20,49	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cam 6	180	0,00	0,00	17,93	0,00	0,00	0,00	
Cam 7	180	0,00	0,00	0,00	22,65	0,00	0,00	
Cam 8	180	0,00	20,49	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cam 9	180	0,00	0,00	14,19	0,00	0,00	0,00	
Cam10	180	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Cam11	180	0,00	0,00	6,77	14,09	0,00	0,00	
Cam12	180	0,00	0,00	8,33	0,00	0,00	0,00	
Cam13	180	0,00	0,00	8,33	0,00	0,00	0,00	
		0	8,000	10,000	10,000	0	0	28.000 Soma massa
		0,00	44,44	55,56	55,56	0,00	0,00	156 N° de viagens

Figura 14: Distribuição do número de viagens por equipamento de transporte (com arredondamento).

Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6		
	3		19				
	20						
		18					
			23				
	20						
		14					
		7	14				
		8					
		8					
0	7.740	9.900	10.080	0	0	27.720	soma massa
0	43	55	56	0	0	154	N° viagens

Em seguida, foi realizado o cálculo dos parâmetros de qualidade com base, primeiramente, na massa por frente de lavra encontrada no Problema de Mistura de Minérios utilizando n e, posteriormente, os parâmetros de controle da qualidade da mistura foram calculados levando em consideração a massa por frente de lavra com a utilização do número de viagens dos caminhões sendo arredondados. A Figura 15 apresenta ambas as situações.

Figura 15: Cálculo dos parâmetros de qualidade



O mesmo processo de implementação do modelo de otimização foi realizado para o cenário definido por 4 escavadeiras e 10 caminhões. Os resultados de ambos os cenários são apresentados no Capítulo 5.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, está apresentado a análise e a discussão acerca dos resultados obtidos neste trabalho.

5.1. Resultados obtidos com o modelo de otimização considerando 3 escavadeiras e 13 caminhões.

Nas Figuras 16 e 17 são apresentados os resultados obtidos com a implementação do modelo de otimização para o Cenário 1 (3 escavadeiras e 13 caminhões).

Figura 16: Resultados obtidos com a implementação do modelo de otimização para o Cenário 1 (3 escavadeiras e 13 caminhões) - Parte 1.

PROBLEMA DE MISTURA DE MINÉRIO - PMM										
	Frete 1	Frete 2	Frete 3	Frete 4	Frete 5	Frete 6	Min (%)	Máx (%)	Cal (%)	Cal (%)
Fe	56	62	64	43	51	49	52,0	56,0	55,93	55,81
P	0,049	0,053	0,048	0,037	0,042	0,041	0,041	0,046	0,046	0,0454
SiO ₂	3,9	4,2	3,8	5,9	7,3	6,4	4,1	4,9	4,66	4,68
Al ₂ O ₃	1,70	1,03	0,92	1,76	0,82	1,55	1,22	1,36	1,25	1,26
-100#	22,6	19,5	23,9	25,8	19,3	21,4	23,0	24,0	23,3	23,4
X (t)	0	9841	7159	10000	0	0				
Y	0	1	1	1	0	0				

Sujeito a:	Restrição								
27000,00	Quantidade								
94318,18	(teor mínimo de Fe na mistura)								
-13681,82	(teor máximo de Fe na mistura)								
128,20	(teor mínimo de P na mistura)								
-6,80	(teor máximo de P na mistura)								
16836,36	(teor mínimo de SiO ₂ na mistura)								
-4763,64	(teor máximo de SiO ₂ na mistura)								
1382,50	(teor mínimo de Al ₂ O ₃ na mistura)								
-2397,50	(teor máximo de Al ₂ O ₃ na mistura)								
0,00	(% mínima -100# na mistura)								
-27000,00	(% máxima -100# na mistura)								
0,000	0,902	0,928	0,900	0,000	0,000	(Y-X/M)			
3						numero de frentes			
0	4840,909091	2159,09091	5000	0	5,174E-10	(X-Qmin*Y)			
0	-159,0909091	-2840,9091	2,7E-11	0	5,174E-10	(X-Qmax*Y)			
Função Objetivo (max X₄)									
FO (t)	10000								
ProdMax (t)		28.000 t							
ProdMin		27.000 t							
Qmin		5.000 t							
Qmax		10.000 t							
nfrentes		3							
M		100.000							
Horas efetiva (turno 12hrs)		7,1712	430,272 min						
Tempo mínimo de operação do caminhão K		200 min							

Figura 17: Resultados obtidos com a implementação do modelo de otimização para o Cenário 1 (3 escavadeiras e 13 caminhões) - Parte 2.

	cap (t)	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	Z	Tempo de trabalho (Z - tempo trabalho/M)		
Cam 1	180	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,000	0,000
Cam 2	180	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,000	0,000
Cam 3	180	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,000	0,000
Cam 4	180	0,00	3,47	0,00	18,81	0,00	0,00	1	430	0,996	230,272
Cam 5	180	0,00	20,49	0,00	0,00	0,00	0,00	1	430	0,996	230,272
Cam 6	180	0,00	0,00	17,93	0,00	0,00	0,00	1	430	0,996	230,272
Cam 7	180	0,00	0,00	0,00	22,65	0,00	0,00	1	430	0,996	230,272
Cam 8	180	0,00	20,49	0,00	0,00	0,00	0,00	1	430	0,996	230,272
Cam 9	180	0,00	0,00	14,19	0,00	0,00	0,00	1	341	0,997	140,590
Cam10	180	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,000	0,000
Cam11	180	0,00	0,00	6,77	14,09	0,00	0,00	1	430	0,996	230,272
Cam12	180	0,00	0,00	8,33	0,00	0,00	0,00	1	200	0,998	0,000
Cam13	180	0,00	0,00	8,33	0,00	0,00	0,00	1	200	0,998	0,000
		0	8.000	10.000	10.000	0	0	28.000	Soma massa		
		0,00	44,44	55,56	55,56	0,00	0,00	156	Nº de viagens		
		0	7.740	9.900	10.080	0	0	27.720			

Tempo de Ciclo (min)					
Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6
18	21	24	19	25	20

Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6
	3		19		
	20				
		18			
			23		
	20				
		14			
		7	14		
		8			
		8			
0	7.740	9.900	10.080	0	0
0	43	55	56	0	0
				27.720	soma massa
				154	Nº viagens

Para o primeiro cenário, obtiveram-se os seguintes resultados:

- Máximo aproveitamento da Frente 4 (10.000 t).
- Massa lavrada da Frente 2 igual a 8.000 t.
- Massa lavrada da Frente 3 igual a 10.000 t.
- Atendimento dos parâmetros de qualidade da mistura de minério.
- Atendimento da produção por turno de trabalho.
- Utilização de 9 caminhões dos 13 disponíveis na frota.
- Os valores encontrados para os parâmetros de qualidade utilizando a massa obtida pelo arredondamento do número de viagens por caminhão mantiveram-se dentro dos limites mínimo e máximo.
- A solução respeitou as quantidades mínima e máxima de material a ser lavrado por frente de trabalho.
- O mesmo ocorreu para o tempo mínimo de operação de um caminhão quando utilizado.

- O modelo alocou os equipamentos de carga e transporte conforme desejado.
- O modelo apresentou uma diferença de somente duas viagens por turno de trabalho de 12 h entre o número de viagens determinado com variáveis reais (156) e reais com posterior arredondamento para o inteiro mais próximo (154).
- O modelo foi aderente ao intervalo de produção mínima e máxima por turno de trabalho.

5.2. Resultados obtidos com o modelo de otimização considerando 4 escavadeiras e 10 caminhões

Nas Figuras 18 e 19 são apresentados os resultados alcançados com a implementação do modelo de otimização para o Cenário 2 analisado (4 escavadeiras e 10 caminhões).

Figura 18: Resultados obtidos com a implementação do modelo de otimização para o Cenário 2 (4 escavadeiras e 10 caminhões) - Parte 1.

PROBLEMA DA MISTURA DE MINÉRIOS - PMM										
	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	Min (%)	Máx (%)	Cal (%)	Cal (%)
Fe	56	62	64	43	51	49	52,0	56,0	55,2	55,1
P	0,049	0,053	0,048	0,037	0,042	0,041	0,041	0,046	0,04539	0,04536
SiO ₂	3,9	4,2	3,8	5,9	7,3	6,4	4,1	4,9	4,592	4,5981
Al ₂ O ₃	1,70	1,03	0,92	1,76	0,82	1,55	1,22	1,36	1,360	1,3623
-100#	22,6	19,5	23,9	25,8	19,3	21,4	23,0	24,0	23,518	23,525
X (t)	5.000	5.000	8.631	9.369	0	0				
Y	1	1	1	1	0	0				

Sujeito a:	Restrições
28000	
89250	(teor mínimo de Fe na mistura)
-22750	(teor máximo de Fe na mistura)
122,94048	(teor mínimo de P na mistura)
-17,05952	(teor máximo de P na mistura)
13775	(teor mínimo de SiO ₂ na mistura)
-8625	(teor máximo de SiO ₂ na mistura)
3920	(teor mínimo de Al ₂ O ₃ na mistura)
9,786E-09	(teor máximo de Al ₂ O ₃ na mistura)
14501,19	(% mínima -100# na mistura)
-13498,81	(% máxima -100# na mistura)
0,95	0,95 0,91369 0,90631 -1,04967E-11 0 (Y - X/M)
4	Numero de frentes
-9,1E-09	-2,94585E-08 3630,95 4369,05 1,04967E-06 0 (X-Qmin*Y)

Função Objetivo (max X ₄)	
FO (t)	9.369
ProdMax (t)	28000 t
ProdMin	27000 t
Qmin	5000 t
Qmax	10000 t
nfrentes	4
M	100000
Horas efetiv	7,1712 430,272 min
Tempo mini	200 min

Figura 19: Resultados obtidos com a implementação do modelo de otimização para o Cenário 2 (4 escavadeiras e 10 caminhões) - Parte 2.

	cap (t)	Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6	Z	Tempo de trabalho (Z - tempo trabalho/M)		
Cam 1	180	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,000	0,000
Cam 2	180	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	0	0,000	0,000
Cam 3	180	0,00	0,00	0,00	22,65	0,00	0,00	1	430	0,996	230,272
Cam 4	180	0,00	0,00	0,00	22,65	0,00	0,00	1	430	0,996	230,272
Cam 5	180	16,77	0,00	0,00	6,76	0,00	0,00	1	430	0,996	230,272
Cam 6	180	11,01	11,05	0,00	0,00	0,00	0,00	1	430	0,996	230,272
Cam 7	180	0,00	16,72	3,29	0,00	0,00	0,00	1	430	0,996	230,272
Cam 8	180	0,00	0,00	17,93	0,00	0,00	0,00	1	430	0,996	230,272
Cam 9	180	0,00	0,00	17,93	0,00	0,00	0,00	1	430	0,996	230,272
Cam10	180	0,00	0,00	8,80	0,00	0,00	0,00	1	211	0,998	11,178
		5.000	5.000	8.631	9.369	0	0	28.000	Soma massa		
		27,78	27,78	47,95	52,05	0,00	0,00	156	Nº de viagens		
		5.040	5.040	8.640	9.540	0	0	28.260			

Tempo de Ciclo (min)					
Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6
18	21	24	19	25	20

Frente 1	Frente 2	Frente 3	Frente 4	Frente 5	Frente 6
			23		
			23		
17			7		
11	11				
	17	3			
		18			
		18			
		9			
5.040	5.040	8.640	9.540	0	0
28	28	48	53	0	0
				28.260	Soma massa
				157	Nº de viagens

No segundo cenário do modelo de otimização tratado, obteve como resultado os seguintes pontos:

- Máximo aproveitamento da Frente 4 igual a 9.369 t
- Massa lavrada da Frente 1 igual a 5.000 t.
- Massa lavrada da Frente 2 igual a 5.000 t.
- Massa lavrada da Frente 3 igual a 8.631t.
- Atendimento dos parâmetros de qualidade da mistura de minério.
- Atendimento da produção por turno de trabalho.
- Utilização de 8 caminhões dos 10 disponíveis na frota.
- Os valores encontrados para os parâmetros de qualidade utilizando a massa obtida pelo arredondamento do número de viagens por caminhão mantiveram-se dentro dos limites mínimo e máximo.
- A solução respeitou as quantidades mínima e máxima de material a ser lavrado por frente de trabalho.
- O mesmo ocorreu para o tempo mínimo de operação de um caminhão quando utilizado.
- O modelo alocou equipamento de carga e transporte conforme desejado.

- O modelo apresentou uma diferença de somente uma viagem por turno de trabalho de 12 h entre o número de viagens determinado com variáveis reais (156) e reais com posterior arredondamento para o inteiro mais próximo (157).
- O modelo foi aderente ao intervalo de produção mínima e máxima por turno de trabalho.
- Pode-se considerar que a solução encontrada foi aderente a produção máxima por turno de trabalho, mesmo o limite superior sendo ultrapassado em 260 t. Ressalta-se que este resultado foi obtido após o arredondamento dos números reais referentes às viagens dos caminhões e, especificamente neste trabalho, não configura, em termos operacionais, o não atendimento a uma das restrições do modelo de otimização.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho utilizou o Solver do *software* Excel para implementar e resolver o modelo de otimização da frota de carga e transporte levando em considerações as restrições de produção e qualidade especificadas como metas em um plano operacional de lavra. A Pesquisa Operacional forma uma base sólida para definições básicas de projetos de engenharia para otimização de frota. O uso das técnicas de Pesquisa Operacional permitiu a modelagem de diferentes cenários a partir da extração de dados e problemas reais. Verifica-se, entretanto, a carência de referência bibliográfica robustas voltada diretamente ao setor da mineração.

Foi observada certa dificuldade (tempo de execução maior que 1 min) de se encontrar a solução ótima quando a variável relacionada ao número de viagens dos caminhões foi declarada como valor inteiro. Para contornar essa situação, foi avaliada a possibilidade de o número de viagens dos caminhões ser um valor real não negativo para, posteriormente, realizar o arredondamento com zero casa decimal. Sobre os desvios do número de viagens após o seu arredondamento em ambos os cenários, entende-se que, especificamente para os cenários utilizados neste estudo, não haveria comprometimento, em termos operacionais, das metas de produção e de qualidade estabelecidas para os parâmetros de controle.

Para os cenários encontrados pelo modelo para dimensionamento de frotas, as metas de produção e qualidade foram atendidas, sendo que no Cenário 1 haveria 4 caminhões não operacionais e, no Cenário 2, dois caminhões. Esses caminhões, eventualmente, poderiam estar em manutenção preventiva ou corretiva.

Conclui-se que os objetivos da pesquisa foram alcançados, visto que foi implementado e utilizado um modelo de otimização para analisar cenários obtidos com técnicas para dimensionamento de frotas de equipamentos de carregamento e transporte levando em consideração metas de produção e qualidade.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para trabalhos futuros, indicam-se:

- Implementar, utilizando uma linguagem de programação de computadores, o modelo proposto para o dimensionamento de frotas de equipamentos proposto por Mendonça, 2002;
- Utilizar, no modelo de dimensionamento, equipamentos de carga e transporte com capacidades diferentes;
- Utilizar o modelo de otimização proposto nesse trabalho e os resultados encontrados em simuladores de processos;
- Aplicar o modelo apresentado neste trabalho a um cenário real de uma mineradora.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANDRADE, Q. **Sequenciamento e programação de lavra com alocação de equipamento de carga**. São Paulo, 2014, p 3. Tese (Mestre em Sistemas Lógicos) - Universidade Federal de São Paulo.
- BARBOSA, L. e MAPA, S. **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.
- BARBOSA, M. e ZANARDINI, R. **Iniciação à pesquisa operacional no ambiente de gestão**. 3° ed., Curitiba: Intersaberes, 2015, p. 26.
- BEZERRA, C. **Técnicas de planejamento, programação e controle da produção e introdução a programação linear**. Curitiba: Intersaberes, 2014, p. 189.
- FOGLIATTO, F. **Pesquisa Operacional**.167. (Notas de aula) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre,s.d.
- LISBOA, R. **Influência dos Tempos Fixos na Produtividade da Frota de Transporte**. 128. (Pós-graduação em Engenharia de Minas) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2019.
- MENDONÇA, R. J. de. **Compatibilização e dimensionamento da frota de equipamentos de lavra em operação conjugada**. II Congresso Brasileiro de Mineração, 2002, pp. 447-459.
- MILAGRES, J. **Novo paradigma para o problema de mistura de minérios**. 2019.128. Bacharel em Engenharia de Produção - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.
- NETO, J. **Pesquisa Operacional**. Curitiba: Contentus, 2020, pp.7-9.
- QUINTÃO, A. **Sequenciamento e programação de lavra com alocação de equipamentos de carga**. 2014.121. Mestrado em Engenharia de Sistemas Lógicos - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- SABRAPO. Documento eletrônico. Disponível em <<http://www.din.uem.br/sbpo/sbpo2017/>> Acesso em 28 outubro 2022.

SILVA, V. **Pesquisa Operacional e o Apoio à Decisão: Um Estudo de Caso em uma Pequena Empresa de Brigadeiros de Uberlândia - MG.** 2017.07. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2017.

RODRIGUES, L *et al.* **Pesquisa Operacional – Programação linear.** Unisinos: Vele do Rio dos Sinos, 2014, p.7.

TAHA, H. A. **Pesquisa Operacional.** Pearson: São Paulo, 8^a ed., 2008, p.4.