



UFOP

Universidade Federal
de Ouro Preto

**Universidade Federal de Ouro Preto
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas
Departamento de Computação e Sistemas**

**Otimização na Logística de
Deslocamento e na Produtividade dos
Colaboradores da Equipe de Limpeza
na Mina Cauê em Itabira**

Celso Henrique Assis Silva

**TRABALHO DE
CONCLUSÃO DE CURSO**

ORIENTAÇÃO:

George Henrique Godim da Fonseca

COORIENTAÇÃO:

Samuel Souza Brito

**Fevereiro, 2024
João Monlevade–MG**

Celso Henrique Assis Silva

**Otimização na Logística de Deslocamento e na
Produtividade dos Colaboradores da Equipe de
Limpeza na Mina Cauê em Itabira**

Orientador: George Henrique Godim da Fonseca

Coorientador: Samuel Souza Brito

Monografia apresentada ao curso de Sistemas de Informação do Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas, da Universidade Federal de Ouro Preto, como requisito parcial para aprovação na Disciplina “Trabalho de Conclusão de Curso II”.

Universidade Federal de Ouro Preto

João Monlevade

Fevereiro de 2024

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S586o Silva, Celso Henrique Assis.

Otimização da logística de deslocamento e na produtividade dos colaboradores da equipe de limpeza na mina Cauê em Itabira.

[manuscrito] / Celso Henrique Assis Silva. - 2024.

30 f.: il.: color., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. George Henrique Godim da Fonseca.

Coorientador: Prof. Dr. Samuel Souza Brito.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Sistemas de Informação .

1. Programação linear. 2. Otimização de processos. 3. Equipes de trabalho. 4. Produtividade do trabalho. I. Fonseca, George Henrique Godim da. II. Brito, Samuel Souza. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 004.4:658.51

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



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E APLICADAS
DEPARTAMENTO DE COMPUTAÇÃO E SISTEMAS



FOLHA DE APROVAÇÃO

Celso Henrique Assis Silva

Otimização da logística de deslocamento e na produtividade dos colaboradores da equipe de limpeza na mina Cauê em Itabira

Monografia apresentada ao Curso de Sistemas de Informação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Sistemas de Informação

Aprovada em 23 de fevereiro de 2024

Membros da banca

Dr. George Henrique Godim da Fonseca - Orientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Samuel Souza Brito - Coorientador - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Janniele Aparecida Soares Araújo - Universidade Federal de Ouro Preto
Dr. Rafael Frederico Alexandre - Universidade Federal de Ouro Preto

George Henrique Godim da Fonseca, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 19/10/2024



Documento assinado eletronicamente por **George Henrique Godim da Fonseca, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/10/2024, às 12:28, 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 **0797906** e o código CRC **656D15EE**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.012963/2024-29

SEI nº 0797906

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: (31)3808-0819 - www.ufop.br

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus por me permitir concluir este trabalho, depois de tantas dificuldades e provações que tive no caminho, sem nunca ter pensado em desistir, agradeço a todas as pessoas que estiveram ao meu lado durante essa jornada. À minha família, pelo amor incondicional, apoio, promessas, novenas e incentivo em todos os momentos. A minha namorada Fernanda por todo apoio, penitências, companheirismo e dedicação em prol da conclusão deste sonho tão desejado. Aos meus orientadores George e Samuel, por compartilharem seus conhecimentos, pela paciência e principalmente por serem seres humanos incríveis, abrindo mão muitas vezes do seu período de descanso com a família para me auxiliar e guiar na conclusão deste trabalho que foi mais longo do que deveria.

Esta conquista não seria possível sem o suporte de cada um de vocês. Que este trabalho seja um reflexo do meu empenho e gratidão por tudo o que fizeram por mim. Dedico também a todos que buscam o conhecimento e a melhoria constante, pois são esses ideais que nos movem para a frente.

Obrigado, de coração. Valeu Chico, tô formando!!!

"Porque para Deus nada é impossível." (Lucas 1:37)

Resumo

O presente trabalho tem como objetivo principal diminuir o tempo de deslocamento dos colaboradores da equipe de limpeza predial da mina Cauê em Itabira-MG. Com isso, foi desenvolvido um modelo matemático de Programação Linear Inteira visando tornar a alocação dos colaboradores mais eficiente, evitando desperdício de tempo com deslocamento e aumentando a produtividade operacional da equipe. O modelo matemático utilizou o cronograma de limpeza, com dados reais dos prédios e suas respectivas distâncias. Os resultados indicam uma alocação mais eficiente, tornando possível o cumprimento de todo o cronograma de limpeza predial.

Palavras-chaves: Programação Linear Inteira. Alocação de equipe de trabalho. Otimização.

Abstract

The main objective of this work is to reduce the displacement time of employees in the building cleaning team at the Cauê mine in Itabira-MG. Thereby, an Integer Linear Programming mathematical model was developed in order to make employee allocation more efficient, avoiding the waste of displacement time and increasing the team's operational productivity. The mathematical model used the cleaning schedule, with real data from the buildings and their respective distances. The results indicate a more efficient allocation, making it possible to fulfill the entire building cleaning schedule.

Key-words: Integer Linear Programming. Work team allocation. Optimization.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Prédios da Mina Cauê	20
Figura 2 – Matriz 5x5 representando a distância entre os prédios da Mina Cauê . .	21
Figura 3 – Três áreas do cronograma	21
Figura 4 – Colaboradores disponíveis na “Seg” e “Ter” e os turno de trabalho . . .	22
Figura 5 – Carga Horária do colaborador por dia e turno de trabalho	22

Lista de abreviaturas e siglas

PL Programação Linear

PLI Programação Linear Inteira

PO Pesquisa Operacional

Sumário

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Problema	12
1.2	Objetivos	12
1.3	Justificativa	12
1.4	Organização do trabalho	13
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
2.1	Pesquisa Operacional	14
2.2	Programação Linear	15
2.3	Programação Linear Inteira	15
2.4	Problema de Alocação de Equipes de Trabalho	17
2.5	<i>Solver</i> Gurobi	18
2.6	Trabalhos Correlatos	18
3	DESENVOLVIMENTO	20
3.1	A Empresa	20
3.2	Coleta dos dados	21
3.3	Modelo Matemático Proposto	23
3.3.1	Conjuntos e parâmetros	23
3.3.2	Variáveis de decisão	23
3.3.3	Função objetivo	24
3.3.4	Restrições	24
4	EXPERIMENTOS COMPUTACIONAIS	25
4.1	Configurações	25
4.2	Resultados	25
5	CONCLUSÃO	27
	REFERÊNCIAS	28

1 Introdução

A mineração é uma das atividades mais importantes para o desenvolvimento econômico de um país, mas também apresenta diversos desafios relacionados à eficiência e segurança operacional. Nesse sentido, a logística de deslocamento das equipes de limpeza, que atuam em ambientes exigentes e complexos, desempenha um papel crucial no funcionamento da mina, que apresenta um grande número de prédios onde a distância entre eles não é negligenciável.

A Programação Linear (PL) é uma metodologia matemática poderosa e amplamente aplicada na resolução de problemas complexos de otimização. Essa abordagem é particularmente útil em contextos onde é necessário maximizar ou minimizar uma função linear, sujeita a um conjunto de restrições lineares (DANTZIG, 1963). A aplicação da programação linear transcende diversos campos, desde a logística e planejamento de produção até o gerenciamento de recursos e a tomada de decisões estratégicas em ambientes empresariais e industriais (HILLIER; LIEBERMAN, 2001).

No contexto da indústria de mineração, a eficiência operacional e a segurança são de suma importância. A logística de deslocamento, em particular, é um aspecto crítico que afeta diretamente a produtividade. A PL oferece uma estrutura robusta para modelar e resolver problemas de otimização relacionados ao deslocamento e à alocação de recursos, permitindo a implementação de soluções que podem significativamente melhorar a operacionalidade e a segurança nas minas (COFFMAN; LEUNG, 1996).

A aplicabilidade da PL na otimização da logística de deslocamento é evidenciada pela capacidade de modelar de forma eficiente as complexidades inerentes aos ambientes de mineração, como a distribuição de tarefas, a alocação de equipes e a minimização dos tempos e custos de deslocamento. Essa metodologia permite a criação de modelos que refletem as realidades operacionais das minas, facilitando a identificação de soluções ótimas para a distribuição e alocação de tarefas dentro de restrições operacionais específicas (TAHA, 2007).

Além disso, os colaboradores que integram a equipe de limpeza desempenham um papel fundamental na manutenção da higiene e segurança nas instalações da mina. Suas atividades envolvem a limpeza de áreas críticas, o que requer atenção aos detalhes e rigor nos procedimentos. Para que esses profissionais possam desempenhar suas funções de maneira eficaz, é necessário que sejam oferecidas condições adequadas de trabalho. Neste trabalho, exploraremos como a programação linear pode ser aplicada para melhorar a logística.

1.1 Problema

A Mina Cauê, localizada em Itabira, enfrenta desafios significativos relacionados à logística de deslocamento e à produtividade das colaboradoras da equipe de limpeza. Esses desafios podem impactar negativamente a eficiência operacional, gerando consequências para a qualidade do trabalho desenvolvido na mina.

Diante dos desafios identificados na logística de deslocamento e na produtividade das colaboradoras da equipe de limpeza na Mina Cauê, em Itabira, a questão problema que orienta este trabalho é: "Como implementar melhorias na logística de deslocamento e na produtividade das colaboradoras da equipe de limpeza, visando aumentar a eficiência operacional e o bem-estar das profissionais na Mina Cauê?"

1.2 Objetivos

O objetivo geral do presente trabalho consiste em otimizar o deslocamento da equipe de limpeza predial da Mina Cauê em Itabira. Para atingir ao objetivo geral, o presente trabalho considerou os seguintes objetivos específicos:

- Realizar o levantamento da periodicidade de limpeza e sujidade de cada ambiente;
- Verificar o efetivo disponível e a distribuição por turno;
- Medir cada área e realizar uma distribuição paritária;
- Quantificar a distância percorrida por cada oficial de limpeza;
- Criar um cronograma de limpeza embasado nos dados levantados acima e propor soluções e recomendações concretas para aprimorar a logística de deslocamento das colaboradoras dentro da mina;
- Melhorar a alocação das colaboradoras;
- Aumentar a eficiência operacional e satisfação das profissionais da equipe de limpeza;
- Propor e implementar um modelo de PL e validar os resultados obtidos..

1.3 Justificativa

A indústria de mineração é um dos pilares fundamentais para o desenvolvimento econômico e social de um país, representando um setor estratégico que demanda alta eficiência e produtividade. Nesse contexto, a logística de deslocamento e a produtividade

dos colaboradores da equipe de limpeza desempenham um papel crítico no funcionamento seguro e eficaz da Mina Cauê em Itabira.

A logística de deslocamento refere-se à movimentação dos colaboradores entre diferentes pontos da mina para realizar as atividades de limpeza. Investigações revelam que uma logística de deslocamento bem planejada pode impactar positivamente a produtividade da equipe e otimizar a utilização do tempo disponível. Além disso, as condições de trabalho oferecidas à equipe de limpeza exercem influência direta na motivação, bem-estar e desempenho dos colaboradores. Um ambiente laboral propício à realização das tarefas da equipe de limpeza pode contribuir para a prevenção de acidentes, redução do absenteísmo e aumento da qualidade do trabalho executado.

A relevância deste estudo reside no fato de que a Mina Cauê enfrenta desafios específicos na logística de deslocamento e produtividade da equipe de limpeza, e uma análise criteriosa dessas questões pode trazer benefícios significativos à operação da mina. Ao propor melhorias nessas áreas, a empresa pode alcançar ganhos consideráveis em termos de eficiência, segurança, satisfação dos colaboradores e redução de custos operacionais. É importante destacar que o tema da melhoria na logística de deslocamento e produtividade dos colaboradores na indústria de mineração ainda apresenta lacunas em termos de pesquisas e práticas consolidadas. Portanto, o presente trabalho se torna relevante também como contribuição ao conhecimento científico e ao campo de gestão de operações, fornecendo diretrizes para aprimorar o desempenho da equipe de limpeza na Mina Cauê e potencialmente servindo de referência para outras empresas do setor.

1.4 Organização do trabalho

Este trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2, será apresentada a revisão bibliográfica, abordando conceitos e estudos relevantes sobre logística de deslocamento e produtividade na indústria de mineração. No Capítulo 3, será abordado o desenvolvimento deste trabalho. O Capítulo 4 apresentará as configurações necessárias e os resultados obtidos. Por fim, no Capítulo 5, serão discutidas as conclusões do estudo e suas contribuições.

2 Revisão bibliográfica

Nessa seção serão apresentados conceitos que suportam o embasamento teórico para fundamentar esta pesquisa. Os temas envolvem conceitos e descrições acerca de [PO](#), [PL](#) e [PLI](#), problemas de alocação de equipes de trabalho, o *Solver* Gurobi, além dos trabalhos correlatos a essa pesquisa.

2.1 Pesquisa Operacional

A Pesquisa Operacional ([PO](#)) é uma área de conhecimento interdisciplinar que se dedica ao desenvolvimento e aplicação de métodos quantitativos para a resolução de problemas complexos relacionados a processos de decisão em organizações e sistemas. Seu objetivo é otimizar o desempenho de sistemas e processos, buscando soluções eficientes e eficazes para problemas envolvendo a alocação de recursos, planejamento, programação, controle, entre outros.

De acordo com [Andrade \(2015\)](#), a [PO](#) é uma área que surgiu durante a Segunda Guerra Mundial, sendo aplicada inicialmente em contextos militares para auxiliar em estratégias e tomada de decisões. Com o tempo, seus métodos e técnicas foram expandidos para resolver problemas em diversas áreas como estratégia, finanças, logística, produção, marketing e vendas ([COLIN, 2019](#)).

Segundo [Arenales et al. \(2007\)](#), a Pesquisa Operacional se baseia em modelos matemáticos e algoritmos para a resolução de problemas reais. Esses modelos matemáticos representam a estrutura dos sistemas estudados, enquanto os algoritmos são utilizados para encontrar soluções ótimas ou aproximadas para esses modelos. Dessa forma, a [PO](#) se torna uma poderosa ferramenta para a tomada de decisões em contextos complexos e incertos.

A aplicação da [PO](#) é ampla e diversificada. [Marins \(2011\)](#) destaca que ela pode ser utilizada em problemas de otimização de processos produtivos, como o planejamento da produção e a programação de máquinas e equipes de trabalho. Em cenários de tomada de decisões estratégicas e táticas, a [PO](#) desempenha um papel crucial. [Andrade \(2015\)](#) aponta que a [PO](#) auxilia na definição de políticas e estratégias organizacionais, por meio da análise de cenários alternativos e da identificação de riscos e oportunidades.

Um dos principais conceitos da [PO](#) é a busca pela solução ótima, ou seja, o melhor resultado possível para um determinado problema, considerando todas as restrições e limitações envolvidas ([ARENALES et al., 2007](#)). No entanto, em muitos casos, encontrar a solução ótima pode ser inviável em termos de tempo computacional. Por isso, é comum

recorrer a métodos heurísticos e algoritmos de aproximação para obter soluções satisfatórias em tempo hábil (COLIN, 2019).

2.2 Programação Linear

A PL é uma das principais técnicas da PO, utilizada para resolver problemas de otimização em que se busca encontrar a melhor solução possível para um determinado conjunto de restrições lineares e uma função objetivo linear. Seu desenvolvimento e aplicação têm se mostrado valiosos em diversas áreas, desde a indústria até a gestão de recursos.

Segundo Ahlert et al. (2014), a PL tem suas origens no trabalho pioneiro de George Dantzig na década de 1940, durante a Segunda Guerra Mundial. Dantzig propôs a formulação matemática de problemas de otimização com restrições lineares e função objetivo também linear, o que permitiu o desenvolvimento do método Simplex, um dos principais algoritmos para resolver esse tipo de problema.

A PL é especialmente útil em situações em que os recursos são escassos e é necessário tomar decisões sobre a alocação ótima de tais recursos. Belfiore e Fávero (2013) destacam que a Programação Linear é amplamente empregada em problemas de planejamento de produção, logística, distribuição, escalonamento de atividades, alocação de recursos financeiros, entre outros.

A formulação de um problema de PL envolve a definição de uma função objetivo a ser maximizada ou minimizada e um conjunto de restrições lineares que limitam as decisões a serem tomadas. Essa formulação é expressa matematicamente por meio de variáveis de decisão e coeficientes, representando as contribuições de cada variável para a função objetiva e para as restrições, respectivamente (BELFIORE; FÁVERO, 2013).

Além do método Simplex, existem outras abordagens para resolver problemas de PL, como o método das duas fases, o método de pontos interiores e a PLI (BELFIORE; FÁVERO, 2013). Cada método tem suas características próprias e pode ser mais adequado dependendo das características específicas do problema em questão.

2.3 Programação Linear Inteira

A Programação Linear Inteira (PLI) é uma técnica de otimização que expande os conceitos da programação linear para incluir restrições de integralidade nas variáveis de decisão. Isso significa que as variáveis em um modelo de PLI são restritas a assumir apenas valores inteiros, o que é particularmente útil em situações de tomada de decisão onde as soluções fracionárias não são práticas ou viáveis, como na alocação de recursos, agendamento de tarefas, e problemas de roteirização (WOLSEY, 1998).

O problema em questão se enquadra no domínio da **PLI**, onde buscamos otimizar uma função linear sujeita a um conjunto de restrições lineares, com a condição adicional de que as variáveis de decisão devem ser restritas a valores inteiros. Este modelo específico que estamos analisando é apenas um exemplo de **Wolsey (1998)** dentro deste vasto campo da otimização combinatória.

Minimizar $2x_1 + 3x_2$ sujeito a:

$$x_1 + x_2 \geq 5 \quad (2.1)$$

$$2x_1 - x_2 \leq 4 \quad (2.2)$$

$$x_1, x_2 \geq 0 \quad (2.3)$$

$$x_1, x_2 \text{ são inteiros} \quad (2.4)$$

Em essência, estamos tentando encontrar os valores de x_1 e x_2 que minimizam a função objetivo, obedecendo às restrições fornecidas.

A **PLI** é fundamental em diversos campos de aplicação, desde logística e planejamento de produção até finanças e gerenciamento de projetos, devido à sua capacidade de modelar uma ampla gama de problemas de decisão discreta. Por exemplo, na indústria de mineração, a **PLI** pode ser usada para determinar o número ótimo de veículos necessários para o transporte de materiais, garantindo que apenas números inteiros de veículos sejam considerados (**NEMHAUSER; WOLSEY, 1988**).

Um dos principais desafios da **PLI** é a complexidade computacional associada à busca de soluções ótimas, especialmente para problemas de grande escala. Isso ocorre porque, ao contrário da programação linear, onde a solução ótima reside em um vértice do poliedro de soluções factíveis, a **PLI** requer uma exploração mais abrangente do espaço de soluções, frequentemente recorrendo a métodos de enumeração, como o branch-and-bound e técnicas de relaxação para encontrar a solução ótima (**HILLIER; LIEBERMAN, 2001**).

Apesar desses desafios, avanços significativos foram feitos no desenvolvimento de algoritmos eficientes para resolver problemas de **PLI**. Solvers modernos, como o Gurobi¹ e o CPLEX², utilizam uma combinação de técnicas de pré-processamento, heurísticas e métodos de corte para melhorar a eficiência e a velocidade na resolução de problemas de **PLI**, tornando-os viáveis para uma ampla gama de aplicações práticas (**Gurobi Optimization, LLC, 2019**).

A **PLI** desempenha um papel crucial na pesquisa operacional e na ciência da decisão, oferecendo uma ferramenta poderosa para modelar e resolver problemas de otimização discreta. Sua aplicabilidade a problemas do mundo real, onde as soluções devem ser

¹ <<https://www.gurobi.com>>

² <<https://www.ibm.com/analytics/cplex-optimizer>>

expressas em termos de quantidades inteiras, faz da **PLI** uma técnica indispensável no arsenal de ferramentas de otimização.

2.4 Problema de Alocação de Equipes de Trabalho

O desafio de alocar equipes de trabalho de forma eficaz é um problema comum em vários setores, incluindo a mineração, onde a eficiência operacional e a segurança são de extrema importância. A utilização de técnicas de programação linear é uma abordagem eficaz para resolver esses problemas de alocação, otimizando a distribuição de recursos humanos para atender a diversas necessidades e objetivos operacionais (TAHA, 2007).

A relevância da análise e modelagem de sistemas na otimização de processos é destacada por Ahlert et al. (2014), que demonstram como a programação linear passo a passo pode ser aplicada para resolver problemas complexos de alocação e distribuição de tarefas. A aplicação desses conceitos ao problema de deslocamento das colaboradoras da equipe de limpeza pode ajudar a identificar soluções que aumentem a produtividade e melhorem as condições de trabalho.

O trabalho de Nogueira (2018) sobre a alocação de horários em instituições de ensino utilizando programação inteira destaca a adaptabilidade e eficácia da programação linear em diversos contextos operacionais. Essa flexibilidade sugere que técnicas semelhantes podem ser aplicadas com sucesso na otimização da logística de deslocamento na Mina Cauê, proporcionando uma abordagem sistemática para enfrentar os desafios identificados.

Ao avançar no desenvolvimento do referencial teórico, é imprescindível considerar a importância das Tecnologias de Informação e Comunicação (TICs) e sua integração com os sistemas de gestão logística. Como destacado por Coffee (2006), a promoção e adoção de linguagens de programação como Python³ podem simplificar o desenvolvimento de soluções customizadas para problemas específicos de logística e otimização. A flexibilidade e a capacidade do Python para lidar com grandes volumes de dados e realizar cálculos complexos o tornam uma ferramenta adequada para modelar e resolver problemas de programação linear na indústria de mineração.

Ferreira (2016) oferece uma perspectiva interessante sobre a formulação de problemas complexos de agendamento, que pode ser aplicada à programação de tarefas de limpeza na mina. Ao adaptar esses modelos para o contexto específico da Mina Cauê, é viável desenvolver um cronograma otimizado que minimize os conflitos de agendamento e garanta a cobertura adequada de todas as áreas críticas.

Por fim, a contribuição de Andrade (2015) sobre métodos e modelos para análise de decisões em pesquisa operacional fornece uma base teórica sólida para entender como

³ <<https://www.python.org>>

as técnicas de decisão quantitativa podem ser aplicadas para melhorar a logística e a produtividade. A aplicação desses princípios ao desafio enfrentado pela Mina Cauê pode levar a soluções inovadoras que beneficiem tanto a empresa quanto seus colaboradores.

2.5 Solver Gurobi

O Gurobi Optimizer⁴ é uma ferramenta avançada de solução de problemas de otimização que suporta uma ampla gama de modelos matemáticos, incluindo programação linear, programação inteira mista e programação quadrática. Reconhecido por sua capacidade de resolver problemas complexos de forma eficiente, o Gurobi é particularmente útil para problemas de grande escala que são desafiadores para outros solvers. Sua integração com várias linguagens de programação, como Python e C++, facilita a modelagem e a solução de problemas de alocação de equipes em contextos industriais.

No contexto específico da Mina Cauê, o Gurobi pode ser empregado para formular e resolver o problema de alocação de equipes de limpeza. O modelo de otimização pode incluir variáveis de decisão representando a atribuição de equipes a diferentes áreas da mina, restrições que asseguram a cobertura adequada de todas as áreas essenciais, sem sobreposição de turnos ou excedendo a capacidade da equipe, e uma função objetivo projetada para minimizar o tempo total de deslocamento ou equilibrar a carga de trabalho entre as equipes (HILLIER; LIEBERMAN, 2001).

A utilização do Gurobi para solucionar o problema de alocação na Mina Cauê traz várias vantagens, incluindo a habilidade de manejar a complexidade e escala do problema, a flexibilidade para adaptar o modelo conforme as mudanças nas condições ou objetivos operacionais, e a eficiência em identificar soluções que podem resultar em melhorias significativas na eficiência operacional.

2.6 Trabalhos Correlatos

Os trabalhos correlatos exploram aspectos de otimização e programação inteira em diferentes contextos, fornecendo *insights* valiosos para aprimorar a logística de deslocamento e a produtividade da equipe de limpeza na mina.

Ferreira (2016) explorou formulações para agendamento de competições esportivas. Embora a área seja diferente da mineração, a otimização de agendamento pode ser adaptada para a programação das atividades da equipe de limpeza, permitindo melhor planejamento dos horários e redução de conflitos.

Nogueira (2018) propôs um modelo de programação inteira para a alocação de horários no Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro

⁴ <<https://www.gurobi.com>>

Preto. Essa abordagem pode ser relevante para a equipe de limpeza da Mina Cauê, já que o mesmo modelo pode ser aplicado para otimizar os horários de trabalho, evitando sobreposições e garantindo uma alocação eficiente de recursos humanos para maximizar a produtividade.

A análise de [Araujo \(2018\)](#) sobre a alocação de equipes, retrata a importância de estudos e análises criteriosas quanto a alocação de colaboradores baseados na distância percorridas pelos mesmos, visto que muitas vezes essa definição é feita através da experiência empírica de gestores. Reduzir o tempo de deslocamento dos colaboradores até o posto de trabalho reduz o tempo de inatividade e minimiza as interrupções, permitindo que as equipes de limpeza operem de forma mais eficiente. Integrar práticas semelhantes pode ser benéfico para otimizar a produtividade e a eficiência logística nas operações de limpeza.

Em suma, esses trabalhos acadêmicos fornecem fundamentos teóricos e metodológicos relevantes para aprimorar a logística de deslocamento e a produtividade da equipe de limpeza na Mina Cauê em Itabira. Através da aplicação de técnicas de otimização, como a Programação Linear Inteira e a formulação de agendamentos, é possível identificar soluções mais eficientes e eficazes para o gerenciamento das atividades da equipe, contribuindo para uma operação mais fluida e produtiva na mina.

3 Desenvolvimento

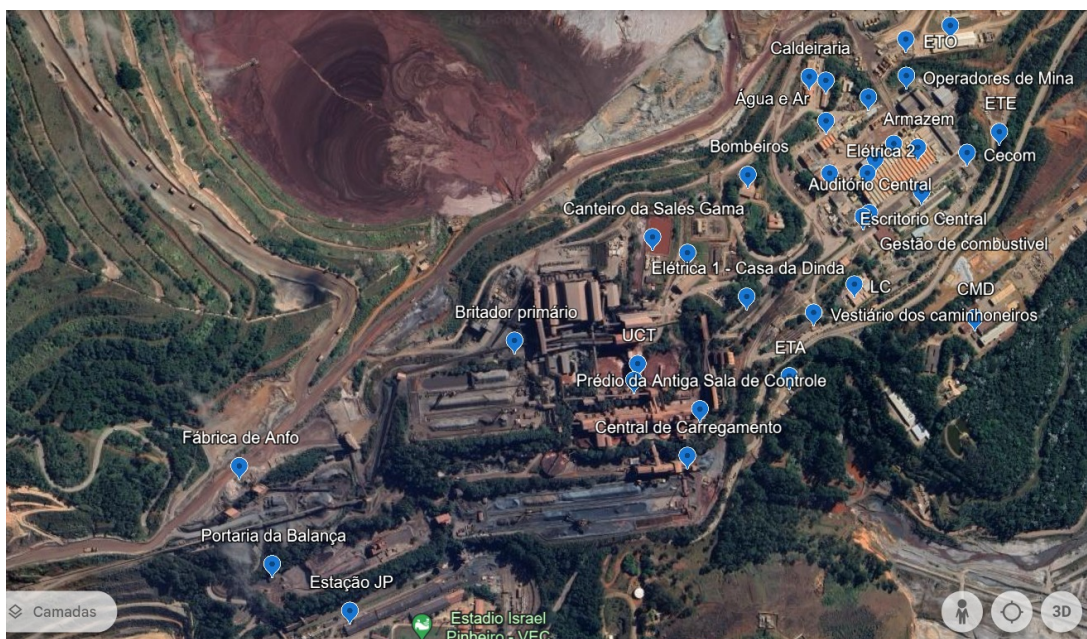
3.1 A Empresa

A empresa referida nesse trabalho é prestadora de serviços de limpeza predial para mineradora Vale. A principal atividade da empresa é realizar a limpeza de todos os ambientes da mina que tenham pessoas trabalhando, ou seja, todos os escritórios, banheiros, copas e vestiários.

A Figura 1 exibe os 33 prédios onde existe atuação da empresa referida neste trabalho e suas distribuições na Mina Cauê. No total, temos 190 áreas que precisam ser limpas. A metragem quadrada das áreas foi convertida em tempo de limpeza, totalizando 6571 minutos, divididos entre os 7 dias da semana e os três turnos de trabalho. No início de cada turno, os colaboradores são designados para as áreas de limpeza, utilizando transporte interno da Vale.

Neste trabalho, abordamos o desafio de otimizar a alocação de 16 colaboradores em três turnos de trabalho distintos na Mina Cauê. Os turnos M6, T15 e N18 representam respectivamente os turnos da manhã, tarde e noite. Os turnos M6 e T15 possuem uma jornada de 8 horas, equivalente a 420 minutos de atividade efetiva, descontando 60 minutos para transporte residencial e diálogos de segurança. O turno N18, por sua vez, conta com 600 minutos disponíveis para a realização das atividades.

Figura 1 – Prédios da Mina Cauê



Fonte: Google Earth

3.2 Coleta dos dados

Utilizou-se uma planilha Excel contendo o cronograma de limpeza predial da mina Cauê em Itabira. Essa planilha contém todas os prédios, o tempo em minutos necessário para limpeza de cada área, o nível de sujeidade do ambiente, a periodicidade de limpeza por dia, os turnos e colaboradores disponíveis. Através de uma pesquisa em campo foi acrescentado ao cronograma o tempo de deslocamento entre todos os prédios da mina Cauê. Para determinar o deslocamento, foi utilizado um *smartwatch* da marca Xiaomi.

Para a análise dos dados, criou-se um modelo matemático utilizando Programação Linear e foi gerado uma alocação otimizada da equipe. Para isso, foi criado um programa de computador utilizando a linguagem Python, o solver Gurobi e a biblioteca Pandas, que recebe os dados em formato Excel e permite fazer a análise e manipulação desses dados.

A figura da tabela 2 refere-se a distância em minutos entre 5 dos 33 prédios da mina Cauê. A matriz de distância completa tem o tamanho de 33x33.

Figura 2 – Matriz 5x5 representando a distância entre os prédios da Mina Cauê

Distancia p1_p2	Agua e Ar	Predio da Antiga Sala de Controle	Planta Ouro	UCT	Armazem
Agua e Ar	0	13	14	13	4
Predio da Antiga Sala de Controle	13	0	1	0	11
Planta Ouro	14	1	0	1	12
UCT	13	0	1	0	11
Armazem	4	11	12	11	0

Fonte: Elaborada pelo autor

A figura 3, exibe os dados de 3 áreas da tabela de um total de 190. No exemplo temos o nome da área, o tempo em minutos, o nome do prédio, o turno, os dias da semana (valor 1 representa a necessidade de limpeza do local), colaboradores fixos e o número de colaboradores que irão executar a limpeza.

Figura 3 – Três áreas do cronograma

Area	Tempo_limpeza_em_minutos	Predio	Turno	Seg	Ter	Qua	Qui	Sex	Sab	Dom	ColaboradorFixo	Num Colaboradores
Agua e Ar - Copa	10	Agua e Ar	M6	1	1	1	1	1	1	0	COLABORADOR1	1
Agua e Ar - Sala da segurança	15	Agua e Ar	T15	0	0	0	1	0	0	0		1
Agua e Ar - Banheiro Feminino	25	Agua e Ar	N18	1	1	1	1	1	1	1		1

Fonte: Elaborada pelo autor

A figura 4, representa a planilha com filtro na coluna dia. Os dados mostram os colaboradores disponíveis nos dias “segunda” e “terça”, nos turnos “M6”, “T15” e “N18”. Os dados dos colaboradores foram ocultados para garantir a proteção de dados. A figura 5 é uma representação da tabela que contém a carga horária máxima dos colaboradores no dia e turno de trabalho. Neste exemplo, a planilha esta com filtro na coluna dia, representando somente a “Qui”.

Figura 4 – Colaboradores disponíveis na “Seg” e “Ter” e os turno de trabalho

Dia	Turno	Colaboradores Disponíveis
Seg	M6	COLABORADOR1+COLABORADOR2+COLABORADOR3+COLABORADOR4+COLABORADOR5+COLABORADOR6+COLABORADOR7
Seg	T15	COLABORADOR8+COLABORADOR9+COLABORADOR10
Seg	N18	COLABORADOR11.COLABORADOR12+COLABORADOR13.COLABORADOR14+COLABORADOR15.COLABORADOR16
Ter	M6	COLABORADOR1+COLABORADOR2+COLABORADOR3+COLABORADOR4+COLABORADOR5+COLABORADOR6+COLABORADOR7
Ter	T15	COLABORADOR8+COLABORADOR9+COLABORADOR10
Ter	N18	COLABORADOR11.COLABORADOR12+COLABORADOR13.COLABORADOR14+COLABORADOR15.COLABORADOR16

Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 5 – Carga Horária do colaborador por dia e turno de trabalho

Colaborador	Dia	Turno	Carga Horaria Maxima
COLABORADOR1	Qui	M6	420
COLABORADOR2	Qui	M6	420
COLABORADOR8	Qui	T15	420
COLABORADOR3	Qui	M6	420
COLABORADOR9	Qui	T15	420
COLABORADOR4	Qui	M6	420
COLABORADOR5	Qui	M6	420
COLABORADOR6	Qui	M6	420
COLABORADOR11.COLABORADOR12	Qui	N18	600
COLABORADOR7	Qui	M6	420
COLABORADOR13.COLABORADOR14	Qui	N18	600
COLABORADOR15.COLABORADOR16	Qui	N18	600
COLABORADOR810	Qui	T15	420

Fonte: Elaborada pelo autor

3.3 Modelo Matemático Proposto

Para a elaboração do modelo, foi considerada a Mina Cauê em Itabira-MG. Foi observado que a equipe de limpeza predial atua em três turnos, sete dias por semana, e cobre todo o cronograma de limpeza atual.

Para cada área da Mina, há um dia e um turno responsável pela realização da limpeza. O colaborador não pode exceder a carga horária máxima definida para seu turno de trabalho, somando os tempos de limpeza e deslocamento entre os prédios.

Cada área é limpa por somente um colaborador por vez, no dia e turno estabelecidos para a limpeza. Em 3 prédios específicos, têm-se a atuação de colaboradores fixos, ou seja, este local deve ser limpo apenas por esse colaborador, mas o mesmo não é exclusivo do local, podendo ser alocado para limpeza de outros prédios.

O modelo matemático tem como objetivo minimizar o tempo gasto pelos colaboradores da equipe de limpeza predial na Mina Cauê em Itabira para deslocar-se de um prédio a outro, garantindo assim mais tempo para a execução das atividades de limpeza. O deslocamento dentro do mesmo prédio não foi considerado neste estudo.

3.3.1 Conjuntos e parâmetros

$C = \{1, \dots, C \}$	conjunto de colaboradores
$A = \{1, \dots, A \}$	conjunto de áreas a serem limpas
$A^{fim} = \{1, \dots, A , fim\}$	conjunto de áreas a serem limpas incluindo <i>dummy</i> fim
$A^{ini} = \{1, \dots, A , ini\}$	conjunto de áreas a serem limpas incluindo <i>dummy</i> início
$T = \{1, 2, 3\}$	conjunto de turnos de trabalho (M6, T15, N18)
$D = \{1, \dots, 7\}$	conjunto de dias da semana (Seg, ..., Dom)
$C^{d,t} = \{1, \dots, C^{d,t} \}$	conjunto de colaboradores disponíveis no dia d , turno t
$A^{d,t} = \{1, \dots, A^{d,t} \}$	conjunto de áreas a serem limpas no dia d , turno t
$h_{c,d,t} \in \{\mathbb{R}\}$	carga horária máxima (em minutos) do colaborador c no dia d no turno t
$t_a \in \{\mathbb{R}\}$	tempo (em minutos) que a área a leva para ser limpa
$n_{a,d,t} \in \{\mathbb{R}\}$	número de colaboradores que limpam a área a no dia d no turno t
$f_{c,a} \in \{0, 1\}$	1 se colaborador c é fixo para limpar a área a
$d_{a,a_2} \in \{\mathbb{R}\}$	tempo de deslocamento (estimado em minutos) entre as áreas a e a_2

3.3.2 Variáveis de decisão

$x_{c,a,d,t} \in \{0, 1\}$	1 se colaborador c atua na área a no dia d e turno t
$y_{c,a,a_2,d,t} \in \{0, 1\}$	1 se colaborador c atua na área a antes da área a_2 no dia d e turno t
$u_{c,a,d,t} \in \{\mathbb{N}\}$	ordem na qual a área a é limpa pelo colaborador c no dia d e turno t

3.3.3 Função objetivo

A função objetivo visa minimizar o somatório dos tempos de deslocamento:

$$\min \sum_{d \in D} \sum_{t \in T} \sum_{a \in A_{d,t}} \sum_{a_2 \in A_{d,t}} \sum_{c \in C_{d,t}} y_{c,a,a_2,d,t} \times d_{a,a_2} \quad (3.1)$$

3.3.4 Restrições

- Cada área deve ser alocada ao número requerido de colaboradores em cada turno e dia da semana:

$$\sum_{c \in C_{d,t}} x_{c,a,d,t} = n_{a,d,t} \quad \forall d \in D, \quad \forall t \in T, \quad \forall a \in A_{d,t} \quad (3.2)$$

- A soma dos tempos de limpeza e deslocamentos não pode exceder a carga horária diária por turno de cada colaborador:

$$\sum_{a \in A_{d,t}} (x_{c,a,d,t} \times t_a + \sum_{a_2 \in A} y_{c,a,a_2,d,t}) \leq h_{c,d,t} \quad \forall d \in D, \quad \forall t \in T, \quad \forall c \in C_{d,t} \quad (3.3)$$

- Respeitar as fixações de colaborador para área quando determinado:

$$x_{c,a,d,t} \geq f_{c,a} \quad \forall d \in D, \quad \forall t \in T, \quad \forall a \in A_{d,t}, \quad \forall c \in C_{d,t} \quad n_{a,d,t} > 0 \quad (3.4)$$

- Para cada colaborador, dia, turno e área, uma área deve ser a próxima a ser limpa:

$$\sum_{a_2 \in A_{d,t}^{fim}, a_2 \neq a} y_{c,a,a_2,d,t} = x_{c,a,d,t} \quad \forall d \in D, \quad \forall t \in T, \quad \forall a \in A_{d,t}^{ini}, \quad \forall c \in C_{d,t} \quad (3.5)$$

$$\sum_{a \in A_{d,t}^{ini}, a \neq a_2} y_{c,a,a_2,d,t} = x_{c,a_2,d,t} \quad \forall d \in D, \quad \forall t \in T, \quad \forall a_2 \in A_{d,t}^{fim}, \quad \forall c \in C_{d,t} \quad (3.6)$$

- Eliminação de subrotas:

$$u_{c,ini,d,t} = 1 \quad \forall d \in D, \quad \forall t \in T, \quad \forall c \in C_{d,t} \quad (3.7)$$

$$u_{c,a,d,t} - u_{c,a_2,d,t} + (|A_{d,t}| y_{c,a,a_2,d,t}) \leq |A_{d,t}| - 1 \\ \forall d \in D, \quad \forall t \in T, \quad \forall a \in A_{d,t}, \quad \forall a_2 \in A_{d,t}^{fim}, \quad a \neq a_2, \quad \forall c \in C_{d,t} \quad (3.8)$$

4 Experimentos Computacionais

4.1 Configurações

Os testes computacionais foram desenvolvidos em um notebook com as seguintes configurações:

- Sistema operacional Windows 11 Home 22H2;
- Processador Intel(R) Core(TM) i7-10750H CPU @ 2.60GHz;
- 8GB de Memória RAM.

Para implementação e autenticação do modelo matemático utilizou-se uma planilha Microsoft Excel contendo o cronograma de limpeza predial da mina de Cauê em Itabira.

O modelo matemático foi implementado na linguagem de programação Python 3.9.12, utilizando a biblioteca do Python MIP versão 1.14.1 e o solver Gurobi versão 9.5.2 com uma licença acadêmica.

Para aplicar o Gurobi ao problema de alocação, inicialmente, define-se matematicamente o problema, incluindo as variáveis de decisão, restrições e a função objetivo. Essas definições são então traduzidas para o formato que o Gurobi pode processar, utilizando a linguagem de programação Python. Após a formulação do problema, o solver Gurobi é utilizado para encontrar uma solução viável em tempo computacional, que representa a alocação de equipes que melhor atende aos critérios estabelecidos, dentro das restrições definidas.

4.2 Resultados

Os resultados obtidos indicam um custo de solução de 927 minutos de deslocamento e um limite inferior (LB) de 177, após um tempo computacional de 10 horas. Esses números refletem a eficácia das técnicas aplicadas para resolver o problema de otimização, considerando sua complexidade NP-Completo.

Além disso, realizamos uma análise combinada do processo de otimização. Inicialmente, foi realizada uma relaxação inicial do problema, onde o valor da função objetivo foi 19,09. Esse valor foi obtido após 10284 iterações do método simplex dual, levando 5.99 segundos de tempo de CPU.

Durante o processo de otimização, foram explorados 6914 nós na árvore de busca, com 11.081.958 iterações do simplex realizadas. Esses nós representam diferentes candidatos ou soluções parciais avaliadas durante a busca pela solução ótima.

Os limites superiores e inferiores para o valor da função objetivo foram determinados ao longo do processo de otimização, enquanto diversas estratégias de corte foram aplicadas para reduzir o espaço de busca e melhorar a eficiência do solver.

No entanto, o solucionador atingiu o limite de tempo especificado sem encontrar a solução ótima. O melhor valor da função objetivo encontrado foi 993, enquanto o melhor limite foi 171, resultando em um gap de 82.68%. Apesar disso, os resultados obtidos demonstram a eficácia das técnicas empregadas na resolução do problema de otimização e fornecem *insights* valiosos para futuras investigações.

5 Conclusão

Este trabalho propôs a criação de um modelo matemático de **PLI** com o objetivo de minimizar o tempo de deslocamento dos colaboradores de uma equipe de limpeza que atua no ramo da mineração. Para atingir o objetivo proposto, foi obtida uma solução otimizada com a melhor alocação obtida dentro de dez horas de esforço computacional.

Para o desenvolvimento considerou-se planilha Excel contendo o cronograma de limpeza já utilizado pela empresa e foi acrescentado ao mesmo o tempo de deslocamento entre os prédios. Foi empregado um algoritmo utilizando a linguagem Python e o *solver* Gurobi para resolver o modelo matemático, onde resultou-se em uma alocação otimizada dos colaboradores, respeitando as restrições do modelo e diminuindo o tempo gasto com deslocamento.

A solução apresentada trouxe como principal melhoria a maneira como a distribuição da equipe está sendo feita, embasada em cálculos matemáticos que ajudaram a diminuir o desperdício de tempo com deslocamentos desnecessários, visto que anteriormente era decidida de forma empírica pelo encarregado do turno, o que acarretava no não cumprimento do cronograma de limpeza.

Este trabalho mostra como a utilização da **PLI** aliada a um sistema de programação ajudam na melhoria dos processos dentro de uma organização. Por se tratar de um escopo sensível e crucial para o funcionamento da mina, que envolve condições básicas dos trabalhadores, a otimização e bom funcionamento da equipe de limpeza predial beneficia a todos os funcionários da mineradora. Foi necessário reduzir o número de áreas e colaboradores preservando a quantidade real de prédios e a distância entre eles, devido as limitações de *hardware*.

Para validação e aplicação do trabalho, será apresentado à empresa a alocação otimizada da equipe de limpeza predial e sugerir a aplicação das melhorias.

Como sugestão para estudos futuros, o trabalho pode ser ampliado para as demais minas da cidade de Itabira-MG e em escopos onde necessitam otimizar o tempo de deslocamento.

Referências

- AHLERT, F. et al. *Pesquisa Operacional - Programação Linear Passo a Passo*. São Leopoldo: Editora Unisinos, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 17.
- ANDRADE, E. L. *Introdução à pesquisa operacional: métodos e modelos para análise de decisões*. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 17.
- ARAUJO, M. M. *Modelo de Programação Matemática para a Alocação Otimizada de Colaboradores em uma Empresa de Vendas de Bebidas*. Fortaleza: [s.n.], 2018. Citado na página 19.
- ARENALES, M. et al. *Pesquisa operacional*. 8. ed. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2007. Citado na página 14.
- BELFIORE, P.; FÁVERO, L. P. *Pesquisa Operacional para cursos de Engenharia*. Rio de Janeiro: Elsevier Editora Ltda, 2013. Citado na página 15.
- COFFEE, P. Promoting python. *E-week*, March 2006. Citado na página 17.
- COFFMAN, E. G.; LEUNG, J. Y.-T. *Combinatorial Optimization*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1996. Citado na página 11.
- COLIN, E. C. *Pesquisa Operacional: 170 Aplicações em Estratégia, Finanças, Logística, Produção, Marketing e Vendas*. 2. ed. São Paulo: Editora Atlas Ltda, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 14 e 15.
- DANTZIG, G. B. *Linear Programming and Extensions*. [S.l.]: Princeton University Press, 1963. Citado na página 11.
- FERREIRA, L. G. M. *Formulações para agendamento de competições esportivas*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.
- Gurobi Optimization, LLC. *Gurobi Optimizer Reference Manual*. [S.l.], 2019. Citado na página 16.
- HILLIER, F. S.; LIEBERMAN, G. J. *Introduction to Operations Research*. [S.l.]: McGraw-Hill, 2001. Citado 3 vezes nas páginas 11, 16 e 18.
- MARINS, F. A. S. *Introdução à Pesquisa Operacional*. São Paulo: Cultura Acadêmica, 2011. Citado na página 14.
- NEMHAUSER, G. L.; WOLSEY, L. A. *Integer and Combinatorial Optimization*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1988. Citado na página 16.
- NOGUEIRA, L. d. S. *Um modelo de programação inteira para a alocação de horários do instituto de ciências exatas e aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Ouro Preto, João Monlevade, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 17 e 18.

TAHA, H. A. *Operations Research: An Introduction*. [S.l.]: Prentice Hall, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 11 e 17.

WOLSEY, L. A. *Integer Programming*. [S.l.]: Wiley-Interscience, 1998. Citado 2 vezes nas páginas 15 e 16.