



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**



Marcos Antonio Miranda Tolentino

**O problema de sequenciamento em projeto com restrição de
recursos aplicado ao setor minerário**

**Ouro Preto
2026**

Marcos Antonio Miranda Tolentino

O problema de sequenciamento em projeto com restrição de recursos aplicado ao setor minerário

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Orientadora: Dra. Clarisse da Silva Vieira Camelo de Souza

Ouro Preto
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

T649o Tolentino, Marcos Antonio Miranda.

O problema de sequenciamento em projeto com restrição de recursos aplicado no setor minerário. [manuscrito] / Marcos Antonio Miranda Tolentino. - 2026.

46 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Clarisse da Silva Vieira Camelo de Souza.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Administração de projetos. 2. Planejamento e Controle de Produção (PCP). 3. Modelos matemáticos. 4. Minas e recursos minerais. I. Souza, Clarisse da Silva Vieira Camelo de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO,
ADMINISTRAÇÃO E ECON



FOLHA DE APROVAÇÃO

Marcos Antônio Miranda Tolentino

O Problema de Sequenciamento em Projeto com Restrição de Recursos Aplicado no Setor Minerário

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em 09 de Fevereiro de 2026.

Membros da banca

Profa. Clarisse da Silva Vieira Camêlo de Souza - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)
Profa. Irce Fernandes Gomes Guimarães - (Universidade Federal de Ouro Preto)
Prof. Davi das Chagas Neves - (Universidade Federal de Ouro Preto)

Clarisse da Silva Vieira Camêlo de Souza, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 19/02/2026.



Documento assinado eletronicamente por **Clarisse da Silva Vieira Camelo de Souza, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 19/02/2026, às 13:02, 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 **1057524** e o código CRC **65F00A7D**.

RESUMO

O presente Trabalho de Conclusão de Curso analisa a aplicação de métodos de otimização ao Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR) no setor de mineração. O estudo apresenta um referencial teórico abrangendo a evolução da mineração no Brasil, os processos produtivos e os fundamentos do Planejamento e Controle da Produção (PCP). Em seguida, aborda os problemas de sequenciamento e seus impactos sobre o uso de recursos e a eficiência operacional. O trabalho aplica um modelo de Programação Linear Inteira Mista ao processo de carregamento ferroviário de minério de ferro em uma empresa mineraria com operações no município de Ouro Preto-MG, considerando restrições operacionais e limitações de recursos. A modelagem foi resolvida no software GLPK GNU, permitindo definir um sequenciamento otimizado com tempo mínimo total de 49 minutos, superior ao cenário real. Também foram avaliadas atividades críticas que podem gerar atrasos, conceituadas como “atividades gatilho”, tornando o modelo mais robusto e fiel a realidade operacional. Conclui-se que o uso do PSPRR oferece suporte estratégico ao planejamento e à gestão das operações minerárias.

Palavras-chave: sequenciamento, modelos matemáticos, recurso, gerenciamento de projetos, mineração.

ABSTRACT

This study analyzes the application of optimization methods to the Resource-Constrained Project Scheduling Problem (RCPSP) in the mining sector. The research presents a comprehensive theoretical framework addressing the development of mining in Brazil, production processes, and the fundamentals of Production Planning and Control (PPC). It then examines production sequencing problems and their impacts on resource utilization and operational efficiency. A Mixed-Integer Linear Programming model was applied to the iron ore railway loading process of a mining company operating in Ouro Preto, Brazil, considering operational constraints and resource limitations. The model was solved using GNU GLPK, enabling the definition of an optimized activity sequence with a minimum total time of 49 minutes, outperforming the real operational scenario. Critical activities that may generate delays—referred to as “trigger activities”—were also analyzed, increasing the robustness and realism of the model. The results indicate that the application of the RCPSP provides strategic support for planning and managing mining operations.

Keywords: scheduling, mathematical models, resource, project management, mining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Arrecadação Anual da CFEM 2020-2024 (Valor Nominal em R\$ Bilhões).....	13
Figura 2 - CFEM por Estado e Municípios Arrecadadores - 4º Trimestre 2024.....	14
Figura 3 - Principais Substâncias Metálicas - Ano Base 2023	15
Figura 4 - Representação do carregamento de minério	29
Figura 5 - Grafo do problema.....	34
Figura 6 - Diagrama de Gantt.....	35
Figura 7 - Diagrama de Gantt “Atividade Gatilho A”.....	38
Figura 8 - Diagrama de Gantt “Atividade Gatilho B”	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Conjunto dos recursos renováveis.....	32
Tabela 2 - Dados Operacionais	32
Tabela 3 - Dados das “Atividades gatilhos A e B”	37

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	10
1.1 Objetivos.....	11
1.1.1 Objetivos gerais	11
1.1.2 Objetivos específicos.....	12
1.2 Justificativa.....	12
2 REVISÃO TEÓRICA.....	13
2.1 A Mineração No Brasil.....	13
2.1.1 Principais produtos do setor minerário	15
2.1.2 Cadeia produtiva da mineração e seus desafios.....	15
2.2 Planejamento E Controle Da Produção (PCP) Na Mineração.....	16
2.2.1 Aplicações do PCP na cadeia produtiva mineral.....	17
2.2.2 Importância do sequenciamento e da otimização.....	19
2.3 Os Problemas De Sequenciamento Na Produção.....	20
2.3.1 Tipos de Problemas de Sequenciamento.....	20
2.4 O Problema De Sequenciamento Em Projetos Com Restrição De Recursos (PSPRR)	22
2.4.1 Variações do PSPRR.....	23
2.4.2 Aplicações práticas do PSPRR.....	25
2.4.3 Modelo matemático para o PSPRR	26
3 ESTUDO DE CASO.....	28
4 RESULTADOS E ANÁLISES.....	35
5 CONCLUSÃO.....	41
6 REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

A mineração desempenha um papel estratégico no desenvolvimento econômico do Brasil, sendo responsável por grande parcela das exportações e pela geração de empregos diretos e indiretos. A complexidade das operações minerárias, somada à elevada demanda por eficiência, controle operacional e sustentabilidade, exige que as empresas adotem métodos capazes de otimizar suas atividades e reduzir desperdícios, neste contexto o Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR) tem se consolidado como uma importante ferramenta para o gerenciamento eficiente de cronogramas, especialmente em ambientes nos quais a simultaneidade de atividades é limitada por recursos compartilhados.

O crescente interesse por modelos mais realistas e aplicáveis levou ao desenvolvimento de diversas extensões do PSPRR tradicional. Tais avanços incluem, por exemplo, a introdução de atividades opcionais, relações lógicas alternativas, variação temporal na demanda por recursos e inclusão de incertezas. Essa maior flexibilidade na modelagem de processos reais, como aqueles observados na indústria extrativa mineral, onde atrasos operacionais, falhas mecânicas e limitações operacionais são desafios recorrentes.

Este trabalho abordará um estudo de caso aplicado a uma empresa do setor minerário localizada em Ouro Preto, MG, visando a redução do tempo médio de carregamento de composições ferroviárias no Terminal de Expedição. Para isso, o PSPRR é modelado considerando tanto as restrições operacionais quanto a escassez de recursos humanos e equipamentos. A proposta se fundamenta na utilização de um modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista, com o objetivo de sequenciar as atividades de forma otimizada, minimizando o *makespan* (tempo total para concluir todas as tarefas) e considerando cenários com eventos condicionais, como, por exemplo, as restrições operacionais do terminal de expedição, a disponibilidade limitada de recursos e as dependências entre as atividades, buscando minimizar o tempo total de execução. Além da possibilidade da ocorrência de eventos indesejados que alteram a sequência das atividades, eventos estes definidos como “atividades gatilho” que podem causar atrasos significativos, como falhas em desviadores de fluxo e obstruções em

chutes de transferência. A análise desses elementos amplia a robustez do modelo e aproxima sua representação das condições reais das operações.

A análise de dados, etapa essencial deste trabalho, foi conduzida pelo levantamento e organização das informações operacionais, que incluíram tempos de ciclo, capacidades, fluxos de processo e recursos disponíveis. Em seguida, procedeu-se à modelagem matemática do PSPRR, na qual as restrições e relações entre atividades foram formalizadas em um modelo de Programação Linear Inteira Mista (PLIM). Na terceira etapa, o modelo foi executado no ambiente computacional, permitindo avaliar seu desempenho frente à operação real e identificar possíveis gargalos. Posteriormente, foram identificadas e analisadas as atividades críticas, denominadas “atividades gatilho”, como falhas em desviadores de fluxo ou obstruções nos chutes de transferência, com o objetivo de compreender sua influência sobre atrasos e sua relevância no planejamento das operações. Além disso, a avaliação das atividades gatilho aumentou a robustez da abordagem, tornando-a mais fiel às condições operacionais. Por fim, a conclusão do estudo reúne as principais contribuições obtidas, evidenciando a importância do uso de modelos de otimização no planejamento das operações minerárias, os ganhos efetivos proporcionados pelo sequenciamento matemático e as possibilidades de aplicação futura da metodologia em outros processos da cadeia produtiva.

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivos gerais

Aplicar o Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR), por meio de um modelo de Programação Linear Inteira Mista, ao planejamento de atividades operacionais no setor minerário, de forma a otimizar o sequenciamento das atividades, respeitando restrições de precedência e disponibilidade de recursos, e contribuir para a melhoria da eficiência operacional do processo analisado.

1.1.2 Objetivos específicos

- Revisar a literatura sobre o Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos em aplicações industriais e no setor mineral;
- Caracterizar o processo operacional estudado no setor minerário, identificando as atividades, recursos envolvidos e suas restrições;
- Modelar matematicamente o problema estudado utilizando Programação Linear Inteira Mista;
- Implementar computacionalmente o modelo proposto;
- Analisar os resultados obtidos, avaliando o impacto do modelo no sequenciamento das atividades e na utilização dos recursos;
- Discutir as contribuições e limitações do modelo proposto para a tomada de decisão no contexto da mineração.

1.2 Justificativa

A realização deste estudo justifica-se pela sua relevância tanto no campo prático quanto teórico. Em relação ao campo prático, a gestão inadequada da execução de atividades pode gerar atrasos significativos nas etapas anteriores e posteriores do processo que será analisado. Problemas como paralisações na cadeia produtiva, desperdício de recursos e prejuízos financeiros podem comprometer empregos, investimentos na região e a capacidade de atendimento ao mercado global.

Além disso, contribuir teoricamente para o desenvolvimento de modelos matemáticos aplicados ao sequenciamento da execução dos processos nas etapas de estocagem e escoamento do minério de ferro nos pátios e terminais ferroviários. A aplicação do método, amplia a compreensão sobre o tema, buscando otimizar a obtenção da solução e aumentando o número de carregamentos realizados no período analisado.

Embora o PSPRR seja amplamente estudado na literatura, sua aplicação ao setor minerário ainda é limitada, especialmente em contextos reais com múltiplas restrições operacionais. Essa lacuna reforça a relevância do presente trabalho.

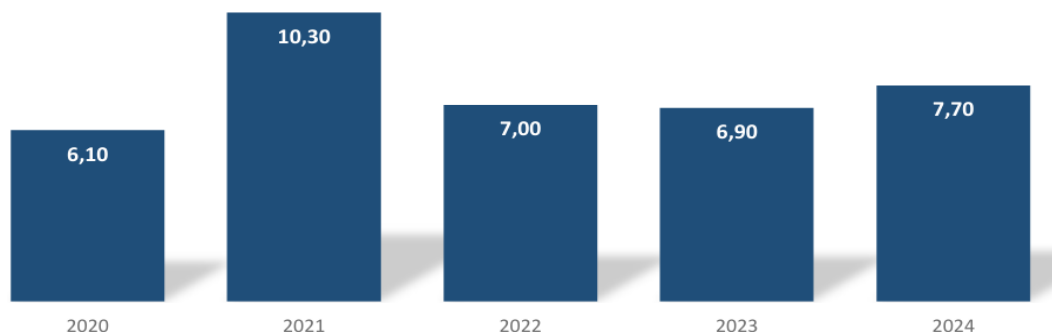
2 REVISÃO TEÓRICA

2.1 A Mineração no Brasil

O solo brasileiro apresenta grande riqueza e diversidade mineral, o que torna a mineração uma das principais atividades econômicas do país, com relevante contribuição para a balança comercial, com base em dados de 2024 confirmados pela ANM (Agencia Nacional de Mineração) no Informe Mineral referente ao 4º Trimestre de 2024 o valor da produção mineral brasileira alcançou R\$ 270,4 bilhões em 2024, mantendo a mineração entre as atividades econômicas mais relevantes do país, o que representa um aumento de aproximadamente 6,5% em relação ao valor registrado em 2023, que foi de R\$ 254,9 bilhões. Ainda segundo o Informe Mineral 4º Trimestre de 2024 publicado pela ANM o valor de operação foi liderado pelo minério de ferro, com um valor total de R\$ 154,8 bilhões, equivalente a 57,24% do total produzido.

No relatório divulgado pela Agência Nacional de Mineração, esse valor de produção mineral gerou uma arrecadação do CFEM (Contribuição Financeira pela Exploração Mineral), no total de R\$ 7,7 bilhões, em 2024. Em comparação aos R\$ 6,9 bilhões registrados em 2023, houve um aumento superior a 11,6%. O relatório da AMN no quarto trimestre de 2024 aponta que o minério de ferro foi responsável por 70,9% das receitas da CFEM. Abaixo, representado na Figura 1, temos a evolução dos últimos 5 anos dos valores registrados como Contribuição Financeira pela Exploração Mineral.

Figura 1 - Arrecadação Anual da CFEM 2020-2024 (Valor Nominal em R\$ Bilhões)



Fonte: ANM Informe Mineral 4º Trimestre de 2024

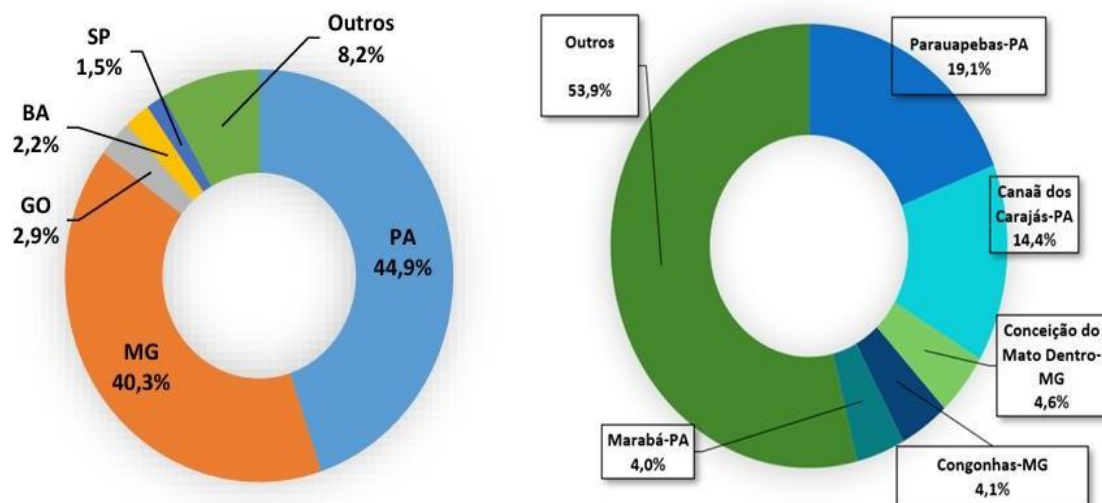
O Informe Mineral apresentado pela ANM, em 2024, reporta que os estados com as maiores arrecadações de CFEM foram Pará (44,9%) e Minas Gerais (40,3%) que concentraram 85,2% da arrecadação.

De acordo com Tonietto e Silva (2011), o Brasil possui cerca de 28,9 bilhões de toneladas de reservas minerais medidas e indicadas, das quais aproximadamente 67% estão localizadas em Minas Gerais, evidenciando a expressiva concentração geológica e econômica da atividade mineradora no território estadual.

Entre as principais regiões mineiras produtoras do estado destaca-se o Quadrilátero Ferrífero, uma área geológica de formato quase quadrangular com cerca de 7.000 km², localizada entre os municípios de Ouro Preto e Belo Horizonte (ROESER; ROESER, 2010). Atualmente, o Quadrilátero Ferrífero abriga não apenas importantes minerações de ferro, mas também empreendimentos voltados à exploração de topázio, bauxita e outros minerais de relevância econômica (MARENT et al., 2011).

Outras regiões de destaque são Goiás, Bahia, Mato Grosso e Mato Grosso do Sul, que juntas representam cerca de 10% do total nacional (Agência Nacional de Mineração, 2025). Na Figura 2, os dados citados são apresentados graficamente conforme descrito acima.

Figura 2 - CFEM por Estado e Municípios Arrecadadores - 4º Trimestre 2024



Fonte: ANM Informe Mineral 4º Trimestre de 2024

2.1.1 Principais produtos do setor minerário

De acordo com o Anuário Mineral Brasileiro – Principais Substâncias Metálicas 2024, publicado pela Agência Nacional de Mineração (ANM), com base nos dados de 2023, as substâncias mais importantes na balança comercial foram o ferro, ouro, cobre, alumínio, nióbio, manganês, níquel, zinco, lítio e grafita, que juntas somaram cerca de R\$ 204 bilhões em valor de produção (ANM, 2025).

O minério de ferro continua sendo o principal produto mineral do país, respondendo por 73% do valor total da produção das 14 principais substâncias metálicas mais a grafita. A Figura 3 apresenta os dados, do ano base de 2023, explicitando o protagonismo da extração de minério de ferro no cenário nacional.

Figura 3 - Principais Substâncias Metálicas - Ano Base 2023



Fonte: ANUÁRIO MINERAL BRASILEIRO – PRINCIPAIS SUBSTÂNCIAS METÁLICAS – 2024

Segundo Nahas (2014), o rápido crescimento da demanda mundial por recursos minerais reforçou ainda mais a vocação extrativa de Minas Gerais, impulsionando o desenvolvimento de diversas cadeias produtivas relacionadas à mineração. Atualmente, o estado possui o terceiro maior Produto Interno Bruto (PIB) do país, tendo o setor mineral como elemento central de sua estrutura econômica.

2.1.2 Cadeia produtiva da mineração e seus desafios

A cadeia produtiva da mineração, especialmente no setor de extração de minério de ferro, apresenta desafios logísticos complexos que envolvem desde a extração até a

distribuição do produto. O baixo valor unitário da tonelada de minério de ferro torna o beneficiamento economicamente viável apenas quando realizado em grande escala, exigindo, portanto, equipamentos de alta capacidade e grande infraestrutura interna e externa. Esse cenário demanda uma gestão eficiente dos fluxos produtivos e logísticos, com foco na redução de custos operacionais, na otimização do transporte e no controle rigoroso da qualidade do produto (CASTRO NETO; BOTTER, 2022).

Segundo Chaves (2002), o processamento de minérios é estruturado em uma sequência de etapas industriais denominadas operações unitárias, que se diferenciam pela forma como são combinadas e pela ordem em que são executadas. Luz et al. (2004) traz que o processo produtivo do minério de ferro é composto por diversas fases integradas. A lavra envolve a extração do minério e suas atividades auxiliares; o beneficiamento abrange as etapas de cominuição e concentração, voltadas para o aprimoramento da qualidade do material extraído. Em seguida, o transporte assegura o deslocamento do minério até a unidade industrial onde será processado, etapa crítica sob o ponto de vista logístico, devido aos elevados volumes movimentados e à necessidade de infraestrutura de transporte eficiente. A aglomeração tem como finalidade melhorar as propriedades físicas e químicas do minério, tornando-o mais adequado à produção de ferro primário, por meio de processos como sinterização e pelletização. Por fim, a estocagem e o embarque correspondem às etapas de armazenamento e exportação do produto, integrando as operações de transporte e expedição típicas das empresas mineradoras. Essas fases demandam um rigoroso planejamento e controle entre o envio do minério produzido nas Usinas de Beneficiamento que serão transportadas por sistemas de escoamento (Ferrovias/Rodovias/ Minerodutos) para os terminais portuários e/ou clientes nacionais ao longo do país.

2.2 Planejamento e Controle da Produção (PCP) na Mineração

O Planejamento e Controle da Produção (PCP) é uma área central da Engenharia de Produção, responsável por coordenar e otimizar os recursos produtivos de uma organização industrial. Segundo Roberto, Lima e Araújo (2023), o PCP busca alinhar a capacidade produtiva com a demanda dos clientes. De forma complementar, Silva, Almeida e Bezerra (2022) afirmam que "o PCP é uma ferramenta utilizada para

acompanhar todas as atividades necessárias para que uma empresa transforme os insumos em produtos, atendendo aos pedidos realizados pelos clientes". Assim, esta visão enfatiza o caráter operacional e de controle do PCP.

De acordo com Martins e Laugeni (2006), o Planejamento e Controle da Produção (PCP) pode ser compreendido como um sistema que transforma informações em ações produtivas. Utilizando dados referentes a estoques, previsões de vendas, produtos e capacidade de produção para gerar ordens de fabricação, garantindo o uso eficiente dos recursos disponíveis. Nesse contexto, o PCP atua como suporte essencial ao planejamento e à coordenação do processo produtivo.

Nessa mesma perspectiva, Barreto (1997) destaca que o PCP é responsável por administrar e equilibrar os principais recursos da produção - como mão de obra, máquinas, matérias-primas e informações, desempenhando o papel de regulador que organiza e distribui as atividades ao longo do processo de manufatura.

Autores como Barbosa, Santos e Lopes (2019) ressaltam que o PCP é essencial para a competitividade industrial, influenciando diretamente custos, prazos e satisfação dos clientes. Indicadores como acuracidade de estoques e lead time são utilizados para medir o desempenho e apoiar a tomada de decisão.

Galvão et al. (2016) apontam que o sucesso do PCP depende do treinamento e da gestão da informação. A Indústria 4.0 traz oportunidades com o uso de sistemas como o *Enterprise Resource Planning* (ERP) para o planejamento de recursos empresariais, a utilização de Internet das Coisas (*IoT*) para a interconexão entre os processos e equipamentos, além da implementação da inteligência artificial, porém exige investimentos e formação técnica adequada. Assim, o PCP continua sendo um campo estratégico e dinâmico, essencial para o avanço da gestão industrial brasileira e para o fortalecimento da competitividade no cenário global.

2.2.1 Aplicações do PCP na cadeia produtiva mineral

Assim como em outros segmentos industriais, o setor mineral também faz uso das ferramentas e práticas do Planejamento e Controle da Produção (PCP) para aprimorar seus processos e garantir maior eficiência operacional. Conforme destaca Costa (2011), o cenário de globalização e a crescente competitividade entre empresas têm exigido

novas estratégias de gestão produtiva, tornando o PCP um elemento essencial para a padronização, redução de custos e aumento da produtividade.

O estudo conduzido por Oliveira e Krüger (2022), em uma empresa mineradora, evidencia que a ausência de um controle eficaz das etapas produtivas, resulta em desperdício de materiais, mau aproveitamento dos equipamentos e dificuldade de monitoramento da produção em tempo real. Antes da implantação de ferramentas do PCP, havia atrasos na comunicação entre os operadores e o setor de controle, ocasionando sobrecarga ou ociosidade de máquinas. Com a adoção do PCP, foi possível organizar melhor as atividades, planejar o fluxo de materiais, otimizar o uso da frota e reduzir perdas durante a extração e o transporte do minério.

De forma semelhante, Trierweiller et al. (2008) analisaram uma mineradora catarinense e identificaram dificuldades de coordenação entre os setores produtivos, o que compromete os prazos e a regularidade da produção. O gargalo principal estava nos caminhões de transporte das britas, cuja capacidade limitada afetava o ritmo do processo. A aplicação do PCP permitiu padronizar o lote de produção, empregar ferramentas como o gráfico de Gantt e melhorar o acompanhamento das operações, resultando em maior eficiência e previsibilidade das entregas. O gráfico de Gantt é uma das ferramentas mais utilizadas no sequenciamento pois permite representar visualmente a duração das atividades ao longo do tempo por meio de barras. Para Mattos (2010) sua principal vantagem é a facilidade de leitura e interpretação, possibilitando que qualquer usuário compreenda rapidamente o andamento das tarefas. Apesar de não evidenciar dependências, folgas ou o caminho crítico, o gráfico é amplamente empregado no planejamento e no acompanhamento da produção, oferecendo suporte eficiente à comparação entre o previsto e o realizado, conforme destacado por Kremer e Kovaleski (2008).

Segundo Biswas e Baral (2021), o Planejamento e Controle da Produção (PCP) desempenha um papel fundamental na coordenação e controle das atividades produtivas, possibilitando o uso eficiente dos recursos, bem como o atendimento dos prazos e metas operacionais.

Dessa forma, observa-se que o PCP desempenha um papel estratégico na cadeia produtiva mineral, pois proporciona o alinhamento entre planejamento, execução e

controle. Sua aplicação possibilita a integração entre setores, o uso racional dos recursos naturais e tecnológicos, a redução de desperdícios e o aumento da produtividade.

2.2.2 Importância do sequenciamento e da otimização na eficiência operacional

Projetos industriais complexos, como os encontrados no setor de mineração, demandam estratégias de planejamento que assegurem não apenas o sequenciamento das atividades, mas também a alocação dos recursos disponíveis, otimizando a eficiência operacional.

Problemas de otimização de sequenciamento de atividades e alocação de recursos são desafios típicos de tomada de decisão, cujo objetivo é encontrar a melhor maneira de utilizar recursos limitados para executar um conjunto de atividades, minimizando, por exemplo, a duração total do projeto.

Para a otimização dos problemas enfrentados nas rotinas de atividades das mineradoras a modelagem matemática é de fundamental importância para na construção de modelos assertivos com o propósito esperado. Goldbarg e Luna (2005) destacam que a modelagem deve ser a tradução da realidade produtiva em modelos matemáticos de otimização, capaz de representar as restrições e variáveis envolvidas ao longo do processo analisado. Somando-se a esse conceito Bertone, Bassanezi e Jafelice (2014) trazem que a modelagem matemática consiste na arte de transformar problemas da realidade em problemas matemáticos e interpretá-los à luz do mundo real.

Diante desse cenário, o Problema de Sequenciamento tem se consolidado como uma ferramenta essencial para o gerenciamento eficiente de cronogramas, especialmente em ambientes industriais onde a simultaneidade de atividades é limitada por recursos compartilhados.

O crescente interesse por modelos mais realistas e aplicáveis levou ao desenvolvimento de diversas extensões do problema de sequenciamento tradicional. Hartmann e Briskorn (2022) aborda os avanços que incluem a introdução de atividades opcionais, eventos considerados gatilhos, relações lógicas alternativas, variação temporal na demanda por recursos e a consideração de incertezas - aspectos amplamente estudados na literatura de otimização e programação matemática.

Essa flexibilidade na modelagem é de fundamental importância em contextos como na indústria extrativa mineral, em que atrasos operacionais, falhas mecânicas e limitações de recursos são desafios recorrentes e exigem um planejamento robusto.

2.3 Os Problemas de Sequenciamento na Produção

Os problemas de sequenciamento da produção consistem em decidir a ordem em que as tarefas serão executadas, considerando regras predefinidas como prioridade do cliente, data de entrega e métodos como UEPS (Último a Entrar, Primeiro a Sair) e PEPS (Primeiro a Entrar, Primeiro a Sair). Para Pinedo (1999), o sequenciamento eficiente tornou-se essencial à sobrevivência das empresas, pois o descumprimento de prazos pode comprometer significativamente sua imagem perante os clientes. Para Fuchigami e Rangel (2014), o sequenciamento se refere à ordenação das atividades, ou seja, a priorização que estabelece que uma permutação de atividades é melhor que outra. Em contribuição de Tubino (2007), o sequenciamento da produção tem como objetivo organizar os recursos do processo produtivo de forma equilibrada, evitando desperdícios de matéria-prima e mão de obra. Logo dessa maneira, é possível prever problemas e antecipar soluções, reduzindo atrasos na entrega dos produtos.

2.3.1 Tipos de Problemas de Sequenciamento

No estudo de Teixeira (2023), temos diferentes tipos de problemas de sequenciamento. Entre eles estão o Flow Shop, Job Shop e o Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR).

- **Flow Shop**

No *Flow Shop*, todos os produtos passam pelas mesmas máquinas e na mesma sequência. Esse tipo de sistema é comum em linhas de produção contínuas, como nas indústrias têxtil, alimentícia e de embalagens. Em exemplo demonstrado por Teixeira (2023, p. 5) “Existem m máquinas em série. Cada atividade tem que ser processada em cada uma das m máquinas. Todas as atividades devem seguir a mesma sequência, ou seja, elas devem ser processadas primeiro na máquina 1, depois na máquina 2 e assim por diante. Após a conclusão em uma máquina, uma atividade entra na fila para a próxima máquina. Normalmente, assume-se que todas as filas operam sob a disciplina primeiro a

entrar, primeiro a sair (PEPS), ou seja, uma atividade não pode passar por outra enquanto espera em uma fila.

- **Job Shop**

O *Job Shop* é um sistema mais flexível, onde cada produto segue um caminho próprio pelas máquinas, variando conforme as operações necessárias. PINEDO (2002) caracteriza o *Job Shop* pela necessidade de determinar a sequência de execução de diferentes atividades (jobs) em um conjunto de máquinas, respeitando restrições de precedência e capacidade. Cada *job* é formado por uma sequência específica de operações que devem ser processadas em uma ordem pré-definida, sendo que cada máquina só pode executar uma operação por vez.

Segundo Portilho (2007, p. 11), “Em um *Job-Shop* com m máquinas, cada *job* tem sua rota particular predeterminada para seguir. Uma distinção é feita entre *jobs* na fábrica na qual cada *job* visita cada máquina no máximo uma vez e os *jobs* que visitam cada máquina mais de uma vez”.

- **Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR)**

O Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR) - *Resource Constrained Project Scheduling Problem* (RCPSP), é um dos principais problemas estudados dentro do gerenciamento de projetos. Ele consiste na alocação de recursos limitados às atividades de um projeto, respeitando suas dependências e restrições de recursos.

Segundo Alves (2019, p. 72), “O Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR) é um dos principais temas de pesquisa no campo do gerenciamento de projetos, pois aborda a alocação limitada de recursos entre atividades interdependentes”.

De acordo com Vieira et al. (2024), o PSPRR configura-se como uma ferramenta essencial para o planejamento, uma vez que permite determinar a melhor ordem de execução das atividades e a alocação eficiente dos recursos disponíveis, garantindo a eficiência do sistema produtivo e a redução do tempo total de execução dos projetos.

De acordo com Alves (2019), o PSPRR busca otimizar a alocação de recursos escassos dentro de um cronograma de atividades, sendo considerado um problema complexo e amplamente estudado em gestão de projetos. Sendo classificado como um problema NP-difícil por Blazewicz, Lenstra e Rinnooy (1983). Por esse motivo, nas últimas décadas, especialmente a partir dos anos 1990, houve um aumento expressivo nas pesquisas que propuseram várias extensões do PSPRR tradicional e métodos de solução para melhorar a aplicação do problema em situações reais.

2.4 O Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos

O Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR) trata de definir um cronograma de execução das atividades, levando em consideração tanto as restrições de precedência entre elas quanto a utilização dos recursos renováveis. O objetivo principal é minimizar a duração total do projeto.

No contexto do PSPRR clássico, segundo Brucker et al. (1998), um projeto é composto por um conjunto V de atividades, sendo elas caracterizadas por uma duração constante definida como p_i . Considerando que a atividade não pode ser interrompida até ser completamente finalizada. As relações de precedência entre as atividades são definidas pelo conjunto E , formado por pares de atividades (i, j) , os quais determinam que a atividade j só pode iniciar após a conclusão da atividade i . Cada atividade i necessita de uma quantidade definida do recurso renovável tipo k (rik), que está disponível em uma quantidade total Rk . São incluídas duas atividades fictícias no projeto, atividade inicial e a atividade final que representam, respectivamente, o início e término, possuindo duração nula e não consumindo recursos. Dessa forma, todas as atividades, suas respectivas durações, as relações de precedência entre elas, as quantidades disponíveis de recursos renováveis total e utilizadas por atividades são dados do problema. As variáveis de decisão são as datas de início de execução de cada uma das atividades, bem como a duração total do projeto.

2.4.1 Variações do Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR)

Estudos fundamentados em uma revisão bibliográfica atualizada por Hartmann e Briskorn (2010), visam investigar as principais generalizações sugeridas para o PSPRR. Os autores enfatizam que essa evolução ocorreu em resposta à crescente complexidade dos projetos modernos, envolvendo não apenas a escassez de recursos e as restrições de precedência e não interrupção, mas também diferentes formas de execução das atividades, múltiplos modos, custos financeiros e incertezas.

Para Fernandes (2017) o Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos e Múltiplos Modos de Execução (MPSPRR) constitui uma extensão direta do PSPRR, diferenciando-se pela existência de diferentes modos de execução para cada atividade do projeto. Cada modo determina simultaneamente o tempo de processamento e o consumo de recursos renováveis e não renováveis, sendo que atividades fictícias possuem apenas um modo, com duração e consumo nulos.

A formulação proposta por Talbot (1982), estabelece o MPSPRR como um problema cujo objetivo é selecionar um modo de execução para cada atividade e definir uma sequência que respeite as restrições de precedência e consumo de recursos, minimizando a duração total do projeto. Diferentemente do PSPRR, o MPSPRR inclui recursos não renováveis, cuja disponibilidade total é fixa ao longo de toda a duração do projeto, o que aumenta significativamente a complexidade do problema.

Conforme destaca Fernandes (2017) o MPSPRR pode ser decomposto em dois subproblemas principais: (i) determinar uma atribuição de modos viáveis, respeitando os limites de recursos não renováveis; e (ii) sequenciar as atividades de acordo com a atribuição de modos, observando as restrições de recursos renováveis e de precedência. A literatura reforça que, devido à sua natureza combinatória, o MPSPRR apresenta alta complexidade computacional. Sprecher e Drexler (1998) complementam apontando que projetos com mais de vinte atividades e múltiplos modos se tornam inviáveis de serem resolvidos de forma otimizada dentro de tempos aceitáveis.

Outras variações no problema original podem ser observadas nos trabalhos citados a seguir. Tao e Dong (2017) utilizam nós lógicos AND e OR, permitindo que diferentes caminhos no projeto sejam ativados conforme as escolhas do projeto. Já

Servranckx e Vanhoucke (2019) acrescentam estruturas do tipo XOR, em que exatamente um caminho deve ser escolhido entre várias alternativas, permitindo também caminhos aninhados. Vanhoucke e Coelho (2016), por sua vez, mantêm todas as atividades obrigatórias, mas flexibilizam as relações de precedência, com ligações do tipo AND (todos os predecessores devem ser concluídos) ou OR (basta um predecessor). Essas variações permitem modelar incertezas vividas nos projetos, decisões condicionais e vários caminhos possíveis dentro do projeto.

Mais um aspecto notável é a possibilidade de atrasos mínimos, que permitem a sobreposição de atividades. Isso significa que uma atividade subsequente pode começar antes de sua predecessora ser concluída, ou seja, as relações de precedência são alteradas de acordo com as necessidades de execução do projeto. Entre os principais avanços está a adoção de problemas generalizados, que permitem incluir atividades opcionais. Kellenbrink e Helber (2015) apresentam atividades opcionais ligadas a atividades “gatilho”. Se o gatilho for executado, ao menos uma das atividades associadas deve ocorrer; se não for, nenhuma delas será realizada. A precedência entre atividades só se aplica quando ambas estão presentes no cronograma, conferindo maior flexibilidade ao planejamento.

Uma extensão importante referente a utilização de recursos, ao longo do tempo, é a necessidade de a quantidade do recurso necessário para uma atividade poder variar durante sua execução. Isso impacta diretamente na definição da duração das atividades. Autores como Hartmann (2013) e Kreter et al. (2016) consideram quantidades de recursos variáveis ao longo do tempo, o que representa contextos como, por exemplo, mudanças de turno ou disponibilidade intermitente. Essas condições também são úteis em problemas de nivelamento de recursos, que visam distribuir sua utilização de forma mais uniforme ao longo do tempo. Conforme Kone, Artigues, Lopez e Mongeau (2013), esses recursos são ocupados no início da atividade e liberados apenas ao final, acumulando sua utilização durante o projeto. Outra estratégia associada à utilização de recursos é determinar apenas a quantidade total do recurso necessário, otimizando a sua alocação ao longo do tempo. Tao e Dong (2017) reforçam também a incorporação do uso dos recursos não renováveis. Dessa forma, essas extensões tornam o PSPRR uma ferramenta mais robusta e próxima dos desafios enfrentados em projetos reais.

2.4.2 Aplicações práticas do PSPRR em diferentes setores produtivos

A necessidade de modelos mais robustos e aderentes aos cenários industriais impulsionou o desenvolvimento de diversas extensões do PSPRR tradicional. Estudos, como os de Welerson (2023), demonstram o potencial das modelagens baseadas em restrições de recursos para otimizar a utilização de equipamentos e reduzir o tempo ocioso em diferentes operações.

A flexibilidade do PSPRR é especialmente útil em setores de alta complexidade operacional, como a indústria extrativa mineral, caracterizada por incertezas diárias, incluindo atrasos operacionais, falhas mecânicas, condições ambientais adversas e limitações na capacidade logística.

No setor de mineração, por exemplo, aplicações do PSPRR têm demonstrado resultados importantes na otimização de processos. O trabalho de Nesbitt et al. (2021) aborda o problema de sequenciamento em uma mina subterrânea, considerando incertezas operacionais e modelando o problema como uma extensão do PSPRR. O estudo traz que em ambientes subterrâneos, fatores como variação nas taxas de produção, instabilidades geotécnicas e disponibilidade de equipamentos tornam o planejamento incerto. Assim, os autores utilizam técnicas de programação e simulação para gerar cronogramas que minimizam riscos operacionais.

Projetos industriais complexos, como os presentes no setor de mineração, exigem métodos de planejamento capazes de garantir não apenas a execução ordenada das atividades, mas também a alocação eficiente dos recursos. Nesse contexto, o Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR) tem se destacado como uma ferramenta essencial para o gerenciamento de cronogramas em ambientes produtivos onde múltiplas atividades competem por recursos limitados.

Conforme destacado por Souza et al. (2025), o PSPRR vem adquirindo relevância justamente por sua capacidade de representar situações reais em que a simultaneidade de operações é restringida por fatores como disponibilidade de mão de obra, equipamentos e infraestrutura.

O modelo apresentado por Vieira et al. (2024), que utiliza a aplicação do PSPRR no setor de mineração onde permite otimizar o sequenciamento de atividades e o uso de recursos em projetos complexos, como a implementação do 3S em estações de

bombeamento, reduzindo significativamente o tempo total do projeto. Inicialmente, a empresa havia elaborado um planejamento manual, que resultou em 28 dias de duração do projeto. O modelo matemático baseado no PSPRR foi utilizado para organizar o sequenciamento das atividades e melhorar a alocação dos funcionários disponíveis para execução das tarefas. Com a aplicação do modelo, o sistema foi capaz de reduzir a duração total do projeto para 21 dias, representando uma melhoria significativa no planejamento inicial.

2.4.3 O Modelo Matemático para o Problema de Sequenciamento de Projeto com Restrição de Recurso

Apresenta-se, a partir do modelo proposto por Artigues *et al.* (2003), o modelo matemático de Programação Linear Inteira Mista desenvolvido para o Problema de Sequenciamento de Projeto com Restrição de Recurso.

Função Objetivo:

$$\min S_t \quad (1)$$

Restrições:

$$x_{ij} = 1, \forall (i, j) \in E \quad (2)$$

$$x_{ji} = 0, \forall (i, j) \in E \quad (3)$$

$$S_j - S_i - p_i - x_{ij}(\sum_{\{i \in V\}} p_i) + (\sum_{\{p \in V\}} p_i) \geq 0, \forall i \in V \cup \{s\}, \forall j \in V \cup \{t\}, i \neq j \quad (4)$$

$$f_{ijk} - (\max\{r_{ik}\}) \cdot x_{ij} \leq 0, \quad \forall i \in V \cup \{s\}, \forall j \in V \cup \{t\}, \forall k \in R, i \neq j \quad (5)$$

$$\sum_{\{j \in V \cup \{t\}\}} f_{ijk} = r_{ik}, \quad \forall i \in V \cup \{s\}, \forall k \in R, i \neq j \quad (6)$$

$$\sum_{\{j \in V \cup \{s\}\}} f_{ijk} = r_{jk}, \forall j \in V \cup \{t\}, \forall k \in R, i \neq j \quad (7)$$

Domínio da Função

$$S_i \geq 0, \forall i \in V \cup \{s\} \cup \{t\} \quad (8)$$

$$f_{ijk} \geq 0, \forall i \in V \cup \{s\}, \forall j \in V \cup \{t\}, \forall k \in R \quad (9)$$

$$x_{ij} \in \{0,1\}, \forall i \in V \cup \{s\}, \forall j \in V \cup \{t\} \quad (10)$$

Considerando:

$V = \{1, 2, \dots, n\}$: conjunto de n atividades do projeto;

$R = \{1, 2, \dots, m\}$: conjunto de m recursos renováveis;

E : conjunto de pares de (i, j) atividades cuja relação de precedência é conhecida a priori;

s : atividade fictícia que representa o início do projeto;

t : atividade fictícia que representa o fim do projeto;

rik : quantidade do recurso renovável tipo k que a atividade i necessita para ser executada;

pi : tempo de processamento da atividade i ;

$fijk$: fluxo da atividade i para a atividade j do recurso tipo k ;

xij : variável binária que estabelece se a atividade i precede a atividade j ;

Si : data de início da atividade i .

Neste modelo, a função objetivo (1) minimiza a data de início da atividade fictícia final t , consequentemente a duração total do projeto. As restrições (2) estabelecem as relações de precedência definidas a priori. O conjunto de restrições (3) fixam os valores igual a zero quando já existe a relação de precedência estabelecida entre as atividades i e j . As restrições (4) definem o sequenciamento das atividades. As restrições (5) limitam a utilização do recurso em sua quantidade total máxima disponível. As restrições (6) e (7) definem que a quantidade de recurso renovável que chega em uma atividade é igual a quantidade que sai, sendo exatamente igual a quantidade que a atividade necessita deste recurso para ser executada. Por fim, as restrições (8), (9) e (10) representam os respectivos domínios das variáveis.

Esse modelo será implementado computacionalmente, utilizando a linguagem MPL (Mathematical Programming Language) e o otimizador GLPK (GNU Linear Programming Kit), e utilizado como uma ferramenta de tomada de decisão no planejamento do processo produtivo mineral.

3 ESTUDO DE CASO

O sequenciamento das atividades relacionadas ao processo de expedição e carregamento de minério de ferro na indústria mineral é um tema de fundamental importância para a cadeia produtiva da mineração. O correto ordenamento dessas atividades é essencial para se alcançar estabilidade nos indicadores de manuseio e transporte dos produtos, sendo, portanto, indispensável à manutenção eficiente das operações em todas as etapas do processo minerário.

Este estudo será direcionado à redução do Tempo Médio de Carregamento (TMC) em um processo de carregamento de minério de ferro realizado em uma empresa de grande porte do setor mineral, localizada no município de Ouro Preto – MG. A organização analisada é reconhecida como uma das maiores produtoras de minério de ferro do país, ocupando posição de liderança no mercado nacional e internacional, com um amplo portfólio de unidades operacionais distribuídas em diferentes regiões do território brasileiro, com destaque para os estados de Minas Gerais e Pará.

Devido à sua elevada capacidade produtiva e à complexidade de suas operações, a empresa apresenta variações significativas nos volumes de produção, decorrentes de fatores operacionais, logísticos e estratégicos. Tais variações exercem influência direta não apenas sobre o desempenho interno dos processos, mas também sobre a dinâmica econômica e social das comunidades localizadas em seu entorno, reforçando a relevância de estudos voltados à eficiência operacional e à otimização de seus sistemas produtivos.

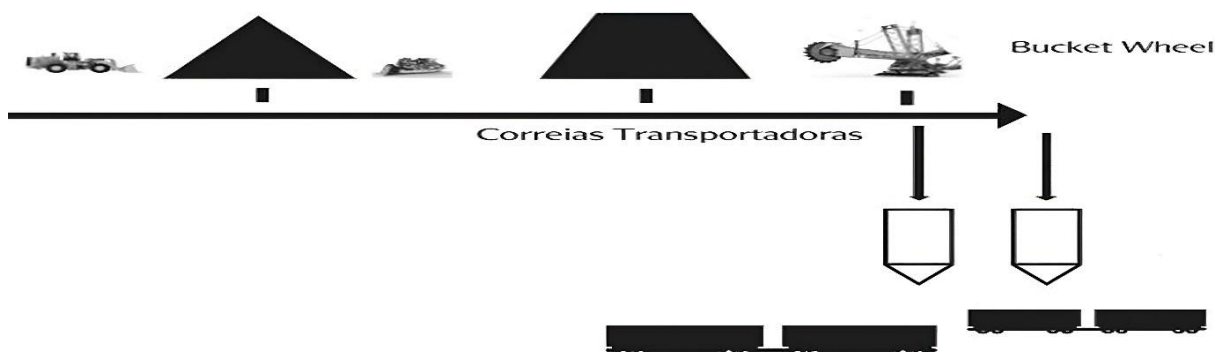
Para delimitar o escopo do estudo, não serão considerados modelos com múltiplos modos de execução, nem recursos não renováveis. Além disso, os custos das atividades e dos recursos não são analisados. Logo, o estudo utiliza exclusivamente o modelo matemático do PSPRR apresentado no Item 2.4.3, adotado como representação do sistema analisado.

O problema estudado é modelado como o PSPRR, considerando o TMC com o objetivo de minimizar o makespan. O caso em análise aborda o fluxo de atividades realizadas tanto na preparação do circuito e dos equipamentos para o início do

carregamento quanto na sequência de operações durante o carregamento em andamento.

Na indústria em questão, o processo de expedição é realizado por meio do transporte ferroviário, sendo os produtos (minérios) escoados para clientes internos e externos. Para o carregamento das composições ferroviárias, é necessário o transporte e o direcionamento do minério de ferro até o ponto de carga - o Terminal Ferroviário 01, composto por silos que despejam o material diretamente sobre os vagões. Todo o processo é operacionalizado por correias transportadoras, alimentadas por equipamentos móveis, como tratores de esteira e carregadeiras, além da retomadora do tipo Bucket Wheel (roda de caçamba), responsável por transferir o material depositado no pátio de produtos até o silo de carregamento. A Figura 4 ilustra esse processo.

Figura 4 - Representação do carregamento de minério



Fonte: Próprio autor (2026)

Cada operador é responsável pela preparação de seu respectivo equipamento, garantindo sua disponibilidade antes da chegada da locomotiva ao ponto de carga. A atividade inicial se dá com a comunicação da presença da composição no ponto “Zero”, aguardando deslocamento até o Terminal de Carregamento 01. A partir desta sinalização, diversas ações são executadas com o objetivo de preparar o circuito para o carregamento. Após a autorização para o deslocamento da locomotiva, as seguintes atividades são realizadas:

- Inspeção nos chutes de transferência dos transportadores de correia;

- Inspeção em três desviadores de fluxo;
- Inspeção nos equipamentos de carregamento (tratores, carregadeiras e Bucket Wheel);
- Movimentação e posicionamento das máquinas de empilhamento e retomada; • Testes e inspeções nos sistemas de aspersão (controle de emissão de particulados/poeira);
- Rechego de material com tratores e carregadeiras (direcionamento do material aos alimentadores de bandeja e transportadores de correia).

Após a conclusão dessas etapas, o circuito pode ser alimentado com minério de ferro, direcionando-o até o ponto de carga onde se encontram os silos e a composição ferroviária, já posicionada e pronta para receber a carga nos vagões. O processo de carregamento é realizado simultaneamente pelos operadores dos equipamentos auxiliares, pelo operador da retomadora de roda de caçamba, pelo operador do silo de carregamento e pelo maquinista, que mantém a locomotiva em movimento contínuo. Ao término da carga completa da composição composta por 84 vagões, considera-se finalizado o processo, sendo está a atividade fictícia final.

Este processo está exposto a desvios que podem ocorrer durante a movimentação dos desviadores de fluxo e o manuseio do minério, como por exemplo travamento nos desviadores de fluxo e obstruções/entupimentos nos chutes de transferências das correias transportadoras. Estas atividades serão consideradas como “gatilho” que segundo os conceitos já apresentados por Kellenbrink e Helber (2015) criam atividades opcionais ligadas a atividades “gatilho”. Se o gatilho for executado, ao menos uma das atividades associadas deve ocorrer; se não for, nenhuma delas será realizada.

O objetivo deste estudo é distribuir os recursos e sequenciar as atividades de forma eficiente, de modo a realizá-las no menor tempo possível. Para isso, devem ser consideradas as restrições relativas à quantidade de recursos disponíveis para a execução simultânea das tarefas. Embora diversas atividades possam ser realizadas em paralelo, é necessário avaliar cuidadosamente o cenário para otimizar a alocação dos operadores, buscando a minimização do makespan.

Durante a etapa de coleta de dados e observação em campo, realizada em conjunto com os responsáveis pelos processos operacionais, constatou-se que não

existia uma lógica formalmente definida para o sequenciamento das atividades. Estas eram executadas de forma empírica, predominantemente em função da disponibilidade momentânea dos operadores e equipamentos, sem a adoção de um planejamento estruturado que orientasse a ordem de execução e a simultaneidade adequada das tarefas. Essa condição caracteriza o cenário operacional anterior à aplicação do modelo proposto, servindo como base para a compreensão do contexto inicial do processo.

Para explicitar essa condição anterior, foi considerado um cenário representativo no qual as atividades são realizadas de forma sequencial, sem coordenação estruturada e sem a alocação eficiente dos recursos disponíveis. Nessa situação, a ausência de paralelismo entre as tarefas e a distribuição não otimizada dos recursos resultam em um tempo total de preparação que pode atingir 151 minutos. Esse valor evidencia uma condição operacional não otimizada, marcada pela subutilização dos recursos e pela inexistência de um sequenciamento racional das atividades, constituindo, portanto, um referencial comparativo para a avaliação dos ganhos obtidos com a aplicação do modelo de otimização.

Com base nesse contexto inicial, procedeu-se à coleta sistemática de dados com o objetivo de subsidiar a construção do modelo otimizado e a análise detalhada do problema. Essa coleta foi realizada por meio de observações em campo, com o suporte da equipe técnica responsável pelo processo de expedição na empresa analisada, ao longo de um período de 30 dias, durante o mês de maio de 2025. Nesse intervalo, foram examinadas as rotinas logísticas relacionadas aos processos de carregamento de minério, contemplando os tempos de deslocamento, a duração das atividades operacionais e as sequências de execução adotadas pelos operadores.

O levantamento foi conduzido com acompanhamento direto das operações, o que possibilitou a obtenção de informações precisas sobre o fluxo de trabalho e as práticas operacionais vigentes. Adicionalmente, foram coletados dados referentes à disponibilidade de recursos, obtidos por meio do sistema interno de gestão de equipes, no qual são definidos o quantitativo de pessoal (headcount) e as respectivas funções desempenhadas pelos operadores.

Por fim, ressalta-se que todos os dados utilizados neste estudo foram obtidos com o conhecimento e a anuência das lideranças envolvidas, assegurando a confiabilidade

das informações e a legitimidade do processo de coleta, bem como a aderência às práticas operacionais reais da organização.

Com base nos dados coletados durante as observações de campo e nas informações obtidas junto ao sistema interno de gestão de equipes, foi possível identificar e quantificar os recursos renováveis envolvidos no processo analisado. Esses recursos, bem como suas respectivas quantidades disponíveis, constituem elementos fundamentais para a modelagem do problema e para a análise do sequenciamento das atividades. As Tabelas 1 e 2 apresentam, de forma estruturada, a caracterização dos recursos considerados neste estudo, servindo como base para a construção e aplicação do modelo de otimização proposto.

Tabela 1 - Conjunto dos recursos renováveis

Rk	Tipo Recurso	Quantidade
1	Operadores de Pátio	2
2	Operador de Trator	1
3	Operador de Carregadeira	1
4	Operadores de Silo	1
5	Operador de Bucket Wheel	1
6	Técnico de Carregamento	1
7	Maquinista	1
8	Operador Usina	1

Fonte: Próprio autor (2026)

Tabela 2 - Dados Operacionais

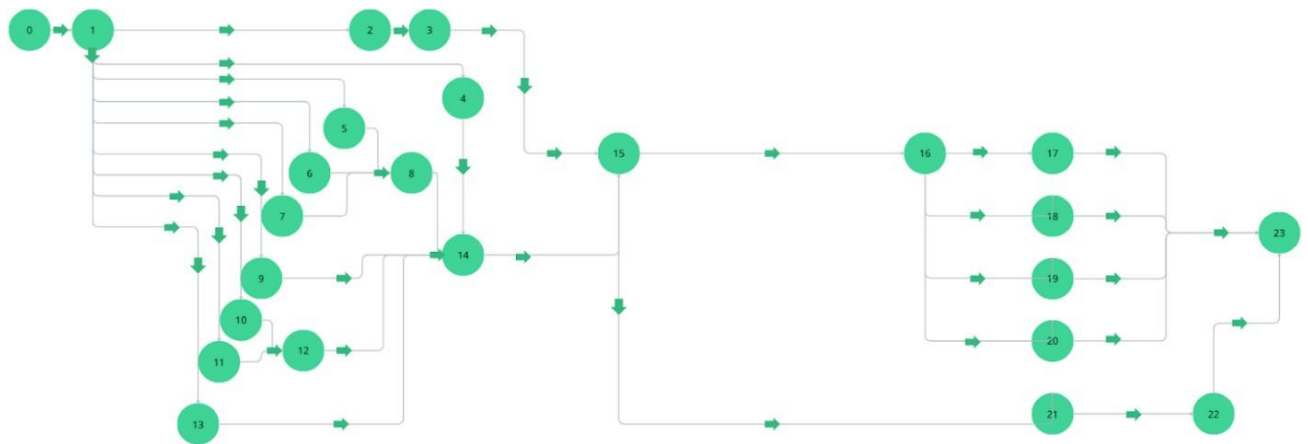
NÚMERO DA EAP	TÍTULO DA TAREFA	Duração (minutos)	Dependência	Recursos Renováveis
1	Composição Aguardando Posição 0	15	0	01 Maquinista
2	Composição Aguardando Pera Ferroviária	15	1	01 Maquinista
3	Posicionamento Composição (84 / 86 vagões)	10	2	01 Maquinista / 01 Operador Silo

4	Inspeção Chutes de Transferências	20	1	01 Operador Pátio
5	Inspeção Desviadores de Fluxo (FG-7914)	5	1	01 Operador Pátio
6	Inspeção Desviadores de Fluxo (FG-7918)	5	1	01 Operador de Pátio
7	Inspeção Desviadores de Fluxo (FG-7934)	5	1	01 Operador de Pátio
8	Atividade Gatilho A (Houve Travamento do Desviador?)	0	5,6,7	01 Operador de Pátio
9	Rechego Produtos	20	1	01 Operador de Trator de Esteira / Carregadeira
10	Inspeccionar Bucket Wheel (RC-7015)	10	1	01 Operador de Bucket Wheel
11	Posicionar EM-6219 / EM7055	10	1	01 Operador de Usina
12	Posicionar Bucket Wheel (RC-7015)	5	10, 11	01 Operador de Bucket Wheel
13	Teste Sistema de Aspersão	5	1	01 Técnico Carregamento
14	Completar Silo SL-7038	4	4,8,9,12 e 13	01 Operador de Silo / 01 Operador de Bucket Wheel / Operador Trator / Operador de Carregadeira
15	Comunicar início	1	3 e 14	Operador Silo
16	Movimentação da Composição 0.8 / 1,0 km/h	1	15	Maquinista
17	Aspersão	1	16	Operador Silo
18	Alimentação Via Trator e Carregadeira	10	16	Operador Trator / Operador e Carregadeira
19	Operação Alimentadores	3	16	Operador de Pátio
20	Operação Bucket Wheel	3	16	Operador Bucket Wheel
21	Inspeção Chutes de Transferências (Durante Carregamento)	3	15	Operador Pátio
22	Atividade Gatilho B (Houve Obstrução??)	0	21	Operador Pátio
23	Final do Carregamento	0	22	Operador Pátio

Fonte: Próprio autor (2026)

A partir dos dados apresentados nas tabelas de atividades e em suas respectivas relações de precedência, foi possível construir o grafo do projeto, representado na Figura 5. Esse grafo ilustra de forma visual a estrutura do problema, evidenciando a sequência lógica de execução das atividades e as dependências existentes entre elas. A representação gráfica contribui para uma melhor compreensão do fluxo do processo, além de servir como base para a modelagem e aplicação do método de otimização utilizado neste estudo.

Figura 5 - Grafo do problema



Fonte: Próprio autor (2026)

4 RESULTADOS E ANÁLISES

O software GLPK (GNU Linear Programming Kit) foi utilizado neste estudo por sua capacidade de resolver modelos de Programação Linear Inteira Mista, como o Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR). Segundo Vieira e Rola (2024), o GLPK foi aplicado na implementação e resolução de modelos matemáticos de sequenciamento, demonstrando sua eficiência na obtenção de soluções ótimas e validando sua aplicação em problemas de otimização.

Além disso, o GLPK é um software gratuito e de código aberto, compatível com linguagens de modelagem matemática, permitindo a implementação e resolução eficiente do modelo proposto. Após a implementação no GLPK, foi obtida a solução representada pelo Diagrama de Gantt apresentado na Figura 6.

Figura 6 - Diagrama de Gantt



Fonte: Próprio autor (2026)

Observa-se que as atividades foram sequenciadas obedecendo suas respectivas relações de precedência e restrições de recursos. Dessa forma, o tempo total de duração do projeto é de 49 minutos. O principal desafio se deu entre as atividades 2 e 13, onde grande parte, parte das atividades poderiam ser realizadas de forma simultânea, porém, devido a limitação dos recursos, essas etapas foram realizadas de forma sequenciada pelo modelo matemático que representa o problema.

A estrela, no Diagrama de Gantt, representa o final do processo e os dois pontos representados em vermelho representam as atividades consideradas “gatilhos” que podem ou não acontecer.

O primeiro representa a “atividade gatilho A” que se refere à movimentação dos chutes móveis FG 7916, FG 7918 e FG 7934, a ser executada exclusivamente em situações de travamento dos desviadores de fluxo durante a etapa de preparação do circuito operacional. O travamento pode ocorrer em decorrência de acúmulo de material, falha mecânica, desalinhamento estrutural ou impedimento do mecanismo de acionamento, comprometendo a correta direcionamento do fluxo de material. Nessa condição, torna-se necessária a intervenção para reposicionamento do chute móvel, utilizando talhas manuais devidamente inspecionadas e compatíveis com a carga aplicada.

A atividade consiste na movimentação mecânica do chute móvel, realizada por meio da utilização de talhas manuais previamente instaladas ou posicionadas no ponto de intervenção. Os operadores executam o reposicionamento controlado do chute até que este atinja a posição operacional adequada, garantindo o correto direcionamento do fluxo de material. Após a movimentação, são realizadas verificações visuais e funcionais para assegurar o restabelecimento das condições normais de operação, permitindo assim a liberação do circuito para retorno às atividades produtivas.

Já o segundo ponto representa a “atividade gatilho B” Desobstrução de Chutes, que é caracterizada como uma intervenção corretiva, sendo executada somente em situações de obstrução dos chutes de transferência durante o processo de carregamento de material. Essa condição é geralmente identificada por meio de inspeção visual, redução ou interrupção do fluxo de material, ou por indicadores operacionais que

evidenciem acúmulo indevido de material nos chutes de transferências, o entupimento pode ocorrer devido a umidade excessiva do material, granulometria inadequada, formação de crostas ou compactação interna, ocasionando restrição ou bloqueio do fluxo.

Uma vez confirmada a obstrução, é necessária a paralisação total do circuito envolvido, garantindo condições seguras para intervenção da equipe operacional. Após a parada e o bloqueio dos equipamentos conforme os procedimentos de segurança (bloqueio e etiquetagem, quando aplicável), é realizado o deslocamento dos recursos necessários até o local da intervenção, incluindo operadores capacitados e caminhão pipa.

A desobstrução é realizada por meio da aplicação de jatos de água pressurizada, com o objetivo de fragmentar e remover o material compactado aderido às superfícies internas do chute, restabelecendo o fluxo normal. Durante toda a atividade, os operadores monitoram visualmente a eficiência da limpeza e verificam a integridade estrutural do chute. Após a conclusão da desobstrução, é realizada uma inspeção final para confirmar a liberação completa do fluxo e, posteriormente, o circuito é liberado para retomada da operação.

A Tabela 3 apresenta os dados referentes às atividades gatilho A e B, incluindo suas respectivas durações, relações de precedência e os recursos necessários para sua execução.

Tabela 3 - Dados das “Atividades gatilhos A e B”

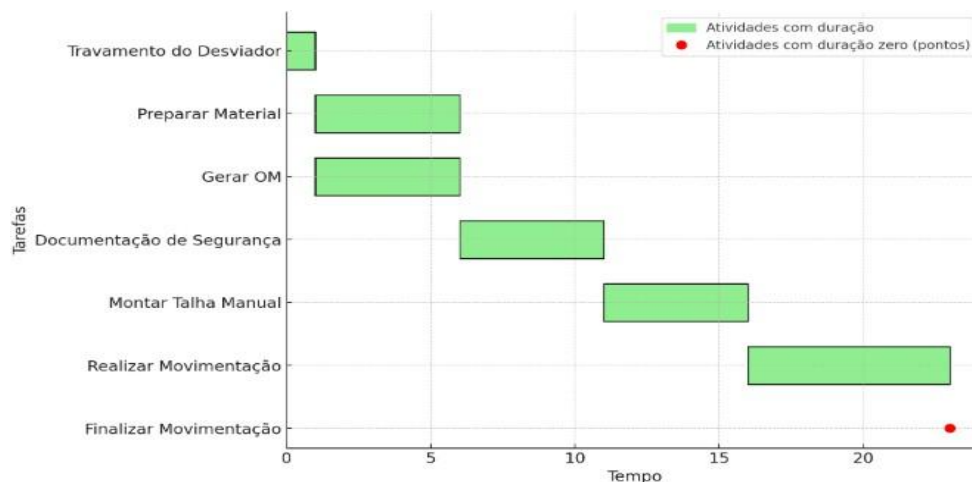
A	Movimentação Chutes (FG-7914/18/34)	Duração	Dependência	Recursos Renováveis
1	Travamento do Desviador	1	-	Operador Pátio
2	Preparar Material	10	1	Operador Pátio (Mantenedor)
3	Gerar OM	5	1	Técnico Carregamento
4	Documentação de Segurança	5	3	Operador Pátio (Mantenedor)
5	Montar Talha Manual	7	4	Operador Pátio (Mantenedor)
6	Realizar Movimentação	7	5	Operador Pátio (Mantenedor)
7	Finalizar Movimentação	0	6	Operador Pátio (Mantenedor)

B	Desobstrução Chutes			
1	Obstrução Chute	1	-	Operador Pátio
2	Preparar Material	5	1	Operador Pátio
3	Solicitar Caminhão Pipa	2	1	Técnico Carregamento
4	Deslocamento Caminhão Pipa	15	3	Operador Pipa
5	Montar Linha de Limpeza	5	2	Operador Pátio
6	Realizar Limpeza	20	4 e 5	Operador Pátio
7	Final da Limpeza	0	6	Operador Pátio

Fonte: Próprio autor (2026)

O Diagrama de Gantt da Figura 7 mostra o processo de Movimentação de Chutes que começa com o Travamento do Desviador e, logo depois, são feitas ao mesmo tempo as tarefas Preparar Material e Gerar OM, entre os tempos 1 e 6. Quando essas duas terminam, inicia-se a Documentação de Segurança, que dura até o tempo 11. Em seguida, ocorre a Montagem da Talha Manual, e depois a Realização da Movimentação, que vai até o tempo 23. Por fim, o processo se encerra com a atividade Finalizar Movimentação, marcada apenas como um ponto final, pois não tem duração.

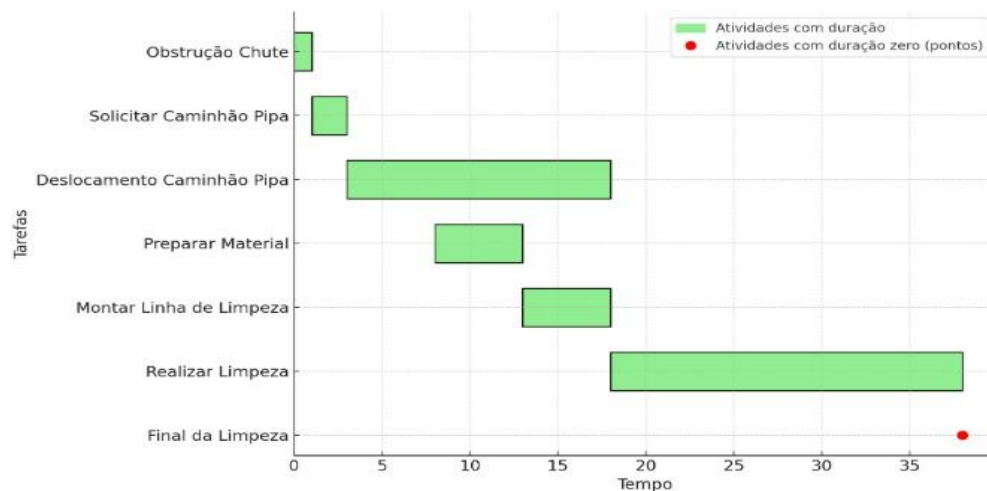
Figura 7 - Diagrama de Gantt “Atividade Gatilho A”



Fonte: Próprio autor (2026)

A Figura 8 representa o Diagrama de Gantt da atividade de Desobstrução de Chute, começando com a Obstrução do Chute, seguida da Solicitação e Deslocamento do Caminhão Pipa. Enquanto o caminhão se desloca, ocorre a Preparação de Material, seguida da Montagem da Linha de Limpeza. A principal tarefa que é a de realizar limpeza, vai de 18 minutos a 38 minutos, e o processo termina com o ponto final da limpeza, sem duração. Algumas atividades acontecem em paralelo e outras de forma sequencial.

Figura 8 - Diagrama de Gantt “Atividade Gatilho B”



Fonte: Próprio autor (2026)

Caso a denominada “atividade gatilho A” ocorra durante a execução do processo, observa-se um impacto direto no cronograma do projeto, com acréscimo de 23 minutos ao tempo total inicialmente planejado. Já a ocorrência da “atividade gatilho B” resulta em um aumento ainda mais expressivo, elevando o makespan em 38 minutos. Além dessas situações isoladas, existe a possibilidade de que ambas as atividades sejam acionadas simultaneamente no mesmo ciclo operacional. Nesse cenário combinado, o impacto acumulado representa um acréscimo de 61 minutos, o que eleva a duração total do projeto principal para 110 minutos, evidenciando a relevância dessas atividades como elementos críticos no desempenho temporal do processo.

Apesar do aumento do makespan decorrente da ocorrência das atividades gatilho, a otimização das atividades A e B contribui de forma significativa para mitigar os impactos negativos no sequenciamento global do projeto. Essas tarefas seguem uma lógica

operacional o que favorece sua gestão quando adequadamente planejadas. No entanto, para que os ganhos esperados sejam efetivamente alcançados, torna-se de fundamental importância a definição clara dos papéis e responsabilidades de cada operador envolvido, bem como a padronização dos procedimentos operacionais. A falta dessa definição pode gerar atrasos, retrabalhos e conflitos na alocação de recursos, comprometendo a eficiência do processo e ampliando os efeitos negativos das atividades gatilho sobre o cronograma.

Antes da aplicação do modelo proposto, o processo era executado sem um sequenciamento estruturado e sem a devida coordenação entre as equipes, que atuavam em diferentes turnos e seguiam procedimentos não padronizados. Como consequência, observava-se um cenário operacional não otimizado, no qual, em uma condição extrema caracterizada pela execução sequencial das atividades e pela distribuição ineficiente dos recursos, o tempo total de preparação poderia chegar a 151 minutos, valor que ainda não considera a ocorrência das atividades gatilho. Esse cenário evidencia a subutilização dos recursos disponíveis e resulta em maiores tempos de parada operacional, impactando diretamente os custos operacionais, especialmente aqueles relacionados à mão de obra, utilização de equipamentos e perdas de produtividade.

Com a aplicação do Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR), foi possível organizar o processo de forma estruturada, definindo a ordem adequada de execução das atividades e promovendo uma alocação mais eficiente dos recursos disponíveis. O modelo permitiu identificar oportunidades de execução simultânea de atividades, reduzir conflitos de recursos e melhorar a coordenação entre as equipes. Como resultado, observou-se uma redução significativa do tempo total de preparação do circuito, passando de um cenário potencial de 151 minutos para 49 minutos após a otimização.

Essa redução representa um ganho expressivo de eficiência operacional, com impacto direto na diminuição dos custos associados ao tempo de preparação, na melhor utilização da mão de obra e dos equipamentos e no aumento da disponibilidade do sistema produtivo. Dessa forma, os resultados obtidos demonstram a eficácia da aplicação do PSPRR como ferramenta de apoio à tomada de decisão.

5 CONCLUSÃO

O presente estudo evidenciou a aplicabilidade prática do modelo de Programação Linear Inteira Mista para o Problema de Sequenciamento em Projetos com Restrição de Recursos (PSPRR), utilizado no contexto operacional de uma empresa do setor minerário localizada em Ouro Preto – MG. A partir de um abrangente referencial teórico, que compreendeu desde a caracterização da atividade mineral no Brasil, passando pelos fundamentos do Planejamento e Controle da Produção (PCP) na mineração, até os modelos clássicos e contemporâneos de sequenciamento da produção, foi possível estruturar uma abordagem robusta e alinhada às características do setor. Esse embasamento teórico permitiu compreender a complexidade inerente às operações minerais e justificar o uso de técnicas avançadas de otimização para apoiar decisões operacionais, como o sequenciamento de atividades observado no estudo de caso.

A modelagem e a resolução do problema, com o uso da ferramenta GLPK GNU, permitiram uma análise otimizada do processo de carregamento ferroviário de minério de ferro, destacando a importância do sequenciamento eficiente das atividades e da gestão adequada dos recursos humanos e equipamentos envolvidos, minimizando o tempo total do projeto (makespan). O tempo mínimo encontrado foi de 49 minutos, evidenciando uma otimização significativa frente à realidade operacional.

Outro ponto de destaque foi a consideração das chamadas “atividades gatilho”, que representam eventos condicionais imprevisíveis, como o travamento de desviadores de fluxo e a obstrução dos chutes de transferência. A inclusão dessas atividades no modelo permitiu a avaliação de diferentes cenários, ampliando a robustez e o realismo da solução obtida. Caso ambos os gatilhos ocorram, o tempo total do projeto será de 110 minutos, evidenciando o impacto substancial desses eventos na produtividade e na eficiência do sistema.

Os resultados obtidos demonstram que a adoção de modelos matemáticos avançados, integrando variáveis operacionais e condicionais, contribui significativamente para o planejamento estratégico da produção. Além disso, destaca-se a importância de se estabelecer papéis e responsabilidades bem definidos para evitar atrasos, especialmente nas etapas críticas e nas atividades condicionais.

Entretanto, ressalta-se que a implementação de modelos de otimização em ambientes reais apresenta desafios significativos, principalmente devido à dependência de dados confiáveis e representativos da operação. A qualidade da solução está diretamente relacionada à precisão dos tempos, capacidades e restrições utilizadas na modelagem, o que exige um esforço consistente de coleta, validação e atualização de dados operacionais reais. Essa limitação reforça a necessidade de integração entre as áreas operacionais e de planejamento para viabilizar a aplicação prática do modelo.

No que se refere às limitações do estudo, destaca-se que o modelo proposto não considerou de forma detalhada os custos operacionais, nem a existência de múltiplos modos de execução das atividades, aspectos comuns em sistemas produtivos reais. Essas características não foram exploradas neste trabalho, mas representam desafios relevantes e oportunidades para pesquisas futuras.

Como sugestão para trabalhos futuros, recomenda-se a ampliação do modelo por meio da inclusão de uma análise mais detalhada dos custos operacionais, permitindo avaliar não apenas o tempo ótimo, mas também o impacto econômico das decisões operacionais. Adicionalmente, destaca-se a importância da utilização de modelos de simulação integrados ao modelo de otimização, possibilitando avaliar diferentes cenários operacionais e analisar a viabilidade da inserção de recursos adicionais, especialmente no que se refere à contratação de mais mão de obra. Essa abordagem permitirá verificar o equilíbrio entre o custo de contratação e os ganhos operacionais obtidos com a redução do tempo total do processo, contribuindo para uma tomada de decisão mais assertiva e economicamente fundamentada.

Por fim, as contribuições acadêmicas deste trabalho concentram-se na aplicação estruturada do PSPRR ao contexto da mineração, com a inclusão de atividades condicionais, ampliando o debate sobre modelos de sequenciamento em ambientes industriais complexos. Do ponto de vista prático, o estudo oferece uma ferramenta de apoio à decisão capaz de melhorar o planejamento operacional, reduzir tempos improdutivos e aumentar a eficiência dos processos, contribuindo para uma gestão mais integrada e fundamentada das operações minerárias.

6 REFERÊNCIAS

ALEXANDRE, R. F. Modelagem, simulação da operação e otimização multiobjetivo aplicada ao problema de despacho de veículos em minas a céu aberto. 2010. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO (ANM). Informe Mineral: 4º trimestre de 2024. Brasília: ANM, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/anm>. Acesso em: 2 nov 2025.

ALVES, M. F.; GUERRAZZI, L. A.; ANDRADE, A.; CINTRA, G. Uma análise bibliométrica e bibliográfica sobre o problema de programação de projetos com restrição de recursos. *Revista de Gestão e Projetos – GeP*, v. 10, n. 3, p. 71–90, 2019.

ANM – Agência Nacional de Mineração. Anuário Mineral Brasileiro: principais substâncias metálicas. Ano-base 2024. Brasília: ANM, 2025. Disponível em: [anuario-mineral-brasileiro-principais-substancias-metalicas-2024](#). Acesso em: 1 nov. 2025.

ARTIGUES, C.; MICHELON, P.; REUS, L. Insertion Techniques for Static and Dynamic Resource-Constrained Project Scheduling. *European Journal of Operational Research*, v. 149, n. 2, p. 249–267, 2003.

BALLOU, R. H. Gerenciamento da cadeia de suprimentos/logística empresarial. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006.

BARBOSA, E. S.; SANTOS, M. S.; LOPES, V. M. N. A importância do PCP (Planejamento e Controle da Produção) para a competitividade em indústrias de Juazeiro da Bahia. 2019. DOI: 10.14295/IDONLINE.V13I47.1946. Disponível em: <https://scispace.com>. Acesso em: 2 nov. 2025.

BARRETO, A. A. M. Qualidade e produtividade na indústria da confecção: uma questão de sobrevivência. Londrina: Imprensa Midiograf, 1997.

BERTONE, A. M. A.; BASSANEZI, R. C.; JAFELICE, R. S. M. Modelagem Matemática. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia – UFU, 2014.

BISWAS, Tanishk; BARAL, Rudra Narayan. *A Review on Production Planning and Control*. 2021.

BLAZEWICZ, J.; LENSTRA, J. K.; RINNOOY KAN, A. H. G. Scheduling Subject to Resource Constraints: Classification and Complexity. *Discrete Applied Mathematics*, v. 5, p. 11–24, 1983.

BRASIL. Instituto Brasileiro de Mineração (IBRAM). Relatório Anual de Atividades 2024. Brasília: IBRAM, 2025. Disponível em: <https://ibram.org.br>. Acesso em: 26 nov. 2025.

BRUCKER, P.; KNUST, S.; SCHOO, A.; THIELE, O. A Branch and Bound Algorithm for the Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, v. 107, p. 272–288, 1998.

CASTRO NETO, J. M.; BOTTER, R. C. Modelagem e simulação da cadeia produtiva do minério de ferro. São Paulo: Universidade de São Paulo, 2022. Disponível em: <https://repositorio.usp.br>. Acesso em: 3 nov. 2025.

CASTRO NETO, L. R. Modelagem e simulação da cadeia produtiva do minério de ferro. 2006. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

CHAVES, A. P. Teoria e prática do tratamento de minérios. v. 1. 2. ed. São Paulo: Signus, 2002.

CHAVES, A. P.; FERREIRA, F. M. Apostila Estocagem e homogeneização. São Paulo, 2006.

CORREA, H. L. Planejamento, programação e controle da produção: MRP II/ERP, conceitos, uso e implantação. São Paulo: Atlas, 2000.

COSTA, C. M. Análise dos sistemas de planejamento e controle da produção em uma empresa do segmento de mineração de calcário e gesso. In: ENEGEP, 31., 2011, Belo Horizonte. Anais [...]. Belo Horizonte: Abepro, 2011.

CRUZ, A. V. A. Otimização de planejamento com restrições de precedência usando algoritmos genéticos e coevolução cooperativa. 2003. Dissertação (Mestrado) — PUC-Rio, Rio de Janeiro, 2003.

DEMEULEMEESTER, E. L.; HERROELEN, W. S. Project Scheduling: A Research Handbook. Springer, 2002. DOI: 10.1007/b101924.

FERNANDES, R. O. P. Estudo de sequenciamento da produção em uma indústria de meias. 2006. Monografia – Universidade Federal de Juiz de Fora, 2006.

FUCHIGAMI, H. Y.; RANGEL, S. Uma análise de estudos de casos em sequenciamento da produção. In: SBPO, 46., 2014, Salvador. Anais [...]. Salvador: SOBRAPO, 2014.

GALVÃO, H. M.; JUNQUEIRA, L. F.; MOTA, J.; AVELAR, T. P.; SILVA, W. C. F. Fatores de influência no Planejamento e Controle da Produção para a competitividade empresarial. XXXVI Enegep – Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2016.

GOLDBARG, M. C.; LUNA, H. P. L. Otimização Combinatória e Programação Linear: modelos e algoritmos. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2005. 518 p.

HARTMANN, S. Project Scheduling with Resource Capacities and Requests Varying with Time: A Case Study. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, v. 25, n. 1, p. 74–93, 2013.

HARTMANN, S.; BRISKORN, D. A Survey of Variants and Extensions of the Resource-Constrained Project Scheduling Problem. *European Journal of Operational Research*, v. 207, 2010.

HARTMANN, S.; BRISKORN, D. Uma pesquisa atualizada de variantes e extensões do problema de programação de projetos com recursos limitados. *European Journal of Operational Research*, v. 297, p. 1–14, 2022.

KELLENBRINK, C.; HELBER, S. Scheduling Resource-Constrained Projects with a Flexible Project Structure. *European Journal of Operational Research*, v. 246, n. 2, p. 379–391, 2015.

KELLENBRINK, C.; HELBER, S. Scheduling resource-constrained projects with a flexible project structure. European Journal of Operational Research, v. 246, n. 2, p. 379–391, 2015.

KIM, J.-L.; ELLIS, R. D. Permutation-Based Elitist Genetic Algorithm for Optimization of Large-Sized Resource-Constrained Project Scheduling. *Journal of Construction Engineering and Management*, v. 134, n. 11, p. 904–913, 2008.

KONE, O.; ARTIGUES, C.; LOPEZ, P.; MONGEAU, M. Comparison of Mixed Integer Linear Programming Models for the RCPSP with Resource Consumption and Production. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, v. 25, p. 25–47, 2013.

KREMER, C. D.; KOVALESKI, J. L. Planejamento e controle dos processos de fabricação metalúrgicos auxiliado pelo gráfico de Gantt: um estudo de caso. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DOS CAMPOS GERAIS, 2., 2008.

KRETER, S.; RIECK, J.; ZIMMERMANN, J. Models and Solution Procedures for the RCPSP with Temporal Constraints and Calendars. *European Journal of Operational Research*, v. 251, n. 2, p. 387–403, 2016.

LUZ, A. B. et al. Tratamento de minérios. 4. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2004.

MARTINS, P. G.; LAUGENI, F. P. Administração da produção. 2. ed. São Paulo: Saraiva, 2006.

MATTOS, A. D. Planejamento e Controle de Obras. São Paulo: Pini, 2010.

NAHAS, M. Mineração e dinâmica produtiva em municípios mineradores de Minas Gerais. 2014. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014.

NESBITT, P. et al. Escalonamento de minas subterrâneas sob incerteza. *European Journal of Operational Research*, v. 294, n. 1, p. 340–352, 2021.

OLIVEIRA, A. H.; KRÜGER, S. Análise da importância do PCP no processo produtivo de uma mineradora. Lavras: UNINTER, 2022.

PINEDO, M.; CHAO, X. Operations Scheduling with Applications in Manufacturing and Services. New York: Irwin McGraw-Hill, 1999.

PINEDO, M. Scheduling: Theory, Algorithms, and Systems. 2. ed. New Jersey: Prentice Hall, 2002.

PORTILHO, L. M. P. Aplicação do Problema de Job-Shop Scheduling em Aciarias. 2007. Monografia – Universidade Federal de Juiz de Fora, 2007.

ROBERTO, J. C. A.; LIMA, O. P.; ARAÚJO, P. C. Planejamento, programação e controle da produção na indústria. *GeSec*, v. 14, n. 6, 2023. DOI: 10.7769/gesec.v14i6.2245.

ROESER, H. M. P.; ROESER, P. A. O quadrilátero ferrífero – MG: história, recursos e problemas ambientais. *Geonomos*, v. 18, n. 1, p. 33–37, 2010.

SERVRANCKX, T.; VANHOUCKE, M. A Tabu Search Procedure for the RCPSP with Alternative Subgraphs. *European Journal of Operational Research*, v. 273, n. 3, p. 841–860, 2019.

SILVA, C. S. V. C.; TOLENTINO, M. A. M.; CORREA, J. H. B.; SILVA, T. L. O problema de sequenciamento em projeto com restrição de recurso aplicado no setor minerário. *Revista DELOS*, v. 18, n. 71, p. 1–19, 2025. DOI: 10.55905/rdelosv18.n71-030.

SILVA, P. V. C. et al. PCP de pequena empresa de fabricação de instrumentos de corda. *Recima21*, v. 3, n. 5, 2022.

SOBREIRA, F. G.; FONSECA, M. A. Impactos físicos e sociais de antigas atividades de mineração em Ouro Preto. *Revista Geotecnia*, n. 92, p. 5–27, 2001.

SPRECHER, A.; DREXL, A. Multi-mode resource-constrained project scheduling by a simple, general and powerful sequencing algorithm. *European Journal of Operational Research*, v. 107, n. 2, p. 431–450, 1998. DOI: 10.1016/S0377-2217(97)00348-2.

SOUZA, Clarisse da Silva Vieira Camelo de; XAVIER, Hugo Pimentel. Otimização de recursos no transporte rodoviário: aplicação do PSPRR em empresas de logística. In: SIMPÓSIO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO (SIMEP), 13., 2025, João Pessoa, PB. *Anais [...]*. João Pessoa: SIMEP, 2025.

TALBOT, F. B. (1982). Resource-Constrained Project Scheduling with Time-Resource Tradeoffs: The Nonpreemptive Case. *Management Science*, 28(10), 1197–1210. DOI: 10.1287/mnsc.28.10.1197

TAO, S.; DONG, Z. S. Scheduling RCPSP Problem with Alternative Activity Chains. *Computers & Industrial Engineering*, v. 114, p. 288–296, 2017.

TEIXEIRA, E. V. P. P. Uma heurística híbrida para o problema de flow shop com bloqueio. 2023. Dissertação (Mestrado) – UFPB, João Pessoa, 2023.

TONIETTO, A.; SILVA, J. J. M. C. Valoração de danos nos casos de mineração de ferro. *Revista Brasileira de Criminalística*, v. 1, n. 1, p. 31–38, 2011.

TRIERWEILLER, A. C. et al. PCP em empresa de mineração em Santa Catarina. In: ENEGEP, 28., 2008.

TUBINO, D. F. Planejamento e Controle da Produção: teoria e prática. São Paulo: Atlas, 2007.

VANHOUCKE, M.; COELHO, J. An Approach Using SAT Solvers for RCPSP. *European Journal of Operational Research*, v. 249, n. 2, p. 577–591, 2016.

VIEIRA, Clarisse da Silva; ROLA, Fernanda Silva Cerceau. Proposições de modelos matemáticos para o problema de sequenciamento em projetos com restrição de recursos e análise de desempenho. *Revista Foco*, v. 17, n. 6, e5350, p. 01–17, 2024. DOI: 10.54751/revistafoco.v17n6-037.

VIEIRA, C. S.; LOPES, D. H.; FERNANDA, M.; TOMÉ, Y. S. A utilização da modelagem matemática para otimização do bombeamento. In: XII SIMP. ENG. PRODUÇÃO, 2024.

VIEIRA, Clarisse da Silva; LOPES, Diego Henrique; FERNANDA, Maria; TOMÉ, Yara Silva. *A utilização da modelagem matemática para otimização do processo de bombeamento em uma empresa mineradora*. In: XII Simpósio de Engenharia de Produção – SIMEP, Rio de Janeiro, RJ, 22–24 maio 2024. Anais... Rio de Janeiro: Universidade Veiga de Almeida, 2024

WELERSON, J. V. A. C. M. Modelos matemáticos no contexto do sequenciamento em projeto. 2023. Monografia – Universidade Federal de Ouro Preto, 2023.