



Universidade Federal de Ouro Preto  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas  
Departamento de Engenharia Elétrica



## **Trabalho de Conclusão de Curso**

# **Aplicação da meta-heurística ILS para operação eficiente de um circuito de britagem**

**Hondemberg Ferreira dos Santos**

João Monlevade, MG  
2021

**Hondemberg Ferreira dos Santos**

**Aplicação da meta-heurística ILS para operação eficiente de um circuito de britagem**

Trabalho de Conclusão de curso apresentado à Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Elétrica pelo Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas da Universidade Federal de Ouro Preto.  
Orientador: Prof<sup>a</sup>. M.Sc Luana Kruger Melgaço Pereira  
Co-orientador: Prof. M.Sc Lucas Farias Maciel Rodrigues

**Universidade Federal de Ouro Preto**  
**João Monlevade**  
**2021**

## SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S237a Santos, Hondemberg Ferreira dos .  
Aplicação da meta-heurística ILS para operação eficiente de um  
circuito de britagem. [manuscrito] / Hondemberg Ferreira dos Santos. -  
2021.  
53 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientadora: Profa. Ma. Luana Kruger Melgaço Pereira.  
Coorientador: Prof. Me. Lucas Farias Maciel Rodrigues.  
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.  
Instituto de Ciências Exatas e Aplicadas. Graduação em Engenharia  
Elétrica .

1. Energia elétrica - Consumo. 2. Heurística. 3. Minérios de ferro. 4.  
Otimização combinatória. I. Pereira, Luana Kruger Melgaço. II. Rodrigues,  
Lucas Farias Maciel. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 621.31

Bibliotecário(a) Responsável: Flavia Reis - CRB6-2431



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Hondemberg Ferreira dos Santos

### Aplicação da meta-heurística ILS para operação eficiente de um circuito de bitragem

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

Aprovada em 04 de novembro de 2021

#### Membros da banca

M.Sc. Luana Kruger Melgaço Pereira - Orientadora (Universidade Federal de Ouro Preto)  
M.Sc. Lucas Farias Maciel Rodrigues - Coorientador (Universidade Federal do Paraná)  
Dr. Juan Carlos Galvis Manso - (Universidade Federal de Ouro Preto)  
M.Sc. Ádamo Henrique Rocha de Oliveira - (Instituto Federal do Maranhão)

Luana Kruger Melgaço Pereira, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 10/11/2021



Documento assinado eletronicamente por **Luana Kruger Melgaço Pereira**, **PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 11/11/2021, às 07:22, 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](http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0243501** e o código CRC **69A2384D**.

# Agradecimentos

Aos meus pais, Hondemberg e Margarete, meus irmãos Pedro Henrique e João Lucas e demais familiares, pela confiança em meu potencial e todo o apoio necessário durante este percurso.

Aos colegas de curso que se tornaram grandes amigos e aos tantos outros amigos feitos durante estes últimos anos.

Aos meus orientadores, Luana e Lucas por toda contribuição para a confecção deste trabalho.

*"Temet Nosce"*  
– Sócrates

# Resumo

A energia elétrica é um dos insumos mais consumidos pelas plantas de beneficiamento mineral, sendo necessária em todas as etapas de tratamento do minério de ferro, por exemplo. Estima-se que cerca de 50% deste consumo está concentrado nos processos de preparação do minério. A britagem, primeira etapa de preparação, é operada em linhas de produção paralelas e divididas em processos de fragmentação onde são operados diversos equipamentos com elevado consumo energético, chamados britadores. A fim de propor uma configuração das linhas para a operação de uma planta de britagem, em que é visada uma produção com redução no consumo de energia elétrica, foi desenvolvido um algoritmo baseado na meta-heurística ILS, do inglês Iterated Local Search, utilizado em conjunto com um simulador de produção desta planta, para verificar a possibilidade de redução do consumo energético sem que a produção fosse comprometida. Neste trabalho, desenvolvido para uma planta de britagem operada pela empresa Vale S/A, na cidade de Itabira MG, foram simulados cenários de operação, nos quais variou-se a quantidade de equipamentos disponíveis e a taxa de alimentação. Foram analisadas as soluções propostas pelo algoritmo e se mostrou possível uma redução de até 60% no consumo desta planta, em um dos cenários. Em todos os cenários simulados foi proposto pelo algoritmo uma alocação das linhas de britagem que entrega uma redução significativa no consumo de energia elétrica sem grandes prejuízos no volume de minério produzido por este processo.

**Palavras-chave:** Eficiência Energética, Britagem, Otimização, Meta-heurísticas.

# Abstract

Electric energy is one of the most consumed inputs by iron ore processing plants, being necessary in all stages of iron ore treatment, for example. It is estimated that around 50% of this consumption is concentrated in the ore preparation processes. Crushing, the first preparation stage, is operated in parallel production lines and divided into fragmentation processes where various equipment with high energy consumption, called crushers, are operated. In order to propose a configuration of lines for the operation of a crushing plant, in which production with a reduction in electricity consumption is aimed at, an algorithm was developed based on the ILS meta-heuristic, from the english: Iterated Local Search, used in together with a production simulator of this plant, to verify the possibility of reducing energy consumption without compromising production. In this work, developed for a crushing plant operated by the company Vale S/A, in the city of Itabira MG, operating scenarios were simulated, in which the amount of available equipment and the feed rate were varied. The solutions proposed by the algorithm were analyzed, and a reduction of up to 60% in the consumption of this plant was shown to be possible, in one of the scenarios. In all simulated scenarios, the algorithm proposed an allocation of crushing lines that delivers a significant reduction in electrical energy consumption without big losses in the volume of ore produced by this process.

**Keywords:**Energy Efficiency, Crushing, Optimization, Metaheuristics

# Lista de ilustrações

Figura 1 – Consumo de modais de energia da empresa Vale . . . . .	14
Figura 2 – Consumo médio de energia elétrica do processamento de minério de ferro - CNII. . . . .	14
Figura 3 – Britador de Mandíbula. . . . .	23
Figura 4 – Britador giratório . . . . .	24
Figura 5 – Britador cônico . . . . .	24
Figura 6 – Esquema do movimento do britador cônico . . . . .	25
Figura 7 – Peneira de 2 decks . . . . .	26
Figura 8 – Transportador de correia . . . . .	26
Figura 9 – Alimentador de Correia da Usina de Conceição II. . . . .	27
Figura 10 – <i>Tripper car</i> . . . . .	28
Figura 11 – Silo de Armazenamento. . . . .	28
Figura 12 – Fluxograma da Britagem de CNII. . . . .	29
Figura 13 – Circuito de Britagem da Usina de Conceição II. . . . .	30
Figura 14 – Exemplo de Vetor solução. . . . .	34
Figura 15 – Análise do número $n$ de iterações onde a busca local converge para um valor mínimo . . . . .	48
Figura 16 – Comparação de resultados entre a primeira e a segunda busca local . .	49
Figura 17 – Comparação de consumos . . . . .	50

# Lista de Abreviaturas e siglas

<b>Abreviatura/Sigla</b>	<b>Significado</b>
CCEE	Câmara de Comercialização de Energia Elétrica
CNII	Conceição II
h	Hora
ILS	<i>Iterated Local Search</i>
kW	Kilowatt
m	Metro
mm	Milímetro
MW	Megawatt
PIB	Produto Interno Bruto
ROM	<i>Run of Mine</i>
t	Tonelada
t/h	Tonelada por Hora
W	Watt

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>12</b>
1.1	Objetivos	16
1.2	Organização do Trabalho	16
<b>2</b>	<b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>	<b>17</b>
2.1	Problema de Otimização	17
2.2	Otimização Multi-objetivo	18
2.3	Heurísticas e Meta-heurísticas	19
2.3.1	Meta-Heurística ILS	20
<b>3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA ESTUDADO</b>	<b>22</b>
3.1	Principais equipamentos da Planta de britagem	22
3.2	Circuito de Britagem da Usina Conceição II	28
3.2.1	Britagem Primária	30
3.2.2	Pilha Pulmão	30
3.2.3	Britagem Secundária e Peneiramento Secundário	31
3.2.4	Peneiramento	31
3.2.5	Britagem Terciária	32
3.2.6	Britagem Quaternária	32
3.3	Simulador do circuito de britagem da usina Conceição II	32
3.4	Referência de Potência para os Britadores	33
<b>4</b>	<b>METODOLOGIA</b>	<b>34</b>
4.1	Formulação do problema de otimização	34
4.2	Algoritmo baseado em ILS	36
4.2.1	Geração da solução inicial	38
4.2.2	Processo de Busca Local 1	38
4.2.3	Critério de aceitação	39
4.2.4	Processo de Busca Local 2	40
<b>5</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>43</b>
5.1	Cenário 1	44
5.2	Cenário 2	44
5.3	Cenário 3	45
5.4	Cenário 4	46
5.5	Cenário 5	46

<b>5.6</b>	<b>Cenário 6</b> . . . . .	<b>47</b>
<b>5.7</b>	<b>Análise da convergência do algoritmo</b> . . . . .	<b>48</b>
<b>5.8</b>	<b>Resumo dos Resultados</b> . . . . .	<b>49</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSÃO</b> . . . . .	<b>51</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> . . . . .	<b>52</b>

# 1 Introdução

O setor de mineração engloba diversas atividades que, segundo Mesquita, Carvalho e Ogando (2016), visam a exploração, extração, beneficiamento e processamento de recursos minerais e é uma das atividades econômicas mais importantes para a economia do Brasil, sendo responsável por cerca de 2,5% do Produto Interno Bruto (PIB) nacional e por gerar mais de 180 mil empregos diretos no ano de 2018 (G1, 2018).

Dentre os minérios tecnologicamente viáveis para extração, o ferro se destaca. Estima-se que o elemento representa cerca de 30% da composição química do planeta e 4% da crosta terrestre (CAXITO JUNIOR; DIAS, 2018). Sua abundância garante amplo emprego no dia a dia da população, na forma de aço, indispensável em setores como construção civil, indústria automobilística, confecção de ferramentas, para citar alguns. De acordo com Mourão (2008), o minério de ferro é quase que totalmente utilizado na indústria siderúrgica para a obtenção de ferro e aço (> 97%).

De acordo com Caxito Junior e Dias (2018), entre cerca de 300 minerais que possuem ferro em sua composição, apenas os óxidos são tratados como minério. O minério extraído da natureza é composto basicamente pelo mineral-minério (minerais que possuem interesse econômico) e os chamados minérios de ganga (que não possuem interesse econômico). Devido à essa associação entre os minerais de interesse com os de ganga, faz-se necessária a sua liberação e separação em um processo de tratamento.

O tratamento de minérios envolve as operações que visam a modificação da granulometria, da forma e da concentração dos minerais presentes no minério, sem, no entanto, alterar a sua natureza química. Ocorrem, geralmente, as seguintes etapas: Preparação, Concentração e Desaguamento.

Na etapa de preparação ocorre o primeiro contato do material oriundo das minas, ou ROM, do inglês *Run Of Mine*, com o processo de beneficiamento. Tem-se por objetivo a redução da granulometria (diâmetro) do minério de ferro através da utilização de esforços mecânicos. A primeira etapa da preparação é a chamada britagem, que tem por objetivo reduzir o mineral recebido das minas, com diâmetros que podem chegar a até 1,5 metro (m), a uma granulometria adequada ao processo de moagem, com diâmetros menores que 15 milímetros (mm). Esta etapa geralmente opera em ciclos de fragmentação onde o minério passa por várias etapas e equipamentos diferentes a depender da granulometria desejada no produto final. A moagem é responsável pela fragmentação do mineral a fim de adequá-lo para a etapa de concentração. A classificação, que é o processo de separação granulométrica de partículas, opera direcionando aos diferentes processos de britagem o material com granulometria inadequada e ao processo de moagem o material em conformidade.

Em todos os casos, a fragmentação é uma operação que envolve elevado consumo energético e baixa eficiência operacional, representando, normalmente, o maior custo no

tratamento de minérios (SOUZA, 2013). Isto se deve à utilização de equipamentos de grande porte nas etapas de britagem e moagem, que são, respectivamente, britadores e moinhos. São equipamentos que tem por objetivo executar esforços mecânicos para promover a fratura da rocha e sua fragmentação. A energia mecânica necessária à fragmentação é aplicada por meio dos seguintes mecanismos: esmagamento ou compressão, impacto e atrito (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

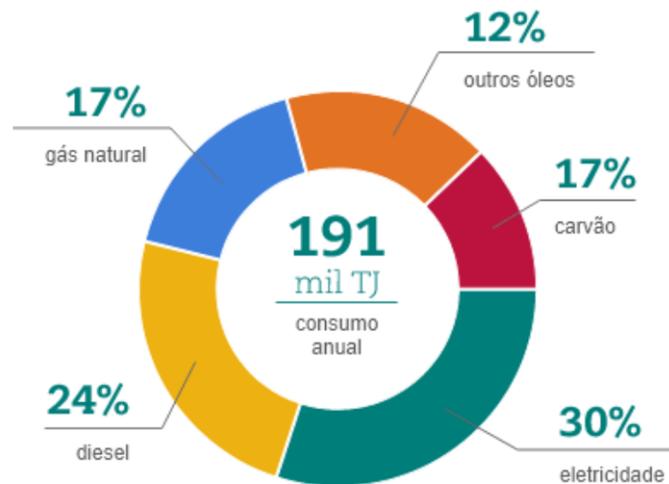
A etapa de concentração é responsável pela liberação do mineral de interesse do material de ganga, sendo a etapa em que se agrega valor ao minério e que influencia diretamente na qualidade do produto final. Nesta etapa, é importante que o mineral-minério esteja fisicamente desagregado ao de ganga, por isso, segundo Souza (2013), as etapas de preparação se fazem de extrema importância para o processo de concentração. Como dissertam Luz e Almeida (2010), as operações de concentração geralmente são feitas a úmido e para facilitar e viabilizar economicamente o transporte do minério de ferro, a retirada de parte da água presente no concentrado faz-se necessária. A esta etapa, dá-se o nome de desaguamento.

Os processos de extração e beneficiamento de minério de ferro possuem um elevado consumo energético. Na Vale, por exemplo, que é a maior mineradora do país, de todos os insumos consumidos nas operações da empresa, a energia elétrica soma cerca de 30% do total, como pode ser visto na figura 1, sendo que somente no Brasil o consumo médio de energia elétrica em suas operações gira em torno de 1150 MWh em um ano (VALE, 2021). Frente às variações do preço do minério de ferro no mercado internacional e à demanda por essa *commodity* ocorre grande variação nos volumes produzidos pelas mineradoras. De acordo com a Câmara de Comercialização de Energia Elétrica (CCEE, 2021), o consumo de energia elétrica é um dos indicadores que evidenciam esta variação. No ano de 2021, por exemplo, houve no Estado de Minas Gerais um aumento de 11% no volume de energia elétrica consumido por atividades de extração de metálicos. Muito se deve a alta do preço do minério de ferro e do dólar, fazendo com que a venda de grandes lotes de minério para o exterior fique cada vez mais viável.

O aumento da produção passa pela redução dos custos no processo produtivo mediante adoção de instrumentos de controle cada vez mais eficazes. E ainda, segundo Mesquita, Carvalho e Ogando (2016), "as novas tecnologias estão sendo adotadas para otimização, controle e automação de operações e viabilização de novos empreendimentos de mineração e metais lavra e transformação mineral". Tendo em vista o alto consumo de energia elétrica em um processo de beneficiamento de minério de ferro, ferramentas visando a diminuição deste consumo são cada vez mais aplicadas para inserir as empresas em melhores patamares de competitividade.

Assim, este estudo foca no processo de britagem da empresa Vale, especificamente em uma planta industrial dessa natureza presente na Unidade Operacional de Conceição II (CNII), na cidade de Itabira - MG, em cujo circuito, existe a real possibilidade de

Figura 1 – Consumo de modais de energia da empresa Vale

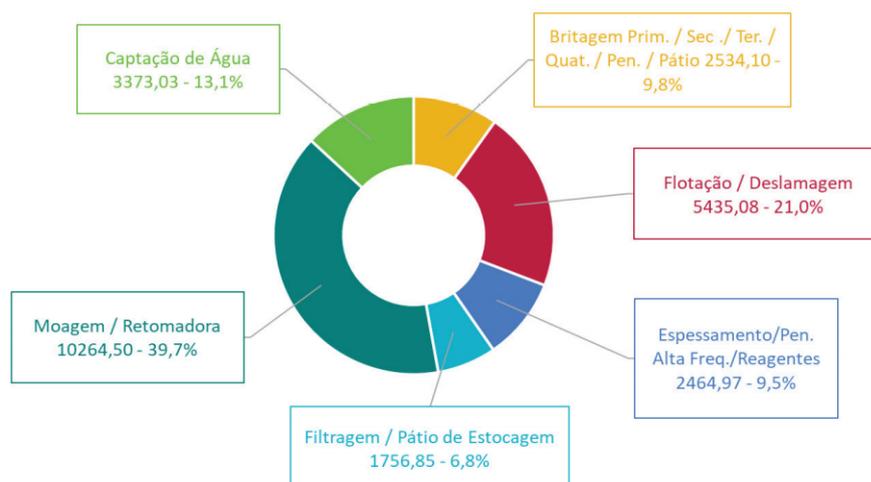


Fonte: Vale (2021).

otimização do consumo energético necessário para a sua operação.

Devido a grande variedade de equipamentos presentes na britagem, com diversas configurações das linhas de produção e etapas de processamento operando em paralelo, sua operação pode ser bem complexa. O trabalho proposto possui por fim otimizar a operação desta planta levando em consideração o consumo de energia elétrica do circuito, tendo em vista que a britagem é responsável por cerca de 10% de todo o consumo de energia elétrica presente no beneficiamento do minério de ferro, como pode ser visto na figura 2.

Figura 2 – Consumo médio de energia elétrica do processamento de minério de ferro - CNII.



Fonte: Santos (2019).

Para tal, será proposto um algoritmo baseado na Meta-heurística ILS, que objetiva a redução do consumo de energia elétrica da planta, por meio da melhor alocação das linhas de produção dadas as variáveis de entrada (alimentação com ROM), de saída (produto da britagem) e a quantidade de linhas disponíveis para a operação.

Será utilizado em conjunto ao algoritmo desenvolvido um simulador de produção para esta planta de britagem desenvolvido por Santos (2019), o qual foi a principal referência para a execução deste trabalho.

Santos (2019), em seu trabalho, objetivou além da construção do simulador de produção da planta de britagem, a proposição de um sistema de suporte à decisão que pudesse indicar a melhor configuração das linhas de britagem, sendo que o objetivo principal do seu trabalho é uma elevação da produção com uma menor quantidade de equipamentos necessários, entretanto, não foram consideradas as diferenças entre os britadores para a otimização, considerando como parâmetro de melhor solução apenas uma elevação da produção com um menor número total de equipamentos, independente do processo e dos consumos de cada um.

O estudo que segue procura agregar ao trabalho citado a otimização das soluções possíveis considerando a potência dos britadores para o processo de obtenção da melhor solução, ao passo de que cada etapa possui equipamentos diferentes, logo com consumos diferentes.

São inúmeras as aplicações de ferramentas de otimização na literatura, muitas delas com a utilização de Meta-heurísticas, devido a sua fácil implementação e aplicação entregando resultados satisfatórios. Cota (2018) apresenta a aplicação de meta-heurística para, entre outros objetivos, reduzir o consumo energético através de um sequenciamento ótimo de máquinas em paralelo. Caldas (2018) apresenta a aplicação das meta-heurísticas GRASP e *Simulated Annealing* como alternativa aos métodos exatos para a obtenção em menor tempo de uma solução para problemas relativos à movimentação de *tripper*. Em Filho (2018) é apresentado a utilização da meta-heurística ILS para a proposição da alocação de máquinas virtuais em *data center*, gerando considerável economia de energia em sua abordagem. Já em Ribeiro (2012) a utilização das meta-heurísticas ILS e GRASP para configurar uma Rede de Sensores Sem Fio, obtendo nas soluções propostas também uma redução no consumo energético do sistema.

Devido a sua simplicidade de implementação e eficiência na obtenção de resultados, a meta-heurística ILS se mostra bem adaptável à resolução do problema proposto por esse trabalho, tendo em vista que, aliada a estratégia de *first improvement* com perturbações aleatórias, é capaz de gerar soluções em tempo computacional reduzido em comparação com métodos mais robustos, que poderiam exigir uma maior frequência de resultados do simulador da planta, elevando assim, o tempo para a obtenção de soluções.

## 1.1 Objetivos

Este estudo tem como objetivo geral desenvolver um algoritmo de otimização para a alocação ótima e eficiente dos equipamentos de uma planta de britagem para garantir a produção mineral com redução no consumo energético.

Para esse fim, levanta-se os objetivos específicos do trabalho.

- Representar a potência ativa consumida pelos britadores;
- Desenvolver um algoritmo de otimização baseado na meta-heurística ILS que considere o consumo energético como parâmetro no processo de otimização;
- Propor e comparar cenários de operação distintos para a planta de britagem e verificar o impacto energético.

## 1.2 Organização do Trabalho

O capítulo 2 oferece uma revisão da literatura acerca de otimização, com foco na Meta-heurística ILS, a qual foi escolhida para a construção do algoritmo.

O capítulo 3 discorre sobre o sistema de estudo, a Planta de Britagem da Usina de Conceição II, pertencente à empresa Vale, seus principais equipamentos e rotas de processo. Além disso, é apresentado o simulador a ser utilizado para quantificar a produção da planta de britagem e uma representação para a potência ativa do circuito.

No capítulo 4 é apresentada a metodologia para a construção do algoritmo de otimização, com seu detalhamento.

O capítulo 5 é destinado para a apresentação dos estudos de caso, onde são simulados 6 cenários de operação da planta e discutidos os resultados obtidos em cada um deles. Por fim, no capítulo 6 são discutidas as conclusões obtidas com a análise dos resultados.

## 2 Fundamentação Teórica

Esse capítulo traz uma revisão acerca do tema otimização, com foco na utilização de meta-heurísticas. A otimização é uma ampla área de estudo, aplicável em todos os segmentos de engenharia, que consiste na utilização de métodos, majoritariamente matemáticos e computacionais, para tornar mais eficiente a operação ou projeto de um determinado processo/sistema. Alguns objetivos típicos, segundo Miyazawa e Souza (2015), consistem em um melhor aproveitamento de recursos, maximização de lucros e diminuição de custos de operação e produção. De acordo com Santana (2021), “dependendo da escolha específica das variáveis de projeto, funções objetivo e restrições, vários tipos de problemas de otimização podem ser criados”.

Para esse trabalho, que apresenta a aplicação de um algoritmo de otimização em uma planta de britagem, através da proposição de um ponto de operação com redução no consumo energético, dada uma sugestão na alocação de equipamentos, é importante que os conceitos de otimização mono-objetivo e multi-objetivo sejam descritos.

Na otimização mono-objetivo tem-se um único objetivo a ser maximizado ou minimizado. Já na multi-objetivo, foco desse trabalho, tem-se um conjunto de dois ou mais objetivos a serem minimizados e/ou maximizados. Segundo Azuma (2011) a maioria dos problemas práticos nas indústrias envolvem diversos objetivos simultaneamente, respeitando-se um conjunto de restrições.

Entre os métodos de otimização as heurísticas se destacam. Consistem na aplicação de métodos que visam a busca de resultados satisfatórios para o sistema a ser otimizado, sem no entanto garantir um ótimo global para a função objetivo tratada. Métodos heurísticos de uso geral, que se aplicam a uma ampla gama de problemas são as chamadas meta-heurísticas.

Assim, esse capítulo irá apresentar uma fundamentação teórica relacionada à utilização de meta-heurísticas para a resolução de problemas de otimização.

### 2.1 Problema de Otimização

Problemas de otimização, em sua maioria, dizem respeito à busca de soluções ou de um conjunto de soluções em que se maximiza ou se minimiza uma ou mais funções. Para tal, podem ser aplicados diversos mecanismos de busca e obtenção da melhor resposta para uma função objetivo, dadas as restrições do problema, quando ele for restrito (SANTANA, 2021). As restrições impostas ao problema de otimização delimitam o espaço no qual estão as soluções aceitáveis para o problema.

As classificações dos problemas de otimização, segundo proposta de Gandomi et al. (2013), podem variar de acordo com o número de variáveis de projeto, sendo uma ou

multivariáveis, com o número de funções objetivo, podendo ser mono ou multi-objetivo.

Em geral, problemas de otimização podem ser representados por:

$$\text{Maximizar/Minimizar } f(S) \quad (2.1)$$

sujeito a:

$$S \in H$$

onde:

- $f$  corresponde a função objetivo;
- $S$  corresponde às variáveis de projeto  $[s_1, s_2, s_3, \dots, s_n]$ ;
- $H$  conjunto de restrições.

Para o estudo proposto, considera-se a existência de dois objetivos concorrentes: a produção e o consumo de energia elétrica. Além disso, o problema possui restrições quanto a quantidade de linhas em funcionamento, tanto máxima quanto mínima. Considera-se por tanto que se trata de um problema de otimização multi-objetivo e restrito.

## 2.2 Otimização Multi-objetivo

Problemas de otimização que envolvem um conjunto com mais de dois objetivos geralmente não são dotados de uma única solução, visto que normalmente existem conflitos entre os objetivos. Em otimização multi-objetivo, não existe uma única solução que otimize cada um dos objetivos, mas sim um conjunto de soluções eficientes no qual nenhuma solução é melhor que outra solução para todos os objetivos (ARROYO, 2002).

Exemplificando, utilizando o objeto de estudo deste trabalho, pode parecer intuitivo que uma diminuição no consumo de energia elétrica implica em uma menor produção, logo estes objetivos (maior produção com menor consumo) podem ser conflitantes.

Dentre os métodos de otimização multi-objetivos descritos na literatura, pode ser observado o método de restrições, introduzido por Haimes e Hall (1974), no qual um dos objetivos é escolhido como o único objetivo a ser otimizado e os demais formam a lista de restrições do problema, podendo, assim, ser resolvido com a utilização dos métodos clássicos de resolução mono-objetivos. Considerando um problema multiobjetivo, com  $p$  funções objetivos,  $f(S) = [f_1(S), \dots, f_p(S)]$ , resolve-lo através do método das restrições, consiste na escolha de uma função objetivo única, a qual é restringida por  $p - 1$  restrições, provenientes dos demais objetivos, como segue, para um problema de minimização:

$$\text{Minimizar } f_k(S) \tag{2.2}$$

sujeito a:

$$f_j(S) \leq \varepsilon_j, \quad j = 1, \dots, p, \quad j \neq k$$

onde:

- $\varepsilon$  representa as restrições impostas pelos demais objetivos.

Este método demonstra ser efetivo na otimização proposta por este trabalho, visto que técnicas adotadas para otimização multi-objetivo, principalmente se tratando de meta-heurísticas, podem ser muito complexas e tendo em vista que o objetivo a ser otimizado é o consumo da planta de britagem, pode-se tratar a produção como restrição para tal.

## 2.3 Heurísticas e Meta-heurísticas

Métodos heurísticos tem como objetivo alcançar soluções aceitáveis em um período de tempo razoável, não se comprometendo a retornar soluções exatas para os problemas de otimização. Consistem em algoritmos que possuem a capacidade de gerar, avaliar e comparar soluções, buscando a que melhor se enquadra nos requisitos do problema (SOUZA, 2011). São métodos estocásticos, onde diferentes execuções podem levar a diferentes soluções, dado um caráter aleatório que muitas vezes é implementado, diferentemente dos métodos clássicos, que são determinísticos, onde as soluções encontradas serão as mesmas, independente da quantidade de execuções do algoritmo (SANTANA, 2021).

Compreende-se como sendo uma solução aceitável, sob a ótica das heurísticas, uma resposta em que, dadas as restrições e características do problema, obtem-se um valor de função objetivo aceitável. A função objetivo, segundo Arroyo (2002), consiste em um valor real o qual pretende-se minimizar ou maximizar no processo de otimização. Em se tratando de algoritmos heurísticos refere-se a uma solução como um ótimo local quando é uma solução aceitável para o problema, fazendo parte do espaço de soluções possíveis e que melhor resolve o problema dentre as soluções próximas, chamadas de vizinhança, ao passo de que um ótimo global também o é, entretanto não existe em todo o espaço uma solução que seja melhor que esta. Entretanto, devido à natureza das heurísticas de não garantia de exatidão na solução do problema, não se infere a qual distância uma solução está de um ótimo global, nem mesmo de um ótimo local.

As heurísticas em sua grande maioria se enquadram em dois conjuntos, de acordo com a forma em que uma solução é gerada por ela. Heurísticas de construção objetivam a construção de uma solução um elemento por vez, onde os critérios para a seleção e avaliação do elemento a ser inserido são ditados pelas funções de avaliação do algoritmo. Nos métodos

clássicos, geralmente é utilizada uma função gulosa, na qual todas as possibilidades são avaliadas e a construção sempre segue para o elemento que melhor resolve o problema (SOUZA, 2011). Já no método de refinamento, ou busca local, o algoritmo tem como função a modificação e melhoria de uma solução já existente, com base na noção de vizinhança e consiste na exploração das vizinhanças de uma solução previamente gerada através de movimentos que levam a busca para pontos que melhor solucionam o problema.

Um movimento é uma modificação em uma solução corrente para gerar uma nova solução diferente, denominada vizinha da solução corrente. Uma vizinhança desta solução é formada por um conjunto de movimentos de um mesmo tipo aplicados sobre ela (COTA, 2018). Encaminha-se para uma solução vizinha a cada iteração da busca local, até que um critério de parada seja satisfeito.

As buscas locais podem obedecer, basicamente, a dois tipos de percurso na busca por melhores soluções, são elas as estratégias de *first improvement* e *best improvement*. Na estratégia de *first improvement*, uma solução nova é gerada na primeira ocasião de uma solução melhor após a movimentação, já na estratégia de *best improvement*, toda a vizinhança é avaliada, seguindo para a melhor solução desta.

Entre os métodos heurísticos existem as chamadas meta-heurísticas, que consistem em algoritmos de uso genérico, aplicáveis em diversos problemas de otimização, dotados de métodos eficientes que visam a busca em vizinhanças podendo por vezes sair de ótimos locais, melhor explorando o espaço de soluções. As meta-heurísticas em geral são baseadas em processos intuitivos e podem ser aplicados nos mais diversos casos de otimização. A meta-heurística de busca local a ser implementada neste trabalho é a Iterated Local Search (ILS).

### 2.3.1 Meta-Heurística ILS

A ideia da meta-heurística ILS é gerar novas soluções de partida por meio de perturbações na solução ótima local, a fim de evitar paradas prematuras do algoritmo (LOURENÇO; MARTIN; STÜTZLE, 2003). Entende-se por perturbação, a alteração nos valores de alguma componente da solução.

---

#### Algorithm 1 Algoritmo Iterated Local Search

---

```

procedure ILS
   $s_0 \leftarrow$  Gera Solucao Inicial();
   $s \leftarrow$  Busca Local( $s_0$ );
  while (Critério de parada não satisfeito) do
     $s' \leftarrow$  Perturbação( $s$ , histórico);
     $s'' \leftarrow$  Busca Local( $s'$ );
     $s \leftarrow$  Critério de aceitação( $s$ ,  $s''$ , histórico);
  end while
  return  $s$ 
end procedure

```

---

No algoritmo ILS, ocorre a busca em vizinhança, na ocorrência de perturbações em uma solução corrente, desde que respeitadas as restrições do problema, até que um critério de parada seja atingido. Segundo Souza (2011), o algoritmo ILS é constituído de quatro componentes, que são a geração da solução inicial, busca local, processo de perturbação e aceitação de uma solução e que podem ser observados no algoritmo 1. Inicia-se pela geração de uma solução inicial,  $s_0$ . Até que um critério de parada seja satisfeito, são realizadas perturbações na solução corrente que passa por um critério de aceitação, onde verifica-se se a solução após a perturbação é uma solução melhor que a corrente ou não o é, em caso positivo, esta passa a ser a nova solução, reiniciando um laço de repetição caso o critério de parada não seja atingido, dando à rotina de perturbação, uma nova solução.

## 3 Caracterização do Sistema Estudado

Britagem é o nome atribuído ao processo inicial de fragmentação de blocos minerais, oriundos das minas, no qual são utilizados equipamentos capazes de promover esforços mecânicos ao material culminando na sua quebra. São utilizados para este fim, britadores, que são equipamentos de conversão entre energia elétrica e mecânica, que podem variar em porte, tipo de esforço promovido ao material e granulometria do produto final, a depender principalmente, como levantado por Figueira, Luz e Almeida (2010), do tamanho das partículas de alimentação. É objetivo dessa etapa de processamento mineral a realização de diversas etapas de fragmentação para que ele seja adequado granulometricamente para a próxima etapa do beneficiamento mineral.

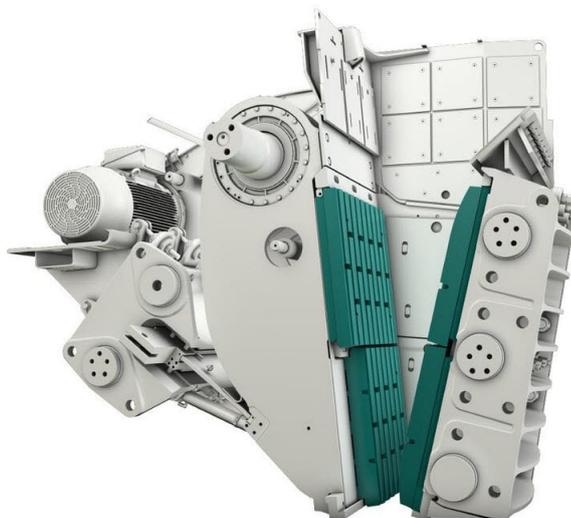
Impacto, abrasão e atrito são os três mecanismos de separação entre as características físicas de fragmentação de minérios e de fragmentação atuantes nos equipamentos de cominuição (fragmentação) e ocorrem por frequências e potências próprias, de acordo com o tipo de equipamento e as condições de operação (DELBONI; MORRELL, 2002).

Sabe-se que a configuração dos equipamentos para britagem dos diferentes tipos de minérios, não obedece um padrão fixo de circuito, podendo, de acordo com Harding (1981), partir da britagem primária, quando normalmente são utilizados britadores de mandíbulas e giratórios, por serem robustos e de grande porte (mais apropriados para o processamento de grandes volumes de material), passando a seguir para a etapa de redução da granulometria na britagem secundária, com equipamentos menos potentes, como britadores cônicos e que fazem o ajustamento do material que abastecerá a britagem terciária, em geral última fase da britagem. Ocorre que, em situações relacionadas a particularidades de demanda específicas de fragmentação ou granulometria, pode ocorrer um estágio quaternário.

### 3.1 Principais equipamentos da Planta de britagem

Os britadores utilizados em cada etapa são determinados, principalmente, pelo tamanho das partículas de alimentação. O britador de mandíbulas, equipamento apresentado na figura 3, é um equipamento que é projetado para promover a fratura de grandes quantidades de material com elevada dureza e dimensão e que é capaz de operar diante de variações na sua taxa de alimentação, por isso é normalmente utilizado nos processos de britagem primária. O equipamento possui basicamente duas mandíbulas, uma fixa e uma móvel ligada a um eixo excêntrico em uma de suas extremidades, ocasionando um movimento de aproximação e afastamento em relação a parte fixa. Esse movimento realiza esforços de impacto no material que, por gravidade, desce entre as duas mandíbulas enquanto se fragmenta.

Figura 3 – Britador de Mandíbula.



Fonte: Metso - Britadores de mandíbula série C: Guia de aplicação das peças de desgaste<sup>1</sup>

O britador giratório, mostrado na figura 4, é um equipamento também utilizado na britagem primária. Segundo Kelly e Spottiswood (1982), o britador giratório é mais operacional que o de mandíbulas devido ao fato de poder ser alimentado por qualquer lado e permitir que material seja armazenado em seu topo. O princípio de funcionamento do britador giratório está no movimento de rotação de seu cone central, que está acoplado no eixo da máquina. Promove-se durante o giro um movimento de aproximação e distanciamento entre o cone e a carcaça, ocasionando esforços de impacto no material alimentado. Este movimento circular (85 a 150 rpm) faz com que toda a área da carcaça seja utilizada na britagem, o que fornece ao britador uma grande capacidade de operação (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

<sup>1</sup> Metso - Britadores de mandíbula série C: Guia de aplicação das peças de desgaste: Disponível em: <https://docplayer.com.br/55901574-Britadores-de-mandibula-serie-c-guia-de-aplicacao-das-pecas-de-desgaste.html>. Acesso em 10 out. 2021.

Figura 4 – Britador giratório



Fonte: Site Direct Industry<sup>2</sup>.

Figura 5 – Britador cônico



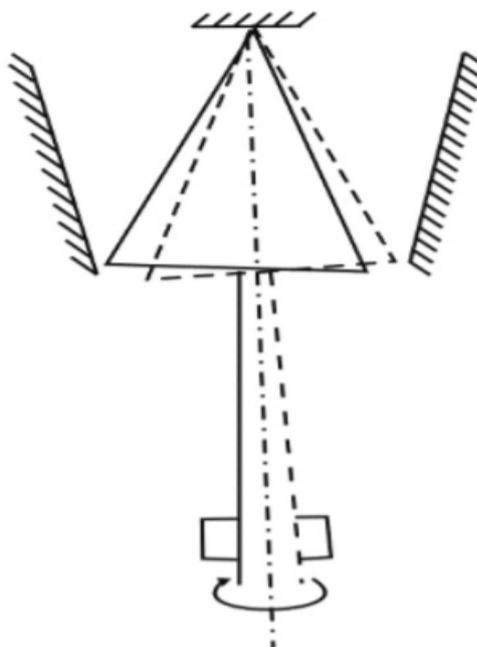
Fonte: Mesto - Britadores cônicos série GP: Guia de aplicação das peças de desgaste<sup>3</sup>.

<sup>2</sup> Site Direct Industry: Disponível em: <https://www.directindustry.com/pt/prod/metso-corporation/product-9344-1663860.html>. Acesso em 10 out. 2021

<sup>3</sup> Mesto - Britadores cônicos série GP: Guia de aplicação das peças de desgaste: Disponível em: <https://docplayer.com.br/83875981-Britadores-conicos-serie-gp-guia-de-aplicacao-das-pecas-de-desgaste.html>

Os britadores giratórios e cônicos, mostrado na figura 5, são equipamentos de funcionamento similar, diferindo um do outro basicamente pela forma e velocidade de operação. Além disso enquanto no britador giratório a saída de material da câmara de britagem se dá por ação da gravidade, no britador cônico ela está sujeita à ação de abertura da saída de descarga. O movimento vertical do cone (evidenciado na figura 6) para cima e para baixo, controla a abertura de saída com auxílio de dispositivos hidráulicos (FIGUEIRA; LUZ; ALMEIDA, 2010).

Figura 6 – Esquema do movimento do britador cônico



Fonte: Figueira, Luz e Almeida (2010).

São também equipamentos significativos para a classificação dos minérios e britagem as peneiras, os alimentadores e transportadores de correia e o *tripper car*.

As peneiras, equipamento exemplificado na figura 7, segmentam o material que são transferidos de forma contínua pelas correias e fazem a classificação do material de acordo com a sua granulometria. Podem transferir, por meio de transportadores, material para o processo seguinte, caso o mesmo esteja com granulometria desejada ou retornar o material para os processos de fragmentação para a sua adequação granulométrica, levando sempre em consideração a granulometria atual do material e a granulometria desejada.

Figura 7 – Peneira de 2 decks



Fonte: Site MAQUINAS FARIA<sup>4</sup>

O transportador de correia, apresentado na figura 8, é uma estrutura de transporte de material, o qual possui uma correia, que de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT, 2016) "se desloca sobre os tambores, roletes e/ou mesas de deslizamento, segundo uma trajetória predeterminada pelas condições de projeto, possuindo partes ou regiões características de carregamento e descarga."

Figura 8 – Transportador de correia



Fonte: Site PRECISMEC<sup>5</sup>.

A alimentação dos britadores é feita por meio de alimentadores de correia, mostrado na figura 9, que são dotados de inversores de frequência, a fim de variar a velocidade

<sup>4</sup> Site MAQUINAS FARIA: Disponível em: <http://maquinasfaria.com.br/project/peneira-vibratoria/>

<sup>5</sup> Site PRECISMEC: Disponível em: <https://precismec.com.br/quais-os-tipos-de-transportador-de-correia/>. Acesso em 10 out. 2021

dos mesmos. Os alimentadores devem variar a velocidade de acordo com a alimentação desejada (SANTOS, 2019).

Figura 9 – Alimentador de Correia da Usina de Conceição II.



Fonte: Santos (2019).

De acordo com Caldas (2018), o *tripper car*, equipamento apresentado na figura 10 é um sistema mecânico projetado para distribuir o minério ao longo da abertura superior de um silo de armazenamento, apresentado na figura 11. Ainda segundo o autor, os silos são estruturas construídas para armazenar material proveniente do processo anterior.

Figura 10 – *Tripper car*.

Fonte: Caldas (2018).

Figura 11 – Silo de Armazenamento.



Fonte: Caldas (2018).

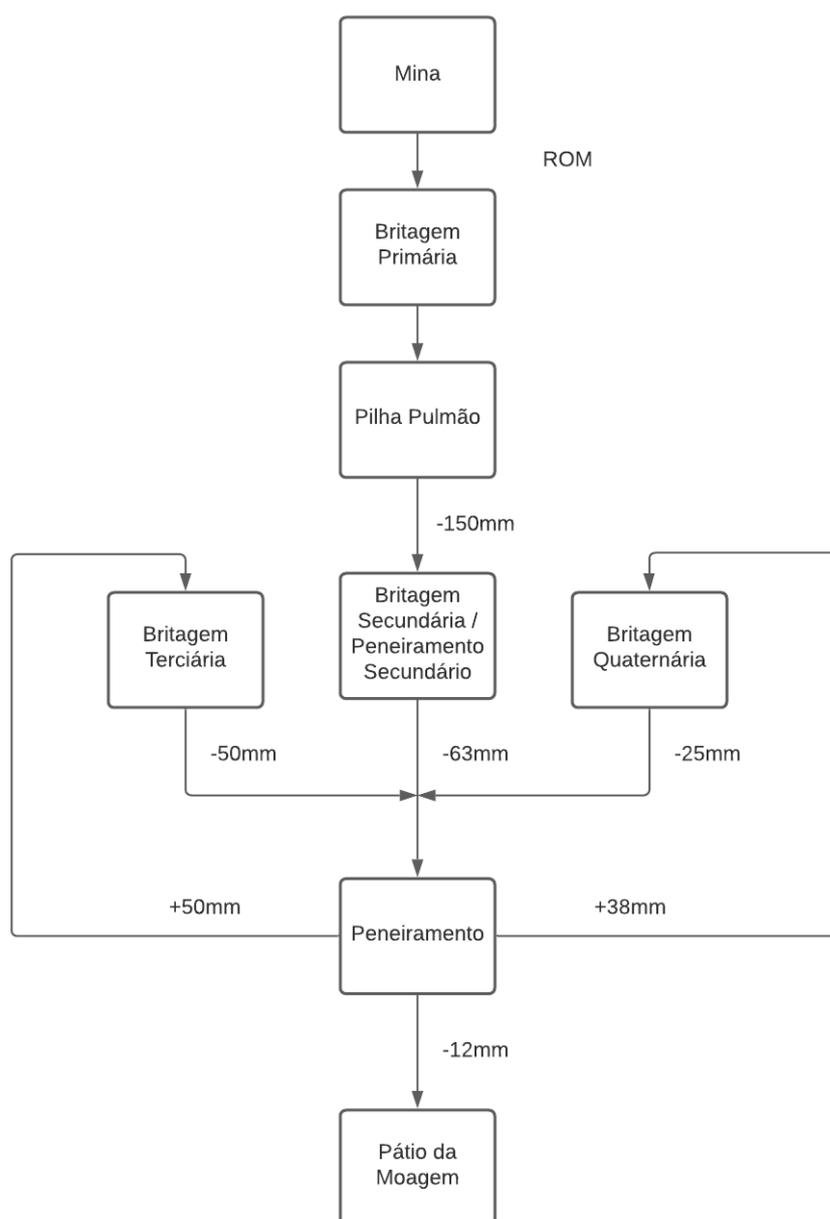
### 3.2 Circuito de Britagem da Usina Conceição II

De acordo com Santos (2019), a britagem da usina de CNII recebe um ROM com granulometria máxima de aproximadamente 1000mm e está projetada para produzir material com granulometria inferior a 12mm, para alimentar o processo de moagem.

O processo da britagem de CNII pode ser observado através do fluxograma da figura 12 e é dividido em:

- Britagem Primária;
- Pilha Pulmão
- Britagem Secundária;
- Britagem Terciária;
- Britagem Quaternária;
- Peneiramento

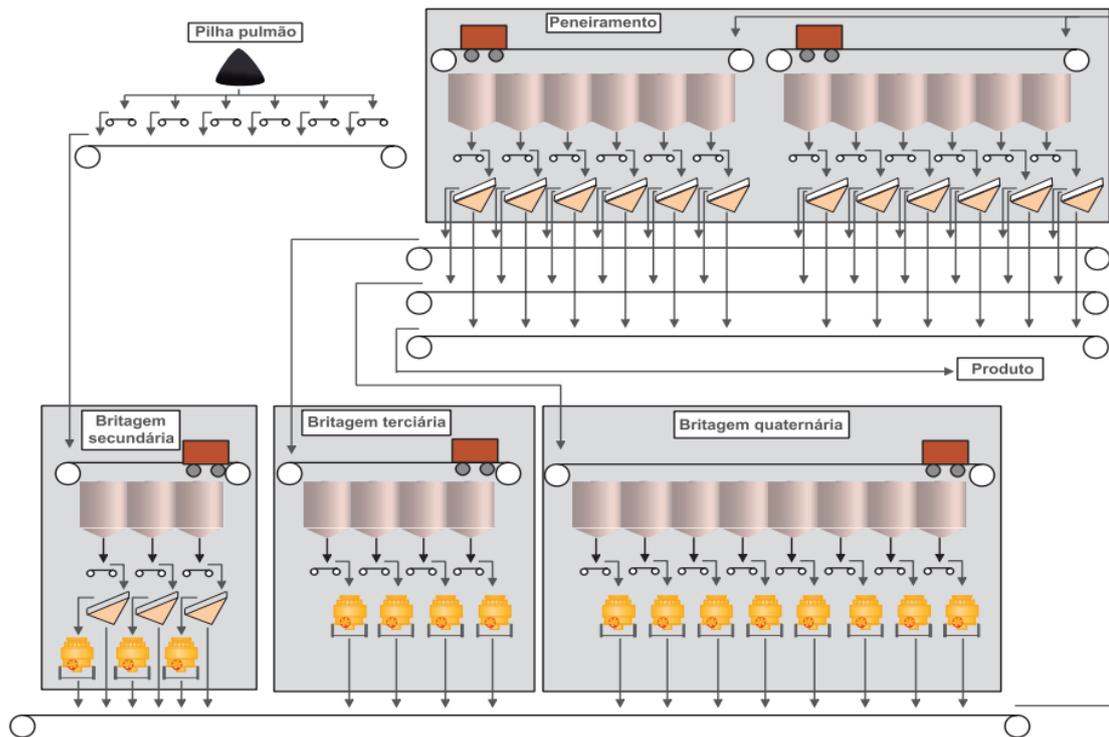
Figura 12 – Fluxograma da Britagem de CNII.



Fonte: Do autor.

A britagem é formada por 1 britador do tipo giratório, 15 britadores do tipo cônico, 33 alimentadores e 15 peneiras como pode ser observado, a partir da Pilha Pulmão, na figura 13. No que segue, será descrito com maior detalhamento cada sub-processo mencionado.

Figura 13 – Circuito de Britagem da Usina de Conceição II.



Fonte: Santos (2019).

### 3.2.1 Britagem Primária

A britagem primária é responsável por receber o material extraído da mina com um diâmetro máximo (*top size*) de 1000mm, transportado por caminhões e basculado em um britador giratório que reduz a granulometria do material a até 150mm.

Após os processo de fragmentação, o produto da britagem primária é transportado por meio de transportadores de correia até a pilha pulmão.

### 3.2.2 Pilha Pulmão

A pilha pulmão tem por objetivo permitir que as áreas da britagem secundária, terciária e quaternária continuem operando mesmo com o britador primário parado (SANTOS, 2019).

Abaixo da pilha pulmão, estão instalados seis alimentadores vibratórios, os quais são responsáveis por extrair material da pilha e levá-lo para um alimentador de correia que alimentará a britagem secundária.

Portanto, considera-se uma linha da pilha pulmão como sendo 1 alimentador individual, constando neste processo seis linhas.

### 3.2.3 Britagem Secundária e Peneiramento Secundário

A britagem secundária tem por objetivo fragmentar material com um *top size* de até  $150\text{mm}$  para fragmentos de tamanho inferior a  $63\text{mm}$ .

Esta etapa possui três linhas independentes uma da outra as quais são alimentadas pelo mesmo alimentador por meio de um silo de armazenamento. Cada linha extrai, por meio de um alimentador de correia da sua respectiva divisão do silo o material a ser processado nesta etapa.

O material proveniente do silo em cada linha passa por uma peneira (peneiramento secundário) na qual o material que é rejeitado pelo equipamento (*over size*) com tamanho superior a  $63\text{mm}$  ( $+63\text{mm}$ ) será fragmentado por um britador cônico e o material que passa por ela (*under size*) de granulometria inferior a  $63\text{mm}$  ( $-63\text{mm}$ ) será direcionado juntamente com o produto dos britadores para a área do peneiramento por meio de uma correia transportadora.

Considera-se para este processo, uma linha como sendo: 1 divisão do silo, 1 alimentador, 1 peneira e 1 britador cônico.

### 3.2.4 Peneiramento

No peneiramento, ocorre a classificação do material de acordo com sua granulometria. Para tal, são empregadas peneiras vibratórias, as quais possuem dois *decks*, cada qual com sua granulometria de *over* e *under size*.

A classificação ocorre da seguinte forma:

- O *over size* do *deck* superior das peneiras, com granulometria maior que  $50\text{mm}$  ( $+50\text{mm}$ ) é direcionado à britagem terciária;
- O *over size* do *deck* inferior, com granulometria superior a  $38\text{mm}$  ( $+38\text{mm}$ ) é direcionado à britagem quaternária;
- O *under size* do *deck* inferior que possui granulometria menor que  $12\text{mm}$  ( $-12\text{mm}$ ) é direcionado ao pátio da etapa de beneficiamento à jusante (pátio da moagem).

O material de alimentação do peneiramento é proveniente do peneiramento secundário e das britagens secundária, terciária e quaternária, por meio de um transportador comum entre todos os processos e é dividido em dois por meio de um desviador de fluxo que

descarrega em dois silos com seis divisões cada, uma para cada linha de classificação, totalizando 12 linhas no processo.

O peneiramento objetiva retornar material com granulometria inadequada aos processos de britagem terciária e quaternária, chamado de carga circulante ou direcionar parte do material com granulometria adequada ( $-12\text{mm}$ ) para o próximo processo.

Considera-se para este processo, uma linha como sendo uma divisão do silo e 1 peneira com seu respectivo alimentador, totalizando para este processo 12 linhas.

### 3.2.5 Britagem Terciária

O processo de britagem terciária recebe material com granulometria superior a  $50\text{mm}$  ( $+50\text{mm}$ ) proveniente da etapa de peneiramento. Este material, que passará novamente pelo processo de fragmentação, é distribuído por um *tripper car* em um silo com quatro divisões. O minério é extraído de cada divisão do silo por meio de alimentadores de correia e submetido a britadores do tipo cônico capaz de reduzir o minério da alimentação para uma granulometria inferior a  $50\text{mm}$ .

Após a fragmentação, o material proveniente desta etapa é enviado ao transportador de correia que alimentará o processo de peneiramento novamente.

Considera-se para este processo, uma linha como sendo: 1 divisão do silo, 1 alimentador e 1 britador cônico.

### 3.2.6 Britagem Quaternária

O processo de britagem quaternária assim como a britagem terciária, recebe material proveniente da etapa de peneiramento como carga circulante. Este material, com granulometria superior a  $38\text{mm}$  ( $+38\text{mm}$ ) que passará novamente pelo processo de fragmentação, é enviado por meio de um transportador de correias móvel a um silo com oito divisões. O minério é extraído de cada divisão do silo por meio de alimentadores de correia e submetido a britadores do tipo cônico capaz de reduzir o minério da alimentação para uma granulometria inferior a  $25\text{mm}$ .

Após a fragmentação, o material proveniente desta etapa é enviado ao transportador de correia que alimentará o processo de peneiramento.

Considera-se para este processo, uma linha como sendo: 1 divisão do silo, 1 alimentador e 1 britador cônico.

## 3.3 Simulador do circuito de britagem da usina Conceição II

Para a obtenção de um valor da totalização da produção da planta de britagem de Conceição II foi utilizado um simulador da planta, proposto e desenvolvido por Santos (2019) em ambiente *MATLAB*, no qual são modelados os principais equipamentos presentes

no processo, com os dados de projeto da planta. São utilizadas equações que descrevem o comportamento estático das peneiras e britadores, não levando em consideração os aspectos dinâmicos do processo, bem como os atrasos relativos a transporte de material pelas correias. O simulador tem por objetivo retornar, em uma quantidade estabelecida de horas de operação, a produção total da planta, em toneladas (t), dadas as quantidades de linhas em funcionamento durante o período em cada processo dada uma taxa de alimentação especificada, em toneladas por hora (t/h).

As variáveis de entrada do simulador são, portanto:

- NAPP: Número de Alimentadores da Pilha Pulmão;
- NABS: Número de Alimentadores da Britagem Secundária;
- NABT: Número de Alimentadores da Britagem Terciária;
- NABQ: Número de Alimentadores da Britagem Quaternária;
- NAPE: Número de Alimentadores do Peneiramento;
- TAXA: Taxa de Alimentação da Planta de Britagem.

É possível alterar no simulador o período, em horas, na qual a produção será totalizada, entretanto por padrão, será considerado o período de 6 horas, que representa um turno completo de produção.

Como solução, o simulador retorna um valor real, com até duas casas decimais, de totalização da produção durante o período em tonelada.

### 3.4 Referência de Potência para os Britadores

Entre todos os equipamentos presentes nos processos de britagem da Usina de CNII, apenas os britadores possuem sua potência instantânea armazenada e observada pelos operadores da planta. Isto se deve ao alto consumo do equipamento que, frente ao consumo dos demais equipamentos da planta de britagem, é predominante no circuito.

Para o desenvolvimento de um processo de otimização cuja redução no consumo de energia elétrica é um dos objetivos, faz-se necessário que se tenha uma referência para a potência dos circuitos. Para isso, serão considerados para cada processo os valores constantes na tabela 1. Estes valores foram levantados por Santos (2019) com base no valor médio das potências ativas dos britadores em um turno completo de seis horas.

Tabela 1 – Valores de Potência Ativa dos Britadores por processo

Processo	Potência Ativa Média (kW)	Número de britadores
Britagem Secundária	40	3
Britagem Terciária	70	4
Britagem Quaternária	80	8

## 4 Metodologia

Este capítulo tem por fim descrever o desenvolvimento do algoritmo de otimização proposto por este trabalho. Inicia-se pela formulação do problema de otimização, posteriormente será detalhado o algoritmo baseado em meta-heurística ILS culminando na obtenção de uma solução para o cenário de operação, que é uma combinação na quantidade de equipamentos por processo de britagem que entrega uma produção com uma redução no consumo de energia elétrica, dadas as restrições de quantidade de equipamento e produção mínima.

Nesta seção descreve-se um algoritmo de otimização baseado em busca local, onde se utiliza da meta-heurística ILS, implementada em um método de otimização com restrições, para a redução do consumo de energia elétrica, tendo a produção da planta de britagem e as quantidades máxima e mínima de linhas como restrições.

### 4.1 Formulação do problema de otimização

O problema de otimização proposto pode ser representado por um conjunto de 8 elementos, sendo que cada um dos 5 primeiros elementos indica o número de linhas em operação em cada etapa de britagem, o elemento 6 indica a taxa de alimentação, 7 o resultado da função objetivo para a quantidade de equipamentos por etapa e na posição 8 o valor da potência ativa para o cenário de operação proposto.

Criou-se, portanto, um vetor de 8 posições, onde:

- Posição 1 - Número de alimentadores funcionando na pilha pulmão;
- Posição 2 - Número de alimentadores funcionando na britagem secundária;
- Posição 3 - Número de alimentadores funcionando na britagem terciária;
- Posição 4 - Número de alimentadores funcionando na britagem quaternária;
- Posição 5 - Número de alimentadores funcionando no peneiramento;
- Posição 6 - Taxa de Alimentação, em t/h;
- Posição 7 - Totalização de produto da britagem em um turno, calculado pela função objetivo, em t;
- Posição 8 - Potência ativa média dos britadores em funcionamento, em kW.

A figura 14 representa o que seria um vetor solução  $S = [s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6, s_7, s_8]$ .

Figura 14 – Exemplo de Vetor solução.

<b>3</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>4015</b>	<b>13922</b>	<b>300</b>
----------	----------	----------	----------	----------	-------------	--------------	------------

Fonte: Do Autor

O problema de otimização a ser resolvido por este trabalho, consiste, em suma, na escolha da melhor combinação dos valores de  $S$ . É importante para a formulação do problema, que o valor da produção, dado pelo simulador da planta de britagem, seja obtido de forma a não violar as restrições quanto às quantidades de linhas possíveis por etapa, para garantir que haja um consumo energético correspondente a essa produção que também não viole estes limites. Esse valor de produção, servirá como restrição para o problema de otimização. Logo, formula-se a totalização de produção, em função da quantidade de linhas por processo e da taxa de alimentação, da forma como apresenta a equação (4.1).

$$p = h(s_1, s_2, s_3, s_4, s_5, s_6) \quad (4.1)$$

onde:

- $p$  corresponde à totalização de produção;
- $h(S)$  corresponde à função de obtenção da totalização de produção - simulador da planta de britagem.

Para a otimização proposta por esse trabalho, será considerado como uma restrição  $\varepsilon$  um valor de produção que seja igual ou maior que 99% daquela com todas as linhas disponíveis em funcionamento, à mesma taxa de alimentação  $s_6$ . Apresenta-se a produção, como restrição para o problema de otimização em (4.2).

$$\varepsilon \geq 0.99 \cdot h(m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, s_6) \quad (4.2)$$

Dadas as restrições apresentadas, define-se o consumo de energia elétrica da planta de britagem, uma função objetivo  $f(S)$  que se dá pela multiplicação das potências dos britadores das britagens secundária, terciária e quaternária, implementadas em um vetor  $G = [g_1, g_2, g_3]$ , cujos valores constam da tabela 1, pela quantidade de linhas em cada um deles. Este valor de potência total, multiplicada pelo tempo de operação em horas, é o que quantifica o consumo desta planta. Considera-se para este trabalho um turno de 6 horas de operação. A função  $f(S)$ , é apresentada em (4.3)

$$f(S) = \left( \sum_{i=1}^3 (g_i \cdot s_{i+1}) \right) \cdot 6 \quad (4.3)$$

Finalmente, tendo em vista a possibilidade de uma combinação de  $S$ , cujo consumo da planta de britagem poderá ser menor e ainda mantidas as restrições, apresenta-se (4.4) como formulação geral do problema de otimização, com restrição  $\varepsilon$ ,  $M$  e  $L$ , onde são dados

os vetores  $L = [l_1, \dots, l_5]$  e  $M = [m_1, \dots, m_5]$ , que armazenam respectivamente, em cada índice  $i$ , as quantidades mínima  $l_i$  e máxima  $m_i$  de linhas por etapa de britagem  $i$ .

$$\text{Minimizar } f(S) \quad (4.4)$$

sujeito a:

$$l_i \leq s_i \leq m_i, \quad i = 1, 2, 3, 4, 5 \quad (4.5)$$

$$h(S) \geq \varepsilon \quad (4.6)$$

$$\varepsilon \geq 0.99 \cdot h(m_1, m_2, m_3, m_4, m_5, s_6) \quad (4.7)$$

Pode se expressar o tamanho do espaço de soluções  $\Gamma$ , para cada taxa de alimentação, como sendo:

$$\Gamma = \prod_1^5 m_i \quad M = [m_1, m_2, m_3, m_4, m_5] \quad (4.8)$$

onde:

- $\Gamma$  é a quantidade de resultados possíveis para a otimização.

Logo, vide equação (4.8), o universo de soluções possíveis aumenta de acordo com a quantidade máxima de linhas possíveis em cada processo. Para o caso em que todas as linhas estão disponíveis, há 6.912 combinações possíveis para  $\Gamma$ , para cada taxa de alimentação. Levando em conta as dimensões do problema, um algoritmo exato dificilmente poderá ser empregado.

No que diz respeito à complexidade do problema em termos computacionais, é de se notar que a mesma escala desfavoravelmente a medida em que o número de variáveis cresce.

## 4.2 Algoritmo baseado em ILS

O Algoritmo de otimização implementado para solucionar o problema, foi baseado em meta-heurística ILS de busca local e estratégia de *first improvement*, o mesmo está estruturado em etapas, com refinamento, objetivos e restrições próprias de cada de cada uma delas, cada qual com seu próprio critério de parada. Primeiramente será descrito o algoritmo integralmente, com seu pseudo-código apresentado no algoritmo 2, e posteriormente as etapas serão melhor detalhadas.

Por se tratar de um algoritmo baseado em meta-heurística, não existe garantia de otimalidade da solução, nem garantia de quão próximo ela está da solução ótima (COTA, 2018).

---

**Algorithm 2** Algoritmo proposto
 

---

```

1: procedure PROPOSTO( $n\_iterações$ )
2:    $s_0 \leftarrow Gera\ Solução\ Inicial()$ ;
3:    $s \leftarrow s_0$ 
4:    $n \leftarrow 0$ ;
5:    $i \leftarrow 0$ ;
6:    $i_2 \leftarrow 0$ ;
7:    $PROD \leftarrow f(s_0)$ ;
8:   while ( $n < n\_iterações$ ) do
9:     while (Critério de aceitação satisfeito) do
10:       $s'' \leftarrow BuscaLocal(s, vet\_max, vet\_min)$ ;
11:       $s \leftarrow CritérioDeAceitação(s, s'')$ 
12:    end while
13:     $n\_iterações \leftarrow n\_iterações + 1$ 
14:  end while
15:  return  $s$ 
16:
17:   $s* \leftarrow BuscaLocal\_2(s, PROD, vet\_min)$ 
18:   $s \leftarrow s*$ 
19:  return  $s$ 
20:

```

---

Para iniciar o algoritmo, gera-se uma solução inicial  $s_0$  igual ao número máximo de equipamentos em funcionamento. Parte-se da premissa de que o objetivo do algoritmo é encontrar uma solução  $s$  em que haja produção equivalente a esta com um menor consumo de energia elétrica, e que o espaço de vizinhança da solução inicial é dotado de soluções desse tipo, tendo em vista a produção, resposta do simulador. Esta solução inicial é então submetida a uma busca local, onde perturbações são feitas de forma aleatória.

Os critérios de aceitação dessa solução são (4.5) e (4.6), encerrando as buscas sempre que a produção for seguir por vizinhanças com produção menor que a definida por (4.2). Tendo a solução proposta obedecido à restrição de produção, a mesma será avaliada quanto a (4.4) logo, o consumo de energia elétrica do circuito, passando a ser a nova solução sempre que a minimização for atingida.

Para tentar explorar vizinhanças diferentes, essa rotina está implementada em um laço de repetição que tem como critério de parada um número  $n$  de iterações, na qual a solução a ser refinada é a solução obtida pelo laço anterior  $n - 1$ .

Esta solução já é uma solução em que se tem um valor menor de consumo para uma produção por turno equivalente à de máxima alocação de equipamentos. Entretanto, pode ser possível que se trate de um ótimo local em que o algoritmo restrito pela produção,

visto a estratégia de *first improvement*, tenha parado prematuramente. A fim de refinar ainda mais esta solução, a mesma é submetida a uma nova busca local.

No que segue, o algoritmo será detalhado mais a fundo em relação a cada etapa do processo de otimização.

#### 4.2.1 Geração da solução inicial

Para dar início à busca no algoritmo, gera-se a solução inicial, tendo como base o número máximo de equipamentos que podem ser operados em cada etapa do processo. Para tal, um vetor com número máximo de equipamentos é aplicado na função objetivo  $f(S)$  e o retorno de produção da mesma é utilizado como base para o início da busca local.

#### 4.2.2 Processo de Busca Local 1

Nesta etapa do algoritmo, ocorre simultaneamente a perturbação randômica na solução corrente, a busca local e a verificação da restrição contida em (4.5).

O movimento utilizado para percorrer diferentes vizinhanças da solução corrente consiste em alterar, para mais ou para menos, o número de equipamentos de uma etapa do processo de britagem.

Geram-se dois valores aleatórios com funções de geração de valores randômicos do *Software MATLAB*, os quais são *processo*, responsável por indicar qual processo sofrerá a alteração no número de linhas (de 1 a 5) e *direção*, que indica de que tipo será a alteração (para mais, indicado pelo número 1 ou para menos, indicado pelo número 2) e verifica se essa alteração proposta viola ou não os valores de máximo e mínimo de equipamentos disponíveis na etapa.

São incluídos dois vetores que representam o número máximo e mínimo de linhas disponíveis por etapa e permite a comparação da alteração randômica proposta com essas quantidades pre-estabelecidas.

##### **Exemplo 1:**

Para ilustrar essa movimentação, sejam os valores de *processo* = 2 e *direção* = 1, sendo uma solução  $s$ , o valor de *producao\_max* = 22222 e considerando todos os equipamentos disponíveis:

$$\begin{aligned}s &= (6,3,4,8,12, 22222) \\ \text{vet\_max} &= (6,3,4,8,12) \\ \text{vet\_min} &= (1,1,1,1,1)\end{aligned}$$

Movimentos dessa natureza não são permitidos pelo algoritmo, visto que qualquer alteração para mais na quantidade de equipamentos, violaria a condição de número máximo

permitido pelo vetor *vet\_max* que representa a quantidade máxima de linhas por etapa de britagem (Pilha pulmão, britagens secundária, terciária, quartenária e peneiramento).

Entretanto, considerando os mesmos valores de processo e  $s'$ , porém com *direção* = 2, permitiria o surgimento de uma nova solução  $s''$ , que não viola as quantidades mínimas e máximas e mantém o valor de produção igual ao de máximos, onde:

$$s' = (6,3,4,8,12,22222)$$

$$s'' = (6,2,4,8,12,22222)$$

Para que o algoritmo possa percorrer vizinhanças diferentes, dada a natureza randômica da busca, são feitas  $n$  iterações desta etapa, onde a repetição é reiniciada a cada armazenamento de solução candidata na qual esse valor será utilizado para partir novamente o algoritmo. Esse método foi aplicado para permitir que o algoritmo explore vários espaços de solução e que o mesmo não fique preso em um ótimo local localizado na vizinhança da solução inicial.

O pseudo-código da busca local é apresentado através do algoritmo 3:

---

**Algorithm 3** Busca Local
 

---

```

1: procedure BUSCALOCAL1( $s$ ,  $vet\_max$ ,  $vet\_min$ )                                ▷ Busca Local - 1
2:    $direção \leftarrow random$ ;
3:    $processo \leftarrow random$ ;
4:   if  $direção = 1$  then                                                    ▷ Indica perturbação + 1
5:     if  $s(processo) < vet\_max(processo)$  then
6:        $s(processo) \leftarrow s(processo) + 1$ 
7:     end if
8:   else                                                                    ▷ Indica perturbação - 1
9:     if  $s(processo) > vet\_min(processo)$  then
10:       $s(processo) \leftarrow s(processo) - 1$ 
11:    end if
12:  end if
13:  return  $s$ 
14:

```

---

### 4.2.3 Critério de aceitação

A solução gerada pela busca local é então avaliada quanto a (4.2). É observado primeiramente a restrição relativa à produção, que não pode ser inferior a 99% daquela de quantidade máxima de equipamentos, permitindo, portanto, valores de produção até 1% menor que o de máximo. Isto se deve a admitir que o algoritmo explore vizinhanças mais variadas. Se a solução oriunda da busca local satisfizer a produção, ela é então avaliada com relação ao consumo da planta.

Para selecionar a solução candidata que melhor se enquadre nos critérios, nessa etapa, os vetores solução recebem um campo direcionado ao valor de consumo dos britadores.

Para tal, um vetor é criado, com os valores de potência média por turno para os britadores de cada um dos processos.

Esse vetor, é composto por 3 campos, cada qual representando um processo de britagem, com os valores já expressos na tabela 1.

Sendo assim, as soluções candidatas recebem o valor de consumo por turno desses britadores, dado por (4.3).

**Exemplo 2:**

$$\begin{aligned} \text{vet\_pot} &= (40, 70, 80) \\ s &= (3, 2, 4, 6, 10, X) \\ s(7) &= (2 \times 40) + (4 \times 70) + (6 \times 80) = 840 \text{ kW} \times 6 \text{ horas} = 5040 \text{ kWh} \\ s'' &= (3, 2, 4, 6, 10, \text{PROD}, 5040) \end{aligned}$$

Onde  $s$  é uma das soluções,  $s(7)$  é a posição de número 7 do vetor solução  $s$  e  $s''$  é o novo vetor solução  $s$  com a potência ativa aplicada.

A cada iteração do algoritmo, uma nova solução é testada com relação a (4.4), selecionando ao final a solução de menor consumo dentre as  $n$  iterações. O pseudo-código do processo de aceitação de uma solução pode ser visualizado no algoritmo 4.

---

**Algorithm 4** Processo de aceitação de solução

---

```

1: procedure ACEITAÇÃO( $s, s''$ )
2:   if  $f(s'') \geq 0.99 * f(s)$  then;
3:     if  $Potência(s'') < Potência(s)$  then
4:        $s \leftarrow s''$ 
5:     end if
6:   else interrompe a repetição
7:   end if
8:    $n\_iterações \leftarrow n\_iterações + 1$ 
9:   return  $s$ 
10:
```

---

Para o caso em que a solução vinda da busca local tenha valor de produção menor que o valor corrente e exceda o 1% permitido, o laço de repetição externo ao procedimento de avaliação da solução é encerrado, pois a busca encontrou uma vizinhança em que a restrição de (4.6) não é satisfeita. Sendo assim, a solução corrente é tida como a melhor solução das vizinhanças exploradas e está apta a seguir para a próxima etapa.

#### 4.2.4 Processo de Busca Local 2

De posse de uma solução oriunda da busca local, percebe-se a necessidade de que haja uma nova avaliação da mesma, tendo em vista que ela foi gerada inicialmente havendo a restrição de produção e devido a estratégia de *first improvement* ter sido adotada em

conjunto com perturbações aleatórias, pode ocorrer de o algoritmo parar prematuramente em um ótimo local, em uma vizinhança ruim direcionada pela aleatoriedade do algoritmo.

Nessa etapa apresentada no algoritmo 5, objetiva-se através de uma busca local, cuja solução inicial é a solução atingida pelo processo de busca anterior, a manutenção do parâmetro consumo da solução, para que seja localizada na vizinhança desta uma solução de menor potência que possa não ter sido gerada pela busca, devido a seu caráter aleatório.

Dado o novo objetivo, é aplicado um laço de repetição que visa subtrair da solução corrente, um equipamento de cada etapa por vez, recalculando a potência ativa e a produção desta solução, tendo como restrições (4.5) e (4.6).

Visando a diminuição do consumo de energia elétrica do circuito, nessa etapa, aplicam-se subtrações ordenadas na solução, de forma que, ocorram do processo de maior potência para o de menor, como segue na descrição abaixo. Seu pseudo-código está apresentado no algoritmo 5.

---

**Algorithm 5** Busca Local
 

---

```

procedure BUSCALocal_2(s, PROD, vet_min)▷ Busca Local - Objetivo Potência
  s_aux ← s
  while i_2 = 0 do
    if s_aux(4) > vet_min(4) & s_aux(7) >= PROD then
      s_aux(4) ← s_aux(4) - 1
    else
      if s_aux(3) > vet_min(3) & s_aux(7) >= PROD then
        s_aux(3) ← s_aux(3) - 1
      else
        if s_aux(2) > vet_min(2) & s_aux(7) >= PROD then
          s_aux(2) ← s_aux(2) - 1
        else
          i_2 = 1;
        end if
      end if
    end if
  return s_aux
  
```

---

- 1 - Subtrai-se 1 da posição com maior influência na potência ativa.
- 2- Caso a produção se mantenha igual ou maior à produção corrente, reinicia-se o laço de repetição.
- 3 - Em caso negativo, retira-se 1 da próxima posição no quesito potência ativa. Se satisfizer a produção, essa nova solução é elencada como melhor solução e é reiniciada a repetição.
- 4- Em caso negativo, é subtraído 1 da terceira posição considerando a potência ativa. Se satisfizer a produção, essa nova solução é elencada como melhor solução e é reiniciada a repetição.

5 - A solução corrente é considerada a melhor do algoritmo.

Quando o laço de repetição implementado na busca varre todo o vetor sem que haja uma solução melhor, ele é encerrado, retornando o valor corrente. O retorno dessa função é tido como o resultado do algoritmo e é a solução  $s^*$  final e resposta para a compilação feita, com base nos valores de restrição número máximo e mínimo de linhas por etapa e para a taxa de alimentação desejada.

## 5 Resultados

A fim de demonstrar a efetividade do algoritmo proposto, serão simulados alguns cenários de operação da planta de britagem, no qual as respostas obtidas pelo algoritmo serão comparadas com a obtida pela operação de todos os equipamentos disponíveis. Para todos os cenários, será escolhido o melhor resultado de 5 execuções do algoritmo.

Nos cenários simulados serão alterados para cada um a quantidade de equipamentos máximos disponíveis e a taxa de alimentação, a fim de demonstrar a efetividade do algoritmo frente às principais mudanças que podem ocorrer nos cenários reais de operação. A alteração na quantidade máxima justifica-se pela não disponibilidade de equipamentos em cenários em que alguns deles podem estar parados para manutenção ou por defeito. A variação da taxa de alimentação justifica-se pela possibilidade de haver alguma restrição de fornecimento de material para a britagem, que pode ser ocasionada por paradas da extração na mina para abertura de novas frentes de lavra, manutenções nos equipamentos de extração e transporte ou simplesmente pela programação da obtenção de material frente à variações no preço e demanda do minério de ferro.

Em todas as simulações foram adotados como número mínimo de equipamentos em funcionamento 1 por etapa, visando garantir que todas os processos de britagem operem e não haja influência da sua não operação na produção da planta. Os cenários simulados constam na tabela 2, onde os valores presentes para a pilha pulmão, para as britagens secundária, terciária e quaternária, bem como para o peneiramento são as quantidades máximas de linhas disponíveis e os valores de alimentação representam a taxa de alimentação da planta, em t/h.

Tabela 2 – Relação de cenários de operação simulados em relação à número de linhas por processo e taxa de alimentação

Variáveis	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
pilha pulmão	6	6	6	3	3	3
brit. secundária	3	3	3	2	2	2
brit. terciária	4	4	4	2	2	2
brit. quaternária	8	8	8	4	4	4
peneiramento	12	12	12	6	6	6
alimentação (t/h)	4.015	3000	2000	4.015	3000	2000

O simulador da planta de britagem possui alguns parâmetros que podem ser previamente definidos pelo usuário. Para a discussão, o resultado a ser avaliado será o de um turno completo de seis horas e não foram feitas mais alterações, relativas principalmente à variações da granulometria do material de alimentação.

## 5.1 Cenário 1

No cenário 1, considera-se a planta de britagem com todos os equipamentos disponíveis e operando à taxa máxima de alimentação, 4015t/h.

Na tabela 3, na coluna 2, está o resultado obtido de produção e potência para o caso de máximo de equipamentos em funcionamento. Na coluna 3 apresenta-se a solução obtida pelo algoritmo.

Tabela 3 – Resultados obtidos no Cenário 1 de teste

Processo	Máximo	Solução do Algoritmo
Pilha Pulmão	6	5
Britagem Secundária	3	2
Britagem Terciária	4	3
Britagem Quaternária	8	5
Peneiramento	12	10
Taxa de Alimentação (t/h)	4.015	4.015
Produção (t)	22.367	22.367
Potência Ativa Média (kW)	1040	690
Consumo Energia Elétrica (kWh)	6.240	4.140

Fica evidente a efetividade do algoritmo frente aos resultados obtidos de produção e potência para o Cenário 1, onde o algoritmo sugere uma utilização de equipamentos menor do que a de quantidade máxima de equipamentos por processo, garantindo ainda assim que a produção, mesmo com um número menor de linhas em funcionamento, mantivesse estabilizada.

Pode-se verificar que, para o caso de todos os equipamentos em funcionamento, houve uma produção total de 22.367t em um turno com uma potência ativa média de 1040 kW. Em termos de consumo energético, durante este turno os britadores consumiriam 6.240kWh de energia elétrica. Neste cenário, o algoritmo sugeriu uma configuração em que todos os processos obtiveram um decréscimo na quantidade de equipamentos, que resulta na operação da planta com uma potência ativa média de 690kW, com um consumo de 4.140kWh. Para este cenário de simulação, houve uma redução de 2.100kWh no consumo da planta, valor que representa 34% de economia de energia elétrica durante este turno de seis horas.

## 5.2 Cenário 2

Para o Cenário 2 foram considerados todos os equipamentos disponíveis e uma taxa de alimentação de 3000t/h. Os resultados obtidos para este cenário estão exibidos na tabela 4

Novamente o algoritmo sugere a operação da planta com uma quantidade de equipamentos diferente da máxima, como pode ser observado na tabela 4.

Tabela 4 – Resultados obtidos no Cenário 2 de teste

Processo	Máximo	Solução do Algoritmo
Pilha Pulmão	6	3
Britagem Secundária	3	2
Britagem Terciária	4	2
Britagem Quaternária	8	5
Peneiramento	12	9
Taxa de Alimentação (t/h)	3.000	3.000
Produção (t)	17.952	17.849
Potência Ativa Média (kW)	1040	620
Consumo Energia Elétrica (kWh)	6.240	3.720

Neste cenário, o valor de produção máxima atingiu 17.952t, ao passo de que a solução do algoritmo sugeriu uma configuração em que a produção será de 17.849t, portanto houve um decréscimo na produção de 0,05% causado pelo fato de que as comparações entre os valores de produção máxima e produção do algoritmo poderiam atingir até 1% de variação, para que a busca local pudesse explorar vizinhanças sem paradas prematuras.

Entretanto, a sugestão do algoritmo gerou uma operação com uma potência de 620kW, vide figura, logo um consumo de 3.720kWh ao passo de que a operação com todos as linhas disponíveis consumiria 6.240kwh durante o turno. Houve portanto uma economia de 2520kWh, cerca de 40% no consumo da planta.

### 5.3 Cenário 3

Para o cenário 3 foram considerados todos os equipamentos disponíveis e uma taxa de alimentação de 2000t/h. Os resultados obtidos para este cenário estão exibidos na tabela 5:

Tabela 5 – Resultados obtidos no cenário 3 de teste

Processo	Máximo	Solução do Algoritmo
Pilha Pulmão	6	3
Britagem Secundária	3	1
Britagem Terciária	4	2
Britagem Quaternária	8	3
Peneiramento	12	10
Taxa de Alimentação(t/h)	2.000	2.000
Produção (t)	11.970	11.970
Potência Ativa Média (kW)	1.040	420
Consumo Energia Elétrica (kWh)	6.240	2.520

O algoritmo sugere, mais uma vez, a operação da planta com uma quantidade de equipamentos menor que a máxima, para uma mesma produção que totaliza 11.970t no turno.

Fica evidente evidência que para este cenário a solução do algoritmo possui uma potência ativa média de 420kW, ao passo de que como nos casos anteriores, a potência do circuito com todas as linhas atinge 1040kW. Houve um decréscimo cerca de 60% no consumo de energia elétrica da planta de britagem para este cenário, com uma economia de 3.720kWh durante o turno, passando de um cenário de operação com consumo de 6.240kWh para o sugerido pelo algoritmo, que consome 2520kWh.

## 5.4 Cenário 4

No cenário 4, foi considerado que apenas metade dos equipamentos estão disponíveis para operarem na planta de britagem. Além disso, será considerada uma taxa de alimentação de 4015t/h, a máxima para o circuito.

Tabela 6 – Resultados obtidos no Cenário 4 de teste

Processo	Máximo	Solução do Algoritmo
Pilha Pulmão	3	3
Britagem Secundária	2	2
Britagem Terciária	2	1
Britagem Quaternária	4	1
Peneiramento	6	6
Taxa de Alimentação (t/h)	4.015	4.015
Produção (t)	14.226	15.035
Potência Ativa Média (kW)	540	230
Consumo Energia Elétrica (kWh)	3240	1380

Neste cenário, a tabela 6 demonstra que o algoritmo sugere a operação da planta com quantidade de equipamentos menor que a máxima disponível e ainda assim produz uma quantidade de minério de ferro britado maior. A configuração com todas as linhas em funcionamento produz 14.226t, ao passo de que a solução do algoritmo atinge 15.035t no turno, ou seja, uma elevação de 6% no volume de produto.

Apesar da elevação na produção, ainda assim houve uma redução no consumo de energia elétrica da planta, saindo de uma demanda de 540kW para 230kW, o que significa durante o turno uma redução de 1860kWh, saindo de um cenário de 3240kWh para um de 1380kWh de consumo de energia elétrica, uma economia de 57%.

## 5.5 Cenário 5

No cenário 5, apenas metade dos equipamentos estão disponíveis para operarem na planta de britagem com uma taxa de alimentação de 3000t/h.

Tabela 7 – Resultados obtidos no Cenário 5 de teste

Processo	Máximo	Solução do Algoritmo
Pilha Pulmão	3	3
Britagem Secundária	2	2
Britagem Terciária	2	1
Britagem Quaternária	4	2
Peneiramento	6	6
Taxa de Alimentação (t/h)	3.000	3.000
Produção (t)	14.030	14.195
Potência Ativa Média (kW)	540	310
Consumo Energia Elétrica (kWh)	3240	1860

Neste cenário, a tabela 7 evidencia que a solução proposta pelo algoritmo possui quantidade de linhas menor que a máxima disponível, e novamente houve uma elevação de cerca de 1.2% na produção da planta, saindo de um total de 14030t para 14195t.

A potência requerida para a operação da planta na configuração proposta pelo algoritmo fora de 310kW, enquanto que para todas as linhas em funcionamento é de 540kW. Houve no cenário 5, portanto, uma redução de 430kWh no consumo da planta durante o turno de seis horas, saindo de um cenário de 3.240kWh para um de 1.860kWh, uma redução de cerca de 43%.

## 5.6 Cenário 6

No cenário 6, estão disponíveis metade dos equipamentos e o processo opera a uma taxa de alimentação de 2000t/h.

Tabela 8 – Resultados obtidos no Cenário 6 de teste

Processo	Máximo	Solução do Algoritmo
Pilha Pulmão	3	3
Britagem Secundária	2	1
Britagem Terciária	2	2
Britagem Quaternária	4	4
Peneiramento	6	6
Taxa de Alimentação (t/h)	2.000	2.000
Produção (t)	11.970	11.970
Potência Ativa Média (kW)	540	500
Consumo Energia Elétrica (kWh)	3.240	3000

Neste cenário, a tabela 8 evidencia novamente que a solução proposta pelo algoritmo possui quantidade de equipamentos menor que a máxima disponível mesmo com uma produção final igual, no valor de 11.970t. Sendo assim, o circuito de britagem consome 3240kWh durante o turno se for operado com todos as linhas disponíveis, porém o algoritmo sugere uma configuração com um consumo de 3000kWh, uma economia de 7% em energia

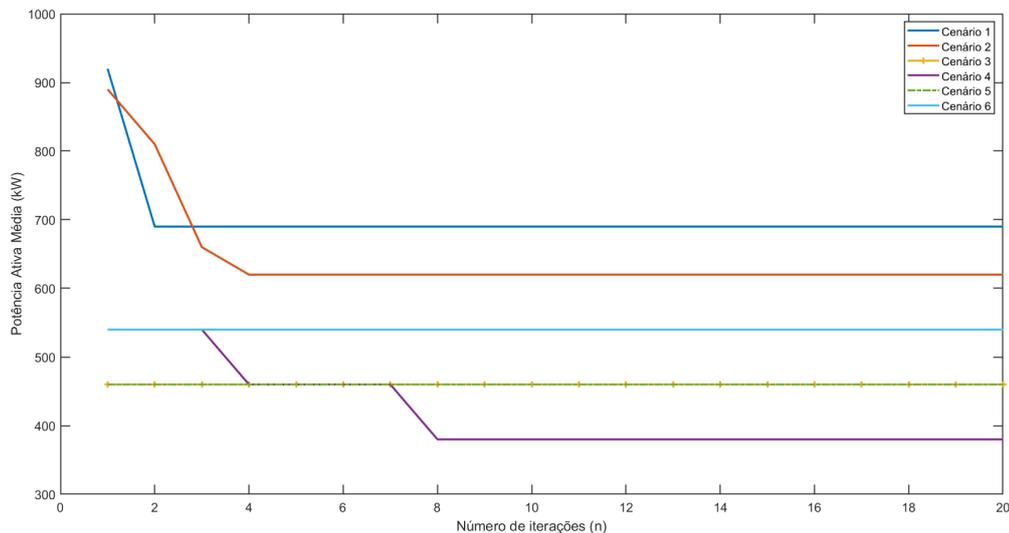
elétrica. A potência média requerida pela solução do algoritmo é de 500kW enquanto a configuração de comparação demandaria 540kW.

## 5.7 Análise da convergência do algoritmo

Os cenários simulados foram obtidos em tempo razoavelmente curto. Cada um dos resultados fora obtido em aproximadamente 2 minutos, com 20 iterações  $n = 20$ , sendo que a obtenção da totalização de produção, solicitada várias vezes no algoritmo, é a principal responsável pelo tempo de execução.

A fim de possuir um melhor entendimento quanto ao comportamento do algoritmo frente ao número  $n$  de iterações da primeira busca local e atestar a efetividade do método adotado, onde são feitas duas buscas em seguida, o algoritmo foi submetido a uma série de testes prévios. Nestes testes foram solicitadas soluções para diferentes taxas de alimentação e números máximo de equipamentos em funcionamento. Nestas soluções foram avaliados o número  $n$  de iterações onde a solução da primeira busca local atingiu o seu valor mínimo de potência ativa. A figura 15 explicita para os cenários que foram discutidos neste capítulo, os resultados de potência ativa encontrados pela primeira busca local em função do número  $n$  de iterações.

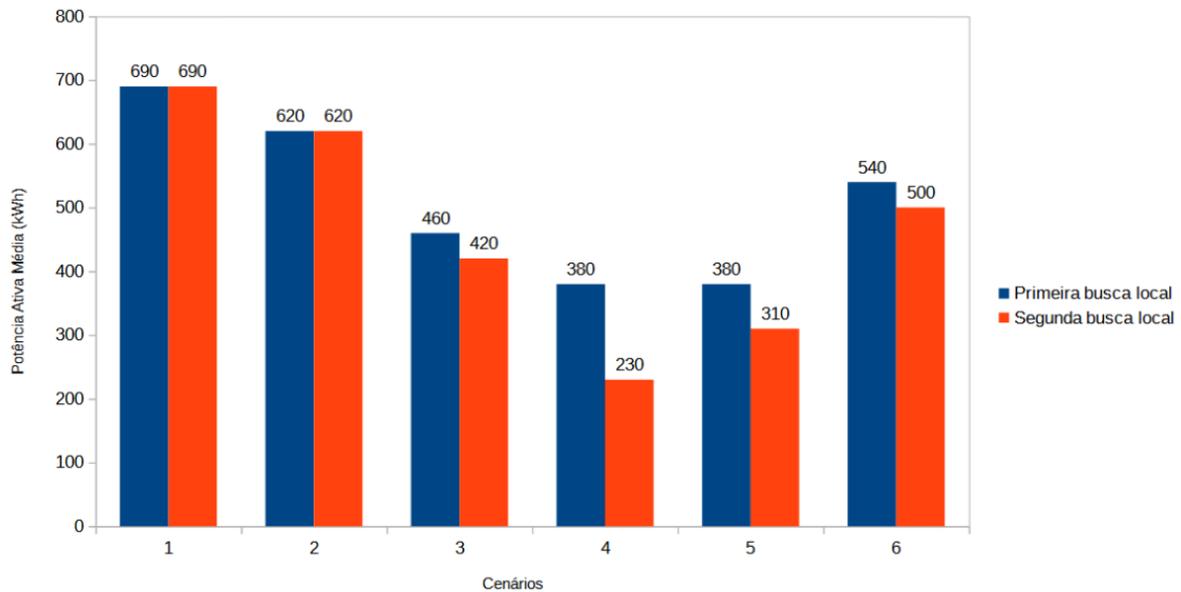
Figura 15 – Análise do número  $n$  de iterações onde a busca local converge para um valor mínimo



Fonte: Do autor

Pode-se observar que o algoritmo convergiu para o seu valor mínimo, para cada cenário, em no máximo de 8 iterações. Ainda assim, para os resultados apresentados neste trabalho, foram admitidas 20 iterações ( $n = 20$ ) da primeira busca local, dado que o

Figura 16 – Comparação de resultados entre a primeira e a segunda busca local



Fonte: Do autor.

algoritmo consegue fazê-lo em tempo computacional aceitável e neste intervalo, todos os cenários convergiram para um valor de potência.

Ainda para atestar o método proposto, em que foram realizadas duas buscas locais distintas a fim de refinar a solução gerada, foram comparados os resultados para potência ativa entre as duas buscas. Estes resultados podem ser observados na figura 16.

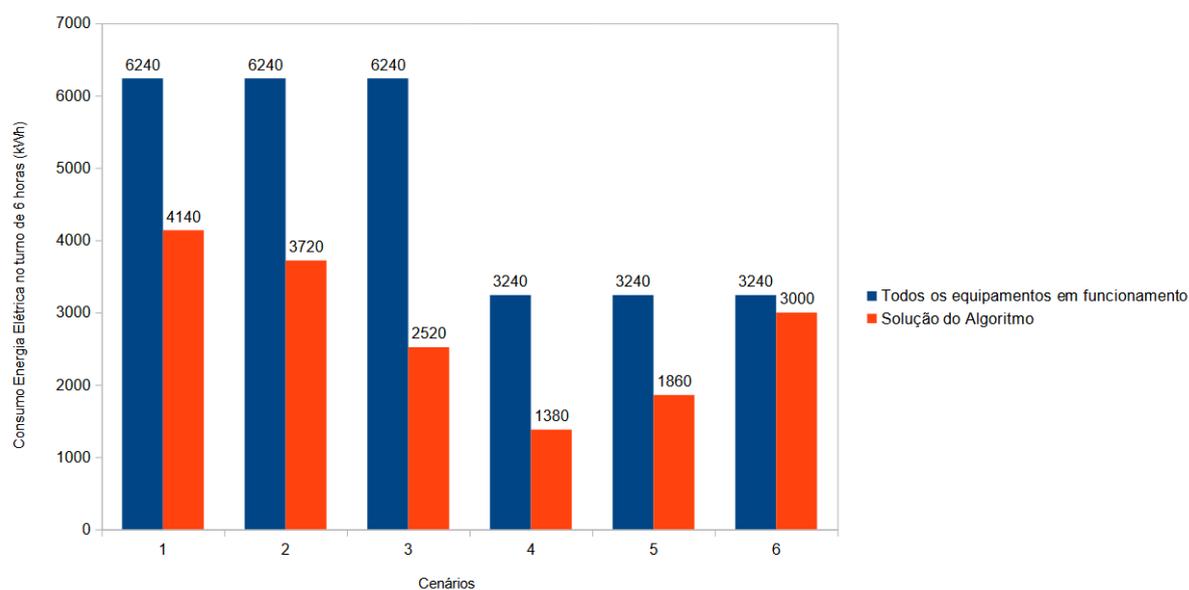
É visível que o método adotado se mostrou eficiente para o refino de uma solução local, pois nos cenários de simulação 3, 4, 5 e 6 houve diferenças significativas entre a potência ativa mínima sugerida pela primeira busca local e o resultado final do algoritmo, refinado pela segunda busca. Pode-se inferir, portanto, a eficiência do algoritmo no que tange ao método utilizado.

## 5.8 Resumo dos Resultados

Os resultados obtidos nos cenários simulados demonstraram a efetividade do algoritmo proposto na redução do consumo de energia elétrica da planta de britagem, ao passo que não houve penalizações significativas na totalização do produto final.

A figura 17 apresenta os resultados de consumo de energia elétrica das configurações onde todas as linhas que estão disponíveis são operadas e as configurações sugeridas pelo algoritmo.

Figura 17 – Comparação de consumos



Fonte: Do autor.

Fica evidente que a operação da planta de britagem com todos os equipamentos disponíveis não é uma boa estratégia para garantir a produção, ao passo que foi demonstrada a possibilidade de otimizar o consumo de energia elétrica sem penalizar a produção, sendo capaz de gerar uma economia substancial e uma consequente redução de custos para a operação da planta.

## 6 Conclusão

Este trabalho procurou apresentar um algoritmo heurístico de otimização visando a operação eficiente de uma planta de britagem, onde fosse garantida a produção com uma redução no consumo de energia elétrica. A britagem, processo constituinte do beneficiamento de minério de ferro, é um das etapas onde se tem elevado consumo energético, dados os equipamentos utilizados, os britadores. Não obstante, a energia elétrica é responsável por cerca de 30% do consumo energético de uma empresa de mineração, sendo o insumo com maior percentual de utilização neste negócio. Alternativas para a redução do consumo de energia elétrica e conseqüentemente nos custos de produção, devem ser adotadas por empresas que visam uma maior competitividade.

Foram levantados neste estudo três objetivos específicos. Em um primeiro momento, fez-se necessária a representação da potência ativa da planta de britagem. Verificou-se a partir de trabalhos sobre o tema a possibilidade de quantificar a potência ativa dos britadores, com o valor de sua média por turno (6 horas), sendo os britadores os equipamentos predominantes para o consumo de energia elétrica em uma planta de britagem. Posteriormente, desenvolveu-se um algoritmo baseado em meta-heurística ILS, que tivesse como objetivo uma redução no consumo energético sem prejuízo à produção. Este algoritmo, utilizado em conjunto com um simulador da planta de britagem mostrou-se eficiente para a resolução do problema, ao passo que retornou soluções viáveis, em tempo computacional razoável. Por fim, foram simulados cenários, onde variaram-se parâmetros de operação e os resultados propostos puderam ser avaliados. Uma análise permitiu verificar que se obteve êxito ao propor soluções onde houvesse uma produção significativa e redução na energia elétrica necessária. Em comparação com a operação da planta com todos os equipamentos em funcionamento, retornou soluções com até 60% de economia em energia elétrica.

Sendo assim, mostrou-se que a otimização da operação do sistema de britagem, visando uma economia em energia elétrica, pode ser utilizado como meio de redução de custos produtivos do minério de ferro. Em trabalhos futuros, pode-se buscar meios de quantificar a potência ativa requerida por todos os equipamentos e etapas de britagem, para além dos britadores, também quantificando a contribuição de peneiras, alimentadores e transportadores de correia para o consumo da planta. Assim pode-se obter mais exatidão e previsibilidade no consumo energético da planta, podendo por fim aumentar os patamares de economia com a utilização de heurísticas.

# Referências

- ARROYO, J. *Heurísticas e metaheurísticas para otimização combinatoria multiobjetivo*. 232 f. Tese (Doutorado em Engenharia Eletrica) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002. 18, 19
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TECNICAS. *NBR 6177: Transportadores contínuos - transportadores de correia - terminologia*. Rio de Janeiro, 2016. 45 p. 26
- AZUMA, R. M. *Otimização multiobjetivo em problema de estoque e roteamento gerenciados pelo fornecedor*. 99 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Eletrica) — Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011. 17
- CALDAS, F. N. *Propostas para solução do problema de movimentação de tripper*. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Computação) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2018. 15, 27, 28
- CAXITO JUNIOR, F.; DIAS, T. G. Ferro. In: \_\_\_\_\_. *Recursos minerais de Minas Gerais*. Belo Horizonte: CODEMGE, 2018. Meio de acesso: eletrônico (<http://www.codemge.com.br>). 12
- CCEE. *Em MG e SP, metalurgia e extração mineral têm crescimento no consumo de energia*. 2021. Disponível em: <[https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages\\_publico/noticias-opiniao/noticias/noticialeitura?contentid=CCEE](https://www.ccee.org.br/portal/faces/pages_publico/noticias-opiniao/noticias/noticialeitura?contentid=CCEE)>. Acesso em: 01 out. 2021. 13
- COTA, L. P. *Abordagens exatas e heurísticas para o problema de sequenciamento em máquinas paralelas não relacionadas com tempos de preparação dependentes da sequência*. 134 f. Tese (Doutorado em Engenharia Eletrica) — Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2018. 15, 20, 37
- DELBONI, H.; MORRELL, S. A load-interactive model for predicting the performance of autogenous and semi-autogenous mills. *KONA Powder and Particle Journal*, v. 20, p. 208–222, 2002. 22
- FIGUEIRA, H. V.; LUZ, A. B. d.; ALMEIDA, S. L. M. d. Britagem e moagem. In: \_\_\_\_\_. *Tratamento de minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 4, p. 143–210. 13, 22, 23, 25
- FILHO, F. M. V. *MSIALLOCATOR: Aplicação da Meta-Heurística ILS para o problema de alocação de máquinas virtuais em um data center*. 60 f. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso) — Universidade Federal do Ceara, Crateus - CE, 2018. 15
- G1. *Como a mineração ajuda a alavancar a economia brasileira: Setor, que gera 180 mil empregos diretos, representa 4% do PIB e é responsável por 25% do saldo comercial do país*. 2018. Disponível em: <<https://g1.globo.com/especial-publicitario/em-movimento/noticia/2018/12/10/como-a-mineracao-ajuda-a-alavancar-a-economia-brasileira.ghtml>>. Acesso em: 01 out. 2021. 12
- GANDOMI, A. H. et al. *Metaheuristic Applications in Structures and Infrastructures*. 1. ed. [S.l.: s.n.], 2013. 17

- HAIMES, Y. Y.; HALL, W. A. Multiobjectives in water resource systems analysis: The surrogate worth trade off method. *Water Resources Research*, v. 10, p. 615–624, 1974. 18
- KELLY, E. G.; SPOTTISWOOD, D. J. Introduction to mineral processing. 1 1982. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/6435163>>. 23
- LOURENÇO, H. R.; MARTIN, O. C.; STÜTZLE, T. Iterated local search. In: \_\_\_\_\_. *Handbook of Metaheuristics*. Boston, MA: Springer US, 2003. p. 320–353. 20
- LUZ, A. B. d.; ALMEIDA, S. L. M. d. Introdução ao tratamento de minérios. In: \_\_\_\_\_. *Tratamento de minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCT, 2010. cap. 1, p. 3 – 20. 13
- MESQUITA, P. P. D.; CARVALHO, P. S. L. de; OGANDO, L. D. Desenvolvimento e inovação em mineração e metais. *BNDES Setorial*, Rio de Janeiro, n. 43, p. [325]–361, 2016. 12, 13
- MIYAZAWA, F. K.; SOUZA, C. C. de. Introdução à otimização combinatoria. In: \_\_\_\_\_. *Anais da 34ª Jornada de Atualização em Informática JAI 2015*. Campinas: SBC, 2015. cap. 3, p. 123–190. 17
- MOURÃO, J. M. *Estudo Prospectivo do Setor Metalúrgico*. [S.l.], 2008. 12
- RIBEIRO, W. G. *Metaheuristics application to the problem of coverage and routing in wireless sensor networks*. 110 f. Dissertação (Mestrado em Metodologias e técnicas da Computação; Sistemas de Computação) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2012. 15
- SANTANA, E. P. d. *Otimização meta-heurística multiobjetivo aplicada ao método sem malha local*. 209 p. Tese (Doutorado em Estruturas e Construção Civil) — Universidade de Brasília, Brasília, 2021. 17, 19
- SANTOS, M. S. *Aplicação de Simheurística para operação eficiente de um circuito de bitagem*. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Controle e Automação) — Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019. 14, 15, 27, 28, 30, 32, 33
- SOUZA, I. de. *Mineração - Concentração: a comprehensive guide*. Ceará: SEDUC, 2013. 13
- SOUZA, M. J. F. *Inteligência Computacional para Otimização, Notas de aula, 2011/1*. Ouro Preto - MG, 2011. Disponível em: <http://www.decom.ufop.br/prof/marcone/Disciplinas/InteligenciaComputacional/InteligenciaComputacional.pdf>. 19, 20, 21
- VALE. *Energia: Consumo*. 2021. Disponível em: <<http://www.vale.com/brasil/PT/business/energy/consumo/Paginas/default.aspx>>. Acesso em: 01 out. 2021. 13, 14