



INSTITUTO TECNOLÓGICO VALE



Programa de Pós-graduação em Instrumentação, Controle e Automação de
Processos de Mineração - PROFICAM
Universidade Federal de Ouro Preto - Escola de Minas
Associação Instituto Tecnológico Vale - ITV

Dissertação

APLICAÇÃO DE *SIMHEURISTIC* PARA OPERAÇÃO EFICIENTE DE
UM CIRCUITO DE BRITAGEM

Mário Sérgio dos Santos

Ouro Preto
Agosto de 2019

Mário Sérgio dos Santos

**APLICAÇÃO DE *SIMHEURISTIC* PARA OPERAÇÃO EFICIENTE DE
UM CIRCUITO DE BRITAGEM**

Dissertação apresentada ao curso de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração da Universidade Federal de Ouro Preto e do Instituto Tecnológico Vale, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Prof. D.Sc. Thiago Antonio Melo Euzébio

Coorientador: Prof. Ph.D. Marcene Jamilson Freitas Souza

Coorientador: Prof. Ph.D. Luciano Perdigão Cota

Ouro Preto, MG – Brasil

Agosto de 2019

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S237a Santos, Mário Sérgio dos.
Aplicação de Simheuristic para Operação Eficiente de um Circuito de Britagem.
[manuscrito] / Mário Sérgio dos Santos. - 2019.
83 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Thiago Antonio Melo Euzébio.

Coorientadores: Prof. Dr. Luciano Perdigão Cota, Prof. Dr. Marccone Jamilson Freitas Souza.

Dissertação (Mestrado Profissional). Universidade Federal de Ouro Preto.
Programa de Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração. Programa de Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Área de Concentração: Engenharia de Controle e Automação de Processos Minerais.

1. Britagem. 2. Minérios de ferro. 3. Otimização estrutural. 4. Simheuristic. 5. Simulação (Computadores). I. Santos, Mário Sérgio dos. II. Cota, Luciano Perdigão. III. Euzébio, Thiago Antonio Melo. IV. Souza, Marccone Jamilson Freitas. V. Universidade Federal de Ouro Preto. VI. Título.

CDU 681.5:622.2

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

Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos
de Mineração - PROFICAM

Aplicação de Simheuristic para Operação Eficiente de um Circuito de Britagem

Mário Sérgio dos Santos


Dissertação defendida e aprovada em 16 de agosto de 2019 pela banca
examinadora constituída pelos professores:




D.Sc. Thiago Antonio Melo Euzébio
Orientador – Instituto Tecnológico Vale Mineração (ITV-MI)



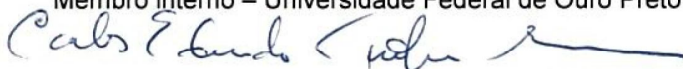
D.Sc. Marcone Jamilson Freitas Souza
Coorientador – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



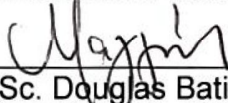
D.Sc. Luciano Perdigão Cota
Coorientador – Instituto Tecnológico Vale Mineração (ITV-MI)



D.Sc. Paulo Marcos de Barros Monteiro
Membro interno – Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP)



D.Sc. Carlos Eduardo Trabuco Dórea
Membro externo – Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN)



D.Sc. Douglas Batista Mazzinghy
Membro externo – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

*Aos meus pais Silas e Lucely,
minha irmã Rosane, minha
esposa Marcela e a toda minha
família que, com muito carinho e
apoio, não mediram esforços
para que eu chegasse até esta
etapa de minha vida.*

Agradecimentos

A elaboração deste trabalho não teria sido possível sem a colaboração, estímulo e empenho de várias pessoas. Gostaria de expressar toda a minha gratidão e apreço a todos aqueles que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esta dissertação se tornasse uma realidade. A todos quero manifestar os meus sinceros agradecimentos.

Primeiramente, gostaria de agradecer a **Deus** por me guiar, iluminar e me dar tranquilidade para seguir em frente com os meus objetivos e não desanimar diante das dificuldades.

Aos meus pais, **Silas e Lucely**, e a minha irmã, **Rosane**, meu infinito agradecimento. Sempre acreditaram em minha capacidade e me incentivaram com meus objetivos, prezando muito pela minha educação. Isso só me fortaleceu e me incentivou a fazer o melhor de mim. Sou grato pelo incentivo e por todas as orações diárias que vocês me dedicaram. Obrigado pelo amor incondicional!

A toda minha família que sempre vibrou comigo, desde o início, e sempre fez “propaganda” positiva a meu respeito. Obrigado pela força!

Agradeço a todos os professores, especialmente ao meu orientador, **Professor Doutor Thiago Antonio Melo Euzébio**, pela orientação prestada, pelo seu incentivo, disponibilidade e apoio que sempre demonstrou desde o início deste trabalho. Manifesto aqui minha gratidão por compartilhar sua sabedoria, seu tempo e sua experiência.

Aos meus co-orientadores, **Professor Doutor Luciano Perdigão Cota** e **Professor Doutor Marcone Jamilson Freitas Souza**, pela disponibilidade, atenção e grandes contribuições na elaboração deste trabalho.

Agradeço também à empresa **VALE**, que me concedeu a oportunidade de realizar este mestrado através da parceria entre o ITV e a Universidade Federal de Ouro Preto. Deixo aqui a minha gratidão ao **Fernando Paiva** e ao **Vicentino Rodrigues**, grandes gestores e mentores, que proporcionaram a realização desta conquista.

Desejo igualmente agradecer a todos os meus colegas do mestrado, especialmente o **Ênio Lopes Júnior** e o **Thomás Vargas**, cujo apoio no desenvolvimento deste trabalho foram fundamentais. Agradeço também ao colega de mestrado e amigo **Gabriel Lott** pela companhia em todas as idas à Ouro Preto e pelos longos momentos de estudo.

Esta dissertação não poderia chegar ao fim sem o precioso apoio de todos vocês, afinal ninguém vence sozinho. Obrigado a todos!

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior, Brasil (CAPES), Código de Financiamento 001; do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG); e da Vale SA.

AGRADECIMENTO ESPECIAL

Meu agradecimento mais profundo só poderia ser dedicado a uma pessoa: minha querida esposa **Marcela**, por ser tão importante na minha vida. O tempo todo ao meu lado, incondicionalmente. Sempre me incentivando e me fazendo acreditar que posso mais que imagino. Devido ao seu companheirismo, amizade, paciência, compreensão, apoio, alegria e amor, este trabalho pôde ser concretizado. Muito obrigado!

Resumo da Dissertação apresentada à Escola de Minas/UFOP e ao ITV como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

APLICAÇÃO DE *SIMHEURISTIC* PARA OPERAÇÃO EFICIENTE DE UM CIRCUITO DE BRITAGEM

Mário Sérgio dos Santos

Agosto/2019

Orientadores: Thiago Antonio Melo Euzébio
Marcone Jamilson Freitas Souza
Luciano Perdigão Cota

Nem sempre a opção de utilizar todos os equipamentos disponíveis em uma linha de produção é a solução de maior produtividade. Neste trabalho, um algoritmo baseado em *Simheuristic* é aplicado em um sistema de suporte à decisão que busca a quantidade ótima de equipamentos que devem operar no circuito de britagem. O estudo é feito com base em um circuito de britagem de minério de ferro da usina de Conceição II, localizada em Itabira-MG, da empresa Vale S.A., composto por 16 britadores divididos em 4 estágios de britagem. Desenvolve-se um simulador do processo de britagem, considerando-se as dificuldades inerentes às aplicações industriais, tais como erros e/ou indisponibilidade de medições, imprecisão de modelos, dimensão do processo etc. Na sequência implementa-se o otimizador que tem como função objetivo o resultado da simulação. Os resultados de diversos cenários simulados mostram um aumento de produção e uma redução do consumo energético.

Palavras-chave: Britagem, Minério de Ferro, Otimização, *Simheuristic*, Simulação

Macrotema: Usina; **Linha de Pesquisa:** Análise e Projeto de Sistemas de Controle Avançado; **Tema:** Aumento de Produtividade na Usina; **Área Relacionada da Vale:** Britagem da Usina de Conceição II.

Abstract of Dissertation presented to Escola de Minas/UFOP and ITV as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

SIMHEURISTIC APPLICATION FOR EFFICIENT OPERATION OF A CRUSHING CIRCUIT

Mário Sérgio dos Santos

August/2019

Advisors: Thiago Antonio Melo Euzébio
Marcone Jamilson Freitas Souza
Luciano Perdigão Cota

Not always the option of using all the equipment available in a production line is the solution to greater productivity. In this work, a Simheuristic based algorithm is applied in a decision support system that seeks the optimal quantity of equipment that must operate in the crushing circuit. The study is based on an iron ore crushing circuit of the Conceição II plant, located in Itabira-MG, of the company Vale S.A., composed of 16 crushers divided into 4 stages of crushing. It is a simulator of the crushing process, considering the inherent difficulties of industrial applications, such as errors and/or unavailability of measurements, imprecision of models, size of the process, etc. In the sequence, we implement the optimizer whose objective function is the result of the simulation. The results of several simulated scenarios show an increase in production and a reduction in energy consumption.

Keywords: Crushing, Iron Ore, Optimization, Simheuristic, Simulation

Macrotheme: Plant; **Research Line:** Analysis and Design of Advanced Control Systems; **Theme:** Increased Plant Productivity; **Related Area of Vale:** Conceição II Crushing Plant.

Lista de Figuras

1.1	Taxa Média Diária de Produção do Circuito de Britagem	4
1.2	Energia Mensal Consumida por Processo da Usina de Conceição II	5
2.1	Tipos de Acionamento da Mandíbula Móvel nos Britadores	8
2.2	Britador Giratório: (a) diagrama funcional; (b) seção do britador	9
2.3	Corte de um Britador Cônico	10
2.4	Alimentador de Correia da Usina de Conceição II	11
2.5	Peneira Vibratória	11
2.6	Transportador de Correia	12
2.7	Tripper	12
2.8	Fluxograma Simplificado da Usina de CE II	13
2.9	Circuito de Britagem da Usina de Conceição II	14
2.10	Fluxograma Resumido da Britagem da Usina de CE II	14
2.11	Diagrama de Fluxo da Área da Britagem Primária	16
2.12	Diagrama de Fluxo da Área da Pilha Pulmão	18
2.13	Diagrama de Fluxo da Área da Britagem Secundária	19
2.14	Diagrama de Fluxo da Área da Britagem Terciária e Quaternária	21
2.15	Diagrama de Fluxo da Área de Peneiramento	23
2.16	Diagrama de Fluxo da Área de Pátio da Moagem	24
3.1	Modelo da Britagem Secundária no IDEAS	30
3.2	Ciclos de Abertura e Quebra no Britador. Adaptado de King (2012)	32
3.3	Função de Classificação Típica de Um Britador. Adaptado de King (2012)	33
3.4	Validação Modelo Britadores	39
3.5	Validação Peneira Britagem Secundária	40
3.6	Validação Peneira Peneiramento	40
3.7	Britadores com Câmara Vazia	41
3.8	Balanco de Massa de Projeto e Modelo Simulado	42
4.1	Os Cinco Níveis de Controle de Processo e Otimização	48
4.2	Evolução de Uma Variável Crítica ao Longo do Tempo	49
4.3	Circuito de Moagem Típico	50

4.4	Visão Geral da Abordagem de Otimização com Simulação. Adaptado de Juan <i>et al.</i> (2015)	53
4.5	Número de Publicações do <i>Google Scholar</i> para " <i>Simheuristic</i> "	53
4.6	Vetor de Representação de Uma Solução	56
4.7	Exemplo de Movimento de Vizinhança	59
4.8	Interface Gráfica do Sistema de Suporte à Decisão	61
5.1	Produção de Três Soluções no Cenário 1	65
5.2	Evolução da Busca do Algoritmo SILS-SIM no Cenário 1	65
5.3	Produção de Duas Soluções no Cenário 2	66
5.4	Produção de Três Soluções no Cenário 3	67
5.5	Produção de Três Soluções no Cenário 4	68
5.6	Produção de Três Soluções no Cenário 5	69
5.7	Produção de Duas Soluções no Cenário 6	70
5.8	Consumo Energético Britadores	71
5.9	Tempo por Iteração do Algoritmo de Força Bruta	74

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros Modelo dos Britadores	42
3.2	Parâmetros Modelo das Peneiras	43
5.1	Geração da Solução Manual	63
5.2	Solução do Algoritmo no Cenário 1	64
5.3	Solução do Algoritmo no Cenário 2	66
5.4	Solução do Algoritmo no Cenário 3	67
5.5	Solução do Algoritmo no Cenário 4	68
5.6	Solução do Algoritmo no Cenário 5	69
5.7	Geração da Solução Manual com Taxa Reduzida	69
5.8	Solução do Algoritmo no Cenário 6	70
5.9	Potência Ativa Britadores	71
5.10	Número de Equipamentos e Taxa para Execução do Algoritmo de Força Bruta	73

Lista de Abreviaturas e Siglas

AL Alimentador

APC *Advanced Process Control*

APF Abertura de Posição Fechada

BL Balança

BR Britador

CN Conceição

CSS *Closed Side Setting*

DM Detector de Metais

DP Desviador de Fluxo

EP Empilhadeira

EX Extrator

GRASP *Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*

IDEAS *Integrated Design Engineering with Advanced Simulation*

ILS *Iterated Local Search*

IRP *Inventory Routing Problem*

LNS *Large Neighborhood Search*

LP *Linear Programming*

MATLAB[®] *MATrix LABoratory*

MCS *Monte Carlo Simulation*

MDWCPSD *Multi-depot Waste Collection Problem with Stochastic Demands*

MPC *Model Predictive Control*

MV *Manipulated Variable*

PIB *Produto Interno Bruto*

PID *Proporcional Integral Derivativo*

PN *Peneira*

PPSP *Project Portfolio Selection Problem*

PV *Process Variable*

RAM *Random Access Memory*

RNMPC *Robust Nonlinear Model Predictive Controller*

ROM *Run of Mine*

RTO *Real-Time Optimization*

SI *Silo*

SUFLP *Stochastic Uncapacitated Facility Location Problem*

TR *Transportador*

VNS *Variable Neighborhood Search*

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2	Motivação	3
1.3	Objetivos	5
1.4	Perguntas da Pesquisa	5
1.5	Organização do Trabalho	6
2	Circuito de Britagem	7
2.1	Principais Componentes do Processo de Britagem	7
2.2	Circuito de Britagem da Usina de Conceição II	13
2.2.1	Rotas e Áreas do Processo	13
2.2.2	Cenários	25
2.3	Conclusão	28
3	Simulador	29
3.1	Desenvolvimento do Simulador	29
3.1.1	Modelagem dos Britadores	31
3.1.2	Modelagem das Peneiras	34
3.2	Validação do Simulador	38
3.3	Conclusão	42
4	Algoritmo Heurístico para Otimização com Simulador	44
4.1	Introdução	44
4.2	Revisão Bibliográfica	45
4.2.1	Métodos para Resolução de Problemas de Otimização	45
4.2.2	Otimização em Sistemas de Controle Aplicada à Mineração	47
4.2.3	Otimização com Simuladores	52
4.3	Algoritmo Proposto	55
4.3.1	Representação e Avaliação da Solução	56
4.3.2	Algoritmo SILS-SIM	57
4.3.3	Geração da Solução Inicial	59

4.3.4	Processo de Busca Local	59
4.4	Implementação do Sistema de Suporte à Decisão	61
4.5	Conclusão	61
5	Resultados	63
5.1	Cenários Reais	63
5.1.1	Cenário 1	64
5.1.2	Cenário 2	65
5.1.3	Cenário 3	66
5.1.4	Cenário 4	67
5.1.5	Cenário 5	68
5.1.6	Cenário 6	70
5.2	Análise do Consumo de Energia	71
5.3	Análise da Convergência do SILS-SIM	72
5.4	Conclusão	74
6	Conclusões e Perspectivas de Trabalhos Futuros	75
	Referências Bibliográficas	77
A	Trabalhos Gerados	82

Capítulo 1

Introdução

Nesse capítulo é introduzido o tema objeto de estudo deste trabalho. Inicialmente é apresentado um contexto geral, onde é feita uma apresentação do cenário a ser estudado. Na sequência é apresentada a motivação que levou à escolha deste tema, e por fim são elencados os objetivos pretendidos.

1.1 Contexto

Muitas são as aplicações dos minérios ou minerais em nosso cotidiano, e eles aparecem em praticamente todos os momentos de nosso dia a dia. Em particular, o minério de ferro é um dos metais mais utilizados pela sociedade atual. Ele é indispensável devido ao seu baixo custo e aplicabilidade, especialmente por ser a principal matéria-prima na produção do aço, que é a liga metálica de ferro mais conhecida e que é amplamente empregada na produção de automóveis, navios, máquinas, ferramentas, construção civil, entre outros. Ele é, também, uma das principais *commodities* exportadas pelo Brasil e de grande importância na composição do PIB do país.

A primeira etapa da obtenção do ferro se dá por meio da extração do seu minério. Essa etapa se resume, basicamente, em utilizar equipamentos para lavrar uma determinada área, onde o minério é abundante e transportá-lo até as usinas, onde este será processado na usina de beneficiamento. Este processo fará com que o minério bruto se torne mais adequado ao processo de obtenção do ferro metálico nas siderurgias. O beneficiamento do minério de ferro é composto por uma série de processos que objetivam, a partir do material resultante da extração, separar e concentrar os minerais desejados, retirando o rejeito do minério, que é a parte para a qual não há interesse econômico. Os processos podem ser físicos e/ou químicos e sua utilização depende dos fins e da qualidade destinados ao minério beneficiado. Britadores reduzem a granulometria e peneiras classificam o minério em um circuito de britagem. A moagem também é responsável por reduzir a granulometria do minério, por meio de moinhos, de modo a adequar o minério às etapas seguintes do processo. Na deslamagem são retiradas as partículas ultrafinas pre-

judiciais às fases posteriores do beneficiamento. Na classificação e concentração tem-se o peneiramento que separa o minério do rejeito por granulometria; a jigagem, que separa minério e rejeito por densidade; a separação magnética que separa minério e rejeito por propriedades magnéticas; e a flotação, que separa minério e rejeito por propriedades físico-químicas, além de ajustar a especificação do produto. O produto final do beneficiamento é chamado concentrado e sua qualidade e valor estão diretamente associados ao teor de ferro que apresenta.

Entre as etapas mais importantes do processo de beneficiamento, a britagem é considerada o primeiro processo de fragmentação e também um dos mais importantes na cominuição do minério de ferro, pois é nela que ocorre boa parte do beneficiamento mineral. Após o minério ser extraído da mina, os blocos são encaminhados ao britador para que sejam reduzidos a uma granulometria conveniente para posterior alimentação dos moinhos ou para sua utilização direta em alguns casos. Dentro do processo de cominuição de minérios, a britagem é responsável, entre outras coisas, pelo tamanho e pela forma dos fragmentos de minério, sendo os processos divididos em secundário, terciário, quaternário e peneiramento. Por ser o primeiro processo de fragmentação, e em alguns casos se limitando a apenas este, uma britagem bem-feita é essencial para garantir um bom processamento nos processos subsequentes.

O processo de britagem de minério de ferro é realizado, em sua maioria, em circuitos fechados, com peneiras, cuja fração mais grossa retorna aos britadores como carga circulante. Após o material ser processado pelo britador primário, ele é destinado à britagem secundária e posteriormente ao peneiramento, que irá fazer a segregação granulométrica do material e definir o que irá para as britagens terciária, quaternária, ou se tornará o produto gerado pelo processo de britagem que irá alimentar o processo de moagem. O material que é alimentado na britagem secundária também passa por peneiras antes de seguir para os britadores, a fim de destinar para os britadores secundários apenas o que não está dentro da granulometria desejada para esta etapa. O material que não passa pelo processo de peneiramento, ou seja, que não está na granulometria adequada para o processo de moagem, irá alimentar as britagens terciária e quaternária como carga circulante. Esta é a realimentação existente em circuitos fechados de britagem, uma vez que o processo não possui eficiência de 100%. As etapas de britagem secundária, terciária, quaternária e peneiramento geralmente possuem linhas paralelas, e não necessariamente todas elas estarão funcionando simultaneamente, podendo ter diversas combinações de números de equipamentos/linhas disponíveis em cada etapa, o que mostra a complexidade desse processo.

Dada a complexidade do circuito de britagem, uma série de estratégias de controle existentes na literatura podem ser empregadas para fazer com que o processo funcione no seu ponto ótimo de operação. Em um primeiro nível tem-se o controle convencional, também conhecido como controle regulatório, que tem como objetivo manter as variáveis contro-

ladas estáveis em patamares desejados, compensando perturbações de carga e distúrbios diversos. Este tipo de controle tem como principais características a alta variabilidade e a operação do processo distante do seu ponto ideal economicamente. Em um nível mais acima tem-se os controles avançados de processo (APC, das iniciais em inglês *Advanced Process Control*), que tem como principal característica e objetivo a redução da variabilidade, porém ainda operando distante do ponto ótimo. Acima do controle avançado tem-se a otimização em tempo real (RTO, das iniciais em inglês *Real Time Optimization*), responsável por levar o processo para o seu ponto ótimo de operação. No nível mais alto tem-se o planejamento e programação da produção, onde é realizada a previsão da demanda e o gerenciamento da cadeia de suprimentos.

As aplicações de otimização em tempo real são normalmente associadas a grandes sistemas como um conjunto de processos unitários interligados. Espera-se que com os controles avançados as variáveis importantes tenham baixa variabilidade, enquanto que com a otimização em tempo real possa-se deslocar o processo para um ponto mais econômico segundo um objetivo determinado, como aumento de produção ou atender as especificações de qualidade de um determinado produto ou subproduto. A otimização do processo geralmente é baseada em um modelo do processo que é usado por um procedimento numérico para computar a solução ideal para o processo naquele momento (CHACHUAT *et al.*, 2009). Normalmente, a RTO otimiza o processo operacional condicionando e atualizando os *setpoints* para as estratégias de controle avançados existentes (SOUZA *et al.*, 2010).

1.2 Motivação

Diante do aumento da competitividade entre as grandes mineradoras, a busca por melhores rotas de processo, por melhores indicadores, por ferramentas de monitoramento e também por ferramentas avançadas de controle e otimização de processos tem sido cada vez mais intensa. A redução da margem de lucro faz com que as empresas busquem minimizar continuamente os custos do processo produtivo e maximizar a produção.

O trabalho proposto é baseado na britagem da usina de Conceição II, localizada na cidade de Itabira-MG. No circuito de britagem desta usina existe a oportunidade real de aumento de produtividade em função da meta desejada para o circuito. De acordo com a média de produção diária, mostrada na Figura 1.1, a capacidade nominal do circuito de $4.015t/h$ não está sendo atingida.

Controlar de forma adequada um circuito de britagem é importante quando existem várias unidades de processamento paralelo que podem variar a sua quantidade devido, por exemplo, a manutenção, demanda ou mudanças de gargalo operacional, no qual o material se acumula de forma diferente nas etapas de britagem. Além disso, o liga/desliga de equipamentos no circuito de britagem gera perturbações tanto nas etapas anteriores quanto posteriores (ITÄVUO *et al.*, 2019). Este é o caso da britagem da usina de Con-

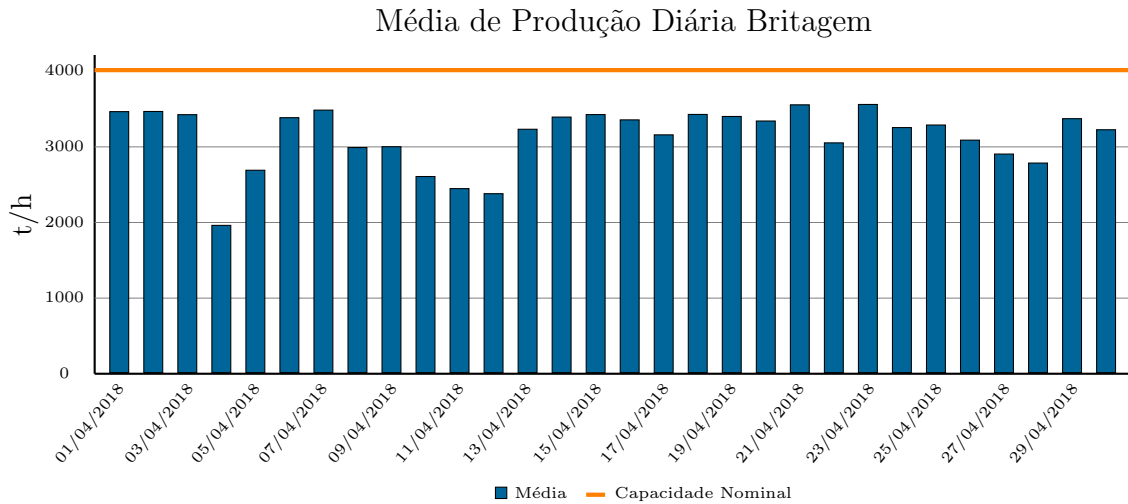


Figura 1.1: Taxa Média Diária de Produção do Circuito de Britagem

ceição II, na qual tem-se três linhas na britagem secundária, quatro na terciária, oito na quaternária e doze linhas de peneiramento, todas paralelas. Entende-se por linha uma unidade de processamento paralela independente.

Outro ponto importante a ser observado é a energia elétrica consumida por cada etapa do processo de beneficiamento de minério de ferro. Na Figura 1.2 pode-se observar o consumo médio mensal de cada processo da usina de Conceição II. Já é de conhecimento que a moagem é a etapa que mais consome energia dentro do processo de beneficiamento de minério e, como pode-se observar no gráfico, ela corresponde a aproximadamente 40% do consumo energético de toda a planta. O circuito de britagem como um todo, somando-se as britagens primária, secundária, terciária, quaternária, peneiramento e pátio de armazenamento tem um consumo médio aproximado de 10% do consumo ($2.534MWh/mês$) de todo o processo de beneficiamento, o que é representativo. Como comparação, considerando que uma casa da região sudeste consumiu em 2016 em média $169kWh/mês$ (EPE, 2018), a energia consumida no circuito de britagem seria equivalente à mesma energia consumida por cerca de 15.000 residências.

O processo produtivo de britagem de minério de ferro tem uma grande variabilidade no seu ponto de operação, devido a mudanças de processo, principalmente em função das alterações de teor e granulometria do minério que é fornecido para alimentação da usina. Variações na economia e preço do minério também direcionam a produção para outros patamares. Isso faz com que o uso de um sistema de suporte à decisão seja viabilizado. Este sistema irá avaliar o desempenho da planta e realizar alterações no processo para que ela possa operar o mais próximo possível do seu ponto ótimo, com aumento de produtividade e redução de custos, principalmente relacionados a uma maior eficiência energética.

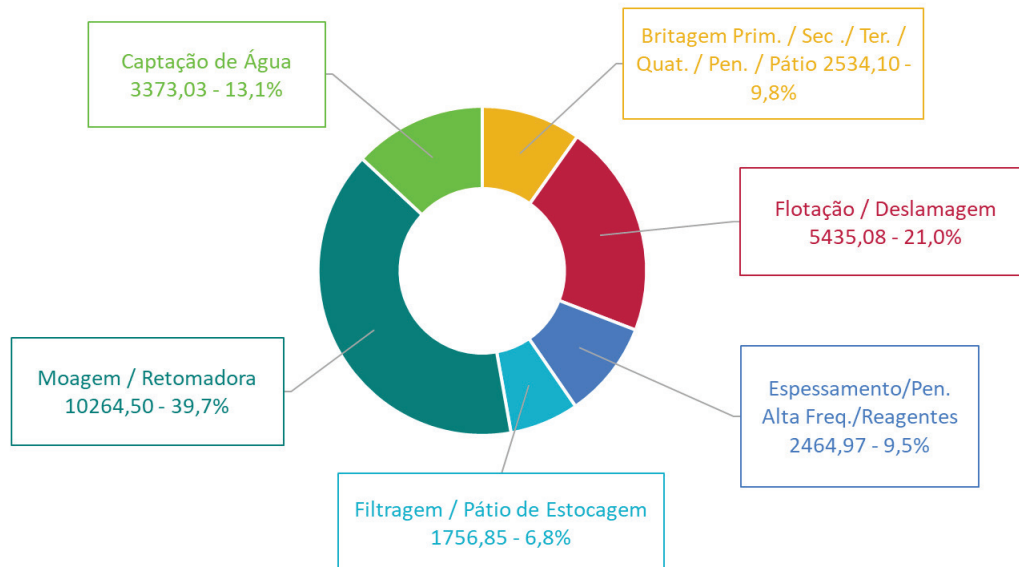


Figura 1.2: Energia Mensal Consumida por Processo da Usina de Conceição II

1.3 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo geral desenvolver um *software* de suporte à decisão para escolha de quantos equipamentos do circuito de britagem de minério de ferro da usina de Conceição II, localizada em Itabira-MG, devem estar funcionando por determinado período, considerando-se as dificuldades inerentes às aplicações industriais, tais como erros e/ou indisponibilidade de medições, imprecisão de modelos, dimensão do processo etc.

Será desenvolvido um simulador para a planta utilizando o *software* MATLAB[®], de modo a integrá-lo ao otimizador utilizando os conceitos de *simheuristic*. Por essa técnica será possível otimizar o processo produtivo usando como função objetivo o resultado da simulação, o que permite modelar as incertezas existentes nos processos reais e que não estão contidas nos modelos determinísticos.

1.4 Perguntas da Pesquisa

As principais questões a serem respondidas nesta pesquisa são as seguintes:

- Existe um número ótimo de equipamentos ligados em um circuito de britagem para aumentar a sua produtividade?
- O número ótimo de equipamentos de um circuito de britagem pode ser menor que todos os equipamentos ligados simultaneamente?

- É possível aumentar a produção de um circuito de britagem e ao mesmo tempo reduzir o consumo energético?

1.5 Organização do Trabalho

A apresentação deste trabalho está distribuída em seis capítulos e apêndice, conforme descrito a seguir.

No Capítulo 1 encontram-se a apresentação do problema, justificativas, objetivos e as perguntas que serão respondidas com esta pesquisa.

No Capítulo 2 apresenta-se o circuito de britagem de maneira geral, bem como seus principais equipamentos, e detalha-se o circuito de britagem da usina de Conceição II, objeto de estudo deste trabalho.

No Capítulo 3 descrevem-se os simuladores dinâmico e estático, e apresentam-se suas características.

No Capítulo 4 mostra-se o algoritmo heurístico que foi proposto e sua integração com o simulador.

Os resultados obtidos com o desenvolvimento deste trabalho são apresentados no Capítulo 5.

As conclusões obtidas por meio das análises realizadas, assim como as sugestões para o prosseguimento da pesquisa estão apresentados no Capítulo 6.

Capítulo 2

Circuito de Britagem

Nesse capítulo faz-se uma abordagem e apresentação do circuito de britagem no processamento de minério de ferro, apresentando-se seus principais componentes e equipamentos, e realiza-se um detalhamento do circuito de britagem específico da usina de Conceição II, mostrando as rotas de processos e as áreas nas quais ele está dividido.

2.1 Principais Componentes do Processo de Britagem

A britagem consiste no primeiro estágio do processo de cominuição de partículas, principalmente pela ação de esforços compressivos, por meio do movimento periódico de aproximação e afastamento de uma superfície móvel contra outra fixa, ou de impacto, caracterizado pela projeção das partículas contra elementos do britador ou do revestimento.

O conjunto de operações, com o objetivo de fragmentar os blocos de minérios oriundos das minas, é realizado em sucessivas etapas até a adequação granulométrica compatível com a etapa seguinte. Os britadores utilizados em cada etapa são determinados, principalmente, pelo tamanho das partículas de alimentação, que geralmente variam entre 1000 e 10mm podendo preparar o minério para a moagem, maximizar a produção de partículas com tamanho e formatos específicos ou somente diminuir o seu *top size*, facilitando o transporte do material (FIGUEIRA *et al.*, 2004).

Um fato importante de ser mencionado é que não existe um circuito fixo padrão para britar os diferentes tipos de minério existentes na natureza, principalmente com relação aos tipos de equipamentos empregados, ao número de estágios necessários, bem como à sua configuração dentro de um circuito desejado. Pode-se ter apenas a britagem primária, como também a secundária, podendo-se chegar até a britagem quaternária.

A britagem primária recebe o material oriundo da mina, na maioria das vezes alimentada diretamente pelos caminhões fora de estrada que fazem o basculamento direto na moega do britador (local onde o minério é despejado para ser britado). Em alguns casos

existem grelhas, uma espécie de peneira, onde os basculamentos são feitos para evitar que materiais fora de especificação sejam destinados ao britador. Nesta etapa geralmente utilizam-se os britadores de mandíbulas e giratórios por serem robustos e de grande porte (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006). Os britadores giratórios geralmente são utilizados sem grelha.

O britador de mandíbulas é utilizado na britagem de materiais de dureza e dimensões elevadas com variações no tamanho da alimentação. São constituídos por uma mandíbula fixa e uma móvel ligada ao excêntrico (direta ou indiretamente), realizando o movimento de aproximação e afastamento delas. Ao passar pelas mandíbulas, o material sofre o impacto, levando à sua fragmentação. Existem três tipos principais de britadores de mandíbulas, classificados de acordo com o acionamento da mandíbula móvel, conforme ilustrado na Figura 2.1 (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006): tipo Blake, no qual se tem a mandíbula acionada na parte superior do britador com uma área de alimentação fixa e uma abertura de descarga variável; tipo Dodge, onde se tem o acionamento da mandíbula na parte inferior do britador com uma área de alimentação variável e uma área de descarga fixa e o universal, no qual se tem a mandíbula acionada numa posição intermediária do britador, possibilitando uma área de alimentação e descarga variáveis (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006).

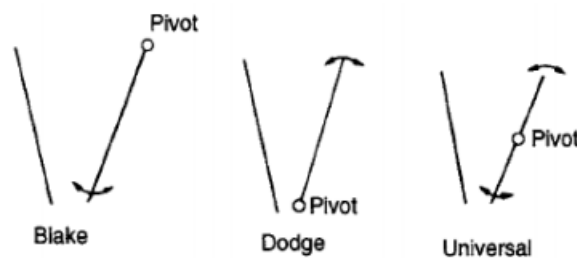


Figura 2.1: Tipos de Acionamento da Mandíbula Móvel nos Britadores

O britador giratório é mais utilizado quando há grandes volumes de material para processar. Consiste, essencialmente, em um longo eixo vertical que carrega um elemento cônico de aço de alta dureza (chamado de manto), o qual é apoiado sobre uma luva excêntrica, conforme ilustrado na Figura 2.2 (WILLS e NAPIER-MUNN, 2006). O eixo é suspenso por uma estrutura chamada de “aranha” e, à medida que ele é girado, produz um movimento cônico dentro da câmara de britagem como resultado da ação do excêntrico, cominuindo o minério na parede do britador. Sendo assim, a operação deste equipamento consiste no movimento de aproximação e afastamento do cone central em relação à carcaça invertida. O movimento circular otimiza a utilização da área da carcaça no processo de britagem, resultando em elevada capacidade de processamento do equipamento (FIGUEIRA *et al.*, 2004).

Após a britagem primária, geralmente tem-se a britagem secundária, com o objetivo de reduzir a granulometria tornando-a adequada para alimentar a britagem terciária. Nessa

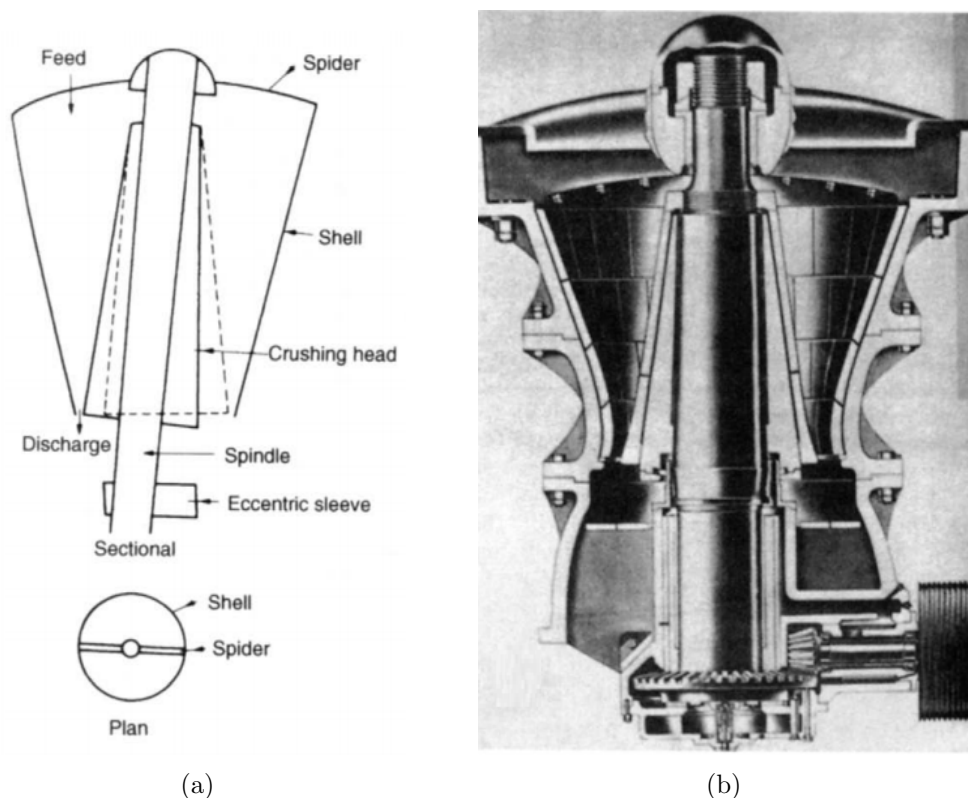


Figura 2.2: Britador Giratório: (a) diagrama funcional; (b) seção do britador

etapa os equipamentos utilizados são menos robustos quando comparados aos utilizados na britagem primária. Visando otimizar a capacidade de produção tem-se a etapa chamada de escalpe, que consiste na separação dos finos através de peneiras, destinando ao britador somente o material que necessita ser cominuído. Os britadores comumente utilizados nesta etapa do processo são: britadores giratórios, britadores de mandíbulas, britadores cônicos e britadores de impacto.

Na sequência temos a britagem terciária, que em geral, é o último estágio de britagem. No entanto, existem processos com mais de três estágios, acrescentando a britagem quaternária, e tal fato está ligado às características de fragmentação do material ou à granulometria demandada para o produto final. Os equipamentos geralmente utilizados nessas etapas são os britadores cônicos. O britador cônico possui o mesmo princípio de operação do britador giratório. Contrariamente ao que ocorre no britador giratório, no cônico, o manto e o cone apresentam longas superfícies paralelas, para garantir um tempo maior de retenção das partículas nessa região, como mostrado na Figura 2.3 (SANTANA e CHARBEL, 2009). No britador giratório a descarga se dá pela ação da gravidade, enquanto que no cônico, a descarga é condicionada ao movimento do cone, e estes equipamentos exigem um maior controle de operação, geralmente operando em circuito fechado (FIGUEIRA *et al.*, 2004). Um parâmetro importante de britadores cônicos é a abertura de posição fechada (APF), a qual determina a razão de redução do material, podendo

ser controlada pelo deslocamento vertical do manto, para cima (diminui a APF) ou para baixo (aumenta a APF), muitas vezes com o auxílio de um sistema hidráulico, e em alguns casos integrado com o sistema de controle da planta, possibilitando a sua abertura de forma automática (SILVEIRA, 2009).

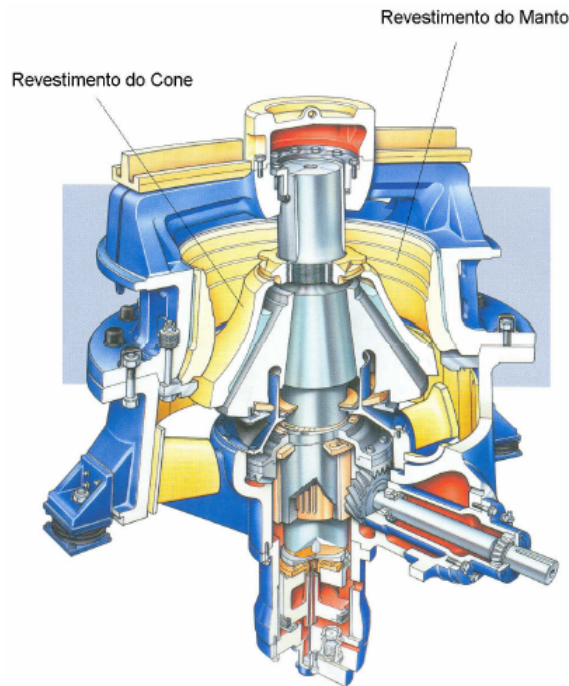


Figura 2.3: Corte de um Britador Cônico

Os alimentadores (Figura 2.4) são máquinas indicadas para atender às necessidades de alimentação, retomada e dosagem em circuitos de cominuição e classificação. Sua aplicabilidade vai desde a alimentação de britadores, retomada de materiais sob silos e pilhas, alimentação de moinhos, entre outras. A alimentação dos britadores é feita por meio de alimentadores de correia dotados de inversores de frequência, a fim de variar a velocidade dos mesmos. Os alimentadores devem variar a velocidade de acordo com a alimentação desejada. Nos britadores cônicos, por exemplo, a velocidade do alimentador deve variar de acordo com o nível da câmara de britagem, a fim de mantê-la sempre cheia e garantir uma operação otimizada.

Um equipamento bastante importante no processo de britagem e na classificação de minérios são as peneiras. Elas são responsáveis por fazer a segmentação do material, separando o material grosso do fino e destinando aos britadores somente aquele que necessita ser fragmentado. O material retido na tela da peneira é denominado *oversize*, e o passante, *undersize*. As peneiras vibratórias, ilustradas na Figura 2.5 são as mais importantes para aplicações em tratamento de minérios. Sua principal aplicação é em circuitos de britagem, onde a vibração é utilizada a fim de aumentar a sua eficiência, uma vez que o entupimento é reduzido e a segregação do material alimentado é induzido.

Outro equipamento de fundamental importância no processo de britagem e na mi-



Figura 2.4: Alimentador de Correia da Usina de Conceição II



Figura 2.5: Peneira Vibratória

neração é o transportador de correia (Figura 2.6). Ele é um tipo de equipamento que tem como objetivo a transferência de material continuamente. A correia trabalha sob o efeito da força de atrito. O transportador de correia é composto por uma estrutura avançada e simples, de fácil manutenção. Sua capacidade de transferência é alta e a distância pode ser longa. Cada vez mais, novos equipamentos, mais modernos e sofisticados, são introduzidos no mercado, e a escolha do melhor equipamento depende de muitas variáveis, como o custo de aquisição e custo operacional, o produto a ser manuseado, a necessidade ou não de mão de obra especializada, espaço disponível, entre outros.

Os *tripper cars* também são equipamentos frequentemente encontrados em usinas de processamento mineral. Seu papel é distribuir minério vindo de fases passadas do processo em um silo com vários funis. Eles são constituídos por uma estrutura metálica móvel que



Figura 2.6: Transportador de Correia

suporta fisicamente um ponto de descarga de uma correia transportadora. O carro é dirigido por rodas de aço localizadas sob sua estrutura. Trilhos metálicos apoiam e guiam o *tripper* longitudinalmente ao longo do silo, permitindo que o minério transportado seja distribuído entre todas as subdivisões (CALDAS e MARTINS, 2018). Um exemplo de *tripper* pode ser visto na Figura 2.7.



Figura 2.7: Tripper

O posicionamento dos *trippers* sobre os silos é um problema de escalonamento definido pela determinação de posição do equipamento através das divisões dos silos ao longo do tempo.

2.2 Circuito de Britagem da Usina de Conceição II

A britagem da usina de Conceição II recebe o minério extraído da mina (ROM - *Run of Mine*) com um *top size* de 1000mm, que por meio de um processo de fragmentação e classificação se deseja obter ao final desta etapa do processo um minério com tamanho inferior a 12mm, o qual será enviado à operação de moagem. A Figura 2.8 mostra um fluxograma simplificado do processo da usina de Conceição II.

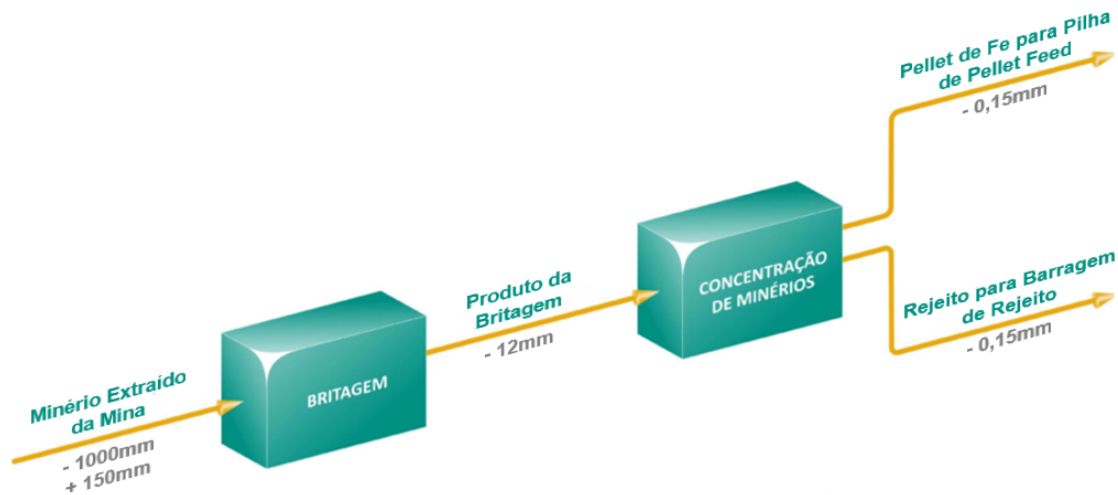


Figura 2.8: Fluxograma Simplificado da Usina de CE II

A operação de britagem da usina de Conceição II é dividida nas seguintes áreas:

- Área de Britagem Primária;
- Área de Pilha Pulmão;
- Área de Britagem Secundária;
- Área de Britagem Terciária e Quaternária;
- Área de Peneiramento;
- Área de Pátio da Moagem.

A Figura 2.9 ilustra o circuito de britagem a partir da pilha pulmão. A britagem é formada por 15 britadores do tipo cônico, 33 alimentadores e 15 peneiras.

2.2.1 Rotas e Áreas do Processo

A Figura 2.10 apresenta um fluxograma com todas as áreas que envolvem o processo de britagem da usina de Conceição II, com os respectivos fluxos de processo.

O minério extraído da mina é transportado por caminhões e descarregado no britador primário. O britador giratório primário (BR-1210CN-01, de 60" x 89", da *Citic*), reduz o

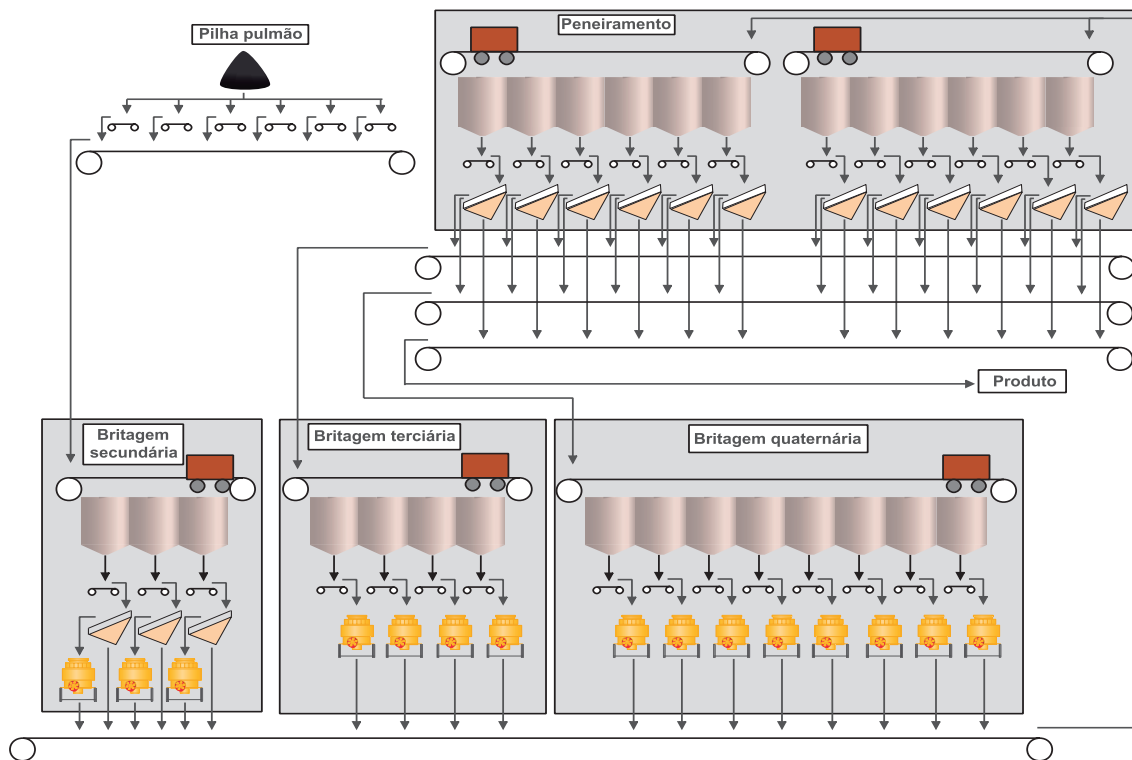


Figura 2.9: Circuito de Britagem da Usina de Conceição II

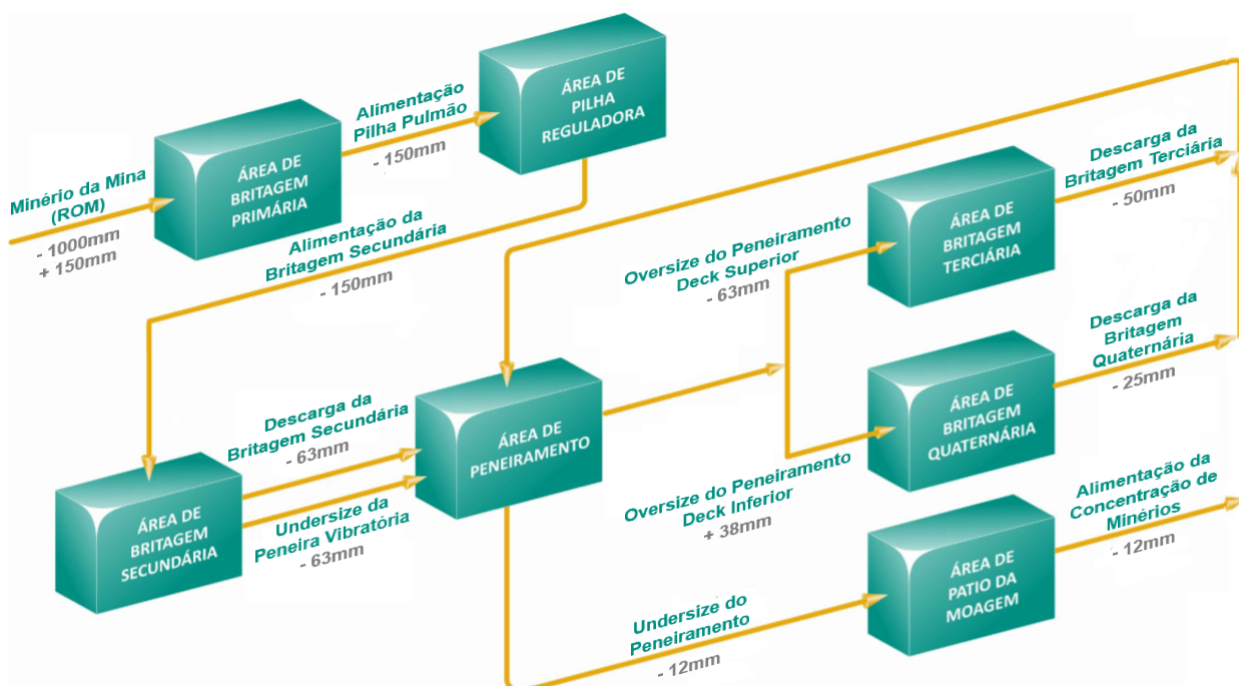


Figura 2.10: Fluxograma Resumido da Britagem da Usina de CE II

minério em blocos de tamanhos de até 1000mm para um tamanho de no máximo 150mm . O produto da britagem primária é transportado mediante transportadores até a pilha pulmão.

A pilha pulmão tem um volume total de 56.000m^3 , o qual permite que as áreas da bri-

tagem secundária, britagem terciária e britagem quaternária continuem operando mesmo com o britador primário parado. Os alimentadores vibratórios (BR-1220CN-01 ao 06, de 84" x 96" e de 1020t/h de capacidade cada) localizados embaixo da pilha pulmão extraem o minério e o levam para o transportador de correia (TR-1220CN-01) para transferi-lo à área de britagem secundária.

Existem três "linhas" dentro da área de britagem secundária que operam independentemente uma da outra, embora compartilhem um mesmo transportador de correia comum (TR-1250CN-01) para os produtos das três linhas. Cada linha possui uma divisão do silo de alimentação (SI-1230CN-01 de 560m³ de volume útil), um alimentador de correia (AL-1230CN-01 a 03), uma peneira vibratória inclinada (PN-1230CN-01 a 03, de 10" x 24", 1 deck) e um britador cônico padrão (BR-1230CN-01 a 03, de 94" x 87", modelo CS 440, da *Sandvik*). O alimentador de correia extrai o minério da divisão do silo correspondente a uma velocidade controlada para manter uma carga estável no britador, entretanto o alimentador descarrega o material na peneira antes do mesmo ser britado e a quantidade de material que chega ao britador pode variar. O *oversize* da peneira (+63mm), alimenta o britador enquanto que o *undersize* (-63mm) é transportado juntamente com o produto do britador secundário para o silo de alimentação da área de peneiramento.

De modo semelhante à área da britagem secundária, a área de britagem terciária e quaternária têm quatro "linhas" para a britagem terciária e oito "linhas" para a britagem quaternária, as quais funcionam independentemente uma da outra, embora compartilhem um transportador de correia (TR-1250CN-01) comum para os produtos. Cada uma das linhas possui uma divisão do silo para cada linha (SI-1240CN-01 de 160m³ de volume útil e SI-1240CN-02 270m³ de volume útil), um alimentador de correia para cada linha (AL-1240CN-01 a 04 e AL-1240CN-05 a 12) e um britador cônico padrão (BR-1240CN-01 a 04 de 212.6"C x 126"L x 209"A, da *Sandvik*) no caso das terciárias, e de cabeça curta (BR-1240CN-05 a 12 de 3780mmC x 2984mmL x 2510mmA, da *Metso*) nas quaternárias. O produto do britador terciário (-50mm) e quaternário (-25mm) é transferido ao silo de alimentação da área de peneiramento (SI-1250CN-01/02, de 760m³ de volume útil).

Existem doze "linhas" dentro da área de peneiramento as quais operam independentemente uma da outra. Cada linha possui uma divisão do silo, um alimentador de correia (AL-1250CN-01 a 12) e uma peneira vibratória inclinada (PN-1250CN-01 a 12 de dois decks, modelo MSH de 10" x 24", da *Metso*). O *oversize* do deck superior (+50mm) é enviado à britagem terciária e o *oversize* do deck inferior (+38mm) é enviado à britagem quaternária, enquanto que o *undersize* (-12mm) é enviado à área do pátio da moagem.

O minério é transportado mediante correias (TR-1260CN-01 a 03) até uma empilhadeira (EP-1260CN-01) que transfere o minério à pilha de homogeneização, a qual tem um volume total de 31.400m³. Esta pilha proporciona uma etapa de compensação entre as operações de britagem e moagem por meio de um desviador de fluxo.

Os alimentadores vibratórios (AL-1260CN-01 a 08) localizados embaixo da pilha de ho-

mogeneização extraem o minério e o conduz em transportadores de correia (TR-1260CN-04 e 05) para transferi-lo à operação de moagem.

2.2.1.1 Britagem Primária

A área de britagem primária faz a operação de cominuição, onde se liberam as espécies disseminadas, facilita-se a manipulação dos sólidos e se obtém um material de tamanho apropriado e controlado para seu tratamento nas seguintes etapas do processo.

A área de britagem primária se divide em três sistemas de operação:

- Sistema de Descarga e Recepção do Minério;
- Sistema de Britagem Primária;
- Sistema de Armazenamento e Transporte de Minério.

A Figura 2.10 mostra o diagrama de fluxo da britagem primária com os seus respectivos equipamentos.

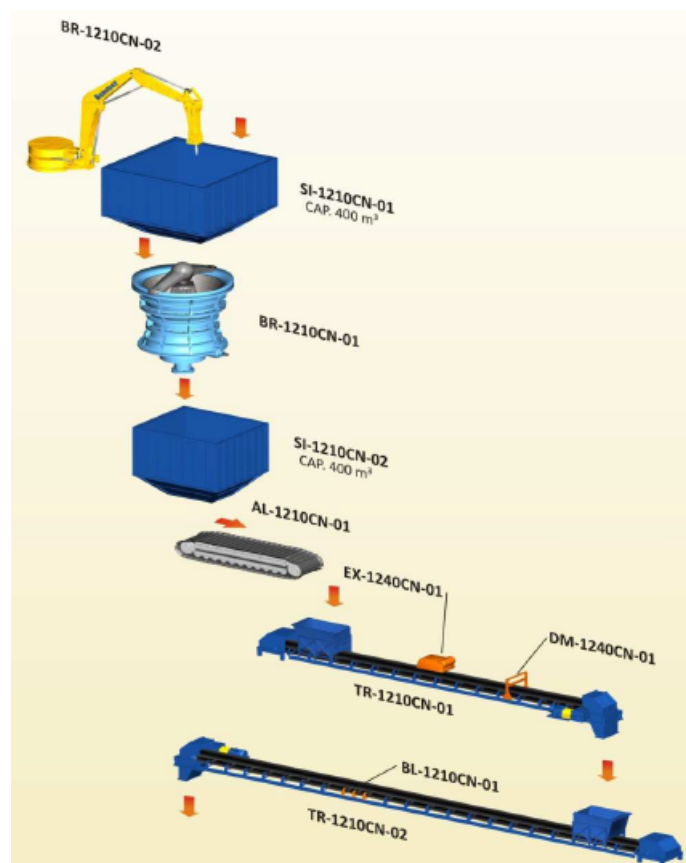


Figura 2.11: Diagrama de Fluxo da Área da Britagem Primária

2.2.1.1.1 Sistema de Descarga e Recepção do Minério

O minério extraído da mina com um tamanho de rocha médio de $0,5 - 1m$ é transportado para a área da britagem primária por meio de caminhões de $240t$ de capacidade em sua grande maioria, os quais descarregam diretamente no silo (SI-1210CN-01) que tem um volume útil de $400m^3$.

Este silo está desenhado para receber minério dos caminhões de ambos os lados. Neste silo se tem instalado um rompedor de matacos (BR-1210CN-02) sobre uma base de concreto, que se encarrega de reduzir os tamanhos das rochas maiores fornecidas para o britador primário.

2.2.1.1.2 Sistema de Britagem Primária

O minério, depois de ser descarregado no silo (SI-1210CN-01), ingressa na alimentação do britador primário (BR-1210CN-01) do tipo giratório modelo $60'' \times 89''$ onde se faz o processo da fragmentação. O britador primário reduz o tamanho do minério até $150mm$ e tem um rendimento operacional médio de 60%.

2.2.1.1.3 Sistema de Armazenamento e Transporte de Minério

O minério triturado é descarregado no silo (SI-1210CN-02). Este silo absorve as variações de fluxo instantâneo do minério triturado, contando com um volume útil de $400m^3$. O minério é extraído do silo por meio de um alimentador de placas (AL-1210CN-01) que transfere sua carga para o transportador de correia (TR-1210CN-01) o qual conta com uma balança integradora (BL-1210CN-01) para o controle da tonelagem, um extrator de sucata autolimpante (EX-1210CN-01) que se encarrega de eliminar a sucata ferromagnética que é encontrada junto com o minério e um detector de metais (DM-1210CN-01) o qual detecta a presença de metais (em casos em que o extrator de sucata não o tenha extraído) e interrompe o funcionamento do transportador. O transportador de correia (TR-1210CN-01) transfere o minério para o transportador de correia (TR-1210CN-02) para logo envia-lo à pilha pulmão (Área de Pilha Pulmão).

2.2.1.2 Pilha Pulmão

A área da pilha pulmão armazena o minério, proporcionando uma estabilidade entre a britagem primária e as operações da britagem secundária, terciária, quaternária, peneiramento e pátio da moagem. Ela se divide em duas etapas:

- Sistema de Armazenamento e Descarga do Minério;
- Sistema de Transporte do Minério.

A Figura 2.12 mostra o diagrama de fluxo da pilha pulmão com os seus respectivos equipamentos.

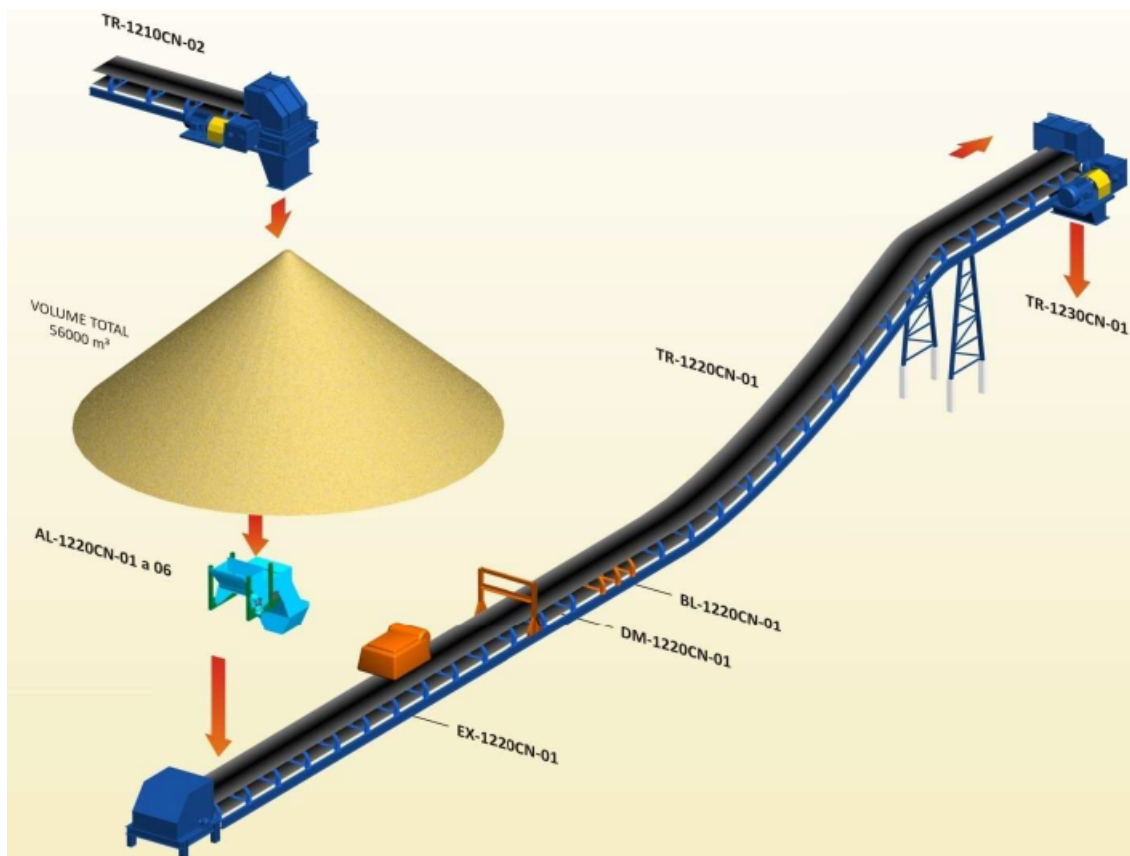


Figura 2.12: Diagrama de Fluxo da Área da Pilha Pulmão

2.2.1.2.1 Sistema de Armazenamento e Descarga do Minério

O minério que provem da área de britagem primária é armazenado na pilha pulmão, a qual permite que as áreas de britagem secundária, terciária e quaternária continuem operando mesmo com o britador primário parado. A pilha tem capacidade de $56.000m^3$, e existem alimentadores vibratórios (AL-1220CN-01 até 06) localizados embaixo dela, que extraem o minério e o levam ao transportador de correia (TR-1220CN-01).

2.2.1.2.2 Sistema de Transporte do Minério

O transportador de correia (TR-1220CN-01) conta com: uma balança integradora (BL-1220CN-01) para o controle de tonelagem, um extrator de sucata autolimpante (EX-1220CN-01) que se encarrega de eliminar os resíduos ferromagnéticos que são encontrados com o minério e um detector de metais (DM-1220CN-01) o qual detecta a presença de metais (em casos em que o extrator de sucata não o tenha removido) e para o transportador. Este transportador transfere o minério à Área de Britagem Secundária.

2.2.1.3 Britagem Secundária

Na área de britagem secundária se realizam as operações de classificação (classificar o minério fino do grosso) e de fragmentação (redução de tamanho do minério), para ob-

ter um material de tamanho apropriado e controlado para seu tratamento na área de peneiramento. A área da britagem secundária se divide em três sistemas de operação:

- Sistema de Descarga e Armazenamento de Minério;
- Sistema de Peneiramento Secundário;
- Sistema de Britagem Secundária.

A Figura 2.13 mostra o diagrama de fluxo da britagem secundária com os seus respectivos equipamentos.

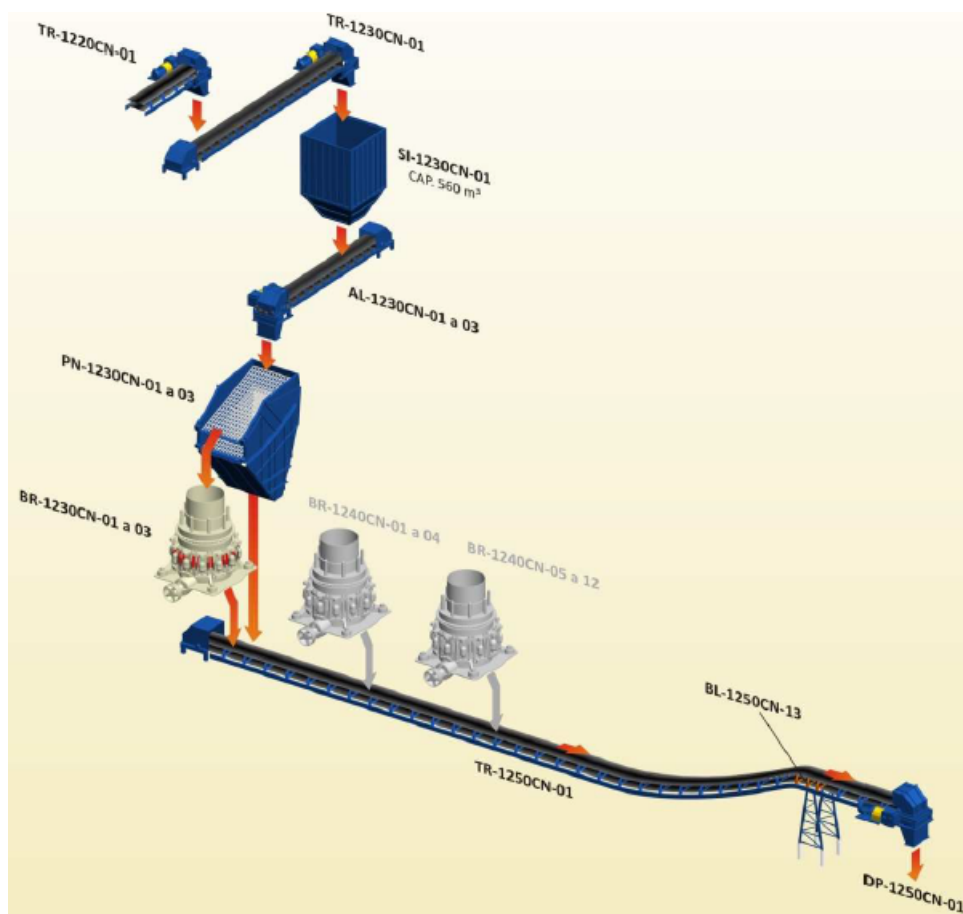


Figura 2.13: Diagrama de Fluxo da Área da Britagem Secundária

2.2.1.3.1 Sistema de Descarrega e Armazenamento de Minério

O minério proveniente do transportador de correia (TR-1220CN-01) da Área de Pilha Pulmão é transferido ao transportador de correia móvel (TR-1230CN-01) para enviá-lo ao silo de regularização do peneiramento secundário (SI-1230CN-01) o qual tem um volume útil de $560m^3$ e conta com três divisões. O tempo de residência do minério no silo é de 15 minutos.

2.2.1.3.2 Sistema de Peneiramento Secundário

De cada uma das divisões do silo de regularização se extrai minério mediante alimentadores de correia (AL-1230CN-01 até 03) a uma velocidade controlada para manter uma carga estável nos britadores, embora os alimentadores descarreguem nas peneiras vibratórias de tipo banana (PN-1230CN-01 até 03) modelo BS 10' x 24' de um *deck*, das quais dois estão operando e uma está em reserva.

O *oversize* do peneiramento secundário (+63mm) alimenta aos britadores cônicos (BR-1230CN-01 até 03) e o *undersize* do peneiramento secundário (-63mm) é enviado ao transportador de correia (TR-1250CN-01) alimentando à área de peneiramento.

2.2.1.3.3 Sistema de Britagem Secundária

O minério proveniente do *oversize* do peneiramento secundário alimenta os britadores cônicos (BR-1230CN-01 até 03) modelo CS 440, onde se tem a operação de fragmentação. O britador secundário reduz o minério para um tamanho de partícula de -63mm e tem um rendimento operacional de 75%. O minério triturado é enviado ao transportador de correia (TR-1250CN-01) da área de peneiramento, junto com o *undersize* do peneiramento secundário.

2.2.1.4 Britagem Terciária e Quaternária

A área de britagem terciária e quaternária realiza o processo de fragmentação (redução do tamanho do minério), onde se libera as espécies disseminadas, facilita-se a gestão dos sólidos e se obtém um material de tamanho apropriado e controlado para seu tratamento nas etapas seguintes do processo. Ela se divide em dois sistemas de operação:

- Sistema de Britagem Terciária;
- Sistema de Britagem Quaternária.

A Figura 2.14 mostra o diagrama de fluxo da britagem terciária e quaternária com os seus respectivos equipamentos.

2.2.1.4.1 Sistema de Britagem Terciária

O transportador de correia (TR-1240CN-01) recebe o *oversize* do *deck* superior (primeiro *deck*) das peneiras vibratórias da Área de Peneiramento (+50mm), o qual conta com uma balança integradora (BL-1240CN-01) para o controle de tonelagem, um extrator de sucata (EX-1240CN-01) o qual se encarrega de eliminar os resíduos ferromagnéticos que são encontrados junto com o minério e um detector de metais (DM-1240CN-01) o qual detecta a presença de metais (em casos que extrator de sucata não o tenha removido) e para o transportador.

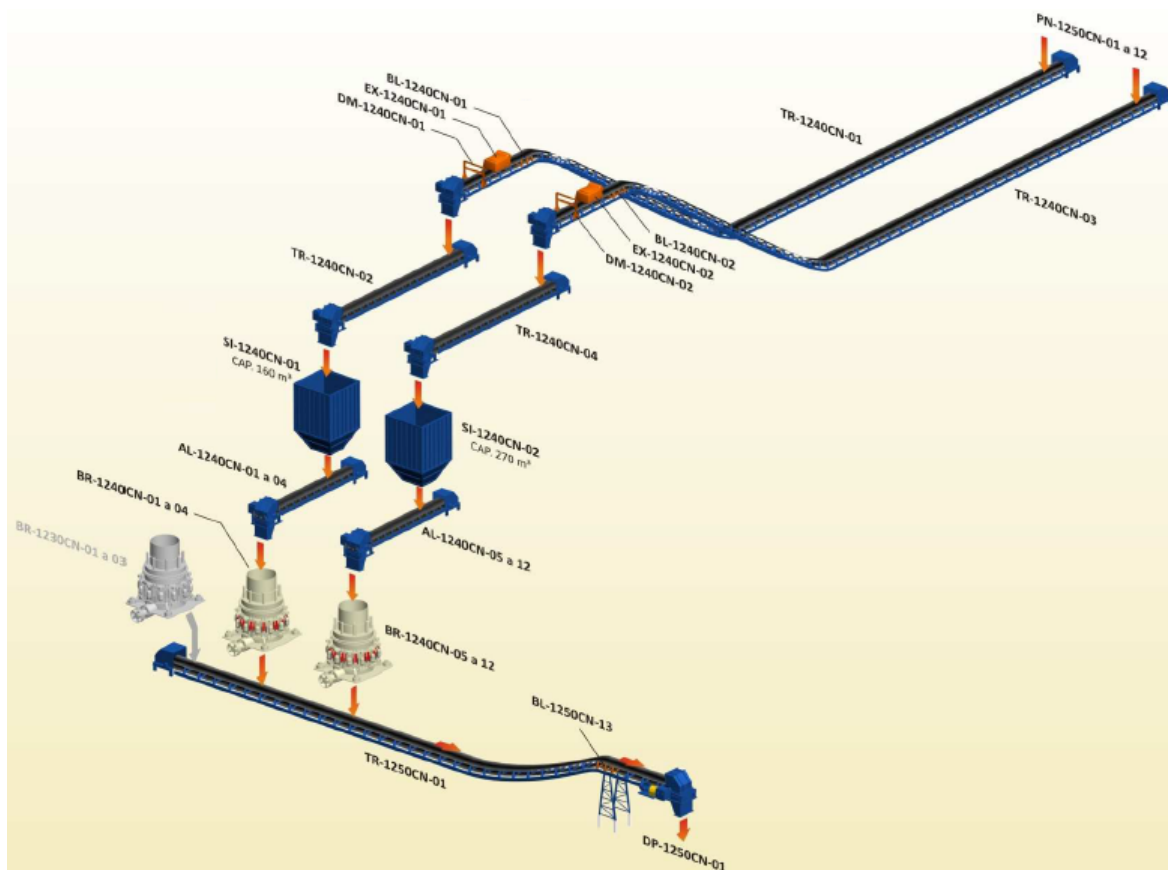


Figura 2.14: Diagrama de Fluxo da Área da Britagem Terciária e Quaternária

O transportador de correia (TR-1240CN-01) transfere o minério ao transportador de correia móvel (TR-1240CN-02) para enviá-lo ao silo (SI-1240CN-01), o qual tem um volume útil de $160m^3$ e quatro divisões. O tempo de residência do minério no silo é de 15 minutos.

De cada uma das divisões do silo (SI-1240CN-01) se extrai o minério mediante os alimentadores de correia (AL-1240CN-01 até 04) numa velocidade controlada para manter uma alimentação estável para os britadores cônicos (BR-1240CN-01 até 04), modelo CS 660, onde se realiza a operação de fragmentação. O britador terciário reduz o minério para um tamanho de partícula de $-50mm$ e tem um rendimento operacional de 75%. O minério triturado é enviado ao transportador de correia (TR-1250CN-01) da área de peneiramento.

2.2.1.4.2 Sistema de Britagem Quaternária

O transportador de correia (TR-1240CN-03) recebe o *oversize* do *deck* inferior (segundo *deck*) das peneiras vibratórias da área de peneiramento ($+38mm$), o qual conta com uma balança integradora (BL-1240CN-02) para o controle da tonelagem, um extrator de sucata (EX-1240CN-02) que se encarrega de eliminar os resíduos ferromagnéticos que são encontrados junto com o minério e um detector de metais (DM-1240CN-02) que detecta

a presença de metais (em casos que extrator de sucata não o tenha removido) e parar o transportador.

O transportador de correia (TR-1240CN-03) transfere o minério ao transportador de correia móvel (TR-1240CN-04) para enviá-lo ao silo (SI-1240CN-02), o qual tem um volume útil de $270m^3$ e oito divisões. O tempo de residência do minério no silo é de 15 minutos. De cada divisão do silo (SI-1240CN-02) se extrai o minério mediante os alimentadores de correia (AL-1240CN-05 até 12) a uma velocidade controlada para manter uma alimentação estável nos britadores cônicos (BR-1240CN-05 até 12), modelo HP 400, onde se realiza a operação de fragmentação. O britador quaternário reduz o minério para um tamanho de partícula de $-25mm$ e tem um rendimento operacional de 75%. O minério triturado é enviado ao transportador de correia (TR-1250CN-01) da área de peneiramento.

2.2.1.5 Peneiramento

A área de peneiramento realiza a operação de classificação (classificar o minério fino do grosso). Ela se divide em dois sistemas de operação:

- Sistema de Transporte e Armazenamento de Minério;
- Sistema de Peneiramento Terciário e Quaternário.

A Figura 2.15 mostra o diagrama de fluxo do peneiramento com os seus respectivos equipamentos.

2.2.1.5.1 Sistema de Transporte e Armazenamento de Minério

O transportador de correia (TR-1250CN-01) recolhe os seguintes fluxos de mineral:

- *Undersize* das peneiras vibratórias secundárias (PN-1230CN-01 até 03);
- Descarga dos britadores cônicos secundários (BR-1230CN-01 até 03);
- Descarga dos britadores cônicos terciários (BR-1240CN-01 até 04);
- Descarga dos britadores cônicos quaternários (BR-1240CN-05 até 12).

Estes fluxos formam a alimentação total do peneiramento. No transportador de correia (TR-1250CN-01) se tem uma balança (BL-1250CN-13) para o controle da tonelagem. Este transportador de correia transfere sua carga para um desviador de fluxo (DP-1250CN-01) o qual divide o fluxo de minério em dois.

Estes fluxos são enviados aos transportadores de correia móveis (TR-1250CN-02/03) respectivamente, para logo ser transferidos aos silos (SI-1250CN-01/ 02) os quais tem um volume útil de $760m^3$ e contam com seis divisões cada um. O tempo de residência do minério no silo de 15 minutos.

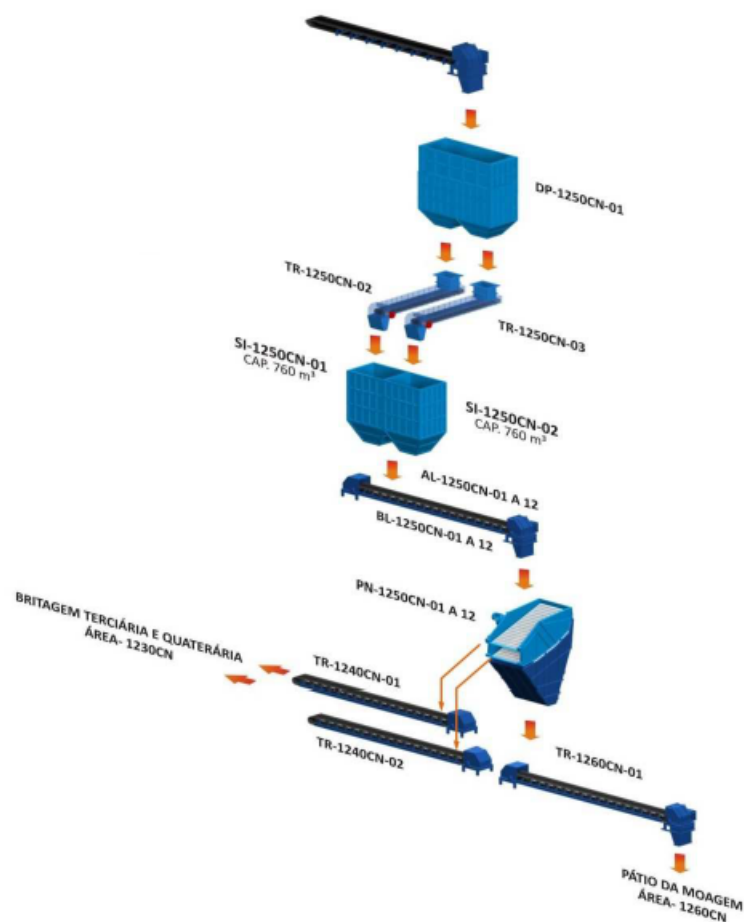


Figura 2.15: Diagrama de Fluxo da Área de Peneiramento

2.2.1.5.2 Sistema de Peneiramento Terciário e Quaternário

De cada uma das divisões dos silos se extrai o minério mediante os alimentadores de correia (AL-1250CN-01 até 12). Os alimentadores de correia transferem o minério às peneiras vibratórias inclinadas (PN-1250CN-01 até 12) de dois decks, com movimento circular e monobloco, modelo MSH 10' x 24', onde se realiza processo de classificação. O *oversize* do *deck* superior (primeiro *deck*) das peneiras vibratórias (+50mm) é enviado ao sistema da britagem terciária e o *oversize* do *deck* inferior (segundo *deck*) das peneiras vibratórias (+38mm) é enviado ao Sistema de Britagem Quaternária, enquanto que o *undersize* do peneiramento terciário e quaternário (-12mm) é enviado à área de pátio da moagem.

2.2.1.6 Pátio da Moagem

Na área de pátio, após o peneiramento, armazena-se o minério, proporcionando-se uma estabilidade entre a britagem e a moagem. Esta área se divide em três sistemas de operação:

- Sistema de Alimentação Direta de Minérios;
- Sistema de Empilhamento de Minérios;

- Sistema de Retomada de Minérios.

Na Figura 2.16 mostra-se o diagrama de fluxo do pátio da moagem com os seus respectivos equipamentos.

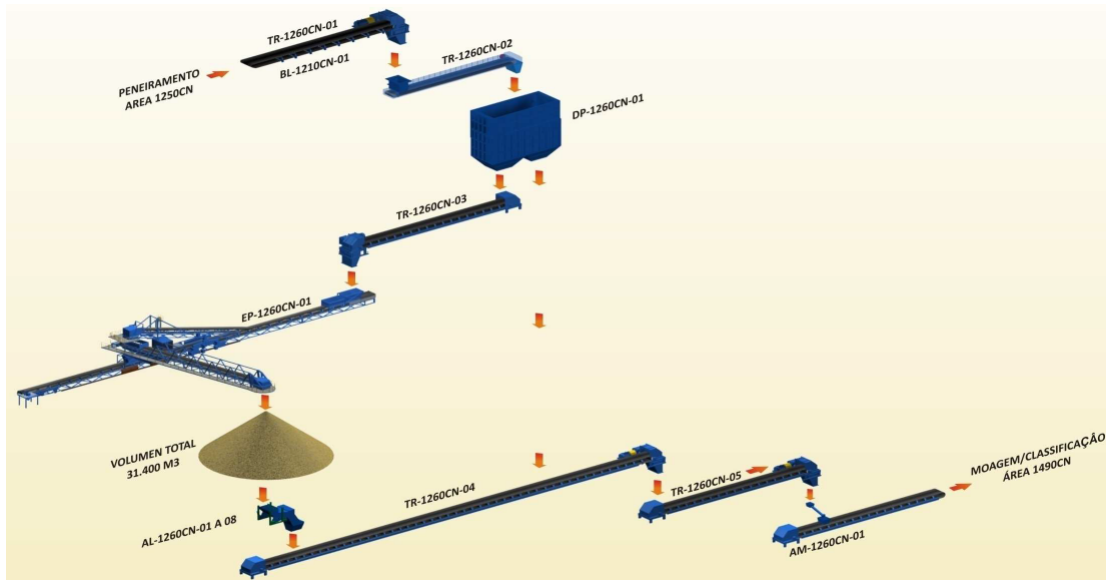


Figura 2.16: Diagrama de Fluxo da Área de Pátio da Moagem

2.2.1.6.1 Sistema de Alimentação Direta de Minérios

O *undersize* do peneiramento terciário e quaternário ($-16mm$) é enviado ao transportador de correia (TR-1260CN-01), que conta com uma balança integradora (BL-1260CN-01) para o controle de tonelagem.

Este transportador de correia transfere o minério ao transportador de correia (TR-1260CN-02), para posteriormente enviá-lo ao desviador de fluxo (DP-1260CN-01) onde é dividido em dois. O primeiro fluxo é enviado ao transportador de correia (TR-1260CN-03), enquanto que o segundo é enviado diretamente ao transportador de correia (TR-1260CN-05), que transfere sua carga até a área da Moagem/Classificação.

2.2.1.6.2 Sistema de Empilhamento de Minérios

O transportador de correia (TR-1260CN-03) transfere o mineiro à empilhadeira móvel de lança simples não basculável (EP-1260CN-01) onde o mineiro é empilhado na pilha de homogeneização, de $31.400m^3$ de capacidade, que proporciona uma etapa de estabilidade entre a britagem e a moagem.

2.2.1.6.3 Sistema de Retomada de Minérios

Os alimentadores vibratórios (AL-1260CN-01 a 08) localizados abaixo da pilha de homogeneização extraem o minério e o levam ao transportador de correia (TR-1260CN-04),

para transferi-lo ao transportador de correia (TR-1260CN-05), o qual conta com uma balança integradora (BL-1260CN-02), para o controle da tonelagem.

2.2.2 Cenários

Atualmente existe um controle regulatório consolidado na área de britagem, com várias estratégias de controle avançado implementadas, na maioria controle do tipo *override*, além de um controle especialista *Fuzzy* para definição dos melhores *setpoints* das malhas de controle de alimentação da britagem secundária, alimentação do peneiramento e alimentação do pátio da moagem. O controle *override*, também conhecido como controle seletivo, é um tipo de estratégia que opera basicamente em função de seletores de sinal (alto ou baixo). No caso de um seletor de sinal baixo ele recebe, na sua entrada, diversos sinais e fornece como saída o menor deles. O contrário vale para o caso de um seletor de sinal alto. Esta estratégia também é conhecida como controle com restrições, pois, normalmente ela é aplicada quando a variável de processo (PV) apresenta restrições de máximo ou mínimo. Outra aplicação para o controle *override* é quando o número de variáveis de processo excede o número de variáveis manipuladas (MV). Desse modo deve-se selecionar qual PV terá prioridade para executar o controle.

O controle *Fuzzy* por sua vez observa as variáveis de processo e realiza o processo chamado de fuzzificação, que é a conversão dos valores mensurados da planta em variáveis compatíveis para a realização da lógica *Fuzzy*, por meio de funções de pertinência. A função de pertinência retornará o grau de pertinência da proposição, e este valor deve estar necessariamente limitado entre 0 a 1. Na sequência, é realizado o processo de inferência, no qual são estabelecidas regras para cada variável, gerando-se a ação de controle no domínio *Fuzzy*. Os dados são tratados de forma lógica utilizando-se portas AND e OR. Por fim, é realizada a defuzzificação, onde as ações de controle geradas no domínio *Fuzzy* são transformadas em valores aplicáveis ao controle, gerando-se as ações de controle.

2.2.2.1 Estratégias de Controle Existentes

Na britagem primária existe um controle para coordenar os caminhões na descarga do minério no silo de alimentação da britagem. São observadas as seguintes condições para liberação da descarga dos caminhões:

- Nível do silo SI-1210CN-01 menor que 75%;
- Corrente do britador BR-1210CN-01 menor que 70%;
- Nível não alto no silo SI-1210CN-02;
- Alimentador de placas e britador funcionando.

Depois de satisfeitas as condições acima, os dois semáforos permanecem vermelhos aguardando o posicionamento dos caminhões. Os sensores de presença de caminhões orientam qual caminhão se posicionou primeiro, mantendo vermelho o semáforo do lado onde o caminhão chegou por último e mantendo verde o semáforo do lado onde o caminhão chegou primeiro.

Assim, o lado liberado tem permissão para basculamento e após o tê-lo feito, sai da posição de basculamento para dar permissão ao próximo caminhão, desativar o sensor de presença informando ao sistema de controle que já finalizou o basculamento. O sistema de controle aguardará até que as condições de liberação tornem a ficar satisfeitas dando sequência na operação.

Na britagem primária existe também um controle de vazão mássica que irá alimentar a pilha pulmão. Em modo manual, o operador da sala de controle central poderá ajustar, mediante a tela de operação, a taxa desejada, variando manualmente a velocidade do alimentador de placas. Em modo automático, o controle de taxa é feito pelo sistema de controle, em função do valor de *setpoint* desejado de taxa no transportador TR-1210CN-02, ajustado pelo operador, atuando no controle de velocidade do alimentador AL-1210CN-01.

Na área de britagem secundária existe uma malha de controle de vazão mássica no transportador (TR-1220CN-01) que irá alimentar o silo de alimentação da britagem secundária (SI-1230CN-01), variando-se a velocidade dos alimentadores que ficam abaixo da pilha pulmão e respeitando-se o nível médio do silo. O enchimento dos compartimentos do silo é realizado por uma lógica que varia o posicionamento do *tripper*, espécie de transportador de correia que se movimenta sobre trilhos logo acima dos silos observando-se o nível médio, de modo a realizar uma distribuição uniforme do material.

Existem seis alimentadores abaixo da pilha pulmão e o operador da sala de controle deve definir quais alimentadores serão liberados para que a malha de controle atue sobre eles e quais terão suas velocidades fixadas. Este é um problema real, visto que muitas vezes os operadores fixam a velocidade de todos alimentadores e a malha de controle fica sem ação.

Os britadores da britagem secundária não trabalham com câmara cheia, sendo assim não existe malha para controle de nível. Desse modo a velocidade dos alimentadores (AL-1230CN-01 a 03) que alimentam os britadores é variada de acordo com a taxa desejada na TR-1250CN-01.

Nas áreas de britagem terciária e quaternária existem controles de níveis individuais das câmaras de britagem em função da variação de velocidade dos alimentadores. Os britadores da britagem terciária possuem um automatismo que possibilita controlar a abertura e fechamento da câmara. Desse modo, tem-se implementado um controle *on-off* em função do ligamento e desligamento das bombas de óleo. Estas bombas possuem opção de reversão e, desse modo, busca-se adequar a abertura da câmara em função do sentido

de rotação da bomba. Já os britadores quaternários não possuem esse automatismo.

Assim como na britagem secundária, o enchimento dos compartimentos dos silos, tanto da britagem terciária, quanto da quaternária, é realizado por uma lógica que varia o posicionamento dos *trippers* que estão posicionados acima dos respectivos silos observando-se o nível médio de cada silo.

Na área de peneiramento existe um controle de vazão mássica no transportador TR-1260CN-01, que irá alimentar o pátio ou a moagem diretamente, em função da velocidade dos alimentadores que alimentam cada uma das peneiras (AL-1250CN-01 a 12). Aliado a esta malha tem-se implementado um controle *override* das taxas dos transportadores TR-1240CN-01 e TR-1240CN-03, que irão alimentar a britagem terciária e quaternária, respectivamente.

Também existe implementado um controle *override* individualmente para cada alimentador, em função do nível do seu respectivo silo de alimentação. Os alimentadores possuem uma velocidade mínima definida em 30% e a velocidade máxima varia entre 40 e 55%, sendo que este valor máximo é definido pelo operador individualmente para cada alimentador.

Um outro controle *override* que também está implementado é com relação ao nível médio dos silos que alimentam a britagem terciária, que também restringe a velocidade dos alimentadores do peneiramento.

Uma estratégia de controle especialista *Fuzzy* é empregada com três controladores que interagem entre si, os quais possuem como variável manipulada os *setpoints* de taxa da TR-1220CN-01, TR-1220CN-01 e TR-1260CN-01 (alimentação da britagem secundária, peneiramento e pátio da moagem, respectivamente). O controle tem como objetivo garantir a distribuição de massa entre os circuitos de forma a otimizar a capacidade e produtividade da britagem observando o comportamento das variáveis de processo e quantidade de equipamento operando. O primeiro controlador responsável por definir o *setpoint* de alimentação da britagem secundária tem como variáveis de observação o nível médio silos da britagem secundária (SI-1230CN-01 a 03), o número de alimentadores operando na britagem secundária (AL-1230CN-01 a 03) e o número de alimentadores operando na pilha pulmão (AL-1220CN-01 a 06). A ação deste controlador é executada a cada 1 minuto. O segundo controlador é executado a cada 5 minutos e atua no *setpoint* de alimentação do circuito de peneiramento e tem como variáveis de observação o nível médio dos silos do peneiramento SI-1250CN-01 a 12 e o número de alimentadores operando na britagem secundária (AL-1230CN-01 a 03). Já o terceiro controlador é responsável por definir o *setpoint* de alimentação do pátio da moagem, tendo como variáveis de observação o nível médio dos silos do peneiramento SI-1250CN-01 a 12, o percentual de carga circulante e a velocidade máxima do sistema de controle do peneiramento. Este controlador é executado de 10 em 10 minutos.

2.2.2.2 Problemas Existentes

Existem algumas dificuldades que reduzem o desempenho das estratégias de controle existentes, das quais podemos citar:

- Interferência operacional em escolher quais e quantos alimentadores serão utilizados para realizar o controle da malha que irá alimentar a britagem secundária;
- Paradas intermitentes de britadores em virtude da falta de minério nos silos;
- Definição de quais britadores serão utilizados nas britagens secundária, terciária e quaternária, visto que nem sempre todos os britadores são necessários para atender a demanda e eles possuem desempenhos próximos;
- Escolha de quais linhas do peneiramento devem operar, uma vez que não é necessário o funcionamento de todas as linhas simultaneamente e as linhas possuem desempenhos diferentes;
- Definição do melhor *setpoint* para as malhas de controle, a fim de atingir a melhor performance possível;
- Alteração na granulometria do material impactando nas frações de minério que irão para cada circuito.

Diante de todas essas dificuldades apresentadas, espera-se que um otimizador em tempo real possa ser capaz de interferir positivamente e possa auxiliar na definição do melhor ponto de operação do processo.

2.3 Conclusão

Neste capítulo pode-se compreender como funcionam os circuitos de britagem em geral, com seus principais equipamentos e características. O circuito de britagem da usina de Conceição II, objeto de estudo deste trabalho, foi apresentado de maneira detalhada. Foram apresentadas as estratégias de controle existentes no processo e quais são os problemas existentes. Ficou evidenciada a complexidade do circuito de britagem e seus desafios, dada a quantidade e tipos de equipamentos e possibilidades existentes.

Capítulo 3

Simulador

Neste capítulo faz-se uma apresentação do simulador desenvolvido, detalham-se os modelos utilizados e a validação individual dos modelos para cada tipo de equipamento. Além disso é apresentado um balanço de massa do processo, comparando os dados dos modelos com dados de projeto.

3.1 Desenvolvimento do Simulador

Inicialmente desenvolveu-se um simulador dinâmico utilizando modelos do processo de britagem da usina de Conceição II por meio da utilização de modelos existentes no *software* IDEAS da *ANDRITZ Automation Solutions*. Desse modo possibilitou-se simular e entender melhor o processo de britagem. A Figura 3.1 ilustra um trecho do modelo (britagem secundária) que foi desenvolvido no simulador. Nela estão representadas as três linhas existentes no circuito de britagem secundária.

Realizaram-se diversos testes e programações para que o modelo pudesse apresentar um resultado coerente com o esperado. Muitas foram as dificuldades na implementação do modelo, dentre as quais pode-se destacar:

- Grande número de equipamentos a serem modelados;
- Complexidade do processo e, conseqüentemente, do modelo;
- Grande quantidade de parâmetros a serem configurados;
- Integração com o sistema de controle;
- Implementação de condições específicas para atender aos requisitos do modelo, entre outros.

Inicialmente previu-se a integração do simulador com o sistema de controle existente na planta em ambiente simulado, porém dada a complexidade e dificuldade de integração

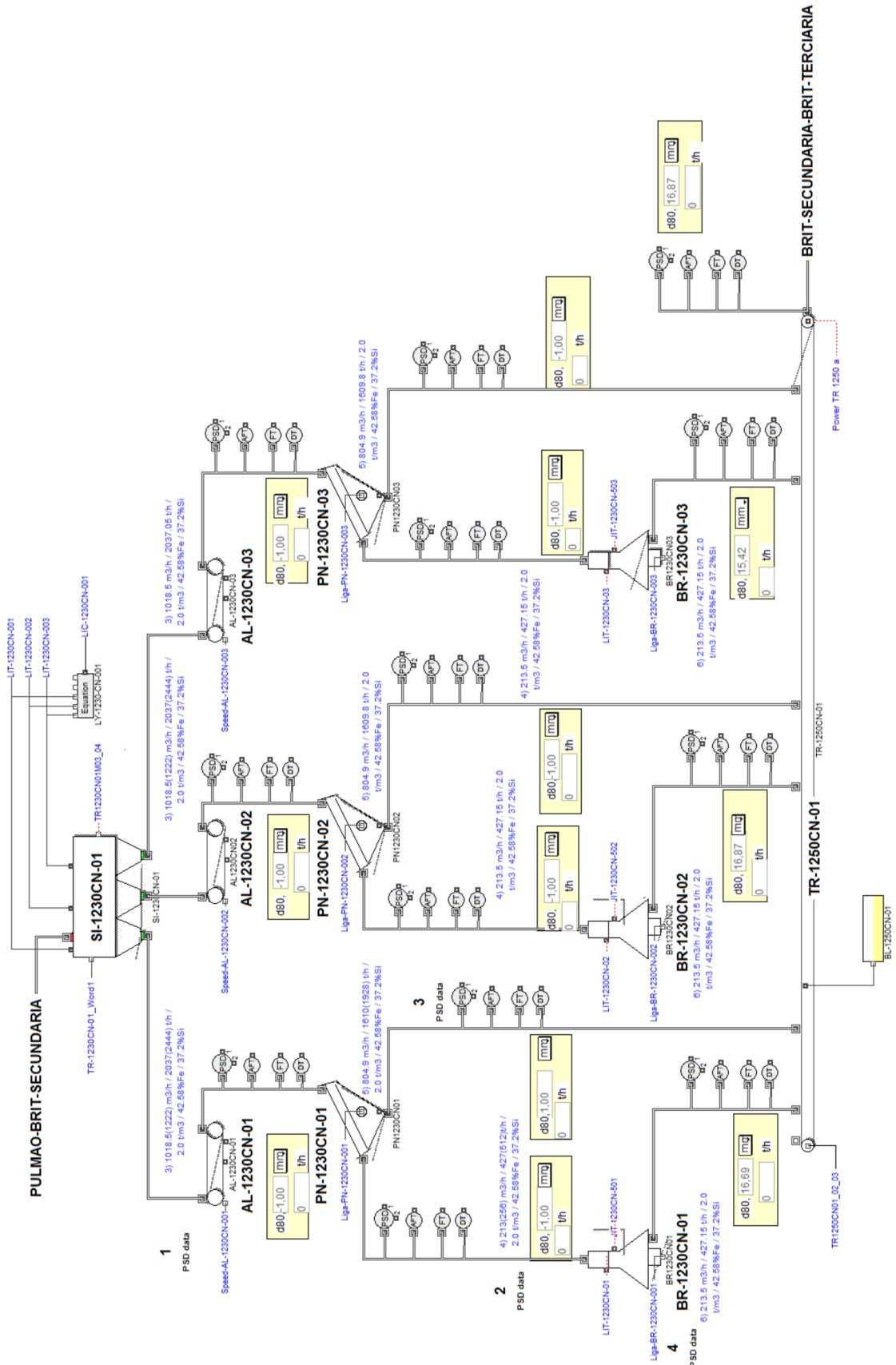


Figura 3.1: Modelo da Britagem Secundária no IDEAS

devido à grande quantidade de variáveis a serem integradas ao simulador (estima-se mais de duas mil variáveis), bem como problemas com licenças de *software* e compatibilidade de versões, esta opção foi abortada. Sendo assim, fez-se necessário criar condições específicas e simplificar algumas outras para que se pudesse ter o modelo compatível com a planta real.

Encontraram-se algumas dificuldades com relação ao algoritmo dinâmico utilizando o *software* IDEAS, principalmente no que se refere ao tempo de execução da simulação. Realizaram-se diversos testes com o modelo dinâmico e na melhor das resoluções foi atingido um tempo de execução de um terço do tempo de execução real da simulação, ou seja, para executar uma hora de simulação real, por exemplo, o simulador gasta em média 20 minutos. Utilizou-se para os experimentos computacionais um computador com *Intel Xeon E5-2670 2, 3GHz* com 16Gb de RAM e sistema operacional *Windows Server 2012*. Como o algoritmo de otimização executa diversas vezes a simulação durante o processo de busca da melhor solução, o tempo de execução do algoritmo tornou-se inviável.

Partiu-se então para a modelagem e desenvolvimento de um simulador utilizando o *software* MATLAB®. Levantaram-se as condições essenciais para a elaboração do modelo e iniciou-se o desenvolvimento. Basicamente, por se tratar de uma modelagem estática onde o comportamento dinâmico dos equipamentos não é levado em conta, necessitou-se modelar os equipamentos peneira e britador. Foram desconsiderados os atrasos referentes ao transporte das correias. Para desenvolvimento do modelo dos britadores e das peneiras utilizaram-se os conceitos apresentados por King (2012) no livro *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*.

3.1.1 Modelagem dos Britadores

A ação de britar de um britador é descrita usualmente através do modelo cíclico de quebra e classificação. O funcionamento de um britador é periódico com cada período consistindo de uma ação de quebra e uma ação de abertura. Durante o período de abertura no ciclo o material se move para baixo no britador e o material se desloca para baixo pela gravidade. Do mesmo modo uma certa quantidade de alimentação é deslocada para dentro do britador. Este comportamento é demonstrado na Figura 3.2.

Esse comportamento pode ser descrito quantitativamente e o modelo que será apresentado na sequência baseia-se em uma distribuição discreta de tamanho, o que faz com que seja bastante útil para cálculos de simulação.

Abaixo são descritos os símbolos que são utilizados no modelo:

p_i^F = fração da alimentação na classe de tamanho i ;

p_i = fração de produto na classe de tamanho i ;

M = massa de material contida no britador;

b_{ij} = fração de partículas quebrando na classe de tamanho j que acabam na classe de

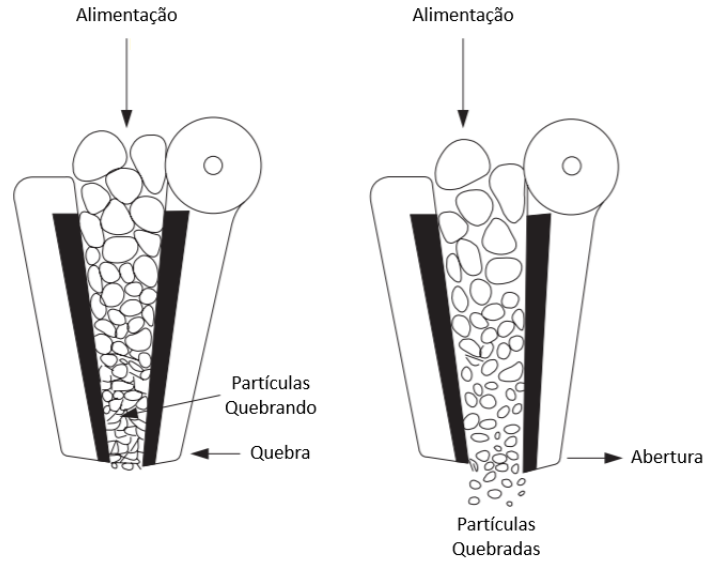


Figura 3.2: Ciclos de Abertura e Quebra no Britador. Adaptado de King (2012)

tamanho i ;

m_i = fração de material no britador na classe de tamanho i de tamanho i ;

$c_i = c(d_i)$ = fração do material na classe de tamanho i que é retido para quebra no próximo ciclo do britador;

W = massa de alimentação total que é aceita durante uma única abertura = massa do produto descarregado.

Conforme mostrado por King (2012) no livro *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*, as Equações (3.1) e (3.2) demonstram como calcular a distribuição granulométrica no produto.

$$\frac{Mm_i}{W} = \frac{1}{1 - c_i b_{ii}} \left(p_i^F + \sum_{j=1}^{i-1} c_j \frac{Mm_j}{W} b_{ij} \right) \quad (3.1)$$

$$p_i = \frac{(1 - c_i) Mm_i}{W} = \frac{1 - c_i}{1 - c_i b_{ii}} \left(p_i^F + \sum_{j=1}^{i-1} c_j \frac{Mm_j}{W} b_{ij} \right) \quad (3.2)$$

A granulometria no produto é completamente calculada através da granulometria na alimentação e o conhecimento das funções de classificação e quebra c_i e b_{ij} . Esse modelo é genérico e pode ser utilizado para qualquer britador, desde que se conheça as funções de classificação e quebra.

A função de classificação é esquematicamente mostrada na Figura 3.3. Os parâmetros d_1 e d_2 são característicos de cada britador. O parâmetro d_1 é o menor tamanho de partícula que pode ser retido na câmara de britagem durante a fase de abertura do ciclo e o parâmetro d_2 é o maior tamanho de partícula que pode passar através da zona de britagem durante a fase de abertura do ciclo.

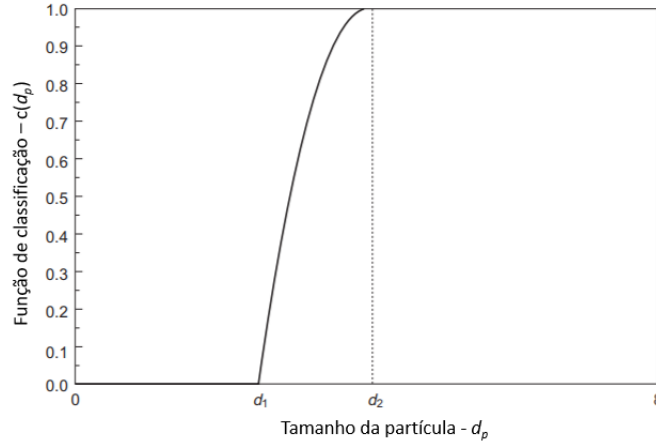


Figura 3.3: Função de Classificação Típica de Um Britador. Adaptado de King (2012)

Uma forma usual de representar a função de classificação é dada por:

$$c_i = 1 - \left(\frac{d_{pi} - d_2}{d_1 - d_2} \right)^n \quad \text{para } d_1 < d_{pi} < d_2 \quad (3.3)$$

$$c_i = 0 \quad \text{para } d_{pi} \leq d_1 \quad (3.4)$$

$$c_i = 1 \quad \text{para } d_{pi} \geq d_2 \quad (3.5)$$

Os parâmetros d_1 e d_2 são relacionados ao CSS (*Closed Side Setting*) ou APF (Abertura de Posição Fechada).

$$d_1 = \alpha_1 CSS \quad (3.6)$$

$$d_2 = \alpha_2 CSS + d^* \quad (3.7)$$

De acordo com King (2012), o valor de α_1 costuma variar entre 0,5 e 0,95, e α_2 entre 1,7 e 3,5. O valor de n , por sua vez, geralmente é configurado como 2, podendo variar entre 1 e 3. Valores altos de n geralmente vão requerer valores elevados de α_2 . O valor de d^* é usualmente zero.

Funções de quebra do tipo:

$$B(x; y) = K \left(\frac{x}{y} \right)^{n_1} + (1 - K) \left(\frac{x}{y} \right)^{n_2} \quad (3.8)$$

são normalmente utilizadas para descrever o comportamento de britadores.

Os valores de b_{ij} são obtidos através da função de quebra acumulativa por:

$$b_{ij} = B(D_{i-1}; d_{pj}) - B(D_i; d_{pj}) \quad (3.9)$$

e

$$b_{jj} = 1 - B(D_i; d_{pj}) \quad (3.10)$$

Os parâmetros da função de classificação e da função de quebra são específicos para cada tipo e tamanho de britador. Ainda não há muitos estudos para estabelecer os seus valores dentro de uma faixa de condições reais de operações usando equações preditivas. Na prática é comum estimá-los através da distribuição granulométrica nos produtos em britadores operacionais. Uma vez que eles forem estabelecidos para um material específico em um britador específico, eles permanecem independentes do CSS, permitindo que o britador possa ser simulado enquanto o CSS é variado (KING, 2012).

Para simular os momentos no qual os britadores não trabalham com câmara cheia, incorporou-se na função de classificação uma constante denominada de E_B para representar a eficiência de britagem, de modo que a nova função de classificação seja representada por:

$$\bar{c} = E_B \cdot c \quad (3.11)$$

Dessa forma, as Equações (3.1) e (3.2) tem o termo c substituído por \bar{c} , ficando da seguinte forma:

$$\frac{Mm_i}{W} = \frac{1}{1 - \bar{c}_i b_{ii}} \left(p_i^F + \sum_{j=1}^{i-1} \bar{c}_j \frac{Mm_j}{W} b_{ij} \right) \quad (3.12)$$

$$p_i = \frac{(1 - \bar{c}_i) Mm_i}{W} = \frac{1 - \bar{c}_i}{1 - \bar{c}_i b_{ii}} \left(p_i^F + \sum_{j=1}^{i-1} \bar{c}_j \frac{Mm_j}{W} b_{ij} \right) \quad (3.13)$$

3.1.2 Modelagem das Peneiras

Uma descrição mais realista do desempenho de um dispositivo de classificação é fornecida pela função de classificação. Esta função define a probabilidade que uma partícula individual entrará no fluxo de *oversize* que deixa o classificador. Essa função também é conhecida como função de partição. A função de classificação $c(d_{pi})$ é definida como a fração de massa de material no intervalo de tamanho i na alimentação que estará presente no fluxo de *oversize* (KING, 2012).

Uma vez que a função de classificação é conhecida, a distribuição de tamanho tanto no *oversize* quanto no *undersize* pode ser calculada por um simples balanço de massa sobre os sólidos na classe de tamanho i (KING, 2012):

$$W^U p_i^U = (1 - c(d_{pi})) W^F p_i^F \quad (3.14)$$

$$W^O p_i^O = c(d_{pi}) W^F p_i^F \quad (3.15)$$

onde O, U e F refere-se ao *oversize*, *undersize* e alimentação (*feed*), respectivamente.

As vazões totais de sólidos no tamanho *oversize* e *undersize* são dadas por:

$$W^U = \sum_i W^U p_i^U = \sum_i (1 - c(d_{pi})) W^F p_i^F \quad (3.16)$$

$$W^O = \sum_i W^U p_i^O = \sum_i c(d_{pi}) W^F p_i^F \quad (3.17)$$

$$p_i^U = [1 - c(d_{pi})] \frac{W^F}{W^U} p_i^F = \frac{[1 - c(d_{pi})] p_i^F}{\sum_i [1 - c(d_{pi})] p_i^F} \quad (3.18)$$

$$p_i^O = c(d_{pi}) \frac{W^F}{W^O} p_i^F = \frac{c(d_{pi}) p_i^F}{\sum_i c(d_{pi}) p_i^F} \quad (3.19)$$

As equações acima mostram uma abordagem tradicional para o dimensionamento de peneiras. Sua principal limitação é que a peneira deve ser dimensionada de acordo com a quantidade de alimentação.

Karra (1979) criou uma abordagem mais lógica baseada na quantidade de material que deve ser transferido pela peneira para o *undersize*, descrevendo de forma efetiva como uma peneira se comporta durante o seu funcionamento.

Para desenvolver um modelo empírico capaz de descrever o comportamento da peneira, é necessária uma formulação matemática da curva de partição. A formulação requer a determinação da funcionalidade em relação ao parâmetro d_{50} . Este tamanho de corte (mediana) é definido como o tamanho correspondente à curva de partição de 50%, que representa o tamanho no qual as partículas têm chances iguais de permanecer na peneira ou passar através dela. O tamanho do corte é uma medida da eficiência da peneira; valores de d_{50} próximos ao tamanho da malha indicam alta eficiência. No entanto, o tamanho do corte é sempre menor que a abertura da peneira. Foi estabelecido que os parâmetros do processo, como relação de partícula por abertura, composição da alimentação, localização do *deck*, taxa de alimentação e densidade aparente afetam o d_{50} significativamente. Essa dependência também foi observada baseando-se em dados experimentais.

O valor teórico de *undersize* que pode ser transferido pela peneira, em *ton/h*, é dado por:

$$Th = A \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F \times \text{área da peneira} \quad (3.20)$$

onde A representa a capacidade básica, que é definida como a quantidade de toneladas de *undersize* que uma peneira particular pode processar por unidade de área de peneiramento. B é a quantidade de *oversize* na alimentação (percentual de material com $d_i > h$, sendo h a abertura da peneira em *mm*). Peneiras que lidam com grande quantidade de *oversize* operam mais eficientemente porque esse material é recuperado diretamente na tela. C é a metade da quantidade de *undersize* na alimentação (percentual de material com $d_i < 0,5h$). Peneiras que contém uma grande proporção de material consideravelmente menor que o tamanho da abertura, irá processá-lo mais facilmente. D é a localização do *deck*. *Decks* inferiores recebem material mais difícil de manusear do que os *decks* que recebem material diretamente; portanto, a capacidade diminui com a posição. E é para o peneiramento a úmido. Se o peneiramento é a seco, este fator recebe 1. F é o fator de densidade; materiais mais densos são separados mais facilmente que materiais leves.

G_c é quantidade de material próximo à abertura da peneira (percentual de material com $0,75h < d_i < 1,25h$). Alimentação com grande quantidade de material próximo ao tamanho da abertura da peneira apresenta maior dificuldade de separação porque a passagem de material é inibida.

Uma peneira será bem projetada se Th for aproximadamente igual à quantidade de *undersize* na alimentação. Cada um dos fatores de capacidade estão relacionados à qualidade da alimentação e ao tipo de peneira. Karra (1979) baseia o desempenho da peneira na abertura efetiva da peneira (h_T) definida por:

$$h_T = (h + d_\omega) \cos \Theta - d_\omega \quad (3.21)$$

em que d_ω é o diâmetro do fio e Θ é o ângulo de inclinação do *deck*. A Equação (3.21) fornece a área de abertura efetiva projetada no plano horizontal que é apropriado para que as partículas possam passar pela peneira através da gravidade.

A capacidade básica é determinada principalmente pelo tamanho de abertura da peneira com a abertura efetiva sendo usada como medida apropriada do tamanho de abertura da peneira.

$$A = 12,13h_T^{0,32} - 10,3 \quad \text{para } h_T < 51mm \quad (3.22)$$

$$A = 0,34h_T + 14,41 \quad \text{para } h_T \geq 51mm \quad (3.23)$$

com h_T em mm e A em $ton\ m/h\ m^2$.

A capacidade básica também dependerá da área aberta da peneira usada. A capacidade básica calculada a partir das Equações (3.22) e (3.23) é aplicável a malha de arame leve industrial padrão. Para outros materiais de tela e superfícies, A deve ser ajustado proporcionalmente à área aberta. O percentual de área aberta para malha de arame leve está relacionado com a malha h por:

$$OA = 21,5 \log_{10} h + 37 \quad (3.24)$$

com h em mm . Então a capacidade A deve ser ajustada para:

$$\bar{A} = \frac{A \times \text{percentual atual de área aberta}}{OA} \quad (3.25)$$

O fator de *oversize* B é dado por:

$$B = 1,6 - 1,2\bar{P}^F(h_T) \quad \text{para } \bar{P}^F(h_T) \leq 0,87 \quad (3.26)$$

$$B = 4,275 - 4,25\bar{P}^F(h_T) \quad \text{para } \bar{P}^F(h_T) > 0,87 \quad (3.27)$$

O fator C que representa a metade da quantidade de *undersize* na alimentação é dado

por:

$$C = 0,7 + 1,2P^F(0,5h_T) \quad \text{para } P^F(0,5h_T) \leq 0,3 \quad (3.28)$$

$$C = 2,053P^F(0,5h_T)^{0,564} \quad \text{para } 0,3 < P^F(0,5h_T) \leq 0,55 \quad (3.29)$$

$$C = 3,35P^F(0,5h_T)^{1,37} \quad \text{para } 0,55 < P^F(0,5h_T) \leq 0,8 \quad (3.30)$$

$$C = 5,0P^F(0,5h_T) - 1,5 \quad \text{para } P^F(0,5h_T) > 0,8 \quad (3.31)$$

O fator D que representa a localização do *deck* é dado por:

$$D = 1,1 - 0,1S \quad (3.32)$$

onde $S = 1$ para o *deck* superior, $S = 2$ para o segundo *deck* e assim por diante.

O fator E é para o peneiramento a úmido. Seja $T = 1,26h_T$ (h_T em mm):

$$E = 1,0 \quad \text{para } T < 1 \quad (3.33)$$

$$E = T \quad \text{para } 1 \leq T < 2 \quad (3.34)$$

$$E = 1,5 + 0,25T \quad \text{para } 2 \leq T < 4 \quad (3.35)$$

$$E = 2,5 \quad \text{para } 4 \leq T < 6 \quad (3.36)$$

$$E = 3,25 - 0,125T \quad \text{para } 6 \leq T < 10 \quad (3.37)$$

$$E = 4,5 - 0,25T \quad \text{para } 10 \leq T < 12 \quad (3.38)$$

$$E = 2,1 - 0,05T \quad \text{para } 12 \leq T < 16 \quad (3.39)$$

$$E = 1,5 - 0,0125T \quad \text{para } 16 \leq T < 24 \quad (3.40)$$

$$E = 1,35 - 0,00625T \quad \text{para } 24 \leq T < 32 \quad (3.41)$$

$$E = 1,15 \quad \text{para } T > 32 \quad (3.42)$$

O fator F que representa a densidade aparente é dado por:

$$F = \frac{\rho_B}{1600} \quad (3.43)$$

O fator G_c que representa a quantidade de material próximo a abertura da peneira é dado por:

$$G_C = 0,975(1 - \text{fração próxima da malha na alimentação})^{0,511} \quad (3.44)$$

$$G_C = 0,975(1 - P^F(1,25h_T) + P^F(0,75h_T))^{0,511} \quad (3.45)$$

Na prática nem todo o *undersize* passa pela malha devido a diversos fatores que prejudicam a eficiência da peneira. Este efeito é representado pela função de partição da peneira (KING, 2012). Utiliza-se a função de *Rosin-Rammler* para representar esse

efeito:

$$c(d_p) = 1 - e^{[-0,693(d_p/d_{50})^{5,9}]} \quad (3.46)$$

A Equação (3.46) mostra a eficiência da transferência de partículas de tamanho d_p para o *oversize*. O parâmetro que determinará a eficiência do peneiramento é o d_{50} . Valores de d_{50} maior que o tamanho da malha gera alta eficiência e vice-versa.

O d_{50} real obtido dependerá principalmente da abertura efetiva da malha de arame usada na tela, em um coeficiente de carga K definido por:

$$K = \frac{\text{toneladas de } \textit{undersize} \text{ na alimentação/ unidade de área da peneira}}{\bar{A} \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F} \quad (3.47)$$

$$K = \frac{W^F P(h_T)/\text{área da peneira}}{\bar{A} \cdot B \cdot C \cdot D \cdot E \cdot F} \quad (3.48)$$

e do fator de tamanho próximo G_c .

Dados de peneiras experimentais são representados por:

$$\frac{d_{50}}{h_T} = \frac{G_c}{k^{0,148}} \quad (3.49)$$

Substituindo d_{50} nas Equações (3.46) e (3.14)-(3.19) tem-se a distribuição de material nos dois fluxos de produtos:

$$p_i^U = \frac{[1 - c(d_{pi})]p_i^F}{\sum_i [1 - c(d_{pi})]p_i^F} \quad (3.50)$$

$$p_i^O = \frac{c(d_{pi})p_i^F}{\sum_i c(d_{pi})p_i^F} \quad (3.51)$$

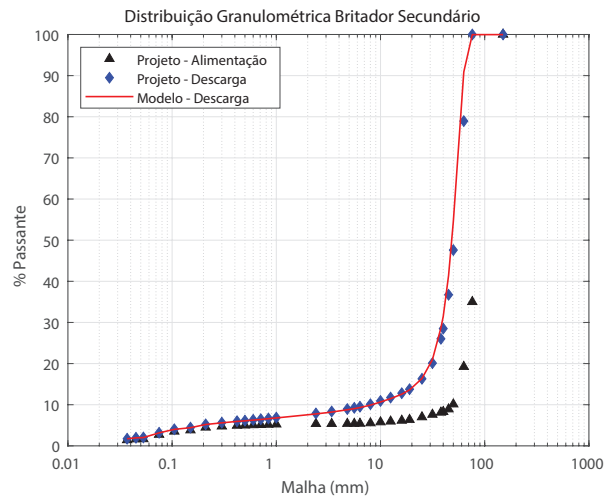
3.2 Validação do Simulador

Para construção do simulador foi necessário desenvolver modelos dos britadores e das peneiras existentes no circuito, conforme apresentado na Seção 3.1. Esses são os equipamentos mais importantes do circuito, uma vez que eles são responsáveis pela redução de tamanho e classificação do minério processado. Para validar os modelos utilizou-se como referências as curvas de distribuição granulométrica de projeto para cada etapa do processo.

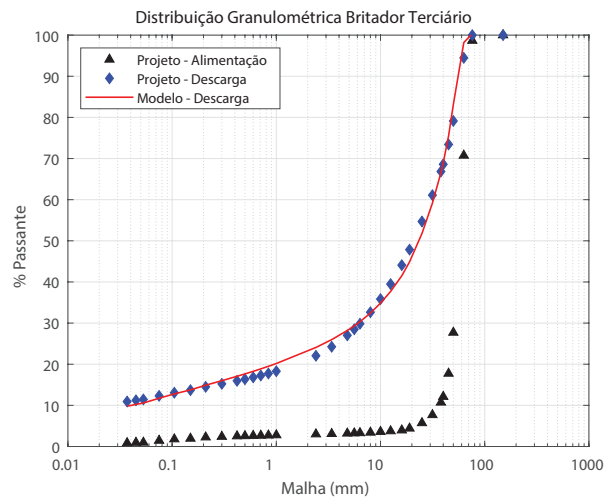
As Figuras 3.4, 3.5 e 3.6 ilustram o resultado simulado e o dado real da granulometria do minério processado na saída do britador, *over* e *under* de peneiras. Os resultados demonstram representatividade entre o modelo simulado e os dados de área operacional.

Para a simulação, transportador de correia foi considerado como um somador de fluxos de minério. Uma característica importante transportador de correia na simulação é o seu limite máximo de carga. Qualquer solução que infrinja o limite máximo de carga deve ser descartada.

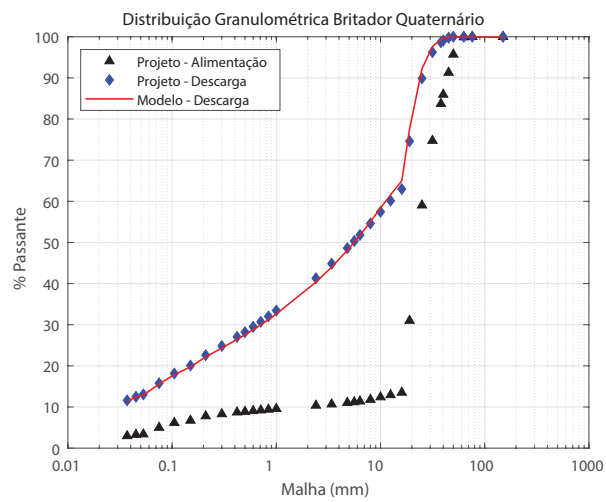
O *tripper car* não foi considerado na simulação. Ou seja, a distribuição de minério



(a) Britador Secundário



(b) Britador Terciário



(c) Britador Quaternário

Figura 3.4: Validação Modelo Britadores

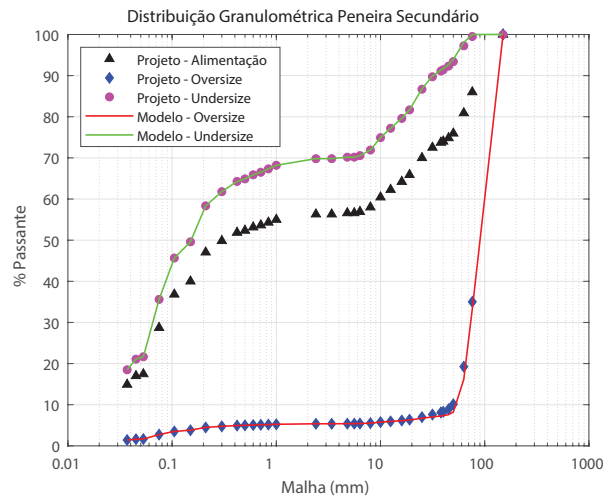


Figura 3.5: Validação Peneira Britagem Secundária

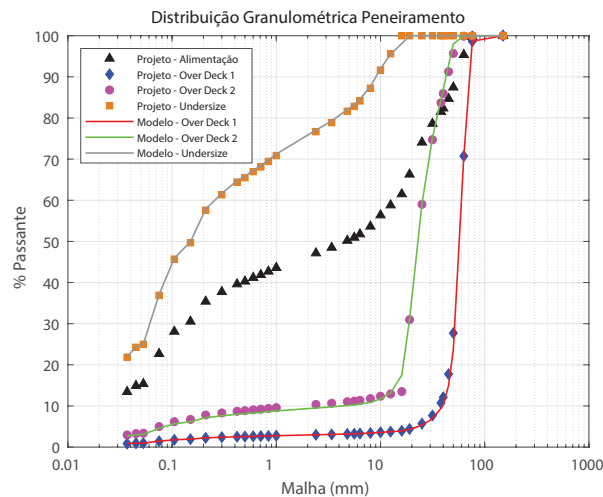
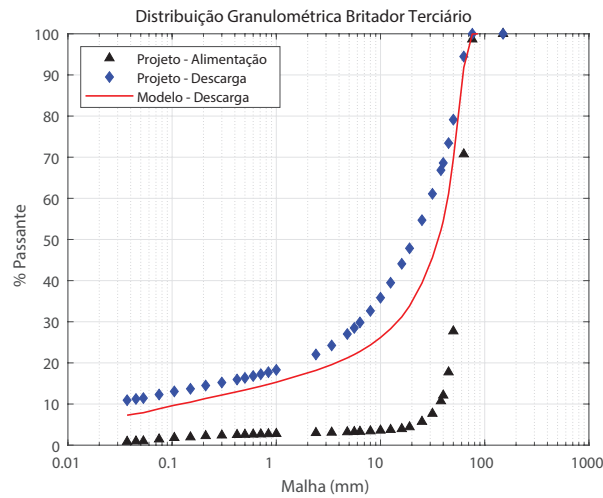


Figura 3.6: Validação Peneira Peneiramento

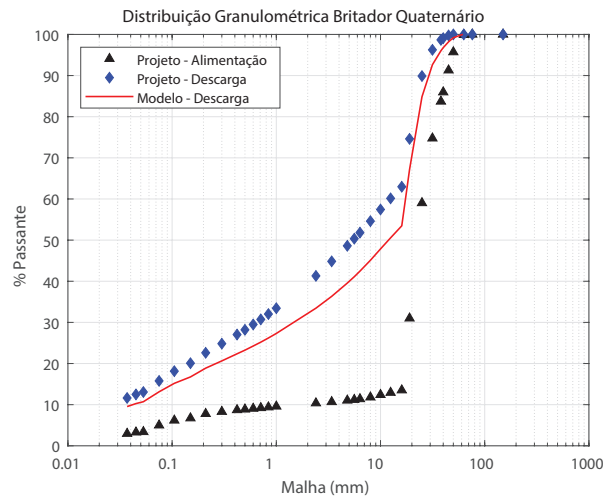
entre os silos é considerada homogênea. Essa aproximação não é distante da realidade, uma vez que soluções de controle já existentes fazem com que a variabilidade de nível dos silos seja desprezível. Na literatura há trabalhos dedicados ao sistema de controle de nível manipulando a posição do *tripper car*, como em Caldas e Martins (2018) e Albuquerque *et al.* (2019).

Adotou-se empiricamente o parâmetro E_B da Equação (3.11) como sendo 0,8 para representar uma queda de 20% na eficiência dos britadores terciário e quaternário, caso eles estejam trabalhando abaixo da sua capacidade, a fim de representar o britador não trabalhando com câmara cheia (condição adequada). Na prática, essa penalização resulta em um material mais grosso na saída com relação ao que seria caso o britador trabalhasse com a câmara cheia. Jacobson *et al.* (2010) mostram que, baseando-se em testes pilotos, britadores trabalhando com a câmara pela metade reduzem sua capacidade em 25%. A Figura 3.7 ilustra a alteração na granulometria de saída comparada com a granulometria

de projeto caso o britador estivesse com a câmara cheia.



(a) Terciário



(b) Quaternário

Figura 3.7: Britadores com Câmara Vazia

A Figura 3.8 apresenta o balanço de massa do circuito de britagem em percentual, comparando-se os valores de projeto da britagem com os valores obtidos utilizando o simulador. Observa-se que a assertividade do modelo foi bem próxima do valor de projeto. Importante mencionar que os valores acima de 100% na alimentação do peneiramento se devem ao fato de que além da alimentação nova da britagem secundária, tem-se a carga circulante das britagens terciária e quaternária.

Balço de Massa: Valor de Projeto x Simulador

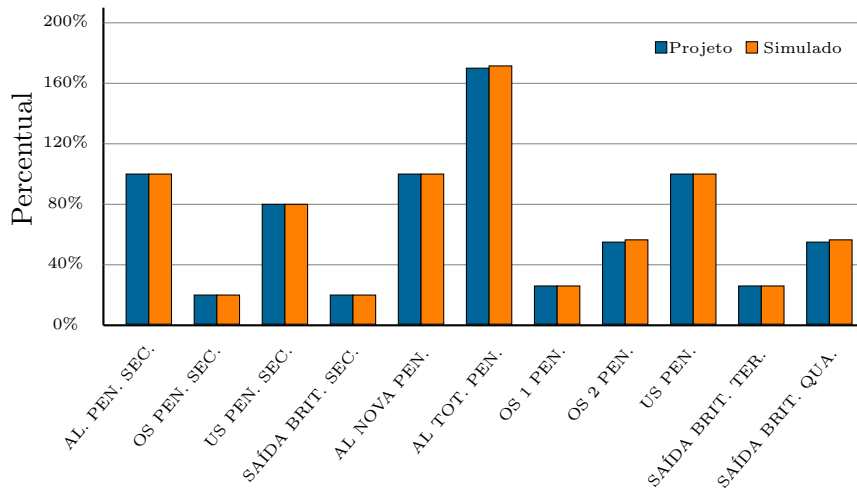


Figura 3.8: Balço de Massa de Projeto e Modelo Simulado

As Tabelas 3.1 e 3.2 apresentam os parâmetros que foram utilizados na modelagem dos britadores e das peneiras, respectivamente.

Tabela 3.1: Parâmetros Modelo dos Britadores

Parâmetro	Britador Secundário	Britador Terciário	Britador Quaternário
k - Eq. (3.8)	0,013	0,350	0,950
n_1 - Eq. (3.8)	0,5	0,2	0,3
n_2 - Eq. (3.8)	5,5	1,5	1,5
n - Eq. (3.3)	2,0	0,9	1,5
α_1 - Eq. (3.6)	0,30	0,05	0,30
α_2 - Eq. (3.7)	2,3	2,1	2,3
CSS (mm) - Eq. (3.6) e (3.7)	48	38	22
M/W - Eq. (3.1) e (3.2)	10,090	1,081	2,042
E_B - Eq. (3.11)	1,0	0,8	0,8

3.3 Conclusão

Neste capítulo mostrou-se como foi desenvolvido o simulador da planta de britagem de Conceição II com uso de modelos de britadores e peneiras apresentados por King (2012) no livro *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*. Faz-se uma comparação dos dados obtidos com os modelos desenvolvidos com dados de projeto a fim de mostrar

Tabela 3.2: Parâmetros Modelo das Peneiras

Parâmetro	Peneira Secundária	Peneira Peneiramento 1º <i>Deck</i>	Peneira Peneiramento 2º <i>Deck</i>
d_w (mm) - Eq. (3.21)	55	50	50
h (mm) - Eq. (3.21) e (3.24)	75	38	16
Θ (°) - Eq. (3.21)	20	20	20
Área Aberta (%) - Eq. (3.25)	35	30	30
Área (m^2) - Eq. (3.48)	21,9	21,9	21,9
S - Eq. (3.32)	1	1	2
ρ_B (kg/m^3) - Eq. (3.43)	2150	2150	2150
% <i>Under</i> no <i>Over</i> - Eq. (3.46)	2,0	1,0	5,5
d_{50} <i>Tunning Factor</i> - Eq. (3.49)	0,5152	0,7834	0,6874

a correspondência dos mesmos e os parâmetros utilizados na modelagem também são apresentados.

Capítulo 4

Algoritmo Heurístico para Otimização com Simulador

Neste capítulo apresenta-se o algoritmo heurístico de otimização integrado com o simulador. Inicialmente faz-se uma introdução ao tema, destacando-se os principais conceitos e, na sequência, faz-se uma revisão bibliográfica do assunto. Ao final, apresenta-se o algoritmo proposto.

4.1 Introdução

A otimização é uma área da pesquisa operacional que utiliza uma abordagem científica para apoiar a tomada de decisões procurando pela forma mais eficiente de projetar e operar um determinado sistema. Esta forma mais eficiente é representada pela melhor combinação de valores para as variáveis do problema (ou solução ótima), considerando seus objetivos e as restrições de projeto e operação (ARENALES *et al.*, 2015; WINSTON e GOLDBERG, 2004).

Na otimização mono-objetivo tem-se um único objetivo a ser maximizado ou minimizado; com isso, uma solução ótima é claramente definida. Uma solução s^* é ótima caso não exista nenhuma outra solução com função de custo melhor que s^* (COTA, 2018).

A seguir é apresentada a formulação de um problema de otimização mono-objetivo de minimização (LUENBERGER e YE, 2015).

$$\min f(x) \tag{4.1}$$

Sujeito a:

$$g_i(x) \leq 0; \quad \forall i = 1, \dots, p \tag{4.2}$$

$$h_j(x) = 0; \quad \forall j = 1, \dots, q \quad (4.3)$$

$$x \in \mathcal{R}^n \quad (4.4)$$

Nesta formulação, x é um vetor n -dimensional de incógnitas, $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$. As funções f , g_i (com $i = 1, 2, \dots, p$) e h_j (com $j = 1, 2, \dots, q$) são funções de valores reais das variáveis x_1, x_2, \dots, x_n . Tem-se um total de p funções do tipo g_i e um total de q funções do tipo h_j . A função f é a função objetivo do problema e as equações e inequações são as restrições do problema.

4.2 Revisão Bibliográfica

Por meio de uma busca na literatura foi realizada uma revisão bibliográfica consultando artigos científicos que abordassem os principais métodos para resolução de problemas de otimização, a otimização em tempo real na mineração, e por fim, a otimização integrada com simuladores.

4.2.1 Métodos para Resolução de Problemas de Otimização

Nesta seção são apresentadas algumas técnicas computacionais utilizadas para a resolução de problemas de otimização.

Heurísticas são técnicas que se baseiam em processos intuitivos, as quais buscam encontrar bons resultados dentro de um tempo computacional aceitável. Entretanto, não é possível dizer que esta solução é ótima, nem quanto esta solução estará próxima da ótima (COTA, 2018).

Dentre as heurísticas clássicas para resolução de problemas de otimização tem-se as buscas locais, também chamadas na literatura de heurísticas de refinamento. Seu objetivo é refinar uma solução. Para isso são realizados movimentos dentro da vizinhança da solução, a fim de gerar uma solução vizinha, diferente da solução corrente. A vizinhança desta solução é composta por movimentos da mesma natureza que dão origem a soluções diferentes da original (COTA, 2018).

Nas buscas locais, a cada iteração caminha-se, de vizinho para vizinho, de acordo com a vizinhança adotada, até que se chegue a um critério de parada. Duas heurísticas clássicas de refinamento são apresentadas a seguir:

- Método da descida/subida (*Best Improvement*): a ideia desta técnica é partir de uma solução inicial qualquer e a cada iteração analisar todos os seus vizinhos possíveis, movendo para aquele que tenha a melhor avaliação e que represente uma melhora no valor da solução corrente;

- Método de primeira melhora (*First Improvement*): Este método se assemelha ao do método anterior, porém ao invés de analisar toda a vizinhança, a busca é interrompida assim que um vizinho melhor é encontrado.

O método de descida para um algoritmo de minimização é apresentado pelo Algoritmo 4.1. Ele recebe como parâmetros uma solução inicial s , uma função de avaliação f e uma dada vizinhança $\mathcal{N}(\cdot)$.

Algoritmo 4.1: Método da Descida

Entrada: Função de avaliação $f(\cdot)$, vizinhança $\mathcal{N}(\cdot)$, solução s

Saída: Solução s refinada

```

1  $V \leftarrow \{s' \in \mathcal{N}(s) \mid f(s') < f(s)\};$ 
2 enquanto ( $|V| > 0$ ) faça
3   Seleccione  $s' \in V$ , sendo  $s' = \arg \min\{f(s') \mid s' \in V\};$ 
4    $s \leftarrow s';$ 
5    $V \leftarrow \{s' \in \mathcal{N}(s) \mid f(s') < f(s)\};$ 
6 retorna  $s;$ 

```

Para resolver os problemas das heurísticas clássicas de pararem em ótimos locais tem-se as meta-heurísticas. Elas são técnicas de caráter geral e possuem mecanismos que buscam evitar a parada prematura em ótimos locais ainda distantes de um ótimo global (GLOVER e KOCHENBERGER, 2006; SIARRY, 2016).

As meta-heurísticas podem ser divididas em duas categorias, de acordo com o princípio usado para explorar o espaço de soluções: busca local e busca populacional. No algoritmo desenvolvido foi utilizada uma meta-heurística baseada em busca local, em que o espaço de soluções é explorado por meio de estruturas de vizinhanças a partir de uma única solução corrente.

A meta-heurística implementada neste trabalho foi a *Iterated Local Search* – ILS (LOURENÇO *et al.*, 2003). A ideia é gerar novas soluções de partida por meio de perturbações na solução ótima local. Perturbações podem ser definidas como alterações nos valores dos componentes de uma dada solução, por exemplo, dada uma solução representada por um conjunto de bits, uma perturbação pode ser a troca no valor de um *bit* selecionado aleatoriamente.

O pseudocódigo do ILS é apresentado pelo Algoritmo 4.2. Inicialmente é gerada uma solução, que pode ser obtida por uma heurística construtiva; posteriormente, é realizado um refinamento da solução inicial.

A seguir, entra-se no laço de repetição do algoritmo até que um critério de parada seja satisfeito. Dois exemplos de critérios de parada são o número máximo de iterações e o tempo máximo de execução. A cada iteração a solução corrente é perturbada, e depois é refinada por uma busca local. Após o refinamento, a solução corrente passa por um critério de aceitação. Este critério define se esta nova solução será aceita. Em

Algoritmo 4.2: *Iterated Local Search*

Entrada: função de avaliação g

Saída: Solução s refinada

```
1  $s_0 \leftarrow \text{GeraSolucaoInicial}();$   
2  $s \leftarrow \text{BuscaLocal}(s_0);$   
3 enquanto (critério de parada não satisfeito) faça  
4    $s' \leftarrow \text{Perturbacao}(s, \text{histórico});$   
5    $s'' \leftarrow \text{BuscaLocal}(s', g);$   
6    $s \leftarrow \text{CriterioAceitacao}(s, s'', \text{histórico}, g);$   
7 Retorne  $s;$ 
```

caso afirmativo, passa a ser a nova solução corrente, em caso negativo, é descartada. O histórico é responsável por definir o grau de perturbação aplicado, e também o critério de aceitação para avaliar se a solução gerada será aceita. A melhor solução encontrada é retornada ao final do laço.

4.2.2 Otimização em Sistemas de Controle Aplicada à Mineração

A operação de um processo simultaneamente com várias restrições aumenta substancialmente a complexidade do controle. Diferentes combinações de variáveis manipuladas e de variáveis controladas são geradas, e isso faz com que seja difícil a correlação direta de variáveis manipuladas com uma única variável controlada. Sendo assim, técnicas avançadas de controle são necessárias para permitir que todas as variáveis manipuladas que influenciem uma variável dependente específica possam ser incluídas no seu controle. Os sistemas tradicionais de controle em malha fechada não são capazes de lidar com problemas de controle multivariável (CUTLER e PERRY, 1983).

A Figura 4.1 mostra os cinco níveis na hierarquia de controle do processo, onde várias atividades de otimização, controle, monitoramento e aquisição de dados são empregadas. A posição relativa de cada bloco na Figura 4.1 destina-se a ser conceitual porque pode haver sobreposição nas funções realizadas, e, muitas vezes, vários níveis podem utilizar a mesma plataforma de computação. As escalas de tempo relativas para a atividade de cada nível também são mostradas. Os dados do processo, bem como os dados da empresa, que consistem em informações comerciais e financeiras, são usados com as metodologias apresentadas para tomar decisões em tempo hábil. O nível mais alto (planejamento e programação) define metas de produção para atender às restrições de suprimento e logística e aborda as decisões de utilização de capacidade e mão de obra variando no tempo (SEBORG *et al.*, 2004).

As aplicações de otimização em tempo real são normalmente associadas a grandes sistemas como um conjunto de processos unitários interligados. Espera-se que com os controles avançados (APC) as variáveis importantes tenham baixa variabilidade, enquanto

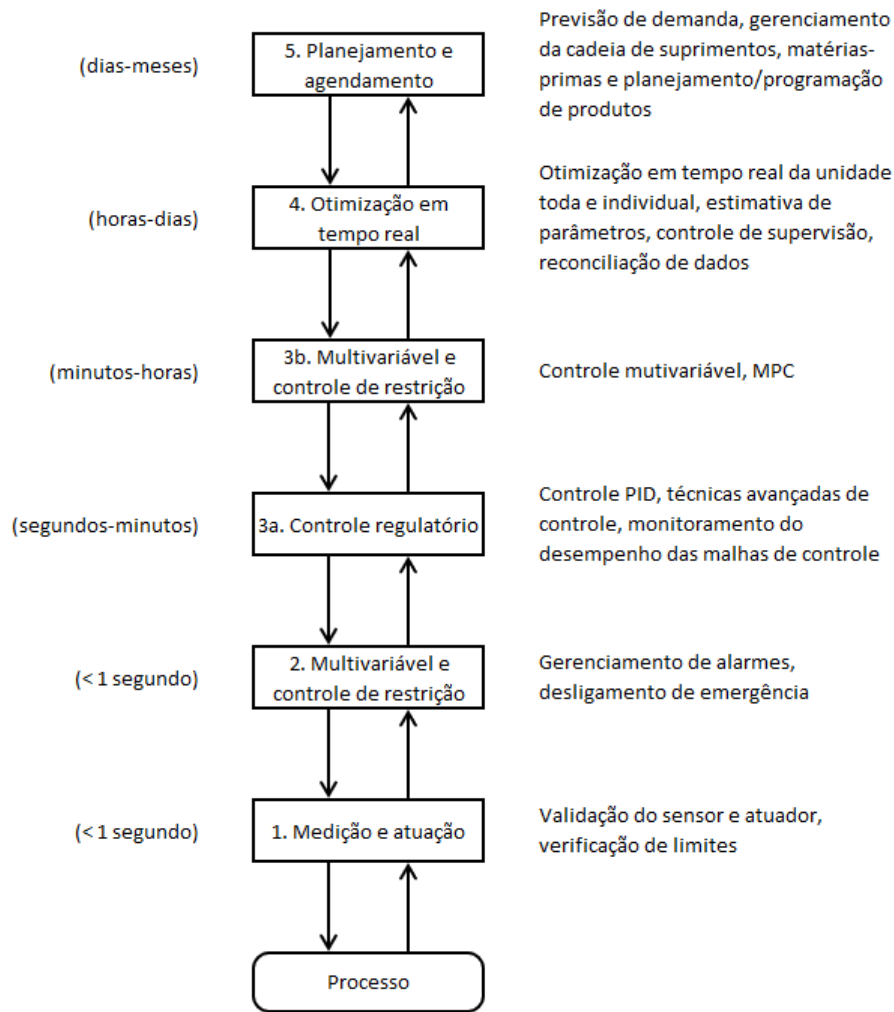


Figura 4.1: Os Cinco Níveis de Controle de Processo e Otimização

que com a otimização em tempo real possa-se deslocar o processo para um ponto mais econômico segundo um objetivo determinado, como aumento de produção ou atender as especificações de qualidade de um determinado produto ou subproduto. Atualmente existem tecnologias que oferecem RTO e APC de forma integrada. Tem-se observado o uso de Sistemas Especialistas com lógica “Fuzzy” em projetos de RTO + APC particularmente no segmento de Mineração. Entretanto, a mais usual é sem dúvida a do Controle Preditivo baseado em Modelo (MPC – “Model Predictive Control”). O MPC oferece a possibilidade de otimização de forma simples, usando modelos de processo e métodos de otimização integrados ao controle (GUIMARÃES NETO, 2011).

Na Figura 4.2 (Adaptada de Guimarães Neto (2011)), pode-se ver o efeito das técnicas de APC e de RTO agindo na evolução de uma variável de processo ao longo do tempo. O APC permite reduzir a variabilidade e o RTO deslocar o valor desejado desta variável para um valor melhor do ponto de vista econômico.

De acordo com Seborg *et al.* (2004), na camada de RTO, são executados todos os cálculos de transferência e otimização de dados e enviadas informações de *setpoint* para

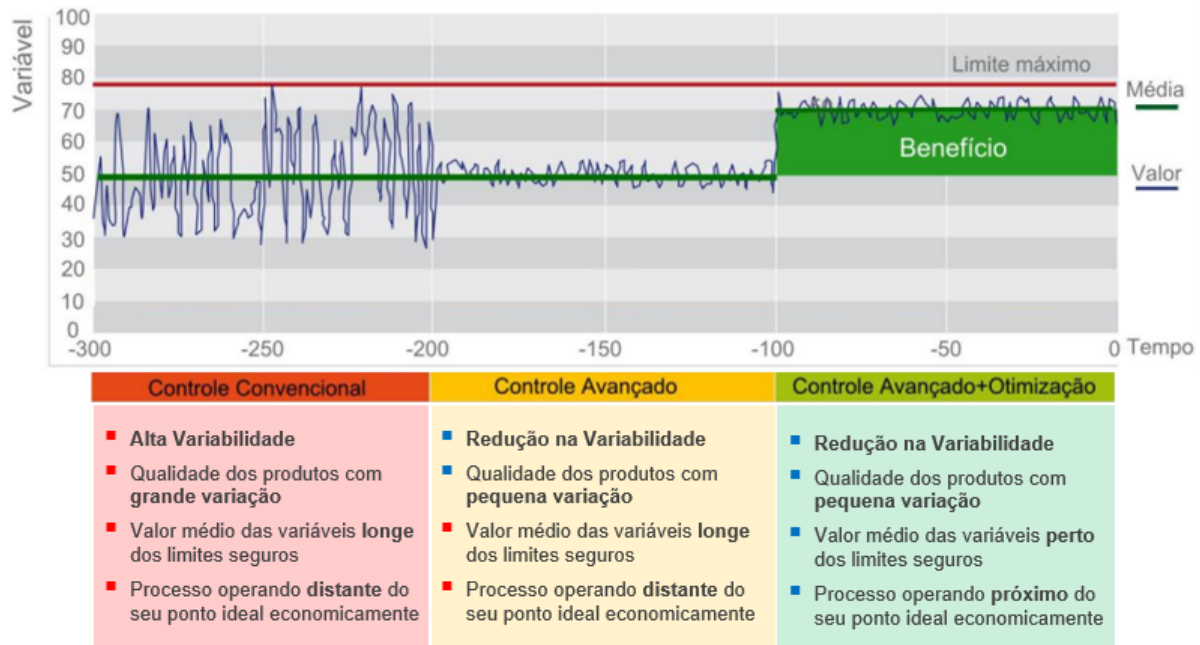


Figura 4.2: Evolução de Uma Variável Crítica ao Longo do Tempo

os controladores. O sistema RTO deve executar todas as tarefas com a planta em estado estacionário. O *software* de otimização pode atualizar os parâmetros do modelo para corresponder aos dados atuais da planta, usando técnicas de regressão. A atualização de parâmetros compensa as mudanças na planta e a degradação do equipamento de processo. É necessário um conhecimento e experiência considerável na planta para decidir quais parâmetros devem ser atualizados e quais dados usar para as atualizações. O departamento responsável pelo planejamento e agendamento deve atualizar os valores econômicos regularmente. O *software* de otimização calcula então os pontos de ajuste ótimos. Se os novos pontos de ajuste ótimos não forem estatisticamente diferentes dos anteriores, nenhuma alteração será realizada no processo.

Ao buscar na literatura artigos científicos que abordassem a otimização em tempo real na mineração encontraram-se vários trabalhos realizados na indústria química, principalmente na indústria do petróleo. Poucos foram os artigos que abordam o processo de beneficiamento de minério. Na sequência os principais pontos dos trabalhos mais relevantes que foram encontrados são apresentados.

Lestage *et al.* (2002) apresentam uma aplicação de otimização em tempo real (RTO) em uma usina de moagem de minério simulada. Os métodos de controle e otimização são baseados em um modelo linear dinâmico do processo. A Figura 4.3 (LESTAGE *et al.*, 2002) mostra um circuito típico de moagem que foi utilizado pelos autores para realizar a simulação.

O minério é alimentado diretamente ao moinho de barras, que descarrega em uma caixa. A bomba alimenta uma bateria de hidrociclones. O *overflow* do hidrociclone é direcionado para a flotação e o *underflow* é destinado para a caixa da bomba após passar

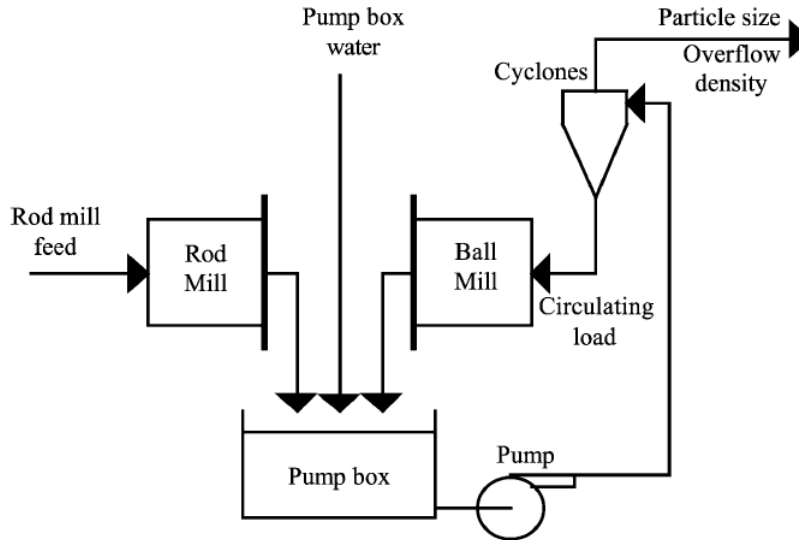


Figura 4.3: Circuito de Moagem Típico

por um moinho de bolas. Em algumas plantas, um moinho de bolas, um moinho semi-autógeno ou qualquer outro moinho pode substituir o moinho de barras. Normalmente, uma operação de moagem deve ser ajustada a fim de entregar uma granulometria ideal para o processo seguinte. Devido à competição que existe entre a granulometria do produto moído, que quanto mais fino tende a gerar um concentrado mais rico, e a capacidade de produção, que aumenta a quantidade de material vendido, a otimização de um circuito de moagem é geralmente formulada como um desses três objetivos:

- Maximizar a produção a uma granulometria constante;
- Maximizar a granulometria a uma produção constante;
- Otimizar uma função ponderada de ambos os objetivos acima.

Lestage *et al.* (2002) utilizam um método de programação linear (LP) para encontrar o melhor *setpoint* do controlador como uma função das restrições de operação do processo. O otimizador seleciona valores de *setpoint* que maximizam a taxa de transferência do circuito sujeito às restrições de carga circulante, nível da caixa de bomba e as densidades do *overflow* e *underflow* dos hidrociclones. Os autores acreditam que a estratégia seja aplicável em plantas reais, uma vez que a simulação que foi realizada mostrou que a otimização foi eficiente em maximizar a taxa, mantendo a granulometria do produto em um *setpoint* constante, sem as restrições que foram impostas, exceto durante regimes transitórios. O simulador foi validado em vários dados da planta e foi capaz de imitar distúrbios realistas como variações de granulometria do minério.

Muller *et al.* (2010) detalham uma abordagem de controle em um circuito de britagem da *Anglo Platinum*, considerado um circuito complexo e com longos atrasos de transporte. Uma camada de controle composta de uma mistura entre lógica *Fuzzy* e controle

preditivo baseado em modelo (MPC) para fornecer *setpoints* para os controladores PID da camada de controle regulatório. O MPC utiliza o modelo dinâmico da planta dinâmica para calcular valores de *setpoint* otimizados de acordo com ações de controle passadas e comportamento futuro previsto. O objetivo geral é maximizar a produção do circuito, sem violar as restrições (níveis de silo baixo/alto, capacidade de equipamentos, etc.). A filosofia de maximizar o rendimento do circuito é descrita como uma estratégia “*push-pull*”: um lado tenta empurrar o máximo de material possível no circuito, enquanto o outro lado tenta extrair o máximo de material possível do circuito. No entanto, isso pode levar a um acúmulo não intencional de material. O estudo indicou um aumento médio de 9% na taxa de transferência após a implementação do MPC.

Navia *et al.* (2016) apresentam uma camada de supervisão com otimização em tempo real que foi implementada em uma coluna de flotação experimental em escala laboratorial para concentração de cobre. Uma metodologia de dois estágios e de adaptação modificadora para RTO foi comparada pelos autores. Também foi testada e apresentada pelos autores uma reformulação da adaptação modificadora, baseada em gradiente. Os resultados demonstraram que a incerteza paramétrica na RTO de dois estágios não foi suficiente para encontrar as condições ótimas do sistema real. A atualização proposta pela metodologia de adaptação modificadora parece ser uma alternativa adequada para encontrar o ótimo do processo sob diferentes fontes de incerteza. Como esperado pelos autores, os métodos de RTO que foram implementados falharam em manter o sistema dentro da região viável durante as transições. Além disso, o desempenho da camada RTO no circuito de concentração completo deve ser estudado para avaliar o efeito de unidades laterais para estimar os benefícios esperados para o processo em geral.

Coetzee e Ramonotsi (2016) apresentam a atualização do RN MPC (Controle Preditivo baseado em Modelo Robusto Não-linear), que faz parte da plataforma de controle desenvolvida internamente na Mintek (organização nacional de pesquisa e desenvolvimento da África do Sul para todos os aspectos de processamento mineral, metalurgia extrativa e tecnologias relacionadas), chamada StarCS, com principal aplicação no circuito de moagem. Foi adicionado ao RN MPC um otimizador em tempo real. O controlador aprimorado foi demonstrado no circuito de moagem primário da mina de platina de Pilanesberg na África do Sul, e o desempenho comparado com a geração anterior, que já estava implementada. Os resultados mostram que o RTO melhorou o desempenho e a estabilidade do processo, bem como aumentou o tempo de execução, eliminando interrupções curtas pelos operadores para intervenção manual.

Itävuo *et al.* (2019) abordam o problema de balanço de massa em circuitos de britagem. É considerado um problema desafiador pelos autores devido aos longos atrasos de transporte, circuitos complexos, vários fluxos de perturbação sem controle e um número variável de equipamentos ativos. O artigo apresenta a estratégia desenvolvida pelos autores, desde a teoria fundamental, passando pela modelagem dinâmica e ajuste do con-

trolador, para o projeto completo do sistema de controle do circuito e implementação. O esquema proposto é avaliado em experimentos extensivos em larga escala e simulados em vários cenários e combinações de equipamentos de produção. Os experimentos realizados revelaram que o esquema proposto forneceu o comportamento desejado em todos os cenários simulados.

Não foram encontradas na literatura implementações industriais de otimização na etapa de britagem do processo de beneficiamento de minério de ferro. O trabalho apresentado por Itävuo *et al.* (2019) propõem uma estratégia de controle para o circuito de britagem apenas com estratégias clássicas de controle regulatório. Muller *et al.* (2010) utilizam técnicas de controle avançado do tipo *Fuzzy* e MPC. Ambos os trabalhos não abordam a otimização para resolução dos problemas propostos.

4.2.3 Otimização com Simuladores

Dada a complexidade e quantidade de variáveis existentes no circuito de britagem, para resolução do problema de otimização proposto faz-se necessário o uso de meta-heurísticas devido às dimensões do problema e pela necessidade de obter soluções de alta qualidade em tempo computacional reduzido. Em meta-heurísticas, frequentemente assume-se que as entradas dos problemas, a função objetivo e o conjunto de restrições de otimização são determinísticas (JUAN *et al.*, 2015). No entanto, a incerteza está ao nosso redor, o que muitas vezes torna os modelos determinísticos muito simplificados comparados aos sistemas reais. Desse modo buscou-se uma metodologia geral que permite estender meta-heurísticas através de simulação para resolver problemas de otimização combinatória estocásticos. Estas são as chamadas *simheuristics*, que permitem modelar a incerteza da vida real de uma maneira natural através da integração de simulação em uma estrutura orientada por meta-heurística (JUAN *et al.*, 2015). Esse grupo de algoritmos de otimização baseia-se no fato de que meta-heurísticas eficientes já existem para a versão determinística do problema de otimização combinatória correspondente.

A Figura 4.4 representa um esquema onde é ilustrada a abordagem da otimização com simulação. Mostra-se que, partindo-se de um problema de otimização complexo, é possível chegar em uma solução quase ótima, integrando meta-heurística ou algoritmos exatos de otimização com simulação.

Numerosas aplicações de *simheuristics* em uma infinidade de contextos têm sido estudadas na literatura. De fato, o uso de *simheuristic* tem aumentado bastante nos últimos anos, conforme mostrado na Figura 4.5, onde é possível perceber que a partir de 2011 tem crescido bastante o número de publicações.

Guimaranes *et al.* (2018) evidenciam que a extensão das meta-heurísticas tradicionais em *simheuristics* está ganhando popularidade conforme mostrado por Grasas *et al.* (2016), e mostram que elas já foram aplicadas para resolver problemas de otimização estocástica

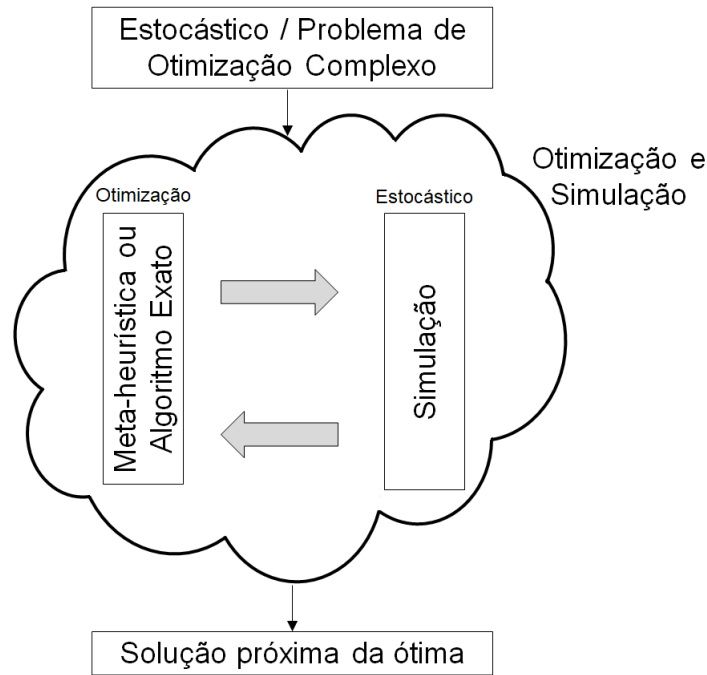


Figura 4.4: Visão Geral da Abordagem de Otimização com Simulação. Adaptado de Juan *et al.* (2015)

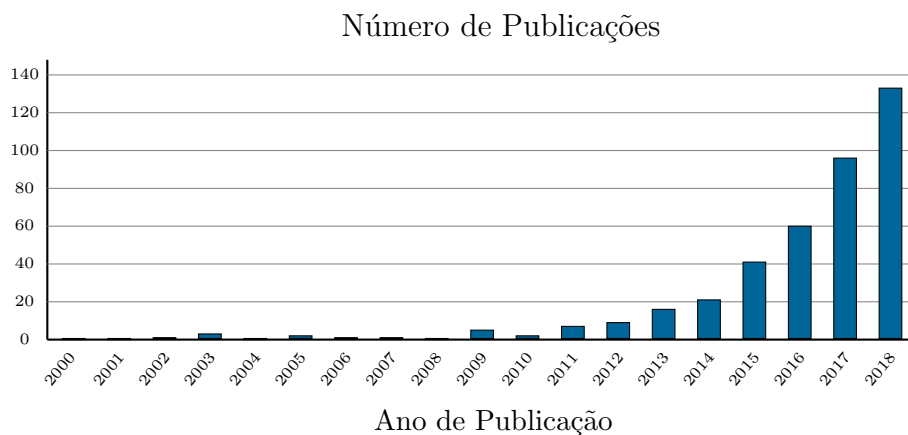


Figura 4.5: Número de Publicações do *Google Scholar* para "*Simheuristic*"

em diversas áreas, como o transporte rodoviário (GONZÁLEZ-MARTIN *et al.*, 2018; JUAN *et al.*, 2011, 2013), coleta de lixo (GRULER *et al.*, 2017a,b), aviação (GUIMARANS e ARIAS, 2015), roteamento de estoque (GRULER *et al.*, 2018a,b; JUAN *et al.*, 2014b), sequenciamento de tarefas em máquinas (GONZÁLEZ-NEIRA *et al.*, 2017; HATAMI *et al.*, 2018; JUAN *et al.*, 2014a), localização de instalações (DE ARMAS *et al.*, 2017) ou finanças (PANADERO *et al.*, 2018).

Guimaranes e Arias (2015) tratam o Problema Estocástico de Recuperação de Aeronaves, que considera a natureza estocástica dos sistemas de transporte aéreo. Utiliza-se uma abordagem de otimização baseada na meta-heurística *Large Neighborhood Search* (LNS), combinada com a simulação em diferentes estágios, a fim de garantir a robustez

das soluções. A abordagem desenvolvida é testada em instâncias diferentes, incluindo dados reais e, em todos os casos, a abordagem funciona melhor do que uma abordagem determinista quando a variabilidade do sistema é considerada.

Gruher *et al.* (2017b) fazem uma análise da versão do problema de coleta de lixo com múltiplos depósitos e demandas estocásticas, propondo um algoritmo híbrido combinando meta-heurísticas com simulação. A abordagem *simheuristic* permite estudar os efeitos da cooperação entre os diferentes depósitos de lixo, quantificando as economias potenciais que essa cooperação poderia proporcionar às prefeituras e às empresas de coleta de lixo. A metodologia para lidar com o complexo problema de coleta de lixo com demandas estocásticas multidepósito (nomeado MDWCPSD) é baseada na estrutura geral do *SimILS* descrita em Grasas *et al.* (2016). É utilizada uma combinação da meta-heurística ILS e a simulação de Monte Carlo. Assim, em diferentes estágios do algoritmo, a simulação de Monte Carlo é aplicada para considerar o desempenho de uma solução determinística pré-definida em um ambiente estocástico.

de Armas *et al.* (2017) propõem uma abordagem de *simheuristic* para resolver o problema de localização de instalações não-capacitado estocástico (SUFLP). Inicialmente é proposta uma heurística baseada em economia para o problema de localização de instalações não-capacitado determinístico, a qual é capaz de gerar soluções de boa qualidade em milissegundos. Em seguida, integra-se essa heurística construtiva dentro de uma estrutura meta-heurística ILS e o algoritmo resultante permite gerar soluções quase ótimas em pouco tempo de processamento. Por fim, estende-se a mesma a um algoritmo *simheuristic*, integrando meta-heurística com técnicas de simulação de Monte Carlo para lidar com o SUFLP, quando outras metas de otimização além do custo mínimo esperado devem ser consideradas. Ilustra-se através de vários exemplos que a abordagem *simheuristic* pode ser usada para fornecer soluções alternativas àquela com o custo mínimo esperado.

González-Martin *et al.* (2018) utilizam simulação de Monte Carlo (MCS) combinadas com a meta-heurística *RandSHARP*, versão randômica de uma heurística baseada em economia para resolver o Problema de Roteamento em Arco Capacitado. O objetivo da combinação é lidar com uma variante estocástica do problema de uma maneira natural e eficiente. O trabalho se baseia no uso de um estoque de segurança durante o projeto de uma rota, a fim de atender demandas inesperadas durante uma rota de entrega. Os resultados para pequenas e médias instâncias mostraram uma melhoria na robustez das soluções empregando os estoques de segurança. Entretanto, em determinados momentos, o alto custo dessa melhoria na robustez não compensa o custo das ações corretivas necessárias com soluções menos robustas obtidas sem estoques de segurança.

Hatami *et al.* (2018) abordam o problema de sequenciamento em máquinas paralelas com tempos de processamento estocásticos, no qual um produto composto de vários componentes tem que ser terminado em um momento particular. Os componentes são processados em fábricas paralelas e independentes, e cada fábrica pode ser modelada

como um problema de sequenciamento com permutação. O tempo de processamento de cada operação em cada fábrica é uma variável aleatória após uma dada distribuição de probabilidade. Implementa-se um algoritmo *simheuristic* para minimizar o *makespan* na versão determinista; e o *makespan* esperado ou um percentual do *makespan* na versão estocástica. Realizam-se diversos experimentos computacionais a fim de ilustrar e comprovar a eficiência do algoritmo proposto.

Panadero *et al.* (2018) apresentam uma versão estocástica do problema de seleção de portfólio de projetos (PPSP). O objetivo é maximizar o valor presente líquido esperado, considerando fluxos de caixa aleatórios e taxas de desconto em períodos futuros, bem como um rico conjunto de restrições incluindo o risco máximo permitido. A abordagem proposta integra uma meta-heurística de busca de vizinhança variável (VNS) com simulação de Monte Carlo. Experimentos computacionais mostram a validação do algoritmo e ilustram como as soluções variam conforme o nível de incerteza aumenta.

Gruher *et al.* (2018a) propõem uma meta-heurística de busca em vizinhança variável (VNS) híbrida com simulação para resolver o problema de roteamento de estoque (IRP) sob incerteza de demanda. A abordagem *simheuristic* é capaz de resolver instâncias de grande porte para o IRP de período único com demandas estocásticas e faltas de estoque em tempos de computação pequenos. Uma série de experimentos enfatiza a competitividade do algoritmo em comparação com abordagens heurísticas usadas anteriormente.

Abordagens mais recentes relacionados a *simheuristic* são apresentadas por González-Neira e Montoya-Torres (2019) e Pagès-Bernaus *et al.* (2019). González-Neira e Montoya-Torres (2019) abordam o problema de sequenciamento com permutação estocástica, no qual os parâmetros estocásticos são os tempos de processamento. Eles propõem um procedimento de busca adaptativa aleatória e gulosa (GRASP), acoplado à simulação de Monte Carlo para obter o *makespan* e o atraso esperado. Pagès-Bernaus *et al.* (2019) integram simulação de Monte Carlo com a meta-heurística ILS para resolver o problema de localização de instalações capacitado com demandas estocásticas.

Percebe-se nos artigos apresentados anteriormente uma grande utilização de *simheuristic* integradas com meta-heurísticas consolidadas na literatura.

4.3 Algoritmo Proposto

O algoritmo de otimização é o responsável por gerar as condições a serem avaliadas, utilizando-se métodos clássicos de resolução de problemas de otimização. Diferentemente dos métodos clássicos, onde se tem uma equação a ser maximizada ou minimizada, utiliza-se como função objetivo do problema de otimização o resultado da simulação fornecido pelo simulador, que no caso é o resultado da produção realizada dentro de um período de tempo especificado inicialmente.

O algoritmo de otimização foi desenvolvido no *software* MATLAB[®] da *MathWorks*.

Foi desenvolvida uma heurística do tipo busca local. Heurísticas podem ser definidas como técnicas inspiradas em processos intuitivos que procuram boas soluções em tempo computacional aceitável para a tomada de decisão. No entanto, não existe garantia de otimalidade da solução, nem garantia de quão próximo ela está da solução ótima (COTA, 2018).

4.3.1 Representação e Avaliação da Solução

Uma solução s é representada por um conjunto de $n + 1$ elementos, sendo que cada um dos n primeiros elementos indica o número de equipamentos em operação em cada etapa de britagem e o último elemento indica a taxa de alimentação. Os equipamentos representam uma linha completa (alimentador-peneira ou alimentador-britador).

Criou-se um vetor de 6 (seis) posições representando as 5 etapas de britagem e a taxa desejada no processo. Os alimentadores e a taxa são representados por um número inteiro. O vetor de 6 (seis) posições é distribuído da seguinte forma:

- 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 Desejada.

A Figura 4.6 ilustra a representação e a composição do vetor de solução do problema de otimização.

2	4	1	3	7	3400
Alimentadores Pilha Pulmão	Alimentadores Brit. Sec.	Alimentadores Brit. Terc.	Alimentadores Brit. Quat.	Alimentadores Peneiramento	Taxa Desejada

Figura 4.6: Vetor de Representação de Uma Solução

É importante ressaltar que os alimentadores em cada etapa do processo foram considerados iguais, não sendo então necessário representar cada equipamento de forma isolada, uma vez que se deseja conhecer o número de equipamentos necessários e não um equipamento específico.

4.3.2 Algoritmo SILS-SIM

O algoritmo *simheuristic* proposto, nomeado SILS-SIM, é baseado na meta-heurística ILS e utiliza um simulador do processo de britagem para avaliar a função objetivo. A versão do ILS utilizada é o *Smart ILS*, uma modificação da meta-heurística tradicional introduzida em Reinsma *et al.* (2018). A solução inicial do algoritmo SILS-SIM é gerada de maneira aleatória e o refinamento das soluções é feita por uma busca local (*Uphill method*) com a estratégia *Best Improvement*. O critério de parada é um tempo limite de execução ou um número máximo de iterações sem melhora. Seu pseudocódigo é apresentado no Algoritmo 4.3.

Algoritmo 4.3: SILS-SIM

Entrada: $iter_{max}, t_{exec}, tentativa_{max}$
Saída: s_{melhor}

```
1  $nivel, tentativa \leftarrow 1$ ;  
2  $s_0 \leftarrow GeraSolucaoInicial()$ ;  
3  $s \leftarrow BuscaLocal(s_0)$ ;  
4 Atualiza  $t_{atual}$ ;  
5 enquanto  $(t_{atual} \leq t_{exec}) \wedge (iter_{sem.Melhora} \leq iter_{max})$  faça  
6    $s' \leftarrow Perturbacao(s, nivel)$ ;  
7    $s'' \leftarrow BuscaLocal(s')$ ;  
8   se  $f(s'') > f(s)$  então  
9      $s \leftarrow s''$ ;  
10     $nivel \leftarrow 1$ ;  
11     $tentativa \leftarrow 1$ ;  
12  senão  
13     $tentativa \leftarrow tentativa + 1$ ;  
14    se  $tentativa \geq tentativa_{max}$  então  
15       $tentativa \leftarrow 1$ ;  
16       $nivel \leftarrow nivel + 1$ ;  
17  Atualiza  $t_{atual}$ ;  
18 Retorne  $s$ ;
```

O Algoritmo 4.3 possui os seguintes parâmetros de entrada: *i*) t_{exec} , que representa o tempo de execução do algoritmo; e *ii*) $tentativa_{max}$, que define o número de tentativas no mesmo nível de perturbação que são permitidas para que se encontre uma solução melhor, antes de aumentar o nível da perturbação.

Para iniciar a busca gera-se uma solução inicial (s_0) de maneira aleatória, respeitando-se os limites mínimos e máximos de equipamentos em cada etapa do processo. Em seguida, essa solução inicial é submetida a uma busca local.

Para que a busca não fique presa no ótimo local gerado, o algoritmo entra em um laço em que a cada iteração são realizados os seguintes passos:

1. Gera-se uma perturbação na solução s escolhendo-se de forma aleatória uma posição e alterando-a em uma unidade o número de equipamentos, e obtém-se uma nova solução s' . Caso o elemento sorteado seja a taxa o valor é alterado de acordo com um valor pré-definido inicialmente pelo usuário. A variável *nivel* define o grau de perturbação, ou seja, a quantidade de vezes que esse movimento será executado;
2. Aplica-se uma busca local na solução s' pelo Algoritmo 4.4 e a solução s'' é gerada;
3. É verificado se solução s'' possui valor de função objetivo maior do que a da solução corrente s , que é a melhor solução até então;
4. Em caso positivo, a solução s é atualizada. As variáveis *nivel* e *tentativa* são atualizadas com os seus valores iniciais;
5. Caso contrário, a variável *tentativa* é incrementada. O nível de perturbação é aumentado apenas quando essa variável assume o limite de tentativas sem melhora na solução corrente ($tentativa_{max}$);
6. O algoritmo é encerrado quando é atingido o tempo máximo de execução (t_{exec}) ou quando o número máximo de iterações sem melhora ($iter_{max}$) é atingido, retornando-se a melhor solução.

Foram criadas funções específicas dentro do algoritmo de otimização para realizar as seguintes funções:

- Validar a solução: garantir que a solução atenda aos requisitos de número mínimo e máximo de equipamentos em cada etapa do processo;
- Perturbar a solução: gerar um indivíduo vizinho a solução, de modo a varrer todo o espaço de busca e sair de ótimos locais;
- Simular a solução: executar o simulador com a solução proposta e obter o valor de produção realizado no período;
- Realizar a busca local: executar o algoritmo de busca local *Best Improvement* ou *First Improvement*, de acordo com a escolha.

Com as funções citadas acima, partindo-se de uma solução inicial aleatória, foi possível executar o otimizador de maneira satisfatória e verificar o comportamento do algoritmo de otimização, tendo como função objetivo o resultado de produção informado diretamente pela integração com o simulador.

4.3.3 Geração da Solução Inicial

Para iniciar a busca de uma solução pelo algoritmo, gera-se a solução inicial de maneira aleatória, respeitando-se as quantidades mínimas e máximas de equipamentos definidas em cada etapa do processo. Para geração da solução aleatória são utilizadas funções randômicas existentes no *software* MATLAB[®].

4.3.4 Processo de Busca Local

As buscas locais são realizadas pelo método de subida (*Uphill method*) com a estratégia *Best Improvement*. O movimento de vizinhança utilizado consiste em alterar, para um dos n primeiros elementos da solução, o número de equipamentos em uma etapa do processo de britagem, tanto para cima quanto para baixo, respeitando-se as quantidades mínima e máxima de equipamentos disponíveis por etapa. Para o último elemento ($n+1$), o movimento consiste em aumentar ou diminuir a taxa de alimentação em um valor *PREF*. Um exemplo deste movimento é ilustrado na Figura 4.7, na qual o número de equipamentos na primeira posição é alterado tanto para cima quanto para baixo.

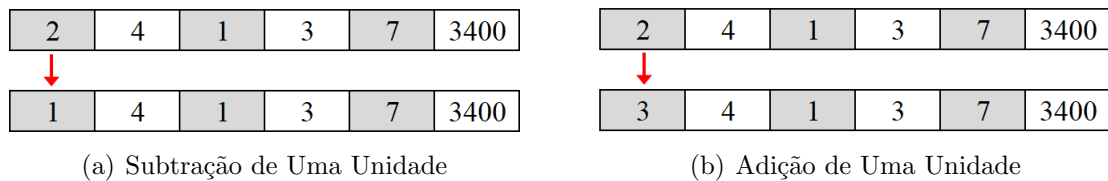


Figura 4.7: Exemplo de Movimento de Vizinhança

Considera-se mais dois vetores, nomeados de l (de *lower*) e u (de *upper*), para definir os limites inferior e superior de equipamentos disponíveis em cada etapa, bem como da taxa de alimentação.

Para ilustrar, seja a solução s , seja $PREF = 200$ e os vetores l e u abaixo:

$$s = (2, 4, 1, 3, 7, 3400)$$

$$l = (1, 1, 1, 1, 1, 3000)$$

$$u = (3, 5, 2, 5, 7, 3800)$$

Então essa solução tem os seguintes vizinhos:

$$s_1 = (1, 4, 1, 3, 7, 3400)$$

$$s_2 = (3, 4, 1, 3, 7, 3400)$$

$$s_3 = (2, 3, 1, 3, 7, 3400)$$

$$s_4 = (2, 5, 1, 3, 7, 3400)$$

$$s_5 = (2, 4, 2, 3, 7, 3400)$$

Não há o vizinho $(2, 4, 0, 3, 7, 3400)$ porque o limite inferior não é atendido.

$$s_6 = (2, 4, 1, 2, 7, 3400)$$

$$s_7 = (2, 4, 1, 4, 7, 3400)$$

$$s_8 = (2, 4, 1, 3, 6, 3400)$$

Não há o vizinho $(2, 4, 1, 3, 8, 3400)$ porque o limite superior não é atendido.

$$s_9 = (2, 4, 1, 3, 7, 3200)$$

$$s_{10} = (2, 4, 1, 3, 7, 3400)$$

Com essa representação é possível explorar todo o espaço de soluções do problema, considerando que a taxa possa ser discretizada apenas no valor $PREF$. Como há dois valores possíveis para cada posição, então o tamanho da vizinhança é facilmente determinado, sendo dada por $2(n + 1)$ vizinhos.

O pseudocódigo da busca local é apresentado pelo Algoritmo 4.4.

Algoritmo 4.4: Busca Local

Entrada: $s, l, u, VariacaoTaxa$

Saída: Solução s refinada

```

1  $s'' \leftarrow s$ ;
2  $melhorou \leftarrow TRUE$ ;
3 enquanto  $melhorou$  faça
4    $melhorou \leftarrow FALSE$ ;
5   para cada  $i \in s$  faça
6      $passo \leftarrow 1$ ;
7     se  $i = 6$  então
8        $passo \leftarrow VariacaoTaxa$ ;
9     Seja  $s'_+$  o resultado da soma do valor  $passo$  na posição  $i$  da solução  $s$ ;
10    se  $l(i) \leq s'_+(i) \leq u(i)$  então
11      se  $f(s'_+) > f(s'')$  então
12         $s'' \leftarrow s'_+$ ;
13    Seja  $s'_-$  o resultado da subtração do valor  $passo$  na posição  $i$  da solução  $s$ ;
14    se  $l(i) \leq s'_-(i) \leq u(i)$  então
15      se  $f(s'_-) > f(s'')$  então
16         $s'' \leftarrow s'_-$ ;
17    se  $f(s'') > f(s)$  então
18       $s \leftarrow s''$ ;
19       $melhorou \leftarrow TRUE$ ;
20 Retorne  $s$ ;

```

Nesta busca local parte-se de uma solução s e a cada passo analisam-se todos os seus vizinhos. Move-se para o melhor vizinho somente se ele melhorar a solução corrente, isto é, se ele aumentar a produção atual. Ao final, o método retorna um ótimo local com relação a essa vizinhança.

4.4 Implementação do Sistema de Suporte à Decisão

O algoritmo de otimização SILS-SIM foi implementado usando-se a IDE MATLAB® da *MathWorks* na versão R2016b. Para gerar a interface gráfica do sistema foi utilizado a ferramenta *App Designer* do MATLAB®. Os parâmetros do algoritmo foram fixados empiricamente nos valores: *i*) $t_{exec} = 10$ minutos; e *ii*) $iter_{max} = 5$.

A Figura 4.8 ilustra a interface desenvolvida para o sistema de suporte à decisão. Nesta interface o operador define os limites da taxa de produção por hora, os limites de equipamentos e o tamanho do ciclo do circuito de britagem (Tempo Sim.). Considerou-se para todas as simulações que todos os equipamentos estavam disponíveis e foram utilizados durante todo o tempo. Com os dados de entrada, o sistema sugere o número de alimentadores ligados em cada etapa do processo, a taxa de produção por hora e o cálculo da produção simulada no ciclo.

PARÂMETROS DE ENTRADA		SAÍDA DO ALGORITMO	
Valores de Taxa (t/h)		Número de Alimentadores Sugeridos	
Mínima	3000	Pilha Pulmão	4
Máxima	4015	Peneiramento Secundário	3
Parâmetros da Simulação		Britagem Terciária	4
Tempo de Simulação (h)	6	Britagem Quaternária	5
Número de Alimentadores		Peneiramento	12
	Mínimo	Máximo	
Pilha Pulmão	1	6	
Peneiramento Secundário	1	3	
Britagem Terciária	1	4	
Britagem Quaternária	1	8	
Peneiramento	1	12	
Resultado da Simulação			
Produção (t)	22579.61		
Taxa (t/h)	4015.00		
Tempo de Execução			
2693		Segundos	

Figura 4.8: Interface Gráfica do Sistema de Suporte à Decisão

4.5 Conclusão

Neste capítulo foi realizada uma introdução à otimização, destacando-se os principais conceitos e métodos de resolução de problemas. Na sequência foi realizada uma revisão

bibliográfica do assunto e pode-se perceber que são poucas as aplicações de RTO na mineração e nenhum trabalho foi encontrado sobre RTO aplicado em circuito de britagem. No que diz respeito às *simheuristics*, pode-se perceber que o assunto está em crescente evolução e diversas aplicações foram destacadas. Por fim, apresenta-se o algoritmo e o sistema de suporte a decisão propostos neste trabalho.

Capítulo 5

Resultados

Nesse capítulo serão apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento desta pesquisa. São simulados cenários reais e a solução encontrada pelo algoritmo de otimização é comparada com outras soluções a fim de comparar a sua efetividade. Também é realizada uma análise do consumo energético e, por fim, faz-se uma análise da convergência do algoritmo proposto.

5.1 Cenários Reais

De modo a comparar as soluções obtidas através do algoritmo de otimização e da solução trivial, na qual tem-se todos os equipamentos ligados, gerou-se uma terceira solução, chamada de manual, para efeitos de comparação. Na solução manual levou-se em consideração a taxa desejada de $4.015t/h$ (capacidade de projeto do circuito), as capacidades dos alimentadores em cada etapa do processo e os percentuais de material destinado para cada etapa, baseando-se em dados de projeto, para calcular quantos equipamentos ligados seriam necessários em cada etapa. A Tabela 5.1 evidencia os cálculos realizados, e como pode-se observar, uma vez que o cálculo do número de equipamentos não é exato ele foi arredondado para cima.

Tabela 5.1: Geração da Solução Manual

Etapa do Processo	Capacidade por AL (t)	Percentual de Taxa	Nº AL's Desejado	Nº AL's Sol. Manual
Pilha Pulmão	1.222	100%	3,29	4
Britagem Secundária	2.037	100%	1,97	2
Britagem Terciária	373	27,5%	2,96	3
Britagem Quaternária	274	47,2%	6,92	7
Peneiramento	647	100%	6,21	7

Seis cenários reais do circuito de britagem da empresa Vale S.A. na usina de Conceição

II foram utilizados para avaliar o algoritmo SILS-SIM. Em todos os cenários foi considerado um tempo de ciclo de 6 horas de operação. Para cada cenário é escolhido o melhor resultado de 5 execuções do algoritmo proposto.

5.1.1 Cenário 1

No cenário 1 considera-se que todos os equipamentos estão disponíveis no circuito de britagem e o minério de entrada tem granulometria com D_{80} de 60,63mm. O algoritmo SILS-SIM foi executado cinco vezes para esse cenário e o melhor resultado é exibido na Tabela 5.2. A coluna 1 apresenta as etapas do processo, as colunas 2 e 3 ilustram os limites mínimo e máximo de equipamentos por etapa e a coluna 4 mostra o melhor resultado encontrado pelo algoritmo SILS-SIM.

Tabela 5.2: Solução do Algoritmo no Cenário 1

Etapa do Processo	Número de equipamentos ligados		
	Mínimo	Máximo	Resultado
Pilha Pulmão	1	6	4
Britagem Secundária	1	3	3
Britagem Terciária	1	4	4
Britagem Quaternária	1	8	5
Peneiramento	1	12	12
Taxa	3.000	4.015	4.015

Pode-se observar que o algoritmo sugere a utilização de menos equipamentos que a quantidade máxima disponível. Na Figura 5.1 é ilustrado o comparativo da solução sugerida pelo algoritmo SILS-SIM, a solução com todos os equipamentos ligados e uma solução seguindo as estratégias utilizadas por um operador da área (chamada solução manual). Na solução do operador leva-se em consideração a taxa desejada, as capacidades dos alimentadores em cada etapa do processo e os percentuais de materiais destinados para cada etapa. Nessa abordagem são utilizados os dados de projeto para calcular quantos equipamentos devem ser ligados em cada etapa.

Pode-se verificar que a solução sugerida pelo algoritmo SILS-SIM gera um aumento de produção de 0,95% em relação à solução com todos os equipamentos ligados e 42,29% em relação à solução manual, utilizando-se um número menor de equipamentos. Houve uma redução de cerca de 23% no consumo energético dos britadores. Essa solução certifica que a utilização de todos os equipamentos na britagem não é a estratégia mais adequada. Na Figura 5.2 é mostrada a evolução da busca do algoritmo SILS-SIM, sendo possível acompanhar o valor de produção ao longo da busca.

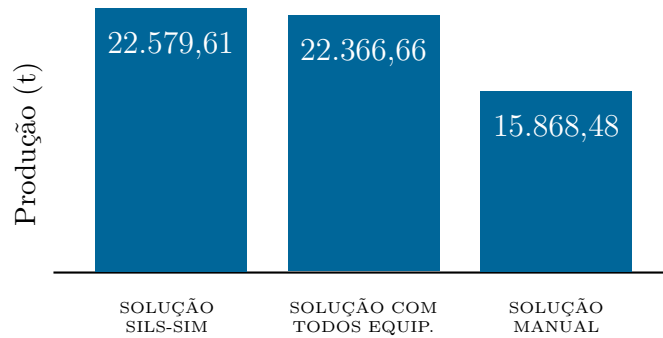


Figura 5.1: Produção de Três Soluções no Cenário 1

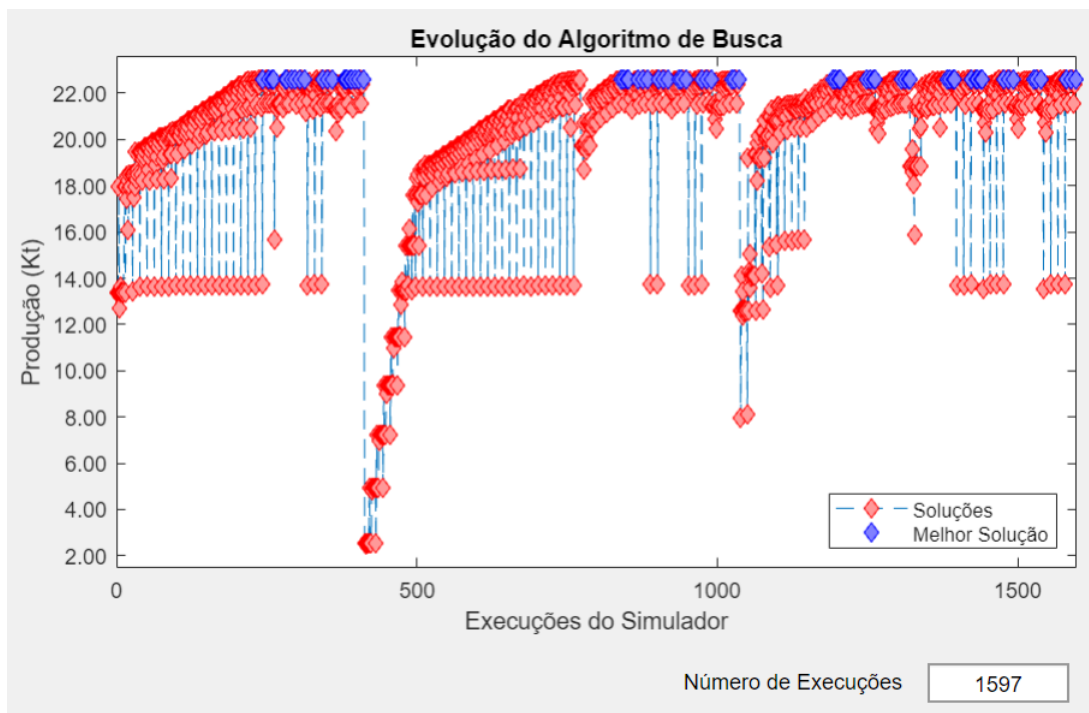


Figura 5.2: Evolução da Busca do Algoritmo SILS-SIM no Cenário 1

5.1.2 Cenário 2

No cenário 2 alguns equipamentos do circuito de britagem não estão disponíveis e a granulometria do minério de entrada é a mesma do cenário 1. Esta situação ocorre quando a operação de alguns equipamentos é interrompida para a realização de manutenções. Na Tabela 5.3 são apresentados os dados desse cenário e o melhor resultado dentre cinco execuções do algoritmo SILS-SIM.

Observa-se nos resultados da Tabela 5.3 que o algoritmo SILS-SIM também sugere a utilização de um número de equipamentos menor que o limite máximo em uma etapa do processo (Britagem Quaternária). Nessa etapa é sugerida a utilização de apenas 5 equipamentos. Na Figura 5.3 são comparados os resultados de produção da solução sugerida pelo algoritmo SILS-SIM e a da solução que utiliza todos equipamentos disponíveis. A solução manual não foi considerada porque ela é similar à solução com todos equipamentos

Tabela 5.3: Solução do Algoritmo no Cenário 2

Etapa do Processo	Número de equipamentos ligados		
	Mínimo	Máximo	Resultado
Pilha Pulmão	1	4	4
Britagem Secundária	1	2	2
Britagem Terciária	1	3	3
Britagem Quaternária	1	7	5
Peneiramento	1	10	10
Taxa	3.000	4.015	4.015

disponíveis.

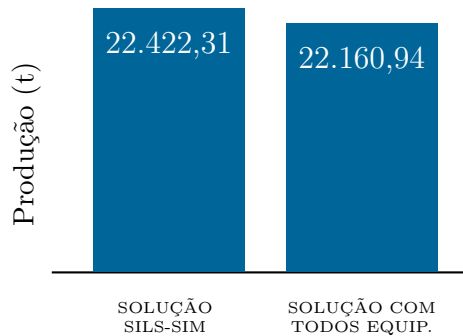


Figura 5.3: Produção de Duas Soluções no Cenário 2

Pode-se observar que a solução sugerida pelo algoritmo SILS-SIM gera uma produção 1,18% maior que a com todos os equipamentos ligados. Nesta solução são usados dois equipamentos a menos, gerando-se uma economia de energia estimada com os equipamentos desligados de aproximadamente 18%.

5.1.3 Cenário 3

No cenário 3 considera-se que todos os equipamentos estão disponíveis em todas as etapas do processo e a granulometria de entrada com D_{80} de $45,71mm$, sendo um valor menor que a utilizada nos cenários 1 e 2. O processo de britagem é sensível a variações de granulometria e, por isso, justifica-se a utilização do cenário 3. Na Tabela 5.4 são mostrados os dados do cenário 3 e o melhor resultado dentre cinco execuções do algoritmo SILS-SIM.

Na Tabela 5.4 percebe-se que o algoritmo SILS-SIM também sugere o uso de um número menor de equipamentos que o limite máximo disponível. Na Figura 5.4 são exibidas as produções para três soluções: *i*) Do algoritmo SILS-SIM; *ii*) Com todos os equipamentos ligados; e *iii*) Com as estratégias do operador (solução manual), a mesma usada no cenário 1.

Tabela 5.4: Solução do Algoritmo no Cenário 3

Etapa do Processo	Número de equipamentos ligados		
	Mínimo	Máximo	Resultado
Pilha Pulmão	1	6	4
Britagem Secundária	1	3	3
Britagem Terciária	1	4	3
Britagem Quaternária	1	8	5
Peneiramento	1	12	12
Taxa	3.000	4.015	4.015

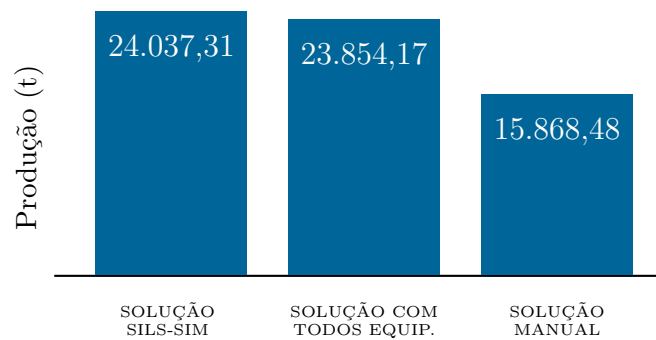


Figura 5.4: Produção de Três Soluções no Cenário 3

Pode-se observar também que a solução do algoritmo SILS-SIM gera uma produção 0,77% superior à solução com todos os equipamentos ligados, além de um número menor de equipamentos. Por outro lado, a solução manual fornece uma produção 33,98% menor que a solução do algoritmo. Nesta solução são utilizados 6 equipamentos a menos. Este número é significativo e implica em diversos ganhos indiretos, como economia de energia com os equipamentos interrompidos, aproximadamente 29%, e redução no desgaste dos equipamentos por menor uso.

5.1.4 Cenário 4

Semelhante ao cenário 3, considera-se neste cenário que todos os equipamentos estão disponíveis em todas as etapas do processo e a granulometria de entrada com D_{80} de $69,2mm$, sendo um valor maior que a utilizada nos cenários 1 e 2. Na Tabela 5.5 são apresentados os dados do cenário 4 e o melhor resultado também dentre cinco execuções do algoritmo SILS-SIM.

Na Tabela 5.5 percebe-se que o algoritmo SILS-SIM também sugere o uso de um número menor de equipamentos que o limite máximo disponível. Na Figura 5.5 são exibidas as produções para três soluções: *i*) Do algoritmo SILS-SIM; *ii*) Com todos os equipamentos ligados; e *iii*) Com as estratégias do operador (solução manual), a mesma

Tabela 5.5: Solução do Algoritmo no Cenário 4

Etapa do Processo	Número de equipamentos ligados		
	Mínimo	Máximo	Resultado
Pilha Pulmão	1	6	4
Britagem Secundária	1	3	3
Britagem Terciária	1	4	4
Britagem Quaternária	1	8	5
Peneiramento	1	12	12
Taxa	3.000	4.015	4.015

usada nos cenários 1 e 3.

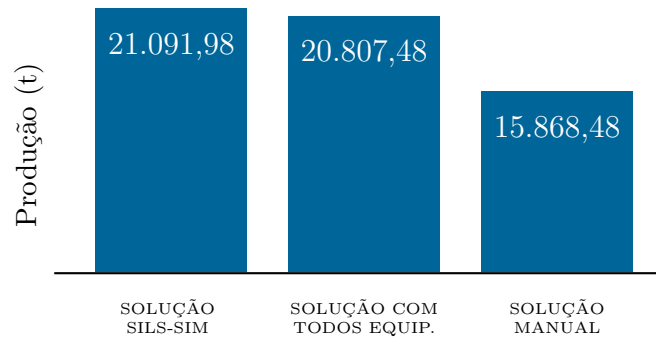


Figura 5.5: Produção de Três Soluções no Cenário 4

A solução do algoritmo SILS-SIM gera uma produção 1,37% maior que à solução com todos os equipamentos ligados e 32,92% maior que a solução manual.

5.1.5 Cenário 5

No cenário 5 considera-se que exista uma limitação de taxa de $3.000t/h$. Desse modo realizou-se a execução do algoritmo SILS-SIM considerando-se uma variação de taxa entre 2.000 e $3.000t/h$. A granulometria utilizada é com D_{80} de $60,63mm$, a mesma utilizada no cenário 1. Este cenário se justifica uma vez que podem ocorrer limitações físicas no circuito, como por exemplo, correias comprometidas com algum rasgo aguardando manutenção, limitação estrutural em alguma etapa do processo, restrição de oferta de minério para o circuito de britagem, entre outros. Na Tabela 5.6 o melhor resultado dentre cinco execuções do algoritmo SILS-SIM é apresentado.

O número de equipamentos sugerido pelo algoritmo SILS-SIM para o cenário 5 também é menor que o máximo disponível. Isso já era esperado uma vez que a limitação de taxa foi bastante significativa. Na Figura 5.6 são exibidas as produções para três soluções: *i*) Do algoritmo SILS-SIM; *ii*) Com todos os equipamentos ligados; e *iii*) Com as estratégias do

Tabela 5.6: Solução do Algoritmo no Cenário 5

Etapa do Processo	Número de equipamentos ligados		
	Mínimo	Máximo	Resultado
Pilha Pulmão	1	6	3
Britagem Secundária	1	3	3
Britagem Terciária	1	4	2
Britagem Quaternária	1	8	5
Peneiramento	1	12	12
Taxa	2.000	3.000	3.000

operador (solução manual), semelhante à apresentada na Tabela 5.1, porém considerando uma taxa de 3.000t/h.

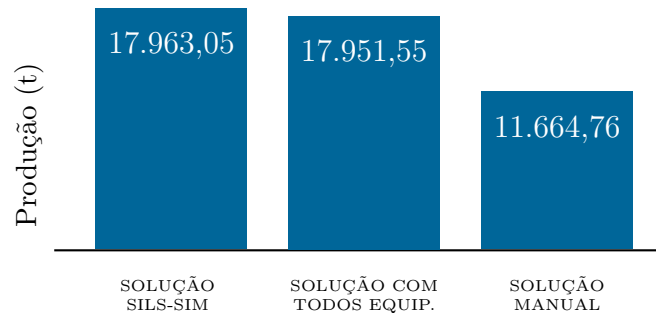


Figura 5.6: Produção de Três Soluções no Cenário 5

Os resultados do cálculo da solução manual são apresentados na Tabela 5.7. Assim como apresentado na Tabela 5.1, como o cálculo do número de equipamentos não é exato, o mesmo foi arredondado para cima.

Tabela 5.7: Geração da Solução Manual com Taxa Reduzida

Etapa do Processo	Capacidade por AL (t)	Percentual de Taxa	Nº AL's Desejado	Nº AL's Sol. Manual
Pilha Pulmão	1.222	100%	2,45	3
Britagem Secundária	2.037	100%	1,47	2
Britagem Terciária	373	27,5%	2,21	3
Britagem Quaternária	274	47,2%	5,17	6
Peneiramento	647	100%	4,64	5

5.1.6 Cenário 6

No cenário 6 considera-se que um dos silos do peneiramento está indisponível, ou seja, o número de peneiras é reduzido de 12 para 6. A granulometria de entrada é a mesma utilizada no cenário 1. Esse cenário é justificável pelo fato de ser possível manter a correia de alimentação e/ou o *tripper* de um dos lados do peneiramento e manter o outro lado em operação. Na Tabela 5.8 são mostrados os dados do cenário 6 e o melhor resultado dentre cinco execuções do algoritmo SILS-SIM.

Tabela 5.8: Solução do Algoritmo no Cenário 6

Etapa do Processo	Número de equipamentos ligados		
	Mínimo	Máximo	Resultado
Pilha Pulmão	1	6	4
Britagem Secundária	1	3	3
Britagem Terciária	1	4	1
Britagem Quaternária	1	8	3
Peneiramento	1	6	6
Taxa	3.000	4.015	4.015

Assim como nos demais cenários, na Tabela 5.8 mostra-se que o algoritmo SILS-SIM também sugere o uso de um número bem menor de equipamentos que o limite máximo disponível, o que já era de se esperar uma vez que existe uma limitação em metade da capacidade do peneiramento. Na Figura 5.7 é comparada a produção do algoritmo SILS-SIM com todos os equipamentos ligados. Assim como no cenário 2, a solução manual não foi considerada. Percebe-se mais uma vez que o algoritmo SILS-SIM apresentou uma produção 9,38% maior que a solução com todos equipamentos ligados.

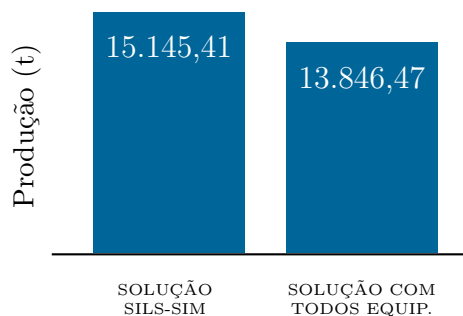


Figura 5.7: Produção de Duas Soluções no Cenário 6

5.2 Análise do Consumo de Energia

Realizou-se uma análise do consumo de energia para cada cenário simulado, considerando apenas os britadores, que são os equipamentos que possuem maior consumo energético no processo de britagem e também pelo fato desses equipamentos possuírem medição de potência ativa na planta real. Os valores de potência ativa para cada britador são mostrados na Tabela 5.9. Para obtenção desses valores utilizou como referência o consumo médio dos britadores em cada etapa do processo.

Tabela 5.9: Potência Ativa Britadores

Britador	Potência (<i>kW</i>)
Secundário	40,52
Terciário	70,62
Quaternário	82,68

A Figura 5.8 mostra o consumo energético dos britadores para cada cenário, comparando todos os equipamentos ligados com a solução proposta pelo algoritmo de otimização. Os dados são em *MWh* por um período de 6 horas de funcionamento, o que equivale a um turno de produção. Conforme pode-se observar, a redução de consumo é significativa para todos os cenários, chegando a aproximadamente 59% no cenário 6.

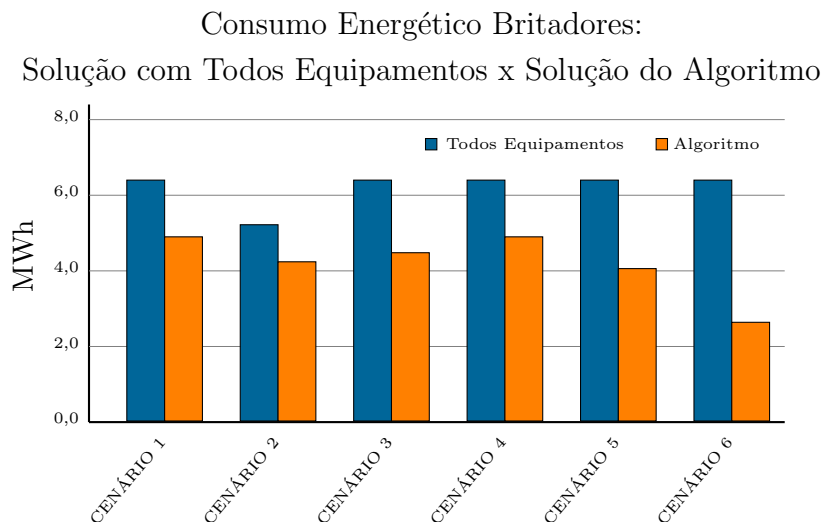


Figura 5.8: Consumo Energético Britadores

O consumo energético foi calculado apenas em função da quantidade de equipamentos em operação.

5.3 Análise da Convergência do SILS-SIM

A fim de validar o algoritmo desenvolvido e realizar uma análise de convergência do SILS-SIM, realizou-se o desenvolvimento de um algoritmo de força bruta, no qual são testadas todas as possibilidades de solução existentes. A ideia inicial do algoritmo era de percorrer todo o espaço de soluções do problema, porém ao realizar o cálculo do número de combinações possíveis, utilizando a quantidade máxima de equipamentos disponível por etapa e com a taxa variando de 3.000 a 4.015t/h, chegou-se à quantidade de 7.015.680 combinações. A Equação (5.1) apresenta o cálculo do número de combinações possíveis.

$$\begin{aligned} \text{Combinações} = & (NAPP_{max} - NAPP_{min} + 1) \cdot (NABS_{max} - NABS_{min} + 1) \cdot \\ & (NABT_{max} - NABT_{min} + 1) \cdot (NABQ_{max} - NABQ_{min} + 1) \cdot \\ & (NAPE_{max} - NAPE_{min} + 1) \cdot (TAXA_{max} - TAXA_{min} + 1) \end{aligned} \quad (5.1)$$

onde,

- $NAPP_{max}$ = número de alimentadores máximo da pilha pulmão;
- $NAPP_{min}$ = número de alimentadores mínimo da pilha pulmão;
- $NABS_{max}$ = número de alimentadores máximo da britagem secundária;
- $NABS_{min}$ = número de alimentadores mínimo da britagem secundária;
- $NABT_{max}$ = número de alimentadores máximo da britagem terciária;
- $NABT_{min}$ = número de alimentadores mínimo da britagem terciária;
- $NABQ_{max}$ = número de alimentadores máximo da britagem quaternária;
- $NABQ_{min}$ = número de alimentadores mínimo da britagem quaternária;
- $NAPE_{max}$ = número de alimentadores máximo do peneiramento;
- $NAPE_{min}$ = número de alimentadores mínimo do peneiramento;
- $TAXA_{max}$ = taxa máxima;
- $TAXA_{min}$ = taxa mínima.

Dessa maneira, para conseguir executar o algoritmo em um tempo razoável, limitou-se a quantidade mínima de equipamentos e a taxa desejada conforme Tabela 5.10.

Com essa limitação foram realizadas 10.368 execuções. Utilizando o mesmo computador que foi utilizado para as demais execuções do algoritmo desenvolvido, gastou-se um tempo de 65.043 segundos, o que equivale a 18,07 horas de execução total. O algoritmo desenvolvido foi configurado para todos os cenários para ser executado até que se atinja um tempo máximo de execução de 10 minutos ou 5 iterações sem melhora na função objetivo. Como o algoritmo é executado por 5 vezes e a melhor solução é retornada, no pior cenário gasta-se um tempo de 50 minutos, ou seja, 0,83 horas. Isso equivale a dizer que o algoritmo é 21,77 vezes mais rápido que o algoritmo de força bruta nessa instância do problema, considerando-se todas as limitações impostas para que ele fosse executado

Tabela 5.10: Número de Equipamentos e Taxa para Execução do Algoritmo de Força Bruta

Etapa do Processo	Mínimo	Máximo
Pilha Pulmão	3	6
Britagem Secundária	1	3
Britagem Terciária	2	4
Britagem Quaternária	3	8
Peneiramento	10	12
Taxa	4.000	4.015

em um tempo razoável.

O algoritmo proposto foi executado considerando a mesma granulometria do cenário 1 (D_{80} de 60,63mm). O algoritmo de força bruta retornou como melhor solução a mesma encontrada pelo algoritmo de otimização SILS-SIM, mostrando que a solução é um ótimo global. Isso demonstra a eficiência do algoritmo desenvolvido.

O pseudocódigo do algoritmo de força bruta é apresentado no Algoritmo 5.1. Ele possui como entradas o número mínimo e máximo de equipamentos em cada etapa, bem como a taxa mínima e máxima. Inicia-se o algoritmo com os valores mínimos e realizam-se todas as combinações possíveis. A solução que apresentar a melhor produção é retornada.

Algoritmo 5.1: Força Bruta

Entrada: $NAPP_{min}, NABS_{min}, NABT_{min}, NABQ_{min}, NAPE_{min}, TAXA_{min},$
 $NAPP_{max}, NABS_{max}, NABT_{max}, NABQ_{max}, NAPE_{max}, TAXA_{max}$

Saída: Melhor solução s

```

1  $s \leftarrow [NAPP_{min}, NABS_{min}, NABT_{min}, NABQ_{min}, NAPE_{min}, TAXA_{min}]$ ;
2 para  $i = NAPP_{min}$  até  $NAPP_{max}$  faça
3   para  $j = NABS_{min}$  até  $NABS_{max}$  faça
4     para  $k = NABT_{min}$  até  $NABT_{max}$  faça
5       para  $l = NABQ_{min}$  até  $NABQ_{max}$  faça
6         para  $m = NAPE_{min}$  até  $NAPE_{max}$  faça
7           para  $n = TAXA_{min}$  até  $TAXA_{max}$  faça
8              $s' \leftarrow [i, j, k, l, m, n]$ ;
9             se  $f(s') > f(s)$  então
10               $s \leftarrow s'$ ;
11 Retorne  $s$ ;

```

A Figura 5.9 apresenta a evolução do tempo de execução para cada iteração do algoritmo de força bruta. Conforme pode-se observar o tempo cresce de forma linear a cada iteração.

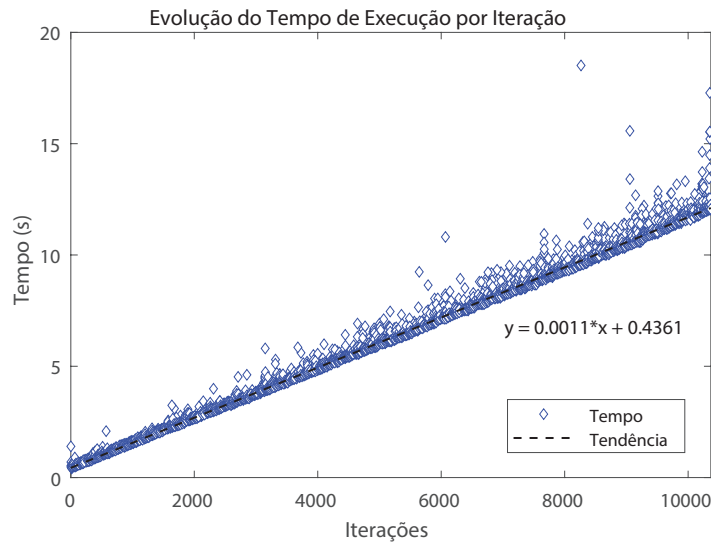


Figura 5.9: Tempo por Iteração do Algoritmo de Força Bruta

Utilizando a linha de tendência mostrada na Figura 5.9, se o algoritmo fosse executado nas 7.015.680 combinações possíveis, demoraria 24.612.945.977,1 segundos para ser executado, o que equivale a aproximadamente 26 anos. Isso mostra que é totalmente inviável realizar a busca da melhor solução por um algoritmo de força bruta utilizando todas as combinações possíveis.

5.4 Conclusão

Neste capítulo foram apresentados os resultados obtidos com o desenvolvimento deste trabalho. Foram simulados diversos cenários que podem ocorrer na planta real para comprovar a eficiência do algoritmo SILS-SIM desenvolvido. Em todos os cenários simulados os resultados obtidos com o algoritmo foram satisfatórios e alcançaram um valor de produção maior que comparado com todos os equipamentos disponíveis, chegando a mais de 9% no cenário 6. Fez-se, também, uma comparação do consumo energético dos britadores para os cenários simulados, mostrando uma redução significativa no consumo de energia em todos os cenários, comparado à todos equipamentos ligados, chegando a 36% no cenário 5 e a mais de 58% no cenário 6. Por fim, fez-se uma análise de convergência do algoritmo proposto, mostrando através de um algoritmo de força bruta que o algoritmo SILS-SIM é capaz de encontrar soluções ótimas em um tempo computacional baixo. O algoritmo de força bruta possui um tempo de execução inviável computacionalmente.

Capítulo 6

Conclusões e Perspectivas de Trabalhos Futuros

Neste trabalho abordou-se um problema de operação do circuito de britagem de uma indústria brasileira de mineração. Uma técnica de *simheuristic* foi utilizada para resolvê-lo. Nesta estratégia foi possível simular a otimização da produção de um processo de britagem variando-se o número de equipamentos ligados em cada etapa do processo, utilizando heurísticas de otimização atreladas a um simulador do processo. Com a utilização do método proposto foi possível aumentar a produção com menos equipamentos do que os atualmente em operação, o que contribui para uma melhor eficiência do circuito de britagem, menor consumo energético e redução de desgaste dos equipamentos. Chegou-se a uma redução de aproximadamente 58% de consumo energético em um dos cenários simulados e de 9% de ganho em produção em um outro cenário, o que representa um aumento de produção de 109.110 toneladas de minério de ferro em um mês, considerando-se um rendimento operacional de 70% do circuito de britagem.

Percebe-se que quanto mais grosso o material, maior a diferença em produção ao utilizar o otimizador. Isso se justifica pelo fato de que com o material mais grosso, mais sensível o circuito fica com a perda de eficiência dos britadores. Na etapa de peneiramento o número de equipamentos sugeridos pelo algoritmo sempre coincide com o máximo disponível. Isso faz sentido uma vez que não se tem nenhuma penalização em utilizar um número maior de peneiras.

Para um futuro próximo, está prevista a instalação de uma solução de análise de imagem que fará a medição de granulometria do material de forma *online*. Este sistema será instalado em quatro pontos da britagem:

- No momento de basculamento dos caminhões;
- Na alimentação da britagem secundária;
- Após a britagem terciária;

- Após a britagem quaternária.

Esses equipamentos poderão ser utilizados como parâmetros de entrada do otimizador desenvolvido e para implantar novas estratégias de controle no circuito de britagem. Sugere-se como trabalhos futuros um estudo mais detalhado das informações de granulometria fornecida por esses equipamentos, de modo a incorporá-los no algoritmo desenvolvido, uma vez que para simulação dos cenários foi considerada a granulometria de projeto para a planta e também criadas granulometrias hipotéticas para simular materiais mais grosseiros e mais finos.

As recomendações propostas pelo algoritmo podem ser alteradas por alguns fatores externos, como por exemplo, uma variação drástica e repentina da granulometria do material que alimenta o processo de britagem, causada por alterações nas frentes de lavra que alimentam o circuito; variação da taxa de fornecimento de minério pela mina para o processo de britagem, causando uma restrição de fornecimento de material. Dessa forma, propõe-se uma avaliação mais detalhada desses pontos, de modo a incorporar essas informações na tomada de decisão do algoritmo, propiciando resultados mais assertivos para auxílio na tomada de decisão pelo operador da planta de quantos equipamentos devem operar em cada etapa do circuito de britagem.

Outro ponto que se propõe a ser estudado é tratar o problema como de otimização multiobjetivo, buscando minimizar o consumo energético e maximizar a produção. Para isso, técnicas de resolução de problemas de otimização multiobjetivo deverão ser avaliadas.

Referências Bibliográficas

- ALBUQUERQUE, K., SILVA, H., TEODORO, E., et al.. “Averaging Level Control of Bulk Solid Material using a Tripper Car (18th IFAC Symposium on Automation in Mining, Mineral and Metal Processing)”, *IFAC Proceedings Volumes*, 2019.
- ARENALES, M., MORABITO, R., ARMENTANO, V., et al.. *Pesquisa operacional para cursos de engenharia*. Elsevier Brasil, 2015.
- CALDAS, F. N., MARTINS, A. X. “Proposed Solutions to the Tripper Car Positioning Problem.” Em: *Proceedings of the 22nd International Conference on Enterprise Information Systems (ICEIS)*, pp. 344–352, Funchal, Portugal, 2018. ISBN: 978-989-758-298-1. doi: 10.5220/0006806303440352. Disponível em: <<https://doi.org/10.5220/0006806303440352>>.
- CHACHUAT, B., SRINIVASAN, B., BONVIN, D. “Adaptation strategies for real-time optimization”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 33, n. 10, pp. 1557–1567, 2009. ISSN: 00981354. doi: 10.1016/j.compchemeng.2009.04.014.
- COETZEE, L. C., RAMONOTSI, M. “Applying StarCS RN MPC with Real-Time Optimiser to Pilanesberg Platinum Mines Primary UG2 Milling Circuit”, *IFAC-PapersOnLine*, v. 49, n. 20, pp. 78–83, 2016. ISSN: 24058963. doi: 10.1016/j.ifacol.2016.10.100. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.ifacol.2016.10.100>>.
- COTA, L. P. *Abordagens exatas e heurísticas para o problema de sequenciamento em máquinas paralelas não relacionadas com tempos de preparação dependentes da sequência*. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, UFMG, Belo Horizonte, Brasil, 2018.
- CUTLER, C. R., PERRY, R. T. “Real time optimization with multivariable control is required to maximize profits”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 7, n. 5, pp. 663–667, 1983. ISSN: 00981354. doi: 10.1016/0098-1354(83)80010-6.
- DE ARMAS, J., JUAN, A. A., MARQUÈS, J. M., et al.. “Solving the deterministic and stochastic uncapacitated facility location problem: from a heuristic to a simheu-

- ristic”, *Journal of the Operational Research Society*, v. 68, n. 10, pp. 1161–1176, 2017. ISSN: 1476-9360. doi: 10.1057/s41274-016-0155-6.
- EPE. *Anuário Estatístico de Energia Elétrica*. Relatório técnico, Ministério de Minas e Energia, Brasília, 2018. Disponível em: <<http://epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anuario2018vf.pdf>>.
- FIGUEIRA, H. V. D. O., ALMEIDA, S. L. M. D., LUZ, A. B. D. “Cominuição”. Em: Luz, A. B. d., Sampaio, J. A., Almeida, S. L. M. d. (Eds.), *Tratamento de Minérios*, 4ª edição ed., cap. Capítulo 4, pp. 113–194, Rio de Janeiro: CETEM-CNPq-MCT, 2004. ISBN: 8572272046.
- GLOVER, F. W., KOCHENBERGER, G. A. *Handbook of metaheuristics*, v. 57. Springer Science & Business Media, 2006.
- GONZÁLEZ-MARTIN, S., JUAN, A. A., RIERA, D., et al.. “A simheuristic algorithm for solving the arc routing problem with stochastic demands”, *Journal of Simulation*, v. 12, n. 1, pp. 53–66, 2018. ISSN: 1747-7786. doi: 10.1057/jos.2016.11.
- GONZÁLEZ-NEIRA, E., MONTOYA-TORRES, J. “A simheuristic for bi-objective stochastic permutation flow shop scheduling problem”, *Journal of Project Management*, v. 4, n. 2, pp. 57–80, 2019. doi: 10.5267/j.jpmp.2019.1.003.
- GONZÁLEZ-NEIRA, E. M., FERONE, D., HATAMI, S., et al.. “A biased-randomized simheuristic for the distributed assembly permutation flowshop problem with stochastic processing times”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 79, pp. 23–36, 2017. doi: 10.5267/j.jpmp.2019.1.003.
- GRASAS, A., JUAN, A. A., LOURENÇO, H. R. “SimILS: a simulation-based extension of the iterated local search metaheuristic for stochastic combinatorial optimization”, *Journal of Simulation*, v. 10, n. 1, pp. 69–77, 2016. doi: 10.1057/jos.2014.25.
- GRULER, A., FIKAR, C., JUAN, A. A., et al.. “Supporting multi-depot and stochastic waste collection management in clustered urban areas via simulation-optimization”, *Journal of simulation*, v. 11, n. 1, pp. 11–19, 2017a. ISSN: 1747-7786. doi: 10.1057/s41273-016-0002-4.
- GRULER, A., QUINTERO-ARAÚJO, C. L., CALVET, L., et al.. “Waste collection under uncertainty: a simheuristic based on variable neighbourhood search”, *European Journal of Industrial Engineering*, v. 11, n. 2, pp. 228–255, 2017b. doi: 10.1504/EJIE.2017.083257.

- GRULER, A., PANADERO, J., DE ARMAS, J., et al.. “Combining variable neighborhood search with simulation for the inventory routing problem with stochastic demands and stock-outs”, *Computers & Industrial Engineering*, v. 123, pp. 278–288, 2018a. doi: 10.1016/j.cie.2018.06.036.
- GRULER, A., PANADERO, J., DE ARMAS, J., et al.. “A variable neighborhood search simheuristic for the multiperiod inventory routing problem with stochastic demands”, *International Transactions in Operational Research*, 2018b. doi: 10.1111/itor.12540.
- GUIMARANS, D., ARIAS, POLAND MOTA, M. M. “Large neighbourhood search and simulation for disruption management in the airline industry”. Em: *Applied Simulation and Optimization*, Springer, pp. 169–201, 2015. ISBN: 978-3-319-15033-8. doi: 10.1007/978-3-319-15033-8_6. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-15033-8_6>.
- GUIMARANS, D., DOMINGUEZ, O., PANADERO, J., et al.. “A simheuristic approach for the two-dimensional vehicle routing problem with stochastic travel times”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 89, pp. 1–14, 2018. doi: 10.1016/j.simpat.2018.09.004.
- GUIMARÃES NETO, J. F. “Otimização de Processos Aplicada na Indústria”, *Intech América do Sul*, v. 135, n. 41, pp. 1–8, 2011.
- HATAMI, S., CALVET, L., FERNÁNDEZ-VIAGAS, V., et al.. “A simheuristic algorithm to set up starting times in the stochastic parallel flowshop problem”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 86, pp. 55–71, 2018. doi: 10.1016/j.simpat.2018.04.005.
- ITÄVUO, P., HULTHÉN, E., YAHYAEI, M., et al.. “Mass balance control of crushing circuits”, *Minerals Engineering*, v. 135, pp. 37–47, 2019. doi: 10.1016/j.mineng.2019.02.033.
- JACOBSON, D., JANSSEN, P., URBINATTI, V. “Cavity level’s effect on cone crusher performance and production”. Em: *Proceedings of 7th International Mineral Processing Seminar (Procemin)*. Santiago, Chile, pp. 15–21, 2010.
- JUAN, A. A., FAULÍN, J., JORBA, J., et al.. “On the use of monte carlo simulation, cache and splitting techniques to improve the clarke and wright savings heuristics”, *Journal of the Operational Research Society*, v. 62, n. 6, pp. 1085–1097, 2011. doi: 10.1057/jors.2010.29.

- JUAN, A. A., FAULIN, J., JORBA, J., et al.. “Using parallel & distributed computing for real-time solving of vehicle routing problems with stochastic demands”, *Annals of Operations Research*, v. 207, n. 1, pp. 43–65, 2013. doi: 10.1007/s10479-011-0918-z.
- JUAN, A. A., BARRIOS, B. B., VALLADA, E., et al.. “A simheuristic algorithm for solving the permutation flow shop problem with stochastic processing times”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 46, pp. 101–117, 2014a. doi: 10.1016/j.simpat.2014.02.005.
- JUAN, A. A., GRASMAN, S. E., CACERES-CRUZ, J., et al.. “A simheuristic algorithm for the single-period stochastic inventory-routing problem with stock-outs”, *Simulation Modelling Practice and Theory*, v. 46, pp. 40–52, 2014b. doi: 10.1016/j.simpat.2013.11.008.
- JUAN, A. A., FAULIN, J., GRASMAN, S. E., et al.. “A review of simheuristics: Extending metaheuristics to deal with stochastic combinatorial optimization problems”, *Operations Research Perspectives*, v. 2, pp. 62–72, 2015. doi: 10.1016/j.orp.2015.03.001.
- KARRA, V. “Development of a model for predicting the screening performance of a vibrating screen”, *CIM bulletin*, v. 72, n. 804, pp. 167–171, 1979.
- KING, R. P. *Modeling and simulation of mineral processing systems*. Elsevier, 2012.
- LESTAGE, R., POMERLEAU, A., HODOUIN, D. “Constrained real-time optimization of a grinding circuit using steady-state linear programming supervisory control”, *Powder Technology*, v. 124, n. 3, pp. 254–263, 2002. ISSN: 00325910. doi: 10.1016/S0032-5910(02)00028-1.
- LOURENÇO, H. R., MARTIN, O. C., STÜTZLE, T. “Iterated local search”. Em: *Handbook of metaheuristics*, Springer, pp. 320–353, 2003. doi: 10.1007/0-306-48056-5_11.
- LUENBERGER, D. G., YE, Y. *Linear and Nonlinear Programming*. Springer Publishing Company, Incorporated, 2015. ISBN: 3319188410, 9783319188416.
- MULLER, D., DE VILLIERS, P., HUMPHRIES, G. “A Holistic Approach to Control and Optimisation of an Industrial Crushing Circuit”, *IFAC Proceedings Volumes*, v. 43, n. 9, pp. 142–146, 2010. doi: 10.3182/20100802-3-ZA-2014.00032.
- NAVIA, D., VILLEGAS, D., CORNEJO, I., et al.. “Real-time optimization for a laboratory-scale flotation column”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 86, pp. 62–74, 2016. ISSN: 00981354. doi: 10.1016/j.compchemeng.2015.12.

006. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2015.12.006>>.

PAGÈS-BERNAUS, A., RAMALHINHO, H., JUAN, A. A., et al.. “Designing e-commerce supply chains: a stochastic facility–location approach”, *International Transactions in Operational Research*, v. 26, n. 2, pp. 507–528, 2019. doi: 10.1111/itor.12433.

PANADERO, J., DOERING, J., KIZYS, R., et al.. “A variable neighborhood search simheuristic for project portfolio selection under uncertainty”, *Journal of Heuristics*, pp. 1–23, 2018. doi: 10.1007/s10732-018-9367-z.

REINSMA, J. A., PENNA, P. H. V., SOUZA, M. J. F. “Um algoritmo simples e eficiente para resolução do problema do caixeiro viajante generalizado”. Em: *Anais do L Simpósio Brasileiro de Pesquisa Operacional*, Rio de Janeiro, RJ, 2018. SOBRAPO.

SANTANA, D. D. C., CHARBEL, P. A. “Notas de Aula do Curso Técnico de Mineração - Tratamento de Minérios II - Britagem.” 2009.

SEBORG, D. E., MELLICHAMP, D. A., EDGAR, T. F., et al.. “Process Dynamics and Control”. 2004. Disponível em: <http://books.google.pt/books/about/Process_Dynamics_and_Control.html?id=_PQ42k0vtfwC&pgis=1>.

SIARRY, P. *Metaheuristics*. Springer, 2016.

SILVEIRA, M. A. D. C. W. “Análise da Britabilidade de Minérios e Previsão da Capacidade de Britadores Cônicos”. 2009. ISSN: 02706210.

SOUZA, G. D., ODLOAK, D., ZANIN, A. C. “Real time optimization (RTO) with model predictive control (MPC)”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 34, n. 12, pp. 1999–2006, 2010. ISSN: 00981354. doi: 10.1016/j.compchemeng.2010.07.001. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.compchemeng.2010.07.001>>.

WILLS, B. A., NAPIER-MUNN, T. *Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. N. October. 2006. ISBN: 0750644508. doi: 10.1016/B978-075064450-1/50003-5.

WINSTON, W. L., GOLDBERG, J. B. *Operations research: applications and algorithms*, v. 3. Thomson Brooks/Cole Belmont, 2004.

Apêndice A

Trabalhos Gerados

Seguem abaixo os artigos gerados ao longo do desenvolvimento desta dissertação:

- Santos, M. S.; Euzébio, T. A. M. Otimização em tempo Real na Mineração de Ferro: Uma Revisão Bibliográfica e Possíveis Aplicações , p. 169-176. In: 22º Seminário de Automação e TI, São Paulo, 2018. ISSN: 2594-5335 , DOI 10.5151/2237-0234-31679. **(PUBLICADO)**;
- Santos, M. S.; Pinto, T. V. B.; Lopes Júnior, E.; Cota, L. P.; Souza, M. J. F.; Euzébio, T. A. M. Aplicação de *Simheuristic* para Operação Eficiente de um Circuito de Britagem. In: 14º Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente - SBAI, Ouro Preto, 2019. **(PUBLICADO)**;
- Santos, M. S.; Pinto, T. V. B.; Lopes Júnior, E.; Cota, L. P.; Souza, M. J. F.; Euzébio, T. A. M. *Simheuristic-based Decision Support System for an Iron Ore Crusher Circuit Efficiency Increase*. In: *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 2019. **(SUBMETIDO)**.