



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

**MÉTODO PARA AJUSTAR DINAMICAMENTE OS PARÂMETROS DE
MOINHO DE MINÉRIO DE FERRO EM LABORATÓRIO DE ANÁLISE
QUÍMICA**

Gabriel Duarte Lott

**Ouro Preto
Agosto de 2019**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

L884m Lott, Gabriel Duarte .
Método para ajustar dinamicamente os parâmetros de moinho de Minério de Ferro em laboratório de análise química. [manuscrito] / Gabriel Duarte Lott. - 2019.
64 f.: il.: color., gráf., tab..

Orientador: Prof. Dr. Frederico Gadelha Guimarães.
Coorientador: Prof. Dr. Thiago Antônio Melo Euzébio.
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. Moagem. 2. Projeto de Experimentos. 3. Lógica Fuzzy. 4. Laboratório. 5. Análise Química. I. Lott, Gabriel Duarte . II. Euzébio, Thiago Antônio Melo. III. Guimarães, Frederico Gadelha. IV. Universidade Federal de Ouro Preto. V. Título.

CDU 681.5:622.2

Gabriel Duarte Lott

**MÉTODO PARA AJUSTAR DINAMICAMENTE OS PARÂMETROS DE
MOINHO DE MINÉRIO DE FERRO EM LABORATÓRIO DE ANÁLISE
QUÍMICA**

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. Frederico G. Guimarães

Coorientador: Prof. D.Sc. Thiago A. Melo Euzébio

Ouro Preto, MG – Brasil

Agosto de 2019

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

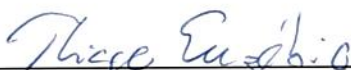
Método para Ajustar Dinamicamente os Parâmetros de um Moinho de Minério
de Ferro em um Laboratório de Análise Química

Gabriel Duarte Lott

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



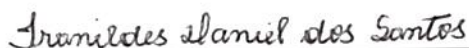
D.Sc. Frederico Gadelha Guimarães
Orientador – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)



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



D.Sc. José Mário Araújo
Membro externo – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Bahia (IFBA)



D.Sc. Iranildes Daniel dos Santos
Membro interno - Instituto Tecnológico Vale Mineração (ITV-MI)



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

Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer aos meus orientadores, Thiago e Frederico, pela receptividade, paciência, profissionalismo e empenho demonstrados desde a concepção da ideia do trabalho, orientando as atividades e mostrando o caminho para seguir o trabalho.

Em seguida, quero agradecer ao Vicentino e ao Fernando pela oportunidade de realizar o mestrado. A toda a equipe da gerência de automação e laboratório pela experiência compartilhada, recursos disponibilizados e apoio constante, os quais foram cruciais para a realização dos estudos e testes em campo.

Ao ITV, UFOP e todos os professores que estiveram dedicando um pouco do seu tempo para compartilhar todo o saber acumulado ao longo de suas jornadas, nos orientando e auxiliando na minha formação.

Agradecer também aos meus pais, Elton e Giszele, e a meu irmão Augusto, por serem meu porto seguro nos momentos de maiores dificuldades durante os últimos dois anos, sempre acreditando nas minhas capacidades e entendendo os momentos de reclusão total.

A minha noiva Lílian por todo amor, carinho, companheirismo e incentivo demonstrados em todos os momentos dessa caminhada. Me incentivando com palavras confortantes e encorajadoras nos momentos mais cruciais dessa jornada. Por fim, agradeço a todos aqueles que não foram nominalmente citados mas que contribuíram, de forma direta ou indireta, para a realização desta dissertação.

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.

A todos vocês, o meu 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.)

MÉTODO PARA AJUSTAR DINAMICAMENTE OS PARÂMETROS DE MOINHO DE MINÉRIO DE FERRO EM LABORATÓRIO DE ANÁLISE QUÍMICA

Gabriel Duarte Lott

Agosto/2019

Orientadores: Frederico G. Guimarães
Thiago A. Melo Euzébio

O processo de análises físicas e químicas de amostras de minério de ferro é crucial para avaliação do tipo e da qualidade do minério que está sendo lavrado e beneficiado nas operações das empresas mineradoras. Garantir a precisão e exatidão das análises químicas é um foco constante da equipe de trabalho do laboratório localizado na mina de Cauê no Brasil. Informações confiáveis são necessárias para otimizar corretamente a operação da usina de beneficiamento e para ser usada para fazer a precificação do minério de ferro. Contudo, a dinâmica de operação do processo bem como a utilização não uniforme e desgaste natural dos equipamentos provoca um aumento na variabilidade das análises químicas. Alguns parâmetros do equipamento podem ser ajustados visando uma maior precisão dos resultados. A aplicação da técnica de planejamento de experimentos (DoE) permite determinar os fatores (parâmetros) e os níveis (diferentes valores) a serem testados a fim de avaliar estatisticamente a relação entre as variáveis de entrada do problema (parâmetros do equipamento) e as variáveis de saída (percentual dos elementos analisados). Testes realizados indicaram um aumento dos percentuais de ferro e redução dos percentuais de sílica ao se aumentar a velocidade de rotação e o tempo de pulverização.

Palavras-chave: Moagem, Planejamento de Experimentos, Análise Química.

Macrotema: Usina; **Linha de Pesquisa:** Análise e Projeto de Sistemas de Controle Avançado; **Tema:** Redução de Variabilidade e Melhoria de Controle; **Área Relacionada da Vale:** Laboratório Cauê.

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.)

METHOD FOR DINAMICALLY ADJUSTING THE PARAMETERS OF AN IRON
ORE MILL IN A CHEMICAL ANALYSIS LABORATORY

Gabriel Duarte Lott

August/2019

Advisors: Frederico G. Guimarães

Thiago A. Melo Euzébio

The process of physically and chemically analyzing iron ore samples is crucial to identifying the type and quality of ore being mined and processed by mining companies. Guaranteeing the accuracy and precision of chemical analysis is a constant focus of the laboratory staff at the Caue mine in Brazil. The reliable information is required to optimize the mining plant operation and to price the iron ore. However, the dynamic nature of the processing operation and non-uniform wear and tear on the equipment increases the variability of the chemical analyses. Several parameters for the machines can be adjusted for accurate results. The design of experiment (DoE) technique enables determining the factors (parameters) and levels (different values) that must be tested to statistically evaluate the relationship between the input (percentage of elements analyzed) and output variables (parameters of the equipment). Tests performed indicated an increase in the iron percentage and a decrease in the silica percentage with increasing mill rotation speed and pulverization time.

Keywords: Milling, Design of Experiments (DoE), Chemical Analysis.

Macrotheme: Mineral Processing Plant; **Research Line:** Analyze and Project of Advanced Process Control; **Theme:** Variance Reduction and Control Loop Performance; **Related Area of Vale:** Caue Laboratory.

Lista de Figuras

1.1	Setores brasileiros com maior consumo de aço.	1
1.2	Os desafios da indústria mineral	2
1.3	Variação do preço do concentrado com teor 58%Fe em relação ao de 62%. .	3
1.4	Cadeia de produção da mineração.	3
1.5	Fluxo de processo – laboratório de Itabira	5
1.6	Laboratório automatizado da Vale em Itabira/MG.	6
1.7	Repetição diária (%) preparação e confecção da amostra para re-análise. .	8
1.8	Relação %SiO ₂ na alimentação da flotação x dosagem de amina.	8
1.9	Sobredosagem provocada por resultados incorretos.	9
2.1	Início da exploração de minério de ferro na mina de Cauê	11
2.2	Início da operação do laboratório da Vale em Itabira/MG.	12
2.3	Fluxograma típico de tratamento de minério	14
2.4	Quantitativo mensal de amostras analisadas entre 2017/2018.	17
2.5	Disponibilidade Física (%) diária da planta automatizada do laboratório de Itabira.	18
2.6	Verificação dos corpos moedores utilizados nos Centaurus	19
2.7	Equipamento Centaurus	20
2.8	Mecanismos de fratura e distribuição dos fragmentos	21
2.9	Distribuição granulométrica por moinho Centaurus	21
2.10	Curva intensidade x teor de Fe.	22
2.11	Configuração do Centaurus e Raios-x: forma ideal x forma prática.	22
2.12	Preparação das amostras de minério para moinhos Centaurus.	24
2.13	Diferença entre os Centaurus	24
2.14	Curva GET – Cent_SP3_2.	25
3.1	A aplicação do DOE em todo o mundo no período de 1920 a 2018	27
3.2	Experimento fatorial com 2 fatores – resposta (y) nos vértices	29
3.3	Experimento fatorial sem (esq) e com (dir) interação entre os fatores	30
3.4	Planejamento de Experimentos - DoE	32
3.5	Variação do tempo de moagem x estequiometria amostra	33
3.6	Variação do tempo de moagem x granulometria amostra	33

3.7	Distribuição granulométrica (granulômetro a laser)	34
4.1	Exemplo de regra heurística.	37
4.2	Composição do mecanismo de inferência Fuzzy	38
4.3	Pesquisa sobre % de utilização de APC na indústria	39
4.4	Funções de pertinência – teores de ferro e sílica.	43
5.1	Correção única do tempo de moagem do Cent_2_SP02 - SUT.	45
5.2	Distribuição estatística dos dados químicos das amostras SUT com correção única.	46
5.3	Correção única do tempo de moagem do Cent_2_SP02 - ALP.	47
5.4	Distribuição estatística dos dados químicos das amostras ALP com correção única.	48
5.5	Correção contínua do tempo de moagem do Cent_2_SP02 - SUT.	49
5.6	Distribuição estatística dos dados químicos das amostras SUT com correção contínua.	50
5.7	Correção contínua do tempo de moagem do Cent_2_SP02 - ALP.	51
5.8	Distribuição estatística dos dados químicos das amostras ALP com correção contínua.	52

Lista de Tabelas

4.1	Fuzzificação - Variável Fuzzy % Fe de Entrada	42
4.2	Fuzzificação - Variável Fuzzy % SiO_2 de Entrada	42
4.3	Regras de inferência fuzzy das variáveis de entrada	42
4.4	Variáveis fuzzy de Saída - Defuzzificação	43
5.1	Erro quadrático médio – correção única - SUT	45
5.2	Erro quadrático médio – correção única - ALP	47
5.3	Erro quadrático médio – correção contínua - SUT	49
5.4	Erro quadrático médio – correção contínua - ALP	51

Lista de Abreviaturas e Siglas

ALFTM Alimentação da flotação

DF Disponibilidade física

DoE Design of Experiments

EFVM Estrada de Ferro Vitória Minas

Fe Ferro

GET Geral Itabira (Curva Raios-x)

ITV Instituto Tecnológico Vale

MPC Model Predictive Control (Controle Preditivo baseado em modelos)

OFAT One Factor At Time

PF Produto final

SiO₂ Sílica

SUT Super Fino Itabira (Curva Raios-x)

UFOP Universidade Federal de Ouro Preto

Glossário

beneficiamento - Um conjunto de processos pelos quais o minério advindo das minas é reduzido a partículas que podem ser separadas em mineral e refugo (resíduo). 16

britagem - É o primeiro estágio mecânico de cominuição de minérios. A britagem reduz as partículas do minério lavrado até a granulometria adequada à operação de moagem. 15

Centaurus - Equipamento de laboratório responsável pelas etapas de pulverização e prensagem de amostras de minério de ferro para análise química em equipamento de raios-x.. 6, 7, 23, 31, 53

cominuição - Fragmentação, trituração. Redução de tamanho das partículas minerais. 20, 21

granulometria - Estudo das dimensões das partículas de diferentes tamanhos, tendo como referência aberturas de peneiras padronizadas. 4, 13, 20–22, 33–35

itabirito - Rocha bandada, alternando níveis milimétricos a centimétricos de hematita (com ou sem magnetita) com níveis siliáticos, geralmente de quartzo. 12

lavra - Conjunto de operações necessárias à extração industrial de minerais de uma jazida. 23

mina - Jazida em lavra cujo produto tem como características principais suas propriedades químicas ou mineralógicas. 11, 16, 40, 54

mineral - Composto inorgânico natural, sólido, com composição química definida e propriedades físicas características (como estrutura cristalina, cor, dureza, brilho, etc.). 12, 16, 35, 39, 40

mineralogia - Ramo da geologia que estuda os minerais, sua gênese e evolução. 23

mineração - Atividade econômica relacionada ao aproveitamento de jazidas minerais. 12, 19

minério - Qualquer substância mineral da qual se pode extrair economicamente um ou mais metais. 11, 23

moagem - Operação de fragmentação fina obtendo-se nela um produto adequado à concentração ou a qualquer outro processo industrial (pelotização, lixiviação, combustão etc). 2, 15, 16, 19, 20, 32, 40, 44, 52, 53

rejeito - Produto descartável da operação de concentração. Contém a maior parte dos minerais não valiosos de um minério (ganga). 40

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contexto	1
1.2	Proposta do trabalho	5
1.3	Motivação	7
1.4	Objetivos	10
1.5	Hipóteses do trabalho	10
2	LABORATÓRIO DE ANÁLISE QUÍMICA NA INDÚSTRIA MINE- RAL	11
2.1	Histórico de operação do laboratório	11
2.1.1	Funcionamento de um laboratório de análises físico/ químicas	13
2.2	Projeto de automação do laboratório	16
2.3	Definição do problema	17
2.3.1	Centaurus: equipamento de moagem e prensagem do laboratório de Itabira	19
2.3.2	Análise de espectrometria de fluorescência de raios-x e as curvas padrões de referência	22
3	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS	26
3.1	Planejamento de experimentos: ferramenta para investigação de problemas	26
3.2	Procedimento de uma pesquisa experimental	27
3.3	Exemplos práticos de utilização da metodologia no ambiente industrial . .	30
3.4	Aplicação de planejamento de experimentos no problema do laboratório . .	31
3.5	Seleção do parâmetro alvo	32
4	CONTROLE ESPECIALISTA	35
4.1	Avanço da utilização de tecnologia no ambiente industrial	35
4.2	Sistemas especialistas utilizando lógica fuzzy	36
4.3	Exemplos práticos de utilização de sistemas especialistas fuzzy na indústria	40
4.4	Aplicação do sistema fuzzy no problema do laboratório	41

5	RESULTADOS	44
5.1	Correção única do tempo de moagem – baseado no histórico da amostra . .	44
5.2	Correção contínua do tempo de moagem – baseado na última amostra . . .	48
5.3	Discussão dos resultados	52
6	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	53
6.1	Considerações finais	53
6.2	Trabalhos futuros	54
	Referências Bibliográficas	55
A	Apendice A	58

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 Contexto

O minério de ferro é um insumo essencial na sociedade. E à medida em que as sociedades se desenvolvem e evoluem, maior é a demanda das populações para obtenção e utilização desse mineral. Para atividades no campo ou nas cidades, nas grandes ou pequenas indústrias de todos os setores, utiliza-se o minério de ferro em algum segmento do processo (BENVINDO DA LUZ *et al.*, 2004). A Figura 1.1 apresenta os setores com maior consumo de aço, produzido nas siderúrgicas a partir do minério de ferro, no Brasil. Construção civil, bens de capital e automotivo são os setores com uso intensivo desse insumo.

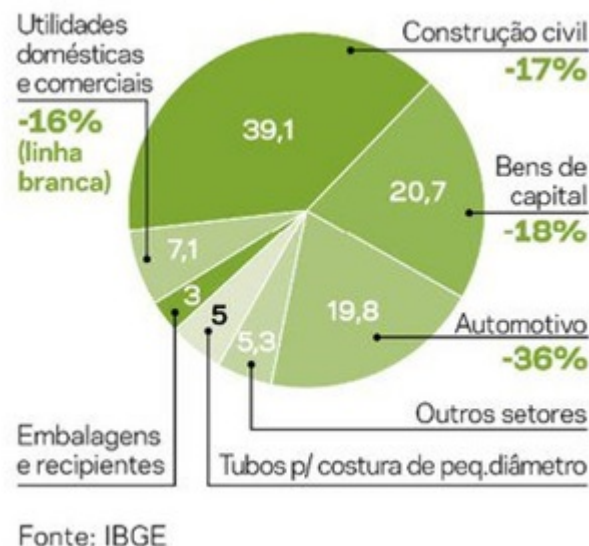


Figura 1.1: Setores brasileiros com maior consumo de aço.

Em contrapartida à dependência e maior demanda e utilização do minério de ferro e seus derivados há uma crescente pressão nas empresas visando aumento de produtividade

e redução de custos. Os profissionais das empresas mineradoras estão sendo desafiados a aperfeiçoar os processos existentes e elevar o nível de eficiência das instalações. Além disso, há também o foco em relação às questões sociais e ambientais, conforme Figura 1.2. O governo chinês, por exemplo, está aplicando altas multas para empresas poluidoras, algumas das quais estão sendo, inclusive, obrigadas a pararem as suas atividades. Algumas mineradoras cujas reservas apresentam baixos teores de ferro estão perdendo competitividade.



Figura 1.2: Os desafios da indústria mineral

A determinação da qualidade do minério de ferro e a sua precificação no mercado são fatores primordiais para as mineradoras. Como ilustrado na Figura 1.3, a precificação do produto final é volátil e feita em relação ao teor percentual de ferro do produto (VIEIRA *et al.*, 2003). A determinação correta dos teores dos elementos é fundamental para realizar os ajustes do processo de beneficiamento visando melhorar a qualidade do produto final.

Garantir uniformidade e qualidade em cada etapa é um desafio e um desejo das equipes responsáveis pelos laboratórios de preparação e análises de amostras. Nesse contexto está inserido o laboratório da Vale em Itabira / MG, que é caracterizado como um laboratório operacional. Sua função é apoiar o processo produtivo de diversos setores da cadeia de produção, desde as frentes de lavras das minas do complexo Itabira até o embarque do minério, Figura 1.4. O complexo Itabira é formado pelas usinas de Cauê, Conceição I e Conceição II, além da mina de Água Limpa, localizada na cidade vizinha de Rio Piracicaba, que somadas produzem cerca de 40 milhões de toneladas de minério de ferro por ano. As etapas de divisão, moagem, fusão e análise das amostras pelos equipamentos

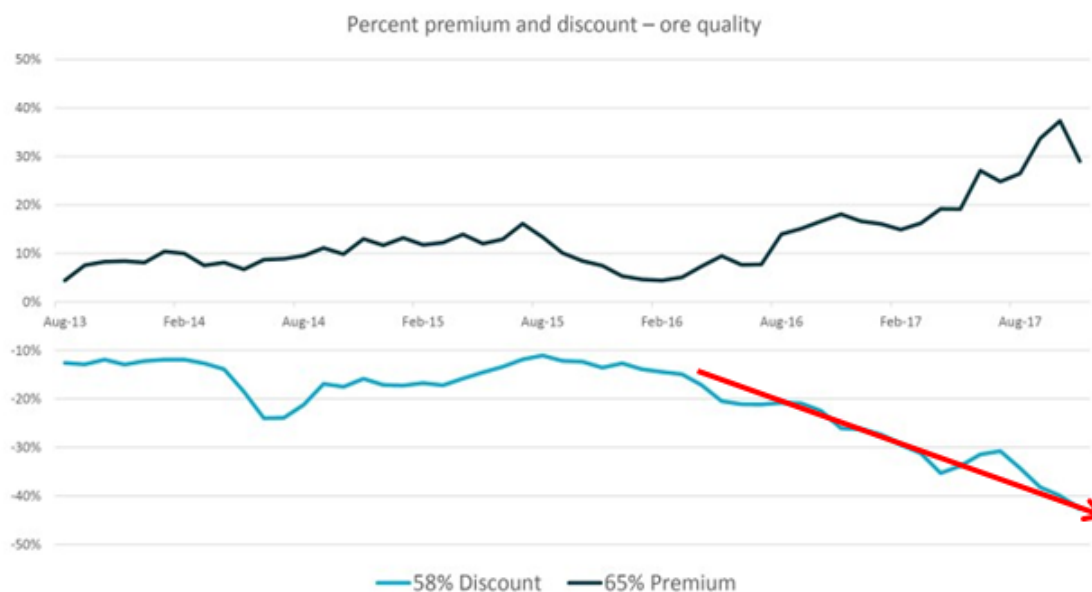


Figura 1.3: Variação do preço do concentrado com teor 58%Fe em relação ao de 62%.

de raios-x foram automatizadas, visando aumentar a confiabilidade e reprodutibilidade dos procedimentos de preparação de amostras, garantindo uma maior qualidade das amostras preparadas e análises realizadas.

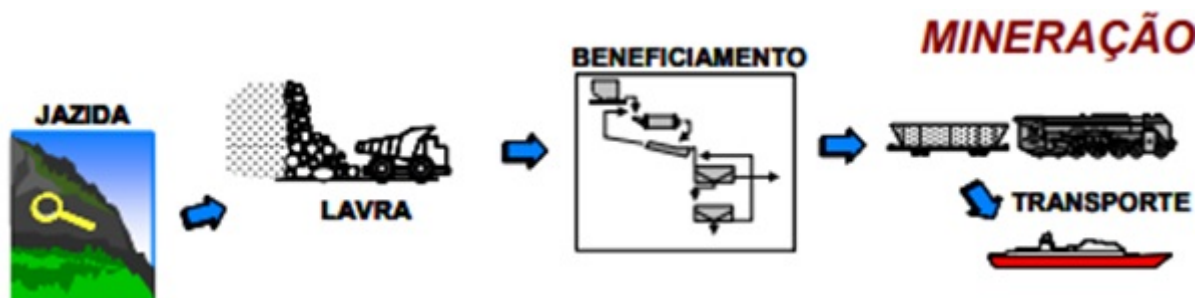


Figura 1.4: Cadeia de produção da mineração.

Com a modernização e adequação das usinas de concentração do Complexo Itabira, Cauê e Conceição, além da construção da terceira usina na cidade, Conceição II, o volume de produção de minério de ferro aumentou consideravelmente nos últimos anos. Além disso, outros processos precisaram ser desenvolvidos ou aperfeiçoados de forma a conseguir realizar o beneficiamento dos itabiritos compactos, mais duros e com menor teor de ferro em relação ao minério explorado na região no início da exploração, na década de 40. Isso exige uma maior quantidade de pontos amostrados no processo de forma a verificar a dinâmica e eficiência de cada uma das etapas.

Esse aumento na quantidade de análises diárias era incompatível com as instalações e a dinâmica até então vigente no laboratório. A solução encontrada foi implantar um projeto

para automatizar o processo de preparação e análise de amostras composto de uma planta com quatro células robóticas e mais de 20 equipamentos, como moinhos de pulverização e prensagem, divisor de amostras, máquinas de fusão, esteiras transportadoras e robôs, numa área de aproximadamente 250 m^2 e uma capacidade nominal de 1400 amostras por dia.

Apesar dos ganhos oriundos com a implantação desse projeto, como aumento da capacidade produtiva, melhorias nos atendimentos aos requisitos de saúde, segurança e ergonomia, modernização e atualização tecnológica, alguns desafios estão sendo enfrentados pelas equipes envolvidas na operação e manutenção da planta automatizada. Um dos principais desafios reside na alta variabilidade dos resultados das análises químicas por equipamentos de fluorescência de raios-x. Essa alta variabilidade dos resultados é consequência direta de duas situações. A primeira refere-se a complexidade do minério, formado por minerais com variação aleatória de propriedades, como granulometria, composição química, micro-fissuras e superfície específica, (HODOUIN *et al.*, 2001). A segunda, por sua vez, reside em alterações oriundas dos equipamentos, nas quais é possível atuar para mitigar os efeitos.

A Figura 1.5 apresenta o fluxograma do processo do laboratório de Itabira, o qual realiza três tipos de análises: granulometria, umidade e química. A etapa de preparação da amostra para análise química, objeto desse trabalho, compreende as etapas de homogeneização, divisão, secagem, britagem, moagem, pulverização, prensagem / fusão e análise via espectrometria de raios-x. As etapas demarcadas em azul compreendem as etapas que foram automatizadas no projeto implementado no laboratório. Pode-se verificar, dessa forma, que há diversas etapas e equipamentos sujeitos a degradação, falta de manutenção e calibração que podem levar a um aumento da variabilidade do processo. Resultados fora dos limites de tolerâncias aceitáveis e acordados com os clientes (usina, carregamento e porto) exigem repetições na preparação da amostra, o que resulta em perda de produtividade e tempo desnecessário gasto para preparação de nova amostra, além de maior gasto de insumos, tais como aglomerantes, fundentes.

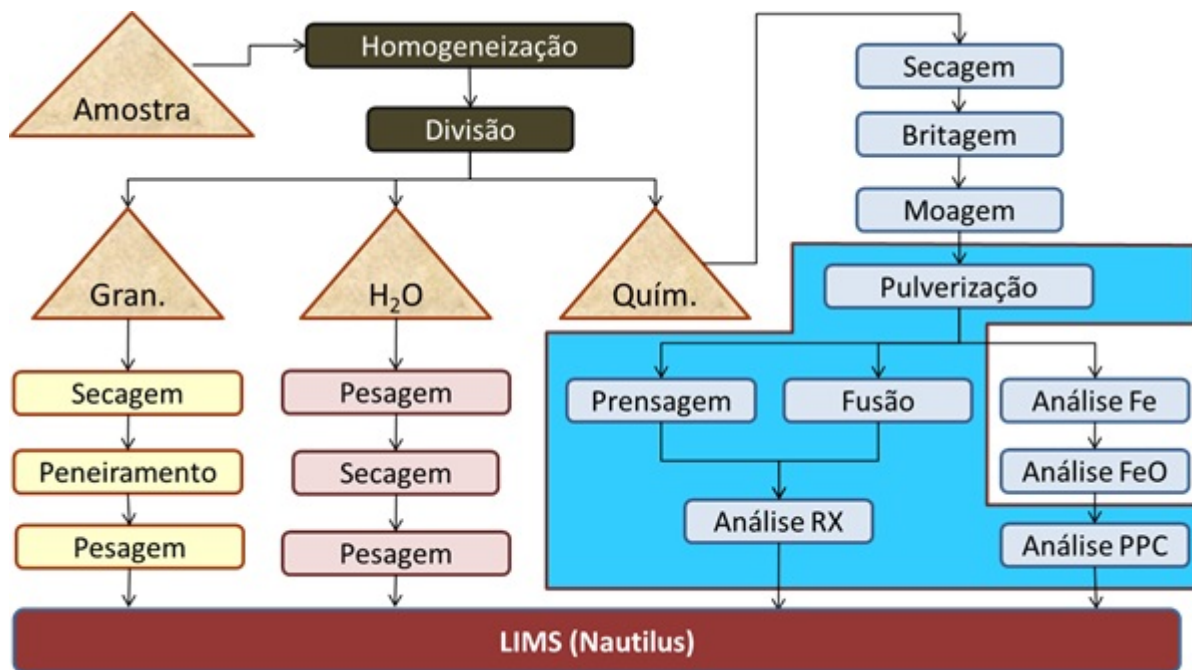


Figura 1.5: Fluxo de processo – laboratório de Itabira

Atualmente, existe no laboratório um grupo multidisciplinar composto por profissionais de automação e do laboratório químico estudando possibilidades de melhorias no processo geral de preparação das amostras. Os estudos estão focados em melhorar as rotas de preparação da amostra, no laboratório físico, e otimizar a parametrização dos equipamentos da planta automatizada, recém implantada e cujos equipamentos estão sendo agora estudados de forma mais minuciosa para compreender seu comportamento e definir o melhor ponto de operação dos mesmos para os diversos tipos de materiais processados no laboratório diariamente.

1.2 Proposta do trabalho

O propósito do projeto é aplicar uma metodologia de Planejamento de Experimentos (Design of Experiments - DoE), de forma a determinar como a interação dos parâmetros de operação do equipamento afetam o resultado das determinações químicas das amostras de minério de ferro. Parâmetros como tempo de moagem, força de prensagem, ciclos de limpeza, serão investigados durante o estudo. Conhecendo a relação dos parâmetros do equipamento e resultados químicos, desenvolve-se um sistema capaz de determinar, de forma precisa, a parametrização mais adequada do equipamento para aumentar a sua performance e reduzir a variabilidade do processo do laboratório.

O presente estudo foi realizado na planta automatizada do laboratório de Itabira / MG da Vale, Figura 1.6, composta de uma célula de recebimento de amostras, estação de login, 3 células de preparação de amostras, 1 célula de transferência e 1 célula para

realização das análises químicas, sala de raios-x. Equipamentos de divisão de amostras, pulverização e prensagem, máquinas de fusão, esteiras, robôs e espectrômetros de fluorescência de raios-x compõe a planta automatizada do laboratório. O trabalho será focado na avaliação do teor das pastilhas de minério de ferro pulverizadas e prensadas nos equipamentos de moagem e prensa, denominados Centaurus. A partir dos dados obtidos e do conhecimento do comportamento do equipamento, propor uma solução eficaz para garantir uma otimização dos parâmetros desses equipamentos para garantir uma maior uniformidade na preparação das amostras. Dessa forma, garante-se uma maior estabilidade e menor variabilidade dos resultados químicos analisados.



Figura 1.6: Laboratório automatizado da Vale em Itabira/MG.

Para maximizar o número de combinações de configurações de parâmetros nos testes de forma estruturada, usando o mínimo de recursos possíveis, definiu-se pela utilização da técnica de Planejamento de Experimentos (Design of Experiments, DoE, na sigla em inglês). O DoE é um método muito utilizado em escala industrial para a realização de experimentos nos processos ou melhoria dos métodos de fabricação/montagem. Utiliza-se uma abordagem estatística através de ensaios experimentais/simulações estruturados cujo objetivo é correlacionar os efeitos na saída baseado nas configurações de parâmetros ou dados de processo (entradas) utilizados (DAVIS e JOHN, 2018).

Algumas áreas nas quais são bastante utilizadas as técnicas de DoE na indústria: Otimização de Designs, por meio de simulação analítica, otimização de processos de manufatura e métodos de montagem, resolução de problemas de fabricação e/ou produção, determinação da melhor e/ou mais adequada configuração de operação através de testes, esta última será o foco do presente trabalho.

Ao determinar o grau de sensibilidade das diferentes configurações de parâmetros do

equipamento em relação à qualidade da pastilha prensada produzida e, conseqüentemente, da leitura dos teores dos elementos pelo equipamento de raios-x, é possível desenvolver um sistema especialista que irá auxiliar a equipe na determinação dos melhores pontos de operação do equipamento. Isso se faz necessário para possibilitar a otimização do processo de forma dinâmica, ajustando as condições operacionais dada a não homogeneidade presente nas amostras, imprecisões/imperfeições no processo de preparação das mesmas.

O sistema proposto é baseado em lógica fuzzy, as quais empregam conceitos abstratos, como “alto”, “baixo”, “quente”, “pouco”, para traduzir matematicamente as variáveis de entrada. Baseado no conjunto de regras envolvendo essas entradas, obtêm-se como saída expressões também abstratas, como “abrir um pouco”, “aumentar”, “reduzir”. A partir dessas saídas abstratas, definidas por conjuntos fuzzy, faz-se a correlação das mesmas para variáveis numéricas, as quais são aplicadas de fato ao processo.

1.3 Motivação

A automação do laboratório trouxe inúmeros benefícios e ganhos para a operação do complexo mineral. Contudo, a variabilidade observada nos resultados, principalmente os relacionados a pulverização e prensagem do equipamento Centaurus, vem desafiando e dificultando a rotina pré-estabelecida da equipe do laboratório, que vem apresentando dificuldades de aplicar os controles existentes atualmente. Além disso, imprecisões e atrasos nas amostras vem ocorrendo mais frequentemente devido ao aumento do % diário de repetições de ensaios, Figura 1.7, causados pela alta variabilidade do processo e/ou dos próprios equipamentos. Tais fatos comprometem a tomada de decisão dos operadores das salas de controle para realização dos ajustes das usinas de beneficiamento.

A consequência dessa não assertividade e alta variabilidade dos resultados químicos fornecidos pelo laboratório podem afetar diretamente as usinas de beneficiamento. As usinas necessitam desses dados para fazer o acompanhamento da performance dos seus processos e realizar os ajustes necessários, caso haja algum comportamento inesperado.

A quantidade de reagentes (soda, amina, amido, floculante) dosada é uma das ações realizadas pela equipe da operação para ajustar o processo. Um desses reagentes, a amina, tem importante função para garantir uma maior qualidade do produto final gerado nas usinas. Ela funciona como um agente coletor do quartzo (sílica) nas células de flotação, auxiliando na redução desse contaminante no produto final, e, por consequência, aumentando seu teor de ferro, Figura 1.8. Contudo, como o seu custo é elevado, a dosagem correta desse reagente é de fundamental importância para a competitividade das empresas.

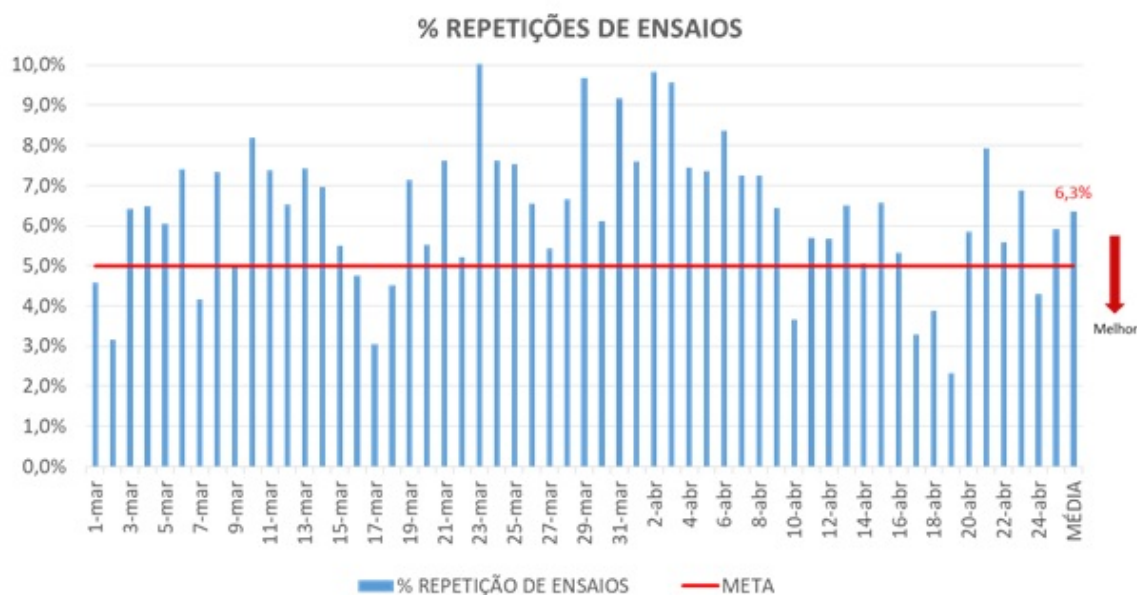


Figura 1.7: Repetição diária (%) preparação e confecção da amostra para re-análise.

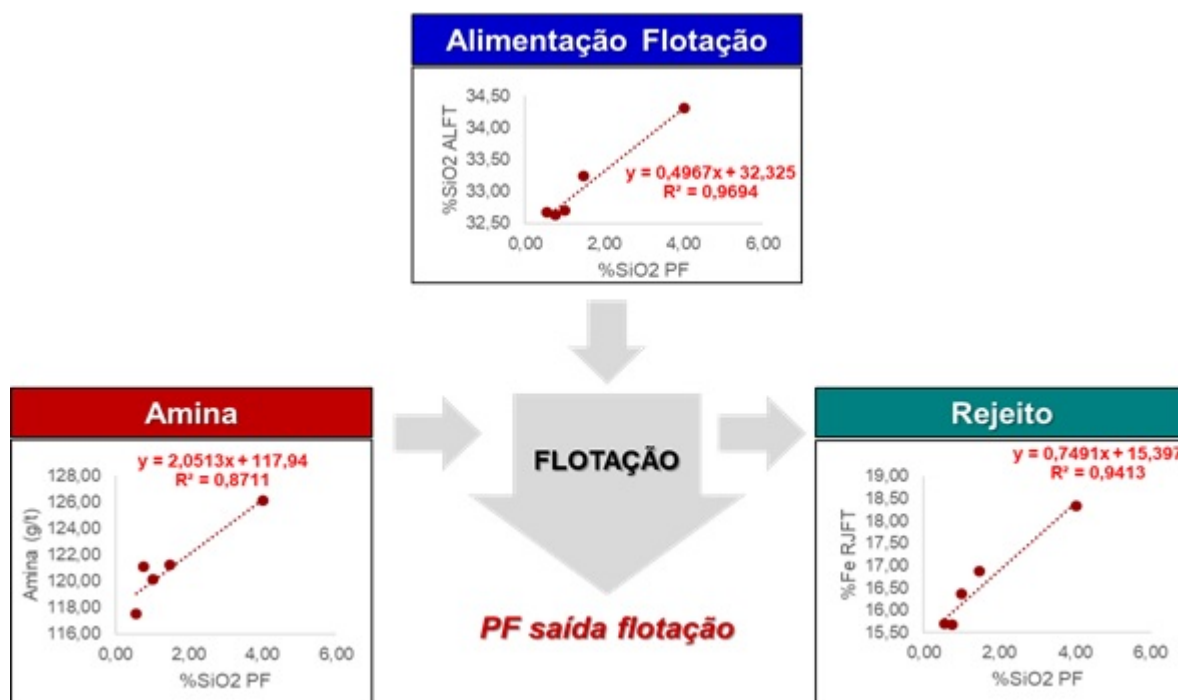


Figura 1.8: Relação %SiO₂ na alimentação da flotação x dosagem de amina.

Para ilustrar esse cenário, vamos ilustrar o seguinte exemplo. No final de 2017, o custo da amina era de R\$ 0,012 / g. A produção diária da usina de Conceição II (CE-II) era de 37.000 ton/dia, que equivale a 1.500 t/h. Para um erro de 1% no teor de SiO₂ do ALFTM, amostra da alimentação da flotação, há uma correlação de 2% no teor de SiO₂ do PF, produto final da usina, conforme correlação apresentada na Figura 1.8. Por sua vez, para cada 1% de SiO₂ no PF que se necessite reduzir, há necessidade de se aumentar

a dose de amina em 4 g/t.

Considerando que o resultado da amostra do laboratório do ALFT leva em média 2 horas para ser coletada – transportada – preparada – analisada, tem-se um custo de $R\$0,012 \times 4g \times 1.500t \times 2horas = R\$144,00$. Como exemplo prático, a Figura 1.9 apresenta um exemplo no qual o teor de SiO_2 do ALFT abruptamente é aumentado (cerca de 1,5%), sendo que os valores anteriores e posteriores estão em um patamar menor, o que pode ser um indicativo de informação errônea. Esse fato, porém, fez com que o operador aumentasse a dosagem de amina em 13 g/t nesse período, reduzindo-o assim que as informações das amostras seguintes apresentam um teor de sílica menor. Tal ação não teria sido realizada se o resultado estivesse em linha com os resultados anteriores e posteriores.

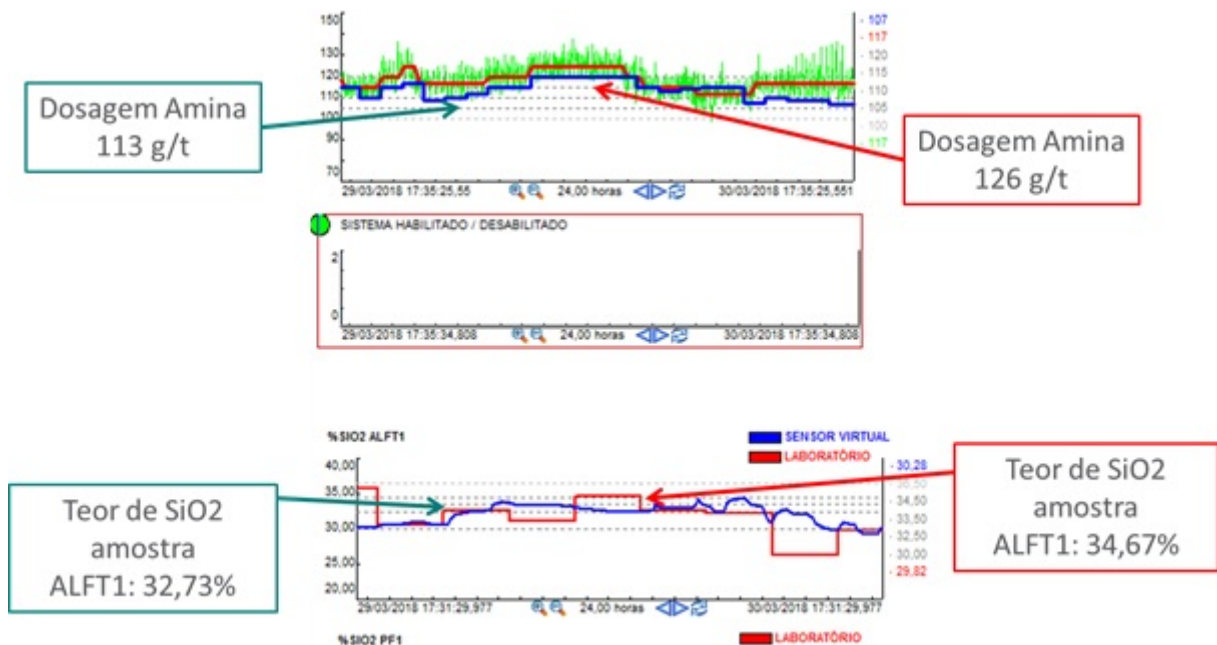


Figura 1.9: Sobredosagem provocada por resultados incorretos.

Contudo, caso esse ajuste na dosagem não fosse realizado a tempo e o produto gerado tivesse um teor de SiO_2 maior, reduzindo em 1% o teor de ferro, o prejuízo projetado seria bem maior: $US\$3,00 \times 1.500t \times 2horas = US\$13000,00$, considerando o demérito verificado no período de março de 2018.

Esses fatos exemplificam claramente a importância de se realizar com zelo, responsabilidade e com a máxima qualidade possível todos os passos do processo de amostragem, preparação e análise das amostras de minério de ferro nos laboratórios operacionais. Além disso, realizar um estudo coordenado e eficiente para entender o funcionamento dos moinho/prensa Centaurus e verificar quais os fatores contribuem e justifiquem as discrepâncias observadas ao se preparar uma amostra em cada um desses equipamentos

que são do mesmo modelo e possuem, portanto, as mesmas características construtivas e de funcionamento. Nesse sentido, o presente trabalho propõe definir metodologia para reduzir variabilidade das análises químicas das amostras de minério de ferro, garantindo uma melhor qualidade nos resultados químicos.

1.4 Objetivos

Os objetivos do presente estudo consistem na determinação da melhor relação de parametrização dos equipamentos Centaurus da planta automatizada do laboratório de Itabira visando garantir uma preparação mais homogênea das amostras de minério de ferro e uma menor variabilidade dos resultados químicos.

Com isso, espera-se obter os seguintes resultados:

- Identificar as variáveis com maior influência na variabilidade dos resultados;
- Identificar a interação entre as variáveis (parâmetros) do equipamento;
- Reduzir a quantidade de repetições de amostras;
- Aumentar a produtividade dos funcionários;
- Melhorar a robustez e confiabilidade dos resultados;
- Reduzir a quantidade de insumos utilizados;

1.5 Hipóteses do trabalho

A principal contribuição que o presente trabalho pretende é garantir a qualidade e estabilidade na preparação das amostras de minério de ferro para leitura dos teores químicos nos equipamentos de raios-x. Para isso, as seguintes hipóteses foram levantadas durante o andamento das atividades:

- Existe alguma relação de causa-efeito entre os parâmetros do equipamento de pulverização e prensagem Centaurus e o resultado obtido da leitura dos teores químicos das amostras?
- É possível determinar se um parâmetro do equipamento exerce maior influência sobre os teores químicos das amostras em relação aos demais?
- Como suportar a decisão do operador, dinamicamente, sobre a configuração mais adequada para cada equipamento Centaurus nas diferentes condições operacionais, de forma que todos consigam garantir a exatidão da leitura dos teores químicos?

Capítulo 2

LABORATÓRIO DE ANÁLISE QUÍMICA NA INDÚSTRIA MINERAL

2.1 Histórico de operação do laboratório

No início do processo de exploração das minas da Vale em Itabira, berço da companhia, a exploração e produção do minério de ferro era feito de maneira bastante rudimentar, com a utilização de muitas ferramentas manuais e grande contingente de operadores nas frentes de operação, Figura 2.1. O minério ainda era transportado em caminhões até a ponta dos trilhos da Estrada de Ferro Vitória Minas, EFVM, em Oliveira Castro, a 22 quilômetros da mina do Cauê. As condições da EFVM também eram muito precárias, com trilhos e dormentes bastante desgastados, o que dificultava o transporte do minério de ferro da área da mina até o porto (VALE S.A., 2012).



Figura 2.1: Início da exploração de minério de ferro na mina de Cauê

As condições iniciais de funcionamento e operação do laboratório da Vale em Itabi-

ra/MG também eram bastante rústicas e braçais. Toda a operação de preparação e análise das amostras de minério de ferro eram feitas de forma manual, com bastante esforço físico dos operadores, Figura 2.2.



Figura 2.2: Início da operação do laboratório da Vale em Itabira/MG.

Algumas características do minério explorado também sofreram grandes alterações ao longo das últimas décadas. O material hoje existente nas minas de Itabira, itabirito compacto, tem um menor teor percentual (%) de Ferro, são mais duros e mais difíceis de serem processados e concentrados. Isso requer etapas adicionais para realizar o processamento desse minério que, aliadas ao crescente aumento do preço dos principais insumos da mineração (água, energia elétrica e reagentes), tem elevado o custo unitário das mineradoras (BAUM, 2014).

É imperativo, portanto, garantir uma maior qualidade do produto final processado nas usinas de beneficiamento, minimizando os custos de produção. Uma gestão rigorosa dos custos dos insumos, maior foco na eficiência de cada etapa unitária da usina e uma determinação mineralógica mais assertiva da frente que está sendo lavrada é crucial nesse cenário. E, para tanto, é imprescindível que os laboratórios de processo, responsável pelas análises químicas e físicas das amostras minerais, tenham alta eficiência e garantam resultados confiáveis e rápidos. Dessa forma, consegue-se garantir uma integração das informações entre as diversas etapas da cadeia de produção mineral de forma ágil, possibilitando uma melhor tomada de decisão e otimização dos processos.

2.1.1 Funcionamento de um laboratório de análises físico/químicas

Um minério bruto extraído das minas não pode ser usado diretamente como produto final para usos industriais ou comerciais. Ele precisa ser processado para se obter um material específico que possa ser utilizável (HODOUIN *et al.*, 2001). Esse processamento mineral é um processo industrial de larga escala, composto por múltiplas etapas unitárias. Cominuição, peneiramento/classificação, concentração, filtragem, espessamento, como apresentados na Figura 2.3. Os equipamentos presentes nessas etapas são utilizados sobre os bens minerais com o intuito de modificar sua granulometria, concentração, formato, sem alterar as características química ou física dos minerais (BENVINDO DA LUZ *et al.*, 2004). Consegue-se, portanto, através dessa sequência tecnicamente coerente, melhorar a qualidade do minério extraído até transformá-lo em um produto economicamente viável (DING *et al.*, 2012).

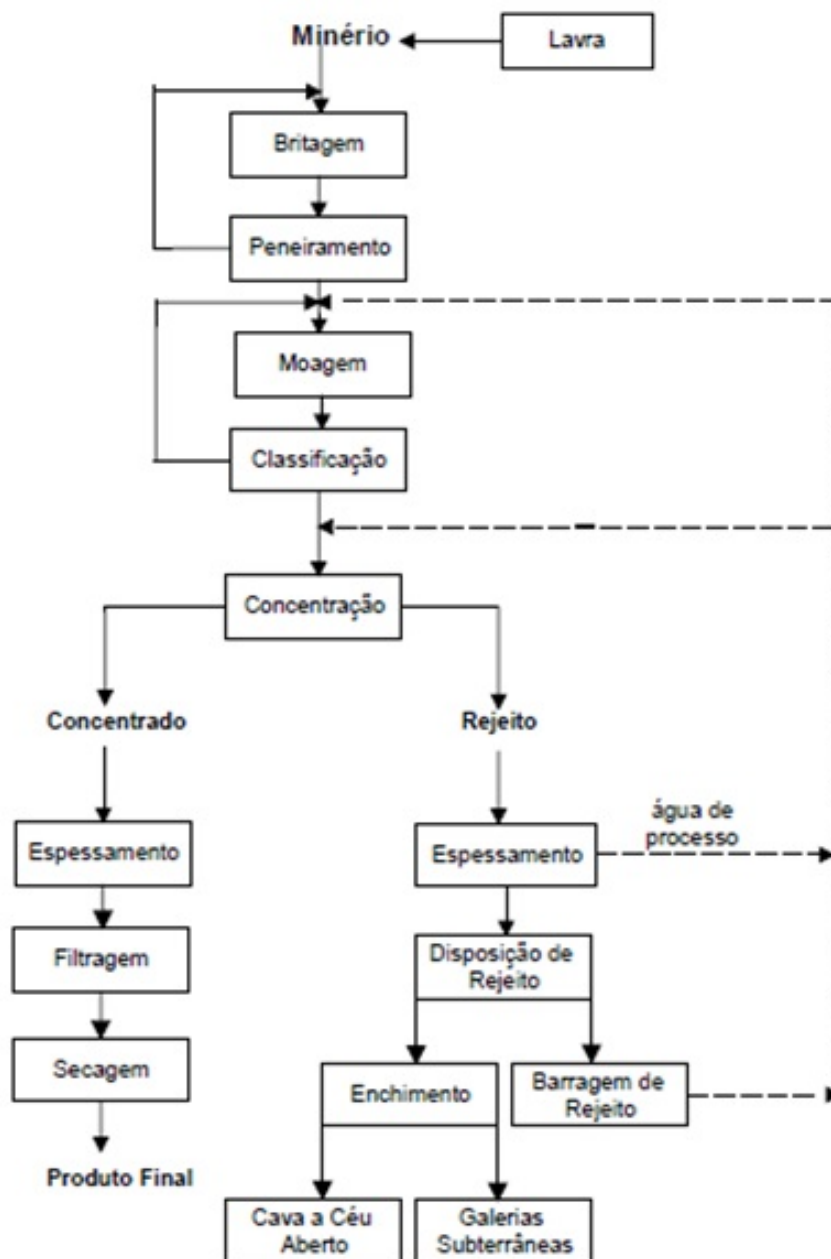


Figura 2.3: Fluxograma típico de tratamento de minério

E para verificar a eficiência de cada um dos processos, é importante mensurar quantitativamente o comportamento físico-químico do material que está sendo processado de forma periódica e contínua. A operação das usinas de beneficiamento mineral tem como rotina, então, realizar coletas em pontos estratégicos afim de avaliar características do material coletado. Contudo, como é impossível realizar a análise de toda a massa de material, utiliza-se o processo de amostragem que consiste na retirada de incrementos, que são porções de uma massa maior que se deseja amostrar, para a formação de uma amostra global (BENVINDO DA LUZ *et al.*, 2004). O processo de amostragem e preparação de amostras são operações complexas e passíveis de erros, já que a quantidade de material

a ser analisado é muito pequena e deve ser representativo de toneladas de um material inerentemente heterogêneo (HODOUIN *et al.*, 2001). Ressalta-se que falhas ou imperícias técnicas nesses processos podem gerar grandes prejuízos na medida em que as informações geradas nos diversos ensaios são extrapoladas e consideradas verdades para uma massa de material muito maior (VALADÃO, G. E. S., VIANA, P. R. M., ARAÚJO, 2004).

Os recipientes com essas amostras são coletados nos pontos e horários determinados, sendo encaminhadas posteriormente para o laboratório. Ao chegar no laboratório, é feita a identificação e registro da amostra no sistema de gerenciamento de amostras do laboratório. O *software* já tem um cadastro de todos os ensaios e análises que precisam ser realizados para cada tipo de material oriundo de cada etapa do processo e das diversas origens (usina/mina/carregamento). A partir desse ponto, segue-se uma série de etapas de preparação que são executadas até a obtenção da análise final. Homogeneização, divisão, secagem e cominuição são algumas dessas etapas químicas realizadas de forma criteriosa e sistemática de forma que as características originais se mantenham durante todo o processo de preparação.

As duas principais análises, largamente realizadas nos laboratórios operacionais, são a verificação de granulometria, análise física, e verificação do teor dos elementos presentes na amostra, análise química. Para a realização da análise da granulometria do material, a amostra é dividida, secada e depois peneirada de forma a determinar o percentual de massa em cada uma das faixas granulométricas. Esse tipo de ensaio é fundamental para verificar se as etapas de britagem e moagem estão eficientes para cominuir e segregar os minérios em dimensões requeridas. Dessa forma, consegue-se uma maior liberação dos elementos constituintes do minério e aumento da área de superfície (CHAVES e PERES, 2003), garantindo uma melhor classificação e concentração nas etapas posteriores.

O segundo tipo de análise visa determinar a qualidade do material oriundo da mina e a eficiência de cada uma das etapas de concentração. Para tal, as amostras dos ensaios de verificação de teor químico precisam ser divididas, secadas, britadas, moídas e, por fim, serem prensadas de forma a se produzir uma pastilha de tamanho específico para ser introduzida nos espectômetros de fluorescência raios-x. A análise química em questão consiste na emissão de feixes de raios-x na amostra de minério para detecção da radiação incidente pelo detector. Cada tipo de minério emite radiações distintas dependendo de características como composição química do minério, granulometria e morfologia do mineral. Como exemplo, no laboratório de Cauê da Vale em Itabira são processadas aproximadamente 800 amostras diariamente, sendo a maior parte provenientes das usinas de beneficiamento.

2.2 Projeto de automação do laboratório

Em razão da grande importância dos resultados das análises químicas dentro do contexto de uma usina de beneficiamento mineral e devido à necessidade de garantir um aumento da capacidade produtiva e redução do tempo de resposta desses resultados, foi realizado o projeto de automação do laboratório de Itabira/MG. Outro fator preponderante para a realização desse projeto foi a busca pela redução da exposição ao risco em etapas críticas de preparação de amostras, como as tarefas de pulverização, (redução de granulometria dentro dos moinhos), prensagem (confecção de pastilhas com o minério utilizando prensas hidráulicas), fusão (confecção de pastilha fundida dentro dos fornos à 1050°C), análise (análise dos teores químicos dos elementos no espectômetro de fluorescência de raios-x) e limpeza (limpeza dos anéis de pastilha prensada com ar comprimido e vibração). As premissas do projeto visavam garantir melhorias ao atendimento de requisitos de saúde, segurança e ergonomia, reduzir exposição ao risco dos trabalhadores, aumentar a capacidade e realizar uma completa atualização tecnológica, com novos equipamentos e sistemas.

Toda essa modernização permitiu um aumento na capacidade nominal de preparação de amostras do laboratório, permitindo atender ao aumento da demanda com a conclusão dos projetos de adequação das usinas de Cauê e Conceição e construção da nova usina Conceição II. Mensalmente, são analisadas entre 16 e 21 mil amostras no laboratório, Figura 2.4, as quais englobam um universo de aproximadamente 160 diferentes pontos de amostragem distintos dentro do complexo de minas e usinas de Itabira-Água Limpa. Os resultados obtidos são encaminhados para os diversos clientes internos que utilizam tais informações para tomadas de decisões tanto na mina, usina, porto e comercialização do produto. Dessa forma, é possível garantir uma detonação na mina mais assertiva e eficiente, otimizar o desempenho das britagens e moinhos, reduzir custos com reagentes na flotação, realizar o sequenciamento de carregamento e embarque com maior qualidade (BAUM, 2014).

O início desse projeto, o primeiro em toda a América Latina para análise química em laboratórios de minério de ferro, deu-se por uma extensa pesquisa de novas soluções e equipamentos de automação de laboratório em países cuja tecnologia já estava consolidada e madura. De posse de todas as informações e conhecimentos adquiridos nessa fase, aliados ao *know-how* do processo de preparação e análise de amostras das equipes de automação e laboratório da Vale, foi desenvolvida uma definição dos requisitos técnicos, premissas e restrições que uma solução de automação deveria satisfazer para atender as necessidades e realidades do laboratório de Itabira.

Com a finalização do projeto, os processos de moagem, prensagem, fusão de amostras, envio de resultados para sistema de gestão, limpeza de copos e anéis de amostras são agora realizados sem intervenção direta dos operadores. A interface do operador com o

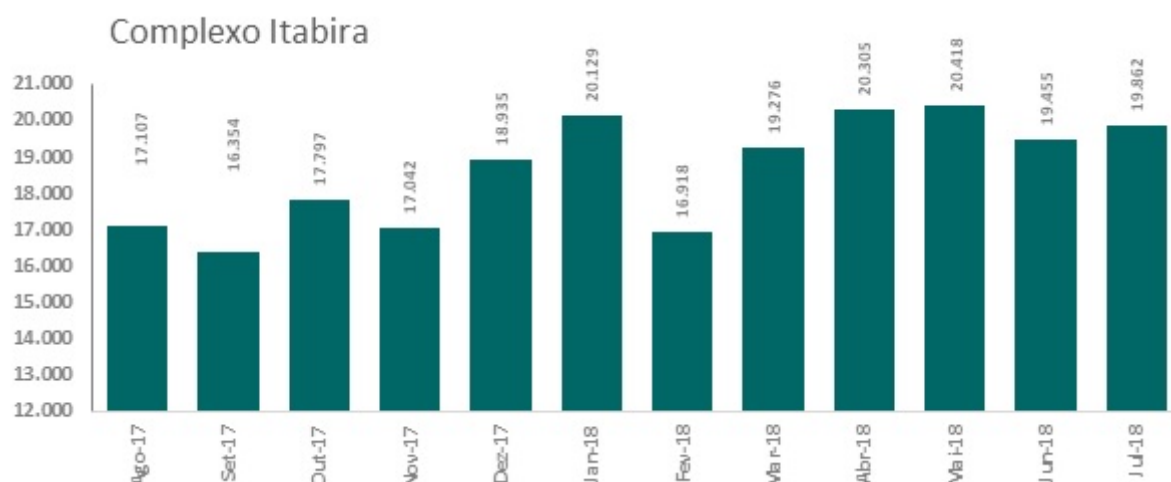


Figura 2.4: Quantitativo mensal de amostras analisadas entre 2017/2018.

sistema é feita através da leitura do código de barras da amostra e direcionamento do recipiente com a amostra para uma das esteiras de entrada das células robotizadas. A partir desse instante, todo o restante do processo, como direcionamento das amostras para os equipamentos de preparação, identificação da posição instantânea da amostra dentro da sua rota, envio do resultado final da análise química e disponibilização dos resultados para os clientes, é feito pelo sistema de controle da planta automatizada, suportado por redes de comunicação de alta velocidade, equipamentos com controladores (PLC's) embarcados de alta capacidade de processamento, servidores físicos de última geração e ambiente virtualizado.

2.3 Definição do problema

Contudo, não apenas de boas notícias são feitos os grandes projetos. Durante o processo de operação assistida do projeto de automação do laboratório, as equipes de operação e manutenção depararam com diversos problemas e/ou novas necessidades em relação ao modus operandi vigente até então. Desde problemas mais simples, como aquisição de ferramentas específicas e peças sobressalentes para as manutenções nos novos equipamentos, até outros mais complexos, como customizações no sistema para possibilitar ações existentes no processo manual, como releitura das amostras em outras curvas de análise nos equipamentos de fluorescência de raios-x.

No decorrer dos meses, as equipes foram tratando esses e vários outros problemas que foram sendo verificados. Contudo, há ainda dois graves problemas ainda não solucionados que estão impactando diretamente no desempenho da planta automatizada. O primeiro deles refere-se a Disponibilidade física (DF) dos equipamentos, Figura 2.5. A DF contratada de 95%, curva verde, ainda está longe de ser atendida, devido a diversas quebras

prematuras de equipamentos e excesso de falhas, desde pequenas até falhas que exigem um tempo maior para resolução. Nacionalização de peças com fornecedores nacionais desenvolvidos pela equipe Vale, contratação de equipe de manutenção corretiva / preventiva de turno, treinamentos constantes das equipes de operação e manutenção foram realizados como ações para o problema.



Figura 2.5: Disponibilidade Física (%) diária da planta automatizada do laboratório de Itabira.

Realizou-se também uma verificação completa do Centaurus e seus componentes. Medições de dureza, composição química, peso, dimensões foram realizadas, Figura 2.6. Comparação dos corpos moedores originais da peça e dos fornecedores nacionais também foram feitas. Contudo, não foram observadas grandes discrepâncias entre as peças, à exceção da composição química, na qual o carbeto de tungstênio (WC) é ligeiramente mais predominante na peça original em relação a similar, o que não seria a causa principal dos problemas com os componentes do equipamento. Estudos continuam sendo realizados com o intuito de desenvolver novos tipos de materiais para alguns componentes, melhorias construtivas e reengenharia de algumas partes do equipamento, revisão do plano de manutenção. Tais ações visam mitigar ou eliminar as quebras prematuras e frequentes desses componentes e melhorar o indicador de disponibilidade física (DF), para possibilitar a operação de toda a planta em sua capacidade nominal.



Figura 2.6: Verificação dos corpos moedores utilizados nos Centaurus

O segundo grande problema refere-se a um aumento do número de repetições de ensaios/preparações diárias após a implantação do projeto de automação, Figura 1.7. Uma repetição sempre é exigida quando, por exemplo, o resultado químico da amostra extrapola os limites mínimos ou máximos de qualquer um de seus elementos, ou quando o resultado é muito divergente comparativamente com as amostras dos horários anteriores, dentre outros critérios definidos no procedimento do laboratório. Para cada repetição de um ensaio, é necessário realizar todo o processo de preparação da amostra novamente até a realização de uma nova análise química no equipamento de raios-x. Isso causa aumento nos custos de insumo, realocação de mão-de-obra e, em alguns casos, atrasos no envio dos resultados para os clientes internos, o que acaba impactando diretamente nos processos produtivos e, conseqüentemente, podendo até afetar a qualidade do produto final. Isso impacta diretamente o cotidiano das operações, uma vez que a medição da composição química e granulométrica do minério são critérios fundamentais para garantir o controle dos processos produtivos da mineração e, conseqüentemente, a qualidade do produto final (HODOUIN *et al.*, 2001).

Um estudo mais aprofundado será feito nos dois principais equipamentos responsáveis, direta ou indiretamente, pelo aumento observado nas preparações de amostras no laboratório. O primeiro, o Centaurus, responsável pelo processo de cominuição e prensagem das amostras e os espectômetros de fluorescência de raios-x, cuja função é realizar a análise química dos teores de cada um dos elementos presentes nas amostras.

2.3.1 Centaurus: equipamento de moagem e prensagem do laboratório de Itabira

O Centaurus é um dos equipamentos da planta automatizada do laboratório, cujas funções são realizar a moagem e prensagem em uma única unidade integrada e compacta, conforme Figura 2.7. A pastilha de minério moída e prensada produzida nesse equipamento é encaminhada para os equipamentos de raios-x, os quais tem a função de realizar

a análise da composição química da amostra.



Figura 2.7: Equipamento Centaurus

Em toda a etapa de preparação, transporte e análise das amostras prensadas da planta automatizada, o processo de cominuição e prensagem é o único que interage diretamente com as partículas do minério, alterando o formato e a granulometria. Na etapa de transporte, pelas esteiras ou pelos robôs, não há interação dos equipamentos com o minério, apenas com o recipiente no qual o mesmo está inserido. Já o processo de análise no equipamento de raios-x é altamente preciso além de também não haver interação direta do equipamento com o conteúdo da amostra.

A Figura 2.8 apresenta, de forma esquemática, uma distribuição dos fragmentos após o processo de fratura para três diferentes mecanismos de quebra, cisalhamento, compressão e impacto. Os produtos resultantes se apresentam em duas faixas de tamanho: partículas grossas resultantes da quebra induzida pela tensão, e partículas finas da quebra por compressão no local onde a carga é aplicada. Deve-se atentar para reduzir o percentual de partículas muito finas, abaixo do valor esperado para os processos seguintes. A característica final desses fragmentos menores dependerá das características das rochas (com forças de coesão das partículas distintas para diferentes concentrações de elementos), além da energia e intensidade aplicada sobre os minérios durante o processo de moagem (MAZZINGHY, 2009).

A métrica utilizada na rotina do laboratório operacional é avaliar o percentual de material retido na peneira abaixo de 0,045 mm, granulometria adequada para realizar a prensagem das pastilhas. Esse acompanhamento é feito semanalmente e realizado em todos os 8 equipamentos de moagem e prensagem. Um teste extra foi realizado, de forma paralela durante 8 semanas, com amostras em duplicata. Na avaliação feita, Figura 2.9, todos os 8 equipamentos foram aprovados no teste de verificação de 95% retido na peneira abaixo de 0,045 mm. Como complemento desse teste, foram inspecionados visualmente todas as pastilhas confeccionadas na etapa de prensagem e todas foram consideradas bem formadas, sem contaminação ou grandes imperfeições. Dessa forma, baseando apenas na

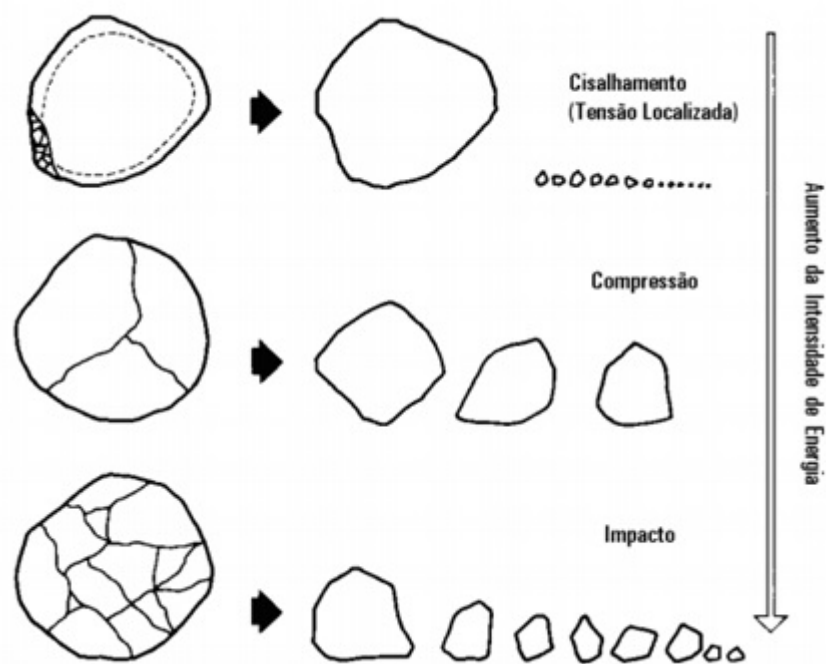


Figura 2.8: Mecanismos de fratura e distribuição dos fragmentos

verificação visual das pastilhas prensadas confeccionadas no equipamento e a verificação da qualidade da cominuição baseado no método já utilizado no laboratório de verificação da granulometria final da amostra, não se permite considerar o Centaurus como um agente causador do alto número de repetições de ensaios.

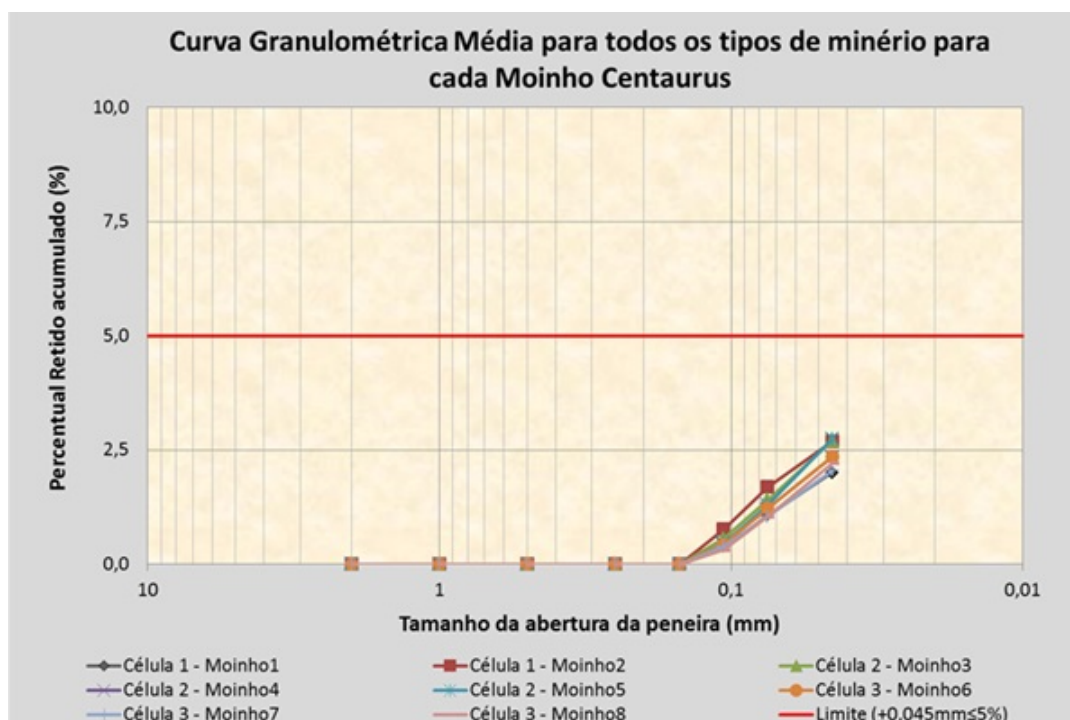


Figura 2.9: Distribuição granulométrica por moinho Centaurus

2.3.2 Análise de espectrometria de fluorescência de raios-x e as curvas padrões de referência

O espectômetro de fluorescência de raios-x é o equipamento responsável pela análise química dos teores dos elementos presentes numa amostra de um determinado minério. Para isso, deve-se determinar uma amostra de referência (padrões certificados com teores conhecidos) para criar a curva padrão para a amostra, que nada mais são do que regressões matemáticas relacionando a intensidade do feixe de raios-x emitido e o teor do elemento analisado, Figura 2.10.

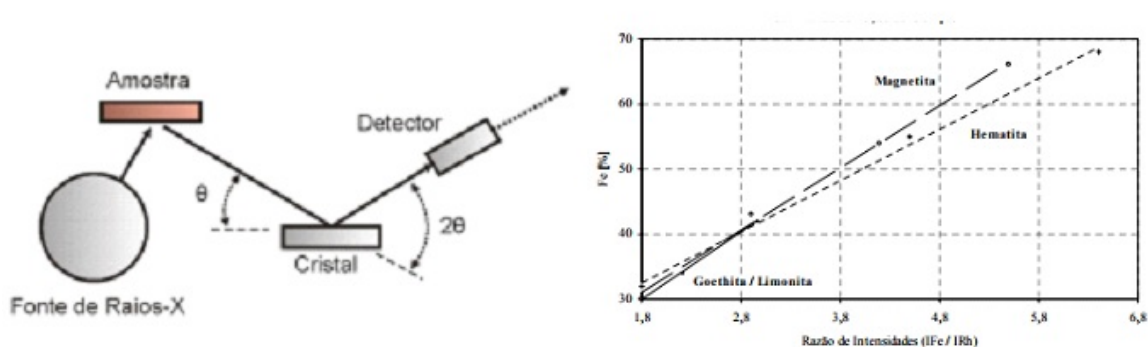


Figura 2.10: Curva intensidade x teor de Fe.

Por se tratar de um laboratório operacional é impossível que se tenha um padrão para cada um dos 166 diferentes pontos de amostras existentes atualmente no complexo de Itabira, devido ao alto custo e dificuldade de se manter a gestão e fazer as correções necessárias. O que é feito, então, é agrupar as amostras em grupos cujas características das amostras, principalmente granulometria e teor químico, são semelhantes, Figura 2.11.

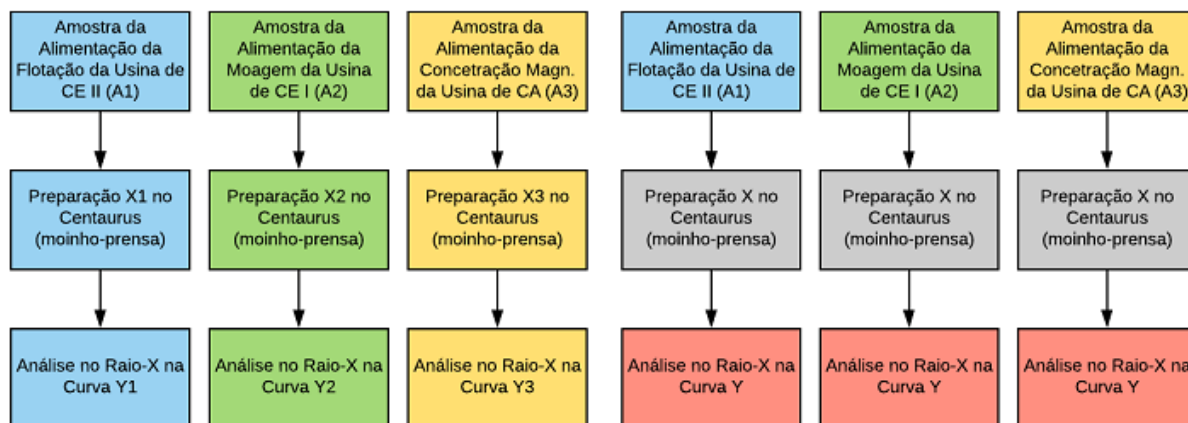


Figura 2.11: Configuração do Centaurus e Raios-x: forma ideal x forma prática.

Essas amostras padrões, cujos teores dos elementos são conhecidos e certificados, são

usadas para fazer o ajuste das curvas do equipamento de raios-X. Por procedimento operacional, periodicamente, faz-se um acompanhamento das amostras padrões, realizando toda a etapa de pulverização, prensagem e análise química dessa amostra para avaliação da tendência de desvio em relação ao valor médio certificado de referência. Esses desvios tem diversos possíveis fatores causadores, como por exemplo alteração da mineralogia do minério na frente de lavra, desgaste/alterações nos equipamentos, manutenção nos equipamentos. Constatado que o teor de algum dos elementos constituintes da amostra padrão violou os limites de referência, é realizada uma correção/ajuste matemático na curva do equipamento de raios-x. Após a correção da curva, ou estando o padrão dentro dos limites estabelecidos, é permitido então que todo o conjunto de amostras pertencentes àquele padrão de referência continuem sendo preparadas e analisadas.

Contudo, a correção dessa curva é feita em relação a análise do padrão preparado em um Centaurus específico. Caso algum dos Centaurus esteja apresentando algum comportamento discrepante dos demais, devido a algum desgaste, defeito ou ineficiência, a preparação do padrão naquele equipamento específico pode tendenciar o ajuste da curva. Dessa forma, ao liberar as amostras operacionais daquele padrão para serem preparadas e analisadas, há uma forte tendência de que a quantidade de repetições aumente, haja visto que as amostras de rotina podem ser preparadas em qualquer um dos Centaurus disponíveis, e não apenas naquele que foi preparado e verificado o padrão do dia, Figura 2.12.

Dessa forma, fez-se necessário um estudo mais aprofundado do comportamento dos 8 diferentes moinho / prensa Centaurus da planta automatizada. O objetivo era verificar, tanto visualmente como posteriormente no raios-x, um conjunto de amostras processadas em cada um dos equipamentos e compará-las. Para isso, foi feita uma campanha com 32 amostras padrões em cada um dos Centaurus, selecionados aleatoriamente, com os parâmetros mantidos fixos, e analisados na mesma curva GET (Geral Itabira (Curva Raios-x)) e no mesmo equipamento de raios-x.

Percebe-se, pela Figura 2.13, que os valores médios de SiO_2 resultantes das amostras processadas em cada um dos Centaurus apresentou um comportamento diferente, tanto deslocamento em relação à média quanto uma maior variância entre os equipamentos analisados.

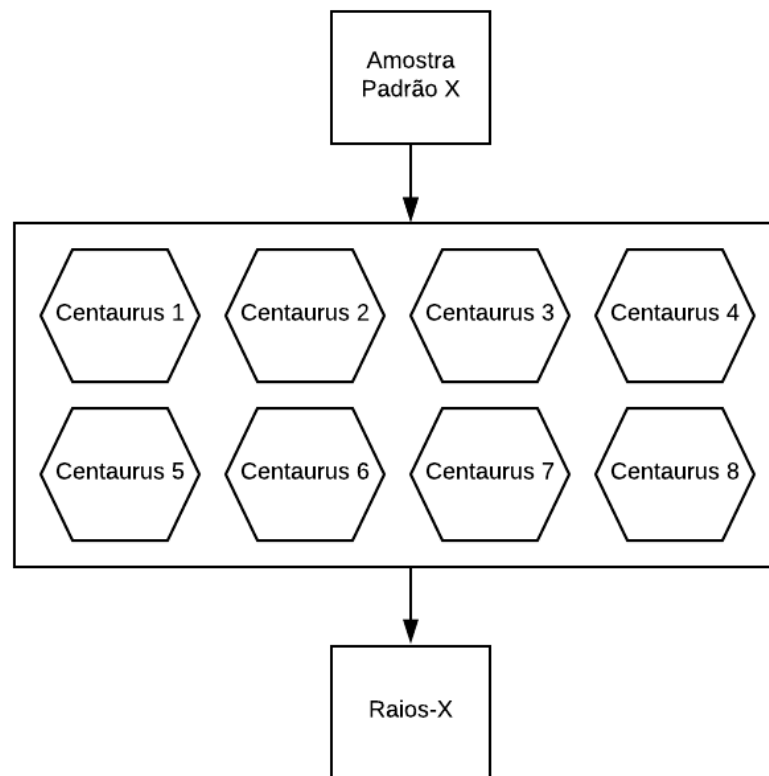


Figura 2.12: Preparação das amostras de minério para moinhos Centaurus.

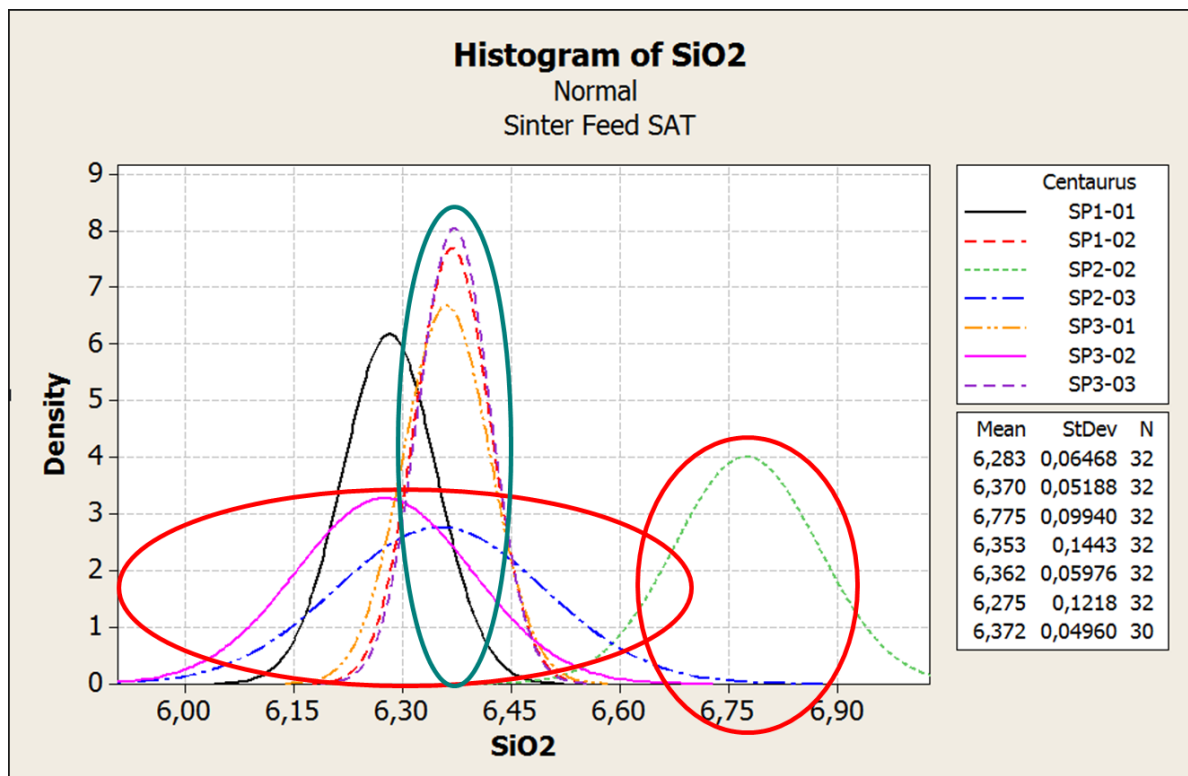


Figura 2.13: Diferença entre os Centaurus

Focando apenas em um dos equipamentos, nesse caso o Centaurus 2 da célula 3, Cent_SP3.2, cuja variância dos seus resultados era maior do que o dos outros equipamentos, observa-se uma alta variabilidade (97,70 a 101,17%), Figura 2.14, o que não é desejável para o processo.

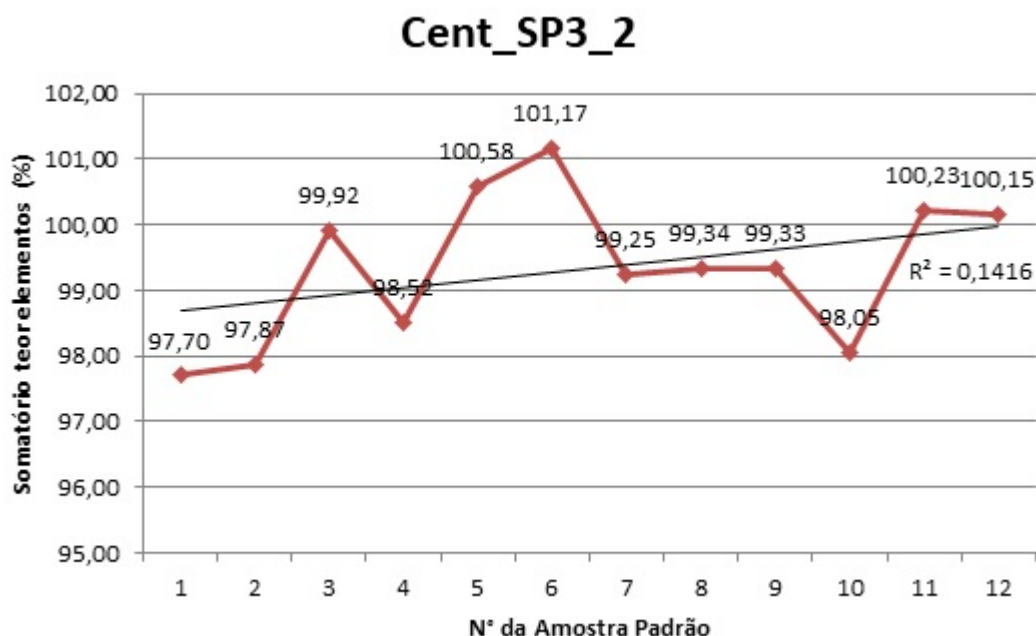


Figura 2.14: Curva GET – Cent_SP3_2.

Valores maiores que 100% podem acontecer devido ao fato da medição de teores dos elementos na amostra ser uma medida indireta, feita pela conversão da intensidade de radiação emitida em um valor de teor do elemento. Importante ressaltar que as amostras padrões são as mesmas. A única interferência reside na preparação das amostras no equipamento Centaurus e ajuste no equipamento de raios-x. Portanto, busca-se nas análises de laboratório uma maior repetibilidade e homogeneidade dos resultados, com a menor variabilidade possível.

As análises realizadas indicaram discrepâncias nas análises químicas das amostras preparadas nos diferentes Centaurus. Contudo, um estudo mais aprofundado precisa ser feito de maneira a determinar os efeitos de causa-consequência de cada um dos parâmetros de receita de preparação dos equipamentos no resultado químico das amostras.

Capítulo 3

PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

3.1 Planejamento de experimentos: ferramenta para investigação de problemas

A observação de um sistema ou processo em operação é uma grande fonte de aprendizagem e um elemento fundamental que ajuda a compreender seu funcionamento e particularidades. Contudo, apenas a observação do processo não é suficiente quando se pretende obter um conhecimento mais detalhado do comportamento do processo em diversas condições operacionais distintas e específicas. Para estabelecer uma relação de causa e efeito em um sistema, é necessário que haja uma alteração controlada das variáveis de entrada e observar o efeito gerado no comportamento do sistema para cada alteração realizada (MONTGOMERY, 1984).

A pesquisa experimental é um recurso muito utilizado por pesquisadores quando se deseja estabelecer o efeito provocado pela variação de alguma variável específica (hipótese) no comportamento de algum sistema. Observações sobre um processo induzem a teorias ou hipóteses sobre seu funcionamento. Contudo, são os experimentos os responsáveis por demonstrar que as hipóteses são verdadeiras ou não (MONTGOMERY, 1984). A pesquisa experimental é uma metodologia estatística ativa, na qual são feitas várias pequenas perturbações no processo de forma a encontrar as melhores características e comportamentos do sistema (ULISSES, 2007). Definidos os critérios correspondentes a esses comportamentos, as técnicas estatísticas funcionam como um suporte à tomada de decisão dos operadores (DOS ANJOS, 2005).

E nesse planejamento basicamente duas questões são levantadas: como determinar o procedimento mais adequado para a realização do experimento e como fazer a análise dos resultados coletados. Pretende-se, dessa forma, estabelecer uma relação de causa-efeito entre as variáveis de processo, tanto as que se tem atuação direta sobre elas (variáveis

dependentes) quanto as que não se tem (independentes).

O Planejamento de Experimentos é uma metodologia estatística implantada em vários tipos de sistemas, utilizada no projeto de processos e de produto, além do ramo da otimização. É uma ferramenta multifuncional que pode ser usada em várias situações, como *design* para comparações, identificação de função de transferência, otimização e *design* robusto (DURAKOVIC, 2018).

Nas décadas de 1920 e 1930, Ronald A. Fisher conduziu uma pesquisa na área agrícola com o objetivo de aumentar o rendimento da colheita no Reino Unido. A obtenção de dados era um desafio. Por exemplo, se decidisse por utilizar o método tradicional ANOVA (teste F – teste de Fisher), ele plantaria na primavera e faria a verificação dos resultados dessa colheita apenas no outono, tempo elevado para a pesquisa. A partir desse obstáculo, ele criou e foi o precursor da utilização do DOE como ferramenta estatística para o planejamento de experimentos. Apesar da pouca utilização nas décadas seguintes após a criação de Fisher, o DOE vem ganhando interesse de pesquisadores de diversas áreas, Figura 3.1, como engenharia, administração, marketing, energia, arquitetura, indústria farmacêutica e alimentícia. Sua utilização foi expandida em muitos setores como parte do processo de apoio a tomada de decisão (DURAKOVIC, 2018).

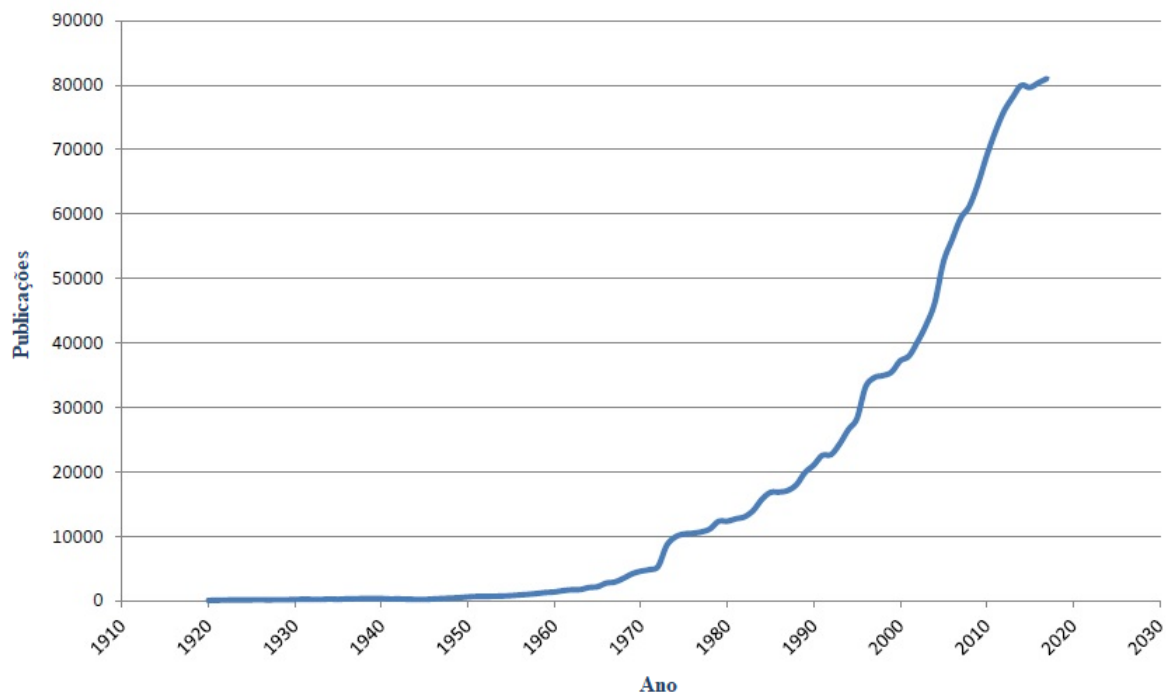


Figura 3.1: A aplicação do DOE em todo o mundo no período de 1920 a 2018

3.2 Procedimento de uma pesquisa experimental

Uma das premissas na realização de uma pesquisa experimental é garantir a imparcialidade na condução e avaliação do procedimento planejado. Busca-se, dessa forma, avaliar

o efeito que a perturbação controlada de uma dada variável representa no comportamento do sistema. Caso se pretenda avaliar o efeito da modificação de mais variáveis, tem-se que fazê-la de maneira isolada, ou em grupos, de modo a delimitar a representatividade de cada uma delas, de forma independente do efeito das demais.

A parte mais difícil do DOE é planejar o experimento em termos de seleção de fatores apropriados para o teste, que intervalos selecionar, quantas repetições devem ser usadas e qual é o ponto central necessário. Os passos práticos gerais e as diretrizes para o planejamento e a condução de uma pesquisa experimental utilizando a técnica DOE são listadas abaixo (DURAKOVIC, 2018):

1. Definição dos objetivos - lista com os problemas que serão investigados;
2. Definição da variável de resposta - resultado mensurável do experimento, baseado nos objetivos previamente definidos;
3. Determinação dos níveis e fatores - seleção das variáveis independentes (fatores) que alteram a variável de resposta;
4. Determinação do tipo de projeto experimental;
5. Realização do experimento de testes;
6. Análise de dados usando métodos estatísticos;
7. Conclusões práticas e recomendações - incluindo validação dos resultados.

De posse dos dados obtidos, faz-se necessário, por parte do pesquisador, a realização de um pré-processamento e uma análise criteriosa da base de dados do estudo, de forma a investigar suas características, como presença de dados faltantes, outliers, tendência, sazonalidade, etc. Essas informações precisam ser checadas e tratadas antes de avaliar as informações oriundas da massa de dados, de forma a subtrair características inerentes ao processo (SHABBIR *et al.*, 2014).

No planejamento de experimentos há três princípios básicos: controle, randomização e repetição. O primeiro princípio foca na organização dos elementos participantes das análises, tanto o grupo experimental quanto o de referência, com a comparação dos resultados entre eles ao final. Já a randomização tem como objetivo garantir que não haja um tratamento diferente (exceto a variação específica causada pela variação aleatória) entre os grupos de amostras integrantes dos testes. Por fim, a repetição garante que haja uma maior massa de dados para reduzir a variação casual nos resultados (MOORE *et al.*, 2009).

Uma estratégia de experimentação bastante usada na prática é a abordagem de um fator por vez (OFAT – One Factor At Time). O método OFAT consiste em selecionar

um fator, exemplo um parâmetro que se pretenda analisar, e fazer alterações sucessivas nesse fator, dentro de uma faixa de valores permitidas, mantendo os outros fatores constantes. Caso queira analisar o efeito de um outro fator, fixa-se todos os outros e faz-se as alterações nesse segundo, da mesma forma que feito para o primeiro, buscando investigar todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores. Como resultado, consegue-se verificar o comportamento do sistema para cada fator de forma independente. Não se consegue, entretanto, avaliar uma possível interação entre os fatores usando essa estratégia (MONTGOMERY, 1984).

O experimento fatorial é a estratégia correta quando se pretende verificar a interação entre os diversos fatores, na qual os fatores são modificados ao mesmo tempo, ao invés de se fazer de forma independente, tal qual o método OFAT. Um planejamento fatorial é necessário quando as interações podem estar presentes, evitando conclusões enganosas. No exemplo da Figura 3.2 tem-se x níveis do fator A e y níveis do fator B, e nos vértices o resultado de cada combinação de testes xy (MONTGOMERY, 1984).

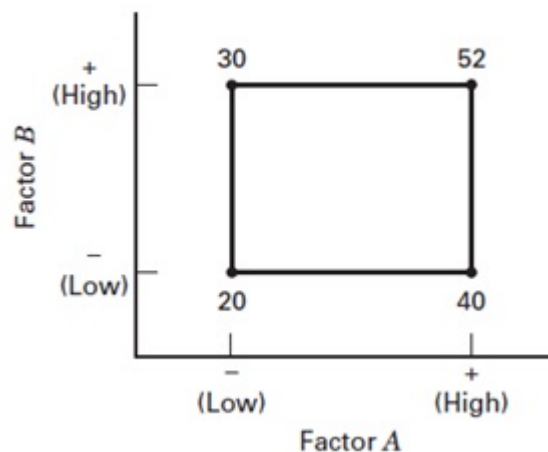


Figura 3.2: Experimento fatorial com 2 fatores – resposta (y) nos vértices

Quando observa-se uma diferença na resposta entre os níveis de um fator, e que essa não é a mesma em todos os níveis dos outros fatores, diz-se que há uma interação entre os fatores, conforme verificado na Figura 3.3.

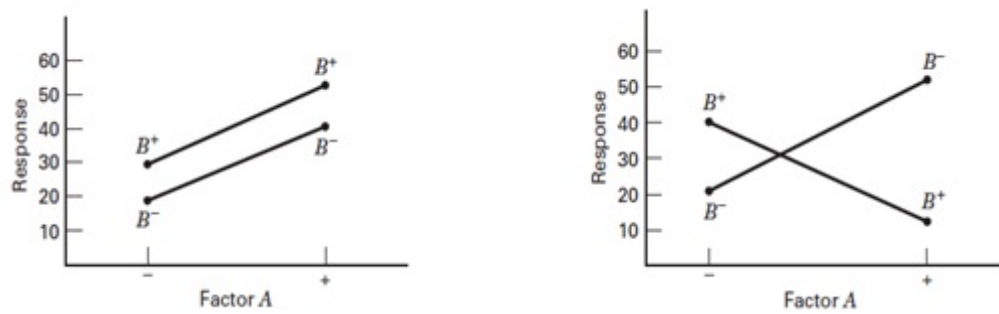


Figura 3.3: Experimento fatorial sem (esq) e com (dir) interação entre os fatores

Em um experimento fatorial com múltiplos fatores (A, B, ..., K), com dois níveis ("baixo" e "alto"), por exemplo, a complexidade da experimentação pode ser um problema. A quantidade de combinações possíveis aumenta a medida em que aumenta o número de fatores. Por exemplo, um experimento com 2 níveis e 8 diferentes fatores resulta um total de 256 combinações. O experimento de múltiplos fatores requer muitos recursos, materiais, além de ter um alto custo e um tempo elevado para ser realizado. Um problema adicional com o planejamento fatorial múltiplo é manter as condições experimentais inalteradas durante um grande número de experimentos e por um longo tempo. Um planejamento fatorial completo é conveniente para um número baixo de fatores se os recursos estiverem disponíveis. O desenvolvimento de experimentos fatoriais válidos e eficientes produz dados quantitativos que suportam à tomada de decisões durante a etapa de um projeto ou melhoria de algum sistema, processo ou produto (DURAKOVIC, 2018).

3.3 Exemplos práticos de utilização da metodologia no ambiente industrial

O trabalho de Sir Fisher sobre o planejamento de experimentos agrícolas é amplamente reconhecido como o primeiro marco no campo do DoE. Posteriormente, vários projetos com experimentos reais/físicos foram desenvolvidos, conhecidos como projetos clássicos. Enquanto o DoE clássico baseia-se em experimentos físicos, a introdução dos computadores no ambiente industrial possibilitou uma nova ramificação do DoE, o DoE moderno, baseado em modelos e simulações (GARUD *et al.*, 2017).

Como exemplo da aplicação do DoE nas indústrias recentemente, (ULISSES, 2007), aplicou a técnica em uma siderúrgica com objetivo de otimização do processo de laminação a frio. Nesse trabalho, ficou evidenciado a redução de 0,5% na variabilidade das espessuras das bobinas produzidas, ao se utilizar os valores mais adequados para as variáveis controláveis do referido processo e que apresentam influência direta nos resultados.

Em outro estudo, conduzido por (SEN, 2016), investigou-se o efeito da taxa de alimentação (kg/h), da força da gravidade (G) e da taxa de fluxo de água de fluidização

(L/min) no processo de beneficiamento da cromita usando o concentrador Knelson KC-MD3. Um experimento fatorial completo em conjunto com a metodologia de superfície de resposta foram utilizados para desenvolver modelos matemáticos para determinação do grau e recuperação de concentrado de Cr_2O_3 . Verificou-se que os valores previstos estavam condizentes com os dados experimentais, confirmados posteriormente por experimentos de validação. Os resultados do experimento indicaram que a taxa de fluxo de água de fluidização é a variável independente/dominante que interfere no grau e na recuperação do concentrado. Após aplicação de otimização numérica, pode-se determinar que operando o concentrador Knelson com taxa de fluidização da água de 11 L/min, força G de 60 G e taxa de alimentação de 12 kg/h, é possível garantir uma recuperação de 72% de Cr_2O_3 a partir de material alimentado a 43%.

3.4 Aplicação de planejamento de experimentos no problema do laboratório

Como verificado nos testes com as amostras padrões do laboratório, há uma nítida diferença na qualidade da pastilha produzida por cada um dos equipamentos de pulverização e prensagem Centaurus. Há um limiar aceitável de erro entre as amostras, haja visto que todo o processo é passível de imprecisões. Contudo, focar na redução da variabilidade dos resultados químicos das amostras e garantir que tais resultados estejam de acordo com as amostras de referência (padrões) é o foco principal da equipe do laboratório.

Uma das possíveis soluções para garantir essa uniformidade na qualidade do produto (no caso a amostra pulverizada e prensada) produzido pelos Centaurus é fazer um estudo de sensibilidade para avaliar como a variação dos parâmetros (variáveis de processo) afetam diretamente o resultado do teor das amostras de minério de ferro é de suma importância para reduzir sua variação e garantir que os teores estejam dentro das especificações desejadas. Esse seria um ajuste pontual e específico para cada um dos equipamentos Centaurus individualmente, de forma a compensar pequenas diferenças intrínsecas entre eles, desgaste desigual das partes internas responsáveis pelo processo de fragmentação do minério. Espera-se que com uma parametrização adequada e específica dos equipamentos, será possível obter uma amostra pulverizada e prensada de forma mais homogênea e, conseqüentemente, que os teores químicos dos elementos estejam dentro das especificações desejadas, reduzindo, portanto, a quantidade de repetições de ensaios, o que é sempre desejável.

De forma a verificar a relação de causa e efeito de cada uma das variáveis, verificar quais apresentam um maior efeito para o resultado e como se interagem, planejou-se o seguinte experimento baseado na técnica de Design of Experiments (DoE): - 5 fatores (A – velocidade de rotação; B – tempo de moagem; C – força de prensagem; D – tempo

de prensagem; E – tempo de limpeza); - 2 níveis diferentes para cada fator (valores diferentes); - 32 diferentes combinações de testes; - 4 campanhas de teste, em quatro diferentes cenários; - Total: 128 amostras analisadas

Como resultado, verifica-se que há, claramente, parâmetros que apresentam um maior grau de interferência na qualidade da pulverização / prensagem das amostras, como os fatores A e B, e outros que alteram pouco ou quase nada nesse processo de preparação e confecção das pastilhas prensadas, como os fatores C, D e E, Figura 3.4.

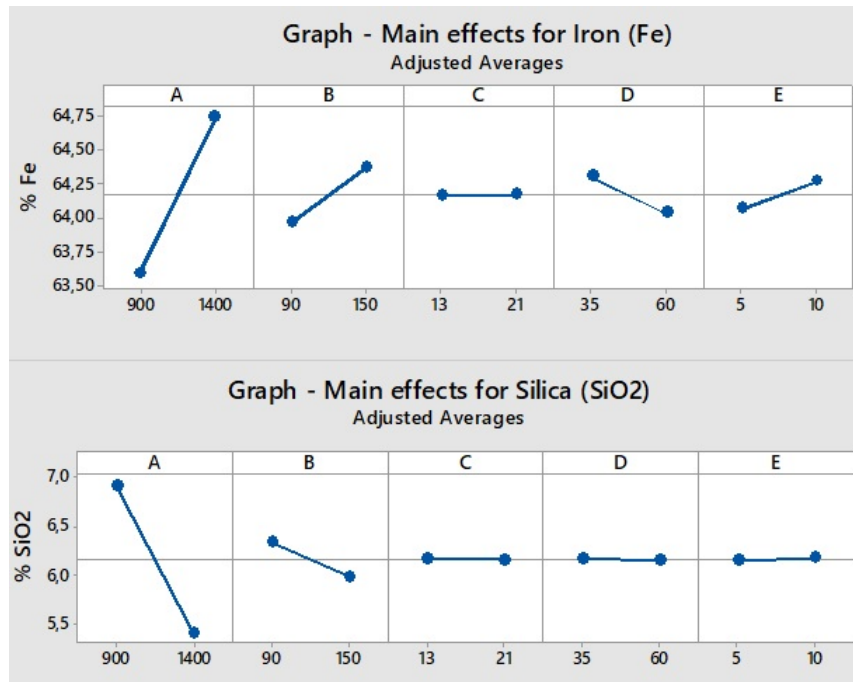


Figura 3.4: Planejamento de Experimentos - DoE

3.5 Seleção do parâmetro alvo

Após a verificação das variáveis que mais influenciavam a preparação da amostra no equipamento Centaurus, decidiu-se pela utilização de apenas uma dessas variáveis como fator principal do estudo. Devido a restrições de segurança do equipamento em não permitir um range muito grande de variação na velocidade de rotação do moinho, além de velocidades muito altas ocasionarem um desgaste prematuro e/ou fraturas nos corpos moedores, decidiu-se pela utilização do tempo de moagem como parâmetro alvo. Na Figura 3.5 verifica-se o comportamento do %Ferro e %Sílica à medida em que se aumentava o tempo de moagem da amostra dentro do equipamento, verificando que há uma clara relação entre essa variável com as variáveis de saída.

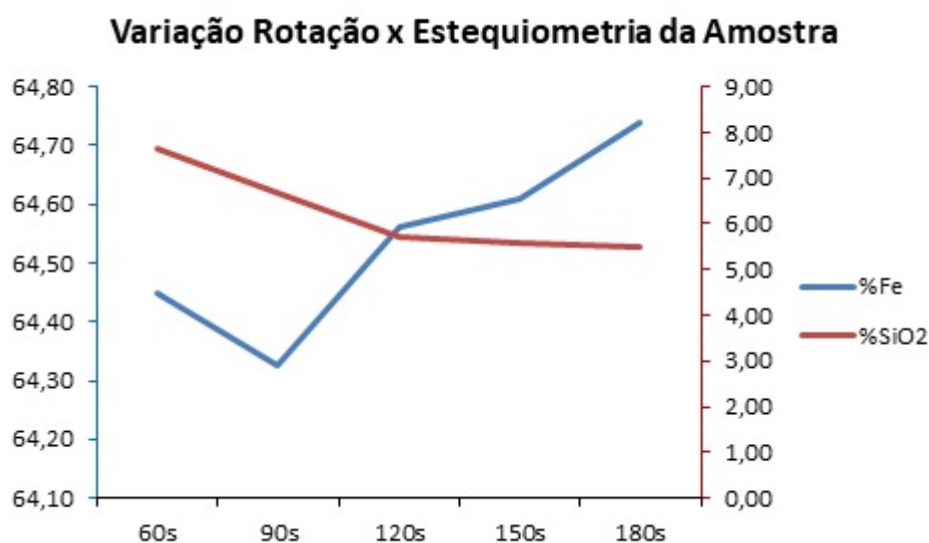


Figura 3.5: Variação do tempo de moagem x estequiometria amostra

Fisicamente, o que ocorre com as amostras é uma maior fragmentação das amostras à medida em que aumenta-se o tempo em que o material permanece dentro do equipamento sendo cominuído. Para verificar esse comportamento, pulverizou-se 5 amostras no Centaurus, sendo que para cada pulverização definiu-se um tempo diferente, conforme Figura 3.6. À medida em que aumenta-se o tempo de pulverização, observa-se um deslocamento à direita e um achatamento das curvas. Isso indica que o % de material retido acumulado nas peneiras maiores (maior granulometria) vai reduzindo à medida em que aumenta-se o tempo de pulverização das amostras.

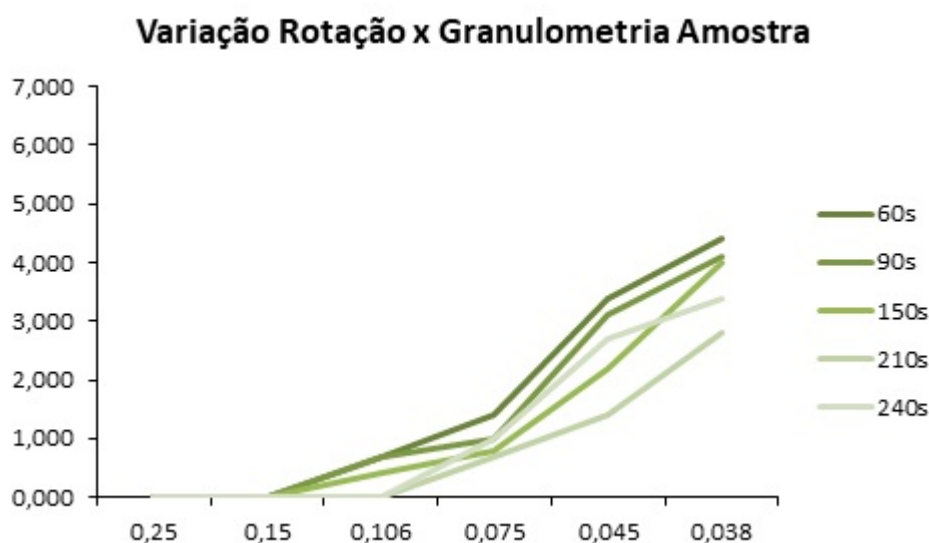


Figura 3.6: Variação do tempo de moagem x granulometria amostra

Por ser um laboratório operacional, e não de pesquisa, as peneiras do laboratório

usadas para as verificações cotidianas de granulometria têm limitações para realizar uma análise granulométrica mais aprofundada. Para isso, realizou-se uma campanha de amostras para análise posterior em um granulômetro a laser em um outro laboratório. Ficou constatado que o comportamento das frações maiores também se estende às frações microscópicas, havendo uma maior densidade de material retido com granulometrias menores à medida em que o tempo de pulverização aumenta (% do passante das malhas mais finas é maior para a amostra pulverizada por um período mais longo), conforme Figura 3.7.

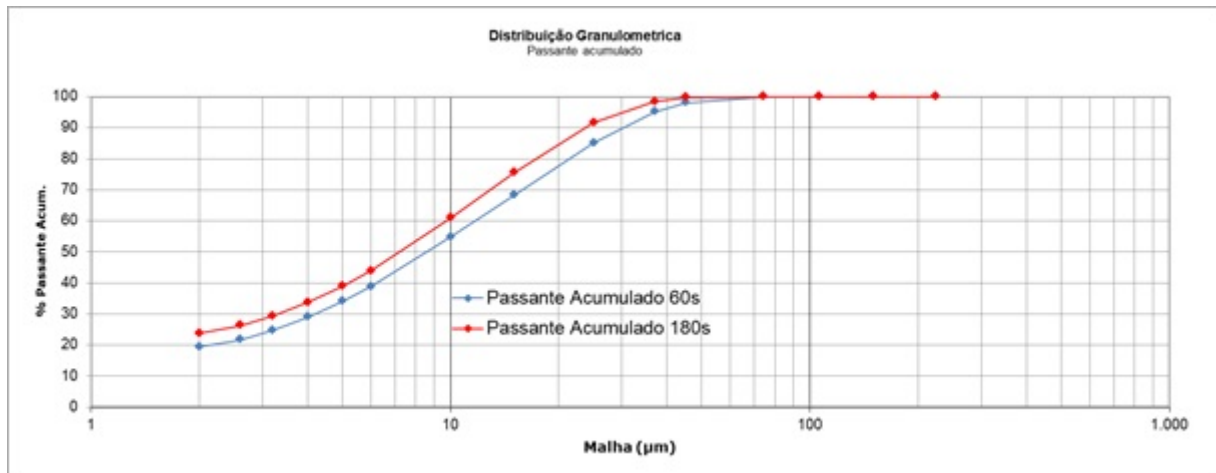


Figura 3.7: Distribuição granulométrica (granulômetro a laser)

De posse das informações dos testes realizados e com um conhecimento mais aprofundado sobre o processo de pulverização e prensagem no Centaurus, pode-se agora sistematizar tal conhecimento para realizar, de forma sistemática e dinâmica, a parametrização mais adequada para cada um dos equipamentos. A utilização de técnicas de controle especialista, que utilizam esse conhecimento existente ou desenvolvido sobre um determinado processo, é a técnica mais adequada para o desenvolvimento de tal sistema.

Capítulo 4

CONTROLE ESPECIALISTA

4.1 Avanço da utilização de tecnologia no ambiente industrial

A inserção de sistemas de informação e tecnologias de automação na indústria mineral fez-se necessária para elevar o patamar de competitividade dessa indústria, conforme requerido nos tempos atuais. Aliado a essa nova tendência, novos equipamentos e rotas de processo foram desenvolvidos, visando um melhor aproveitamento dos recursos minerais e menores impactos ambientais (BENVINDO DA LUZ *et al.*, 2004). A base de dados coletada dos equipamentos e dos processos aumentou consideravelmente, o que requer a utilização de técnicas de controle avançado cada vez mais robustos e específicos para apoiar os engenheiros e pesquisadores na análise de grandes massas de dados, com diversos critérios a serem analisados, quase impossíveis de serem computados manualmente.

Outro fator preponderante para a utilização de sistemas especialistas no ambiente industrial se deve a própria dinâmica de operação das indústrias minerais, a qual é geralmente desconhecida, altamente complexa e estão sujeitas a distúrbios e incertezas (CHAI *et al.*, 2014). Os distúrbios externos, como granulometria e dureza do minério, podem alterar abruptamente com o tempo, causando grandes perturbações para o processo. Os distúrbios internos, por sua vez, são causados por efeitos de acoplamento e parâmetros que são variantes no tempo (por exemplo, corpos moedores, reagentes, etc.), os quais podem afetar a característica dinâmica e até resultar em uma operação instável do processo (ZHOU *et al.*, 2013).

Essa dinâmica de operação, sujeita a grandes e frequentes variações e perturbações, aliada à alta complexidade dos processos industriais torna o ajuste ótimo dos set points das variáveis operacionais difícil de se realizar pelos operadores, mesmo os mais experientes e capacitados. Dessa forma, o controle operacional nas indústrias de processos não apenas influenciam a qualidade do produto, eficácia dos processos, produtividade da planta e consumo de insumos, mas também tem impacto significativo na operação confiável e

segura das plantas (ZHOU *et al.*, 2016).

Portanto, é seguro afirmar que o controle de processo é parte integrante das plantas de beneficiamento modernas. Na verdade, o controle é considerado uma tecnologia madura na indústria de processos, sem a qual a mesma não poderia operar em larga escala, com eficiência, produtividade e qualidade. Existe um impulso natural para difundir a utilização de instrumentação de campo, controles e sistemas especialistas nas plantas de beneficiamento. Com isso, consegue-se gerar uma grande base de dados e indicadores para a tomada de decisão por equipes cada vez mais qualificadas e enxutas, mas que irão direcionar à operação baseado em KPI's de negócio, como qualidade do produto final, % de contaminantes, volume de produção, ao invés de focar em operações manuais e repetitivas, as quais serão feitas por computadores (OLIVIER e CRAIG, 2017).

4.2 Sistemas especialistas utilizando lógica fuzzy

As principais técnicas utilizadas empregam redes neurais, controle preditivo baseado em modelo (*model predictive control* - MPC), algoritmos genéticos, lógica fuzzy (em menor escala, contudo), dentre outros, de forma separada ou um híbrido entre duas ou mais técnicas, dependendo da complexidade do problema analisado.

Especificamente sobre a regra fuzzy, criada por Zadeh em 1965, a mesma pode ser considerada como uma álgebra das relações, onde as variáveis, ao invés de serem definidas por equações diferenciais ou álgebra simples, passam a ser definidas por variáveis linguísticas, por exemplo expressões intuitivas como “baixo”, “médio”, “alto”, figura 4.1 (ZADEH, 1965). Uma característica importante atribuída a lógica fuzzy é que ela foi desenvolvida com o intuito de simular o raciocínio humano e sua capacidade de julgamento em situações nas quais as informações disponíveis não são claras ou estão incompletas. Expressa-se a informação incerta e ambígua na linguagem humana quantitativamente a fim de imitar o pensamento, raciocínio e julgamento realizados pelo cérebro humano (ZHOU *et al.*, 2013). Dessa forma, é possível que os sistemas tomem decisões racionais baseados em informações muitas das vezes não lógicas em um ambiente de incertezas e imprecisão.

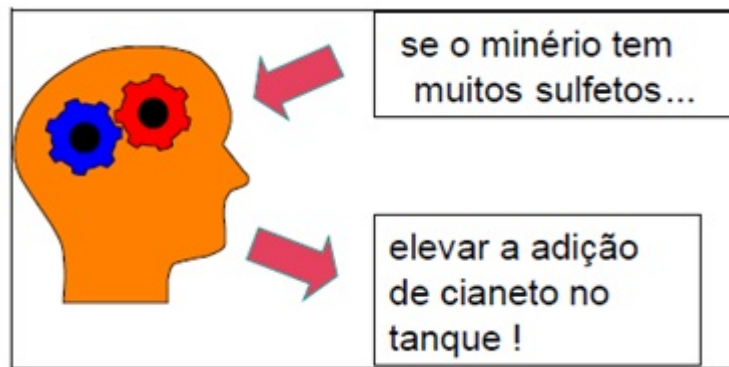


Figura 4.1: Exemplo de regra heurística.

Os fuzzy sets, ou conjuntos fuzzy, como “alto”, “OK”, “pouco”, são empregados para descrever os estados do processo, ou seja, as variáveis de entrada e saída. Baseado na relação entre essas entradas e regras de associação, há a geração de um conjunto fuzzy de saída, descrito por meio de expressões como “abrir um pouco”, ou “aumentar / elevar”, conforme figura 4.1, que irá atuar controlando o processo dinamicamente. Contudo, para ser programada em um computador, por exemplo, há a necessidade de se transformar essa saída fuzzy em um valor numérico, o qual será aplicado nos equipamentos de fato. Essa transformação é feita em um processo denominado “defuzzificação”, da mesma forma como feito para as variáveis de entrada, conforme figura 4.2.

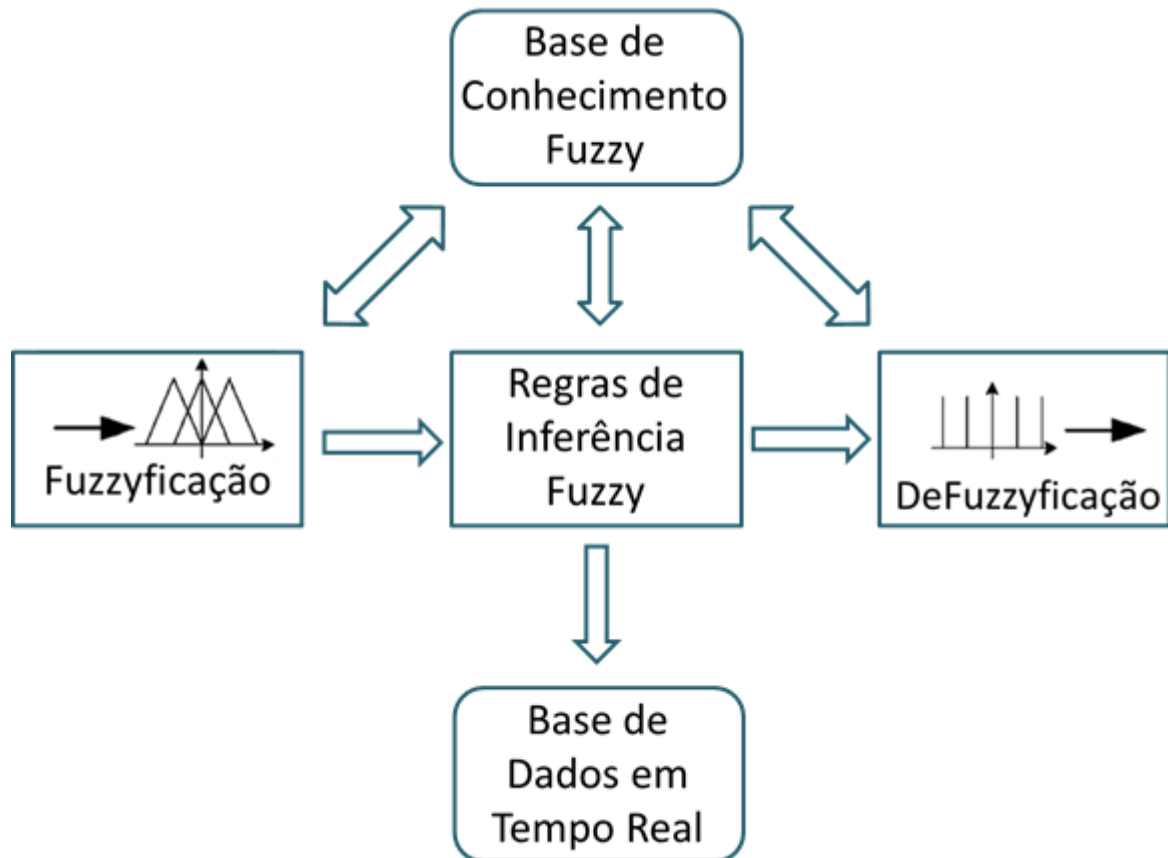


Figura 4.2: Composição do mecanismo de inferência Fuzzy

Apesar de diversos bons exemplos obtidos a partir da utilização de técnicas de controle avançado na indústria, verifica-se ainda um certo desconhecimento / pouca utilização de técnicas utilizando lógica fuzzy. Pesquisa realizada entre indústrias de diversos setores, como petroquímico, óleo e gás, siderurgia e mineração, dentre outros, mais de 50% dos entrevistados ou não conhecia ou nunca utilizou lógica fuzzy em suas aplicações práticas, figura 4.3.

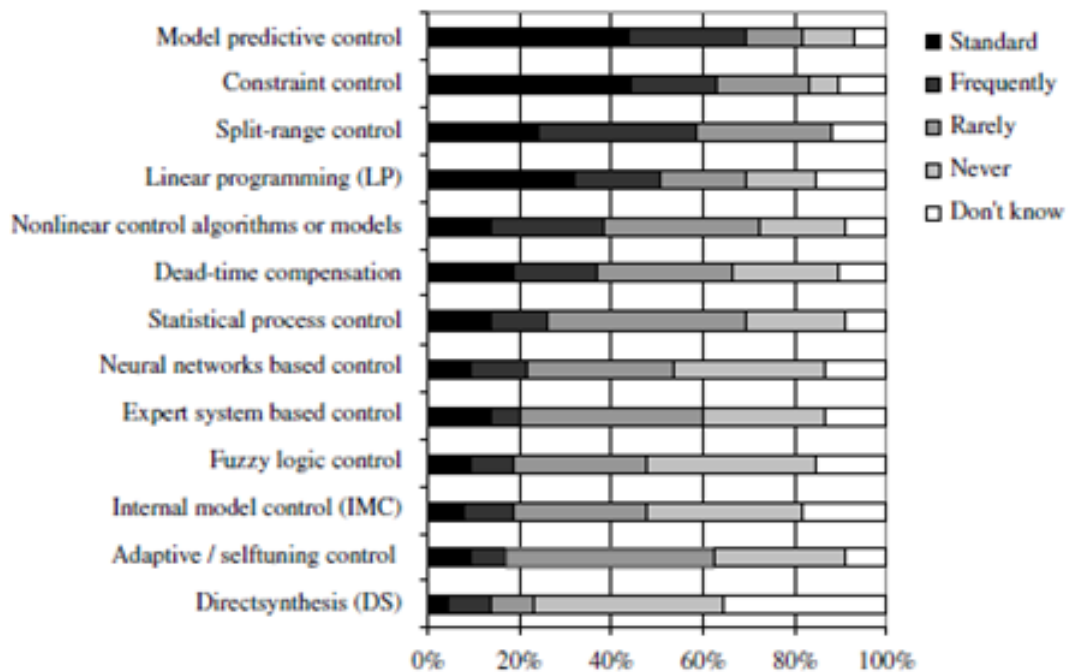


Figura 4.3: Pesquisa sobre % de utilização de APC na indústria

O interesse demonstrado pela indústria mineral pelos sistemas especialistas baseado em lógica fuzzy tem sido, em geral, semelhante ao demonstrado pelas indústrias de manufatura: uma exaustiva, cautelosa e investigativa busca de oportunidades, seguido, porém, por implementações pontuais das estratégias em alguns locais. Contudo, as organizações precisam focar e concentrar esforços na aquisição de conhecimento dos operadores mais eficientes e experientes e armazená-los de forma a facilitar sua utilização futura. No cenário atual, apesar da evolução tecnológica, é impossível imaginar hoje que as estratégias de controle e os sistemas especialistas irão substituir todos os operadores e especialistas em atuação nas indústrias minerais (ROMANS, 1993).

Contudo, há várias estratégias que podem e estão sendo usadas durante a implementação de sistemas especialistas fuzzy, de forma a reduzir a ocorrência de erros. Deve-se, primeiramente, testar exaustivamente o sistema desenvolvido, de forma *offline*, desde o início do desenvolvimento. Envolver os operadores e técnicos de processo desde a concepção inicial, principalmente durante os testes práticos, de forma a validar se as ações tomadas estão condizentes com ações que eles executam na prática. Fazer com que todos os envolvidos sintam-se parte da implementação desenvolvida, fornecendo a todos o máximo de informações possíveis, de forma a facilitar o processo de aceitação e utilização futura da ferramenta (ROMANS, 1993). Dada a sua simplicidade de implementação e assimilação dos conceitos, é uma técnica com grande potencial e com uma vasta gama de aplicações, o que pode facilitar a sua difusão (ZHOU *et al.*, 2013).

4.3 Exemplos práticos de utilização de sistemas especialistas fuzzy na indústria

A utilização de técnicas de otimização/sistemas especialistas nos processos industriais vem ganhando cada vez mais espaço. Isso se deve a simplicidade de implementação, flexibilidade, adaptabilidade do sistema frente às variações tanto de processo quanto do minério processado. Bons resultados já estão sendo obtidos e apresentados através de estudos de caso em diversas empresas. Garantir a homogeneidade do processo é essencial para obter um produto adequado, dentro das especificações requeridas. Contudo, dado a não homogeneidade dos depósitos minerais, é imprescindível a utilização de técnicas que consigam ajustar e otimizar o processo baseado nas diferentes características do minério de forma dinâmica e em tempo real (BENVINDO DA LUZ *et al.*, 2004).

Exemplos de utilização de sistemas fuzzy na indústria mineral para controle dos processos incluem desde balanços de massa e energia, definição do volume de produção e redução de custo com insumos. Uma aplicação de sistema baseado em lógica fuzzy, citada em (MEECH, 1990), foi utilizado para capacitação de operadores, em ambiente simulado, de uma grande variedade de plantas de britagem distintas. Outra aplicação citada em (MEECH, 1990) apresenta a aplicação desse tipo de sistema por pesquisadores chilenos para realizar o controle de células de flotação. Um terceiro exemplo de aplicação prática menciona a utilização dessa técnica para controle de adição de reagentes nos processos de flotação, baseado na correlação de diversas informações coletadas ao longo de vários horizontes de tempo e em diferentes faixas de operação.

Na mina de Carajás, da Vale, utilizou-se algoritmos baseados em lógica fuzzy para controlar um espessador de rejeito. Verificou-se que as economias no bombeamento de água nova e redução na adição de floculante foram tão altas que o projeto implantado teve retorno em apenas dois meses (SANTOS *et al.*, 1995).

Relata-se na literatura também trabalhos relacionados a aplicação de sistemas especialistas utilizando lógica fuzzy nos processos de moagem. Em (ZHOU *et al.*, 2013), constatou-se redução no consumo de energia em 4,82% e redução no consumo de corpos moedores em 6,81%, além de obter um aumento na taxa de alimentação em 3,27%. Já no trabalho apresentado em (CHEN *et al.*, 2007), implementou-se um sistema especialista baseado em lógica fuzzy buscando garantir uma maior estabilidade na distribuição granulométrica das partículas e uma maior eficiência do moinho. Com a implementação realizada, foi possível garantir um aumento de 8% na taxa de alimentação do moinho, garantindo uma maior eficiência do moinho, além de garantir uma regularidade da distribuição granulométrica do material.

Na área de laboratórios, trabalho apresentado em (STÉZOWSKI *et al.*, 2002) há utilização de lógica fuzzy no desenvolvimento de um procedimento automático para calibração de detectores de energia. Com o advento de matrizes de múltiplos detectores,

muitas tarefas que normalmente são executadas por físicos, como a calibração de detectores de energia, tornam-se muito demorados. A lógica fuzzy propõe um arcabouço teórico para construir algoritmos próximos ao modo humano de pensar. Para calibrar um detector, é preciso selecionar, em um espectro proveniente de uma fonte conhecida, vários picos (rotulados Ref 1; Ref 2; Ref k) que serão usados para determinar os coeficientes de calibração. A correspondência entre esses k picos e seus valores são tabelados e estabelecidos para esta referência de espectro. O sistema implementado deve reconhecer k picos similares no espectro de todos os outros detectores. O experimento conduzido conseguiu fazer a identificação de picos certos em 97,5% dos casos, para os quais não há necessidade de intervenção humana.

Sabe-se que, com a crescente pressão por aumento de produtividade e redução de custos, aliados as questões ambientais, as empresas de mineração continuarão sendo desafiadas a buscar novas tecnologias e estratégias de forma a permanecerem competitivas e sustentáveis nos próximos anos. A utilização das tecnologias, equipamentos e softwares para controle e otimização do processo têm mostrado grande potencial. Resultados expressivos tem sido obtidos em diversas empresas, que deverão, cada vez mais, implantarem essas soluções para auxiliar nas etapas de tomada de decisão, integração entre diferentes áreas e processos e otimização da operação em toda a cadeia de produção (MEECH, 2006).

4.4 Aplicação do sistema fuzzy no problema do laboratório

No laboratório, após a entrada em operação dos equipamentos da planta automatizada, vários comportamentos e características apresentadas nas etapas de preparação das amostras e de análise dos resultados eram desconhecidos ou divergentes em relação a preparação manual vigente até então. Contudo, o conhecimento e experiência dos engenheiros e técnicos do laboratório era uma fonte de informações que poderiam ser usadas de forma a determinar os melhores métodos e configurações de preparação de forma a garantir resultados precisos e com baixa variabilidade de forma contínua.

Realizou-se a modelagem das variáveis fuzzy de entrada do sistema especialista, as quais seriam usadas na etapa de fuzzyficação: %Fe e %SiO₂ presente nas amostras analisadas, para cada conjunto de amostras existentes no laboratório de Itabira/MG. Como exemplo, a modelagem das entradas fuzzy para amostras do tipo SUT (Super Fino Itabira), conforme tabelas 4.1, para % de Fe, 4.2, % de SiO₂.

Tabela 4.1: Fuzzificação - Variável Fuzzy % Fe de Entrada

Fuzzificação - Entrada 1 (% Fe) - Trapezoidal				
%Fe	Min Value	Med Value 1	Med Value 2	Max Value
Muito Baixo 67,17	67,17	67,17	67,37	67,66
Baixo	67,37	67,6	67,84	68,07
Moderado	67,84	68,01	68,37	68,53
Alto	68,31	68,53	68,78	69
Muito Alto 69,21	68,72	69	69,21	69,21

Tabela 4.2: Fuzzificação - Variável Fuzzy %SiO₂ de Entrada

Fuzzificação - Entrada 2 (% SiO ₂) - Trapezoidal				
%SiO ₂	Min Value	Med Value 1	Med Value 2	Max Value
Muito Baixo 1,280	1,280	1,280	1,397	1,572
Baixo	1,382	1,558	1,660	1,821
Moderado	1,616	1,821	2,099	2,304
Alto	2,099	2,260	2,362	2,538
Muito Alto 2,640	2,391	2,538	2,640	2,640

Com as duas entradas, definiu-se as regras de inferência Fuzzy, as quais são formadas pela combinação de 5 faixas de valores para cada uma das entradas, totalizando 25 regras de inferência, conforme tabela 4.3. Diferentemente das variáveis de entrada que dependem do conjunto de amostras, as regras de inferência fuzzy são as mesmas, independentemente do tipo de amostras que será pulverizada/prensada.

Tabela 4.3: Regras de inferência fuzzy das variáveis de entrada

Regras de Inferência Fuzzy					
%Fe / %SiO ₂	Muito Baixo	Baixo	Moderado	Alto	Muito Alto
Muito Baixo	Ajuste -50	Ajuste -50	Ajuste -20	Ajuste -20	Manter
Baixo	Ajuste -50	Ajuste -20	Ajuste -20	Manter	Ajuste +20
Moderado	Ajuste -20	Ajuste -20	Manter	Ajuste +20	Ajuste +20
Alto	Ajuste -20	Manter	Ajuste +20	Ajuste +20	Ajuste +50
Muito Alto	Manter	Ajuste +20	Ajuste +20	Ajuste +50	Ajuste +50

Da mesma forma que as regras de inferência, no processo de Defuzzificação, a variável de saída fuzzy, tempo de pulverização do moinho Centaurus, é determinada da mesma forma para todos os conjuntos de amostras existentes hoje no laboratório automatizado, conforme Tabela 4.4.

Tabela 4.4: Variáveis fuzzy de Saída - Defuzzificação

DeFuzzyficação - Saída (tempo de moagem) - Triangular			
Tempo de rotação do Centaurus (s)	Min Value	Med Value	Max Value
Muito Baixo (Ajuste -50)	60	60	98
Baixo (Ajuste -20)	75	108	140
Moderado (Manter)	112	150	192
Alto (Ajuste +20)	165	193	228
Muito Alto (Ajuste +50)	205	240	240

Realizada a modelagem das variáveis fuzzy de entrada (fuzzyficação), figura 4.4, e saída (defuzzyficação), além da relação entre cada uma das variáveis (processo de inferência), pode-se agora utilizar o sistema implementado para determinar as melhores configurações de parâmetros para os moinhos, de forma a obter resultados químicos das amostras mais precisos e com uma menor variabilidade.

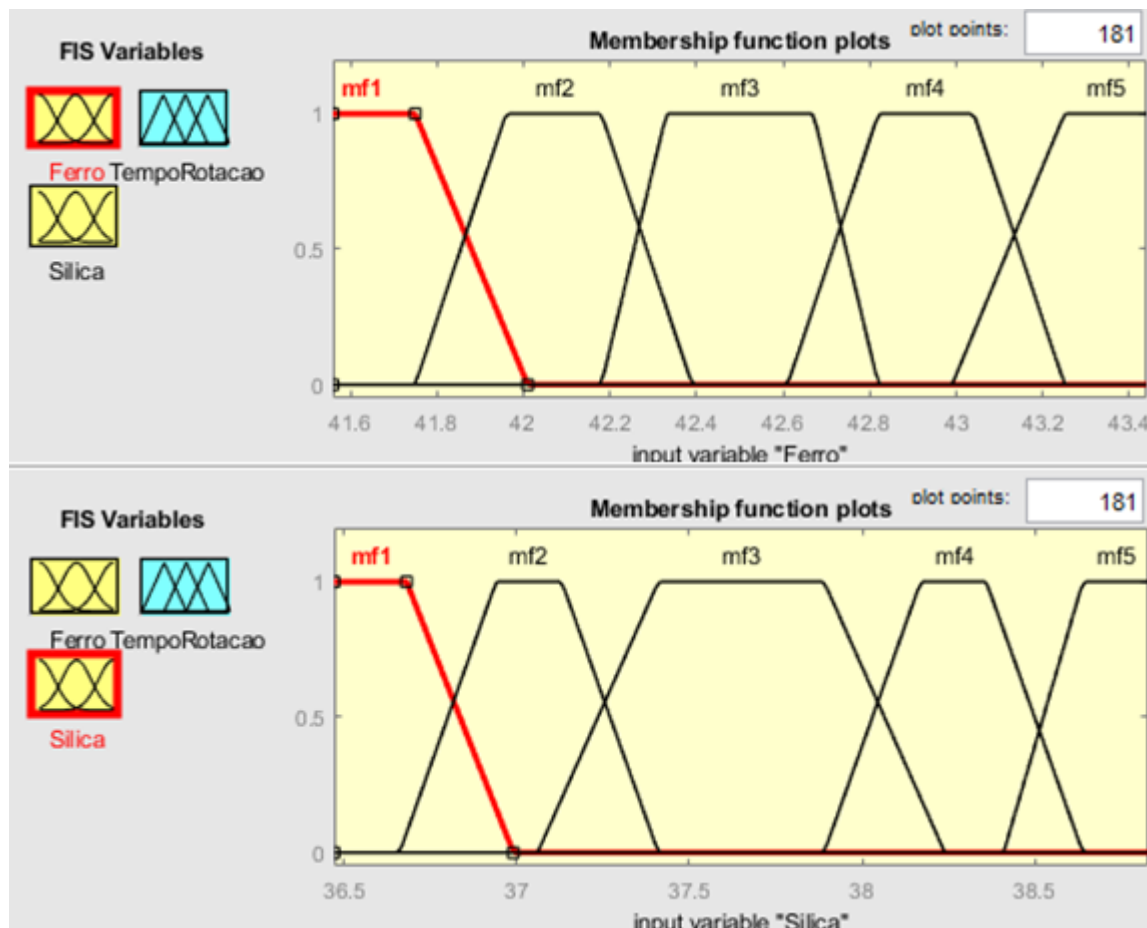


Figura 4.4: Funções de pertinência – teores de ferro e sílica.

Capítulo 5

RESULTADOS

Para verificar o desempenho do sistema implementado de forma prática, definiu-se pela realização de duas diferentes campanhas de testes distintas, uma baseada no histórico da amostra e outra com atuações contínuas, baseada nos teores químicos analisados da amostra anterior.

5.1 Correção única do tempo de moagem – baseado no histórico da amostra

A primeira bateria de testes de avaliação do sistema implementado buscava verificar o melhor ponto de operação de um determinado Centaurus escolhido, para um tipo de amostra definido. Para tanto, coletou-se o histórico de valores do período entre 14 de março e 24 de abril de 2019 do padrão da amostra preparados no Centaurus de referência do teste. A partir desses dados, utilizou-se o sistema especialista desenvolvido para calcular a melhor configuração daquele respectivo Centaurus naquelas condições operacionais e com os mesmos corpos moedores presentes nas preparações das semanas anteriores. Após calcular o novo parâmetro de tempo de moagem pelo sistema especialista, ajustou-se o equipamento com esse novo valor e realizou-se uma nova campanha de ensaios para avaliar o grau de assertividade obtido usando esse novo tempo de moagem.

O primeiro padrão escolhido foi o SUT, que engloba todos os produtos finais produzidos nas usinas de Itabira. O valor de tempo de moagem usado como referência foi de 150 segundos no Centaurus 2 da célula 2 de preparação (Cent_2_SP02). Usando o sistema fuzzy implementado, obteve-se um novo valor de 175 segundos, o qual foi usado na segunda bateria de testes para verificação, conforme Figura 5.1.

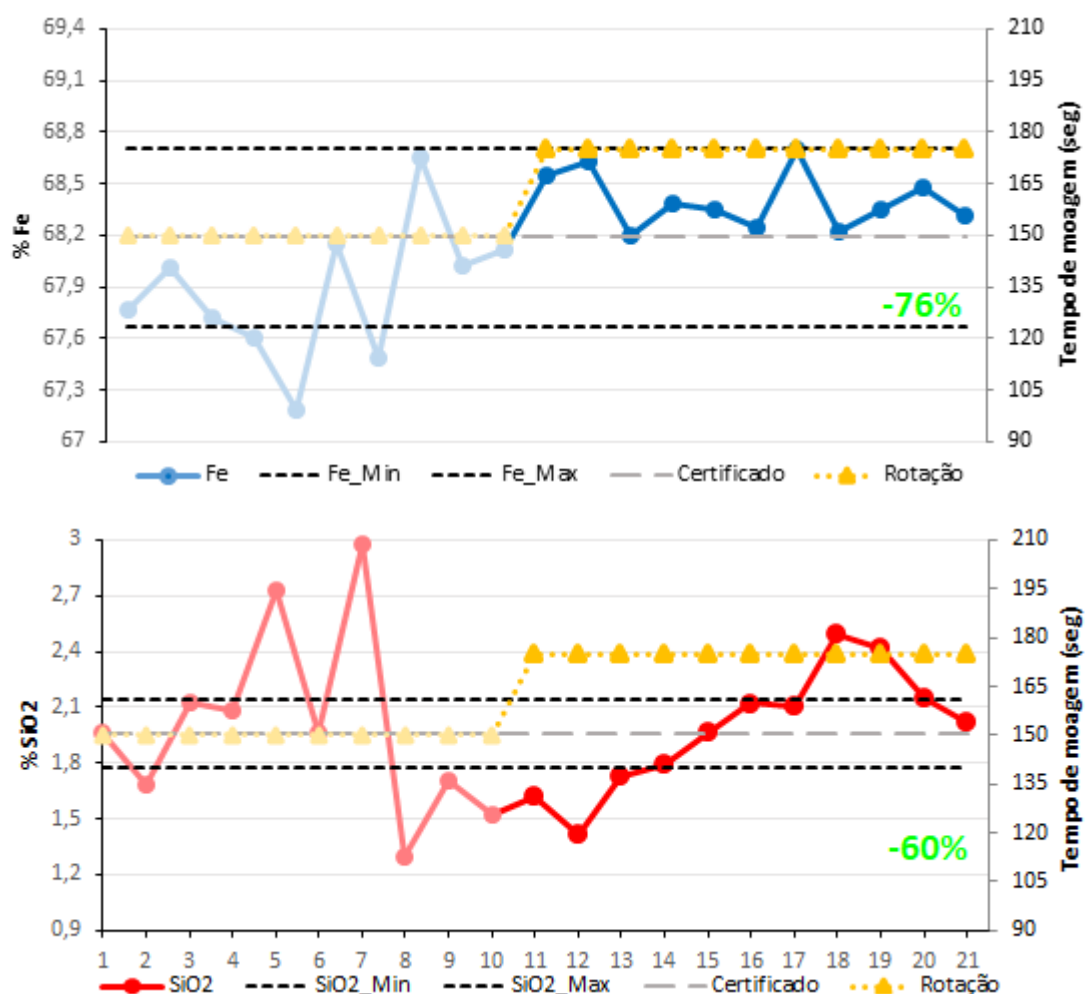


Figura 5.1: Correção única do tempo de moagem do Cent.2_SP02 - SUT.

Tabela 5.1: Erro quadrático médio – correção única - SUT

Erro quadrático médio			
	Antes	Depois	Redução
% Fe	0,2030	0,0478	-76%
% SiO ₂	0,2423	0,0973	-60%

O erro quadrático médio, em relação ao valor da amostra certificada (referência), teve redução de 76% para o Ferro e 60% para a sílica, Tabela 5.1. Contudo, analisando o box plot da Figura 5.2. verifica-se que apesar do erro médio ter diminuído, a variabilidade do erro para a sílica se manteve alto. Esse fato pode ser explicado devido baixos valores de teor de sílica presente nas amostras do conjunto SUT, em torno de 2%, com baixo range de valores possíveis, reduzindo a sensibilidade desse parâmetro. Pode-se concluir que o sistema especialista apresenta uma maior dificuldade de fazer as correções necessárias para garantir um bom resultado, como o observado para o ferro, quando os valores de entrada e o range de variação desses valores são muito pequenos, como observado para a sílica.

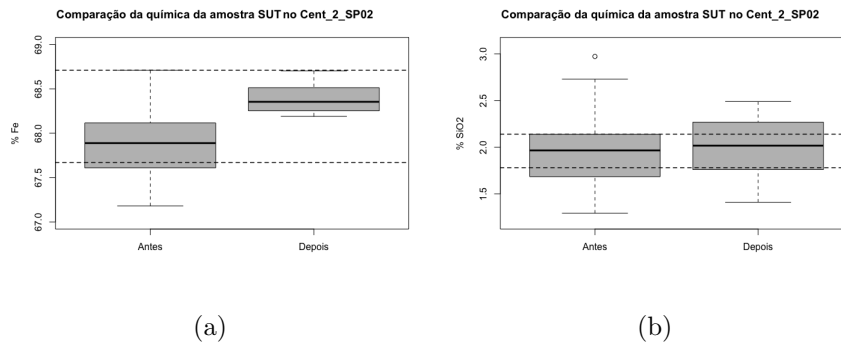


Figura 5.2: Distribuição estatística dos dados químicos das amostras SUT com correção única.

O segundo padrão escolhido foi o ALP, que engloba todas as amostras das alimentações dos processos de concentração das usinas de Itabira. O valor de tempo de moagem do Centaurus usado como referência foi de 150 segundos no Centaurus 2 da célula 2 de preparação (Cent_2_SP02). Usando o sistema fuzzy implementado na base de dados das amostras padrões desse mesmo tipo analisadas nas últimas semanas, obteve-se um novo valor de 135 segundos, o qual foi usado na segunda bateria de testes para verificação, conforme Figura 5.3.

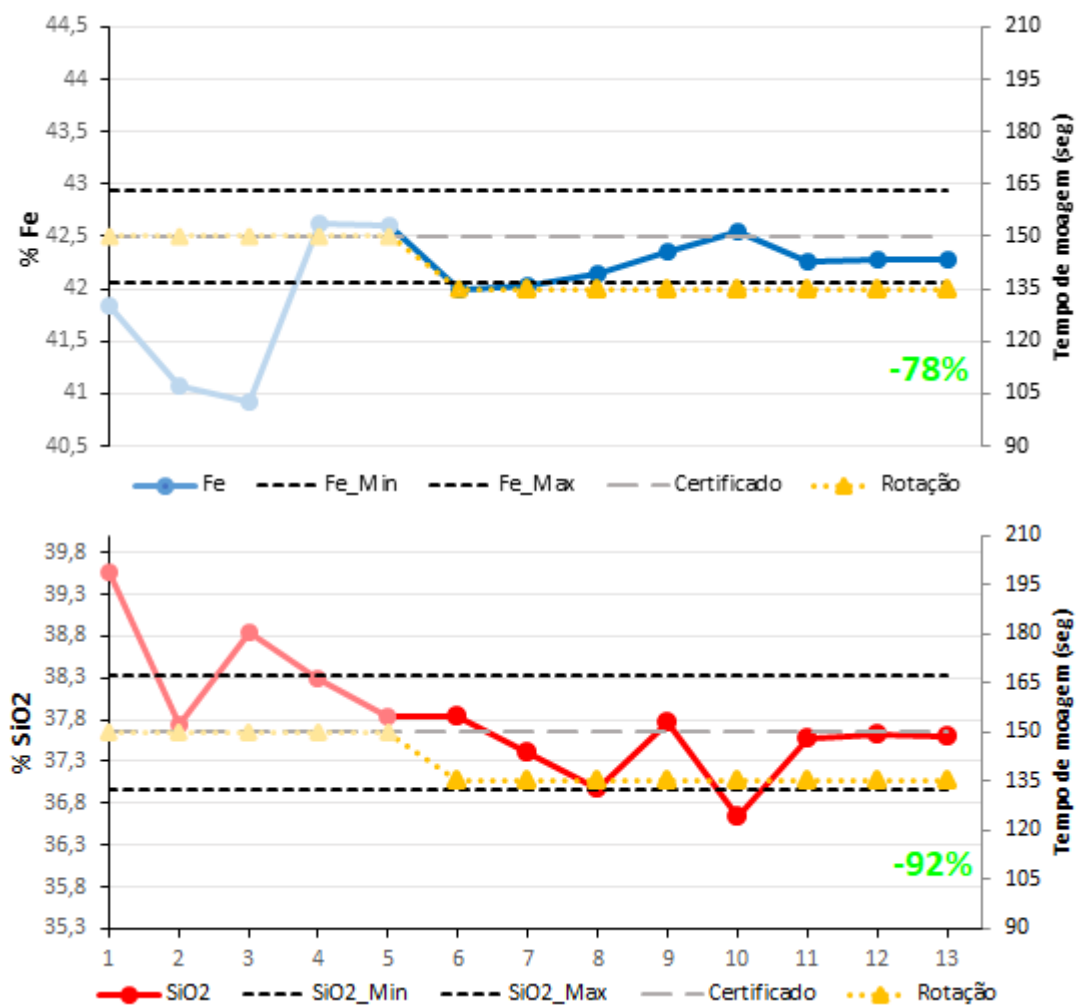


Figura 5.3: Correção única do tempo de moagem do Cent.2_SP02 - ALP.

Tabela 5.2: Erro quadrático médio – correção única - ALP

Erro quadrático médio			
	Antes	Depois	Redução
% Fe	0,7637	0,0646	-78%
% SiO ₂	0,7885	0,1750	-92%

O erro quadrático médio, em relação ao valor da amostra certificada (referência), teve redução de 78% para o Ferro e 92% para a sílica, Tabela 5.2. A análise do box plot da Figura 5.4 confirma o resultado observado anteriormente, na qual observa-se uma maior precisão e menor variabilidade dos resultados para os dois elementos, tanto ferro quanto sílica. Nos testes realizados com as amostras do tipo ALP, verificou-se que os parâmetros sugeridos pelo sistema especialista garantiram uma melhor preparação das amostras e, por consequência, um resultado químico mais estável e preciso.

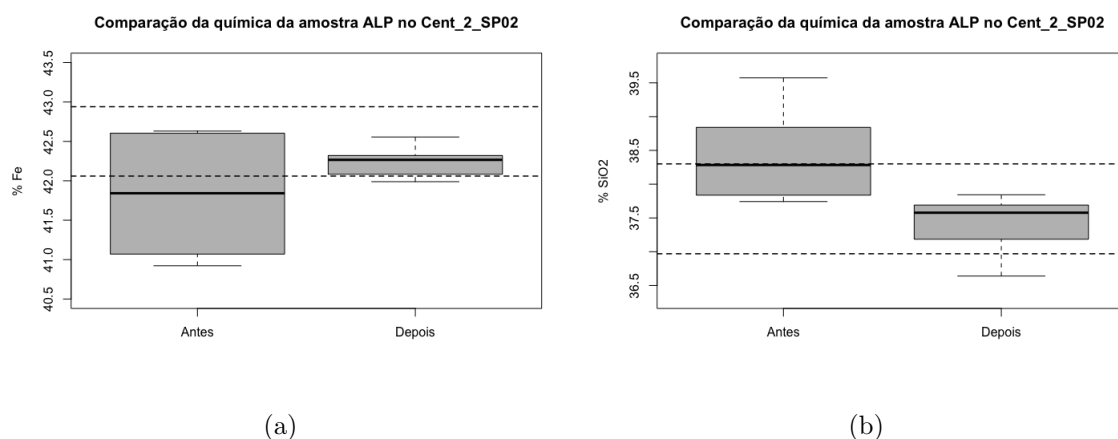


Figura 5.4: Distribuição estatística dos dados químicos das amostras ALP com correção única.

5.2 Correção contínua do tempo de moagem – baseado na última amostra

Na segunda bateria de testes de avaliação do sistema implementado busca-se verificar o melhor ponto de operação de um determinado Centaurus escolhido a partir do resultado químico da última amostra preparada. Utilizou-se o sistema especialista desenvolvido para calcular a próxima configuração recomendada para aquele equipamento. Com esse novo valor de tempo de moagem, prepara-se a próxima amostra, analisa no equipamento de fluorescência de raios-x e repete-se o processo, buscando sempre garantir que os elementos químicos analisados, Fe e SiO₂, satisfaçam os limites de especificação. Dessa forma, busca-se verificar se o sistema era capaz de adaptar-se a eventuais fatores que afetam a preparação e análise química das amostras.

- SUT (Super Finos Itabira)

Novamente, o teste inicia-se com amostra do tipo SUT. O valor de tempo de moagem usado como referência foi de 150 segundos no Centaurus 2 da célula 2 de preparação (Cent_2.SP02), valor presente na receita de preparação das amostras usadas como base para início dos testes. A partir do instante que o sistema fuzzy começa a ser utilizado, verifica-se variações desse parâmetro entre 105 e 195 segundos de tempo de moagem, conforme Figura 5.5. Tais alterações tem como objetivo atingir os valores de referência de ferro (Fe) e sílica (SiO₂).

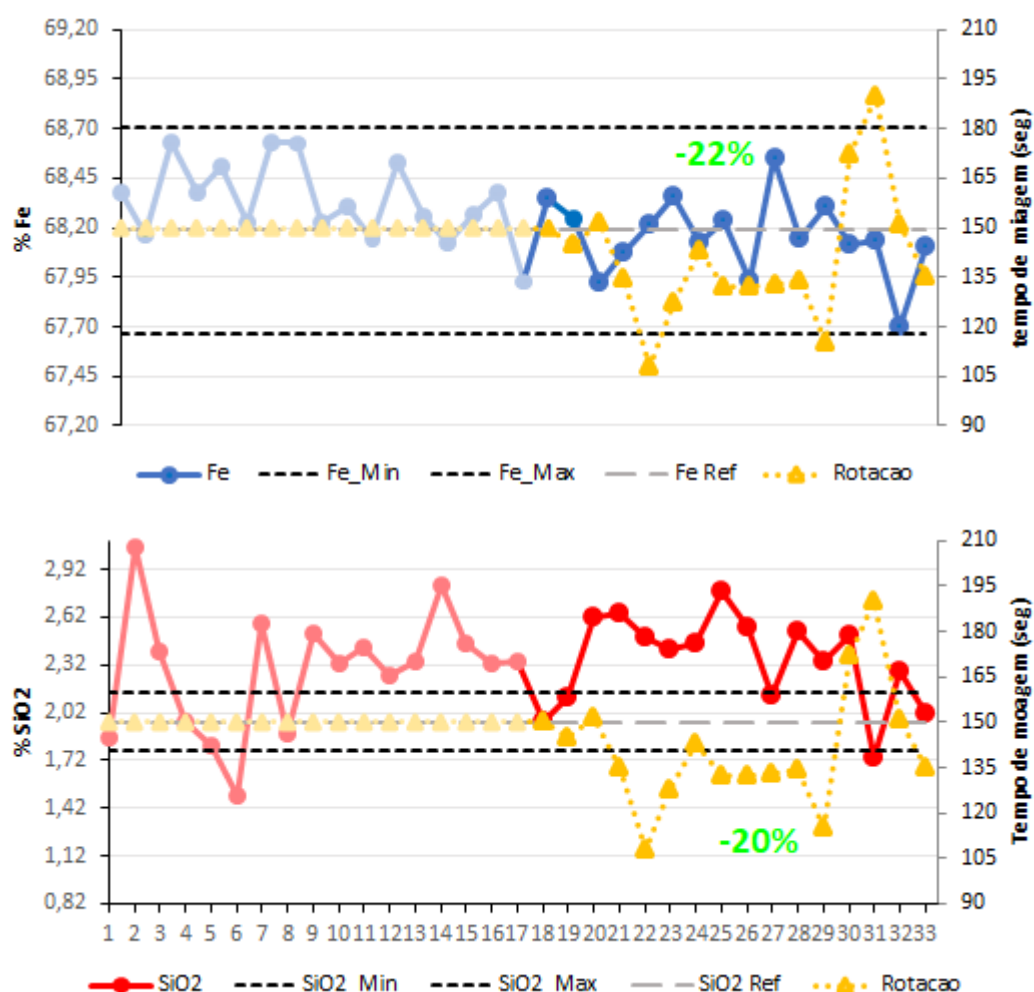


Figura 5.5: Correção contínua do tempo de moagem do Cent.2.SP02 - SUT.

Observa-se uma redução do erro quadrático médio, Tabela 5.3, em relação ao valor da amostra certificada (referência). No box plot da Figura 5.6 pode-se observar uma melhora nos resultados químicos das amostras, com pequena redução da variabilidade e teor de ferro das amostras mais próximos do valor de referência. Contudo, o desvio em relação à média para a sílica piorou com a utilização do sistema fuzzy, muito em função do range pequeno de sílica presente nesse conjunto de amostras, normalmente inferior à 2%. Assim como no exemplo anterior, houve novamente uma dificuldade do sistema especialista em realizar correções assertivas de forma a garantir resultados mais consistentes e corretos, atenuando os problemas das etapas de amostragem, preparação e análise das amostras.

Tabela 5.3: Erro quadrático médio – correção contínua - SUT

Erro quadrático médio			
	Antes	Depois	Redução
% Fe	0,0482	0,0397	-22%
% SiO ₂	0,1937	0,1544	-20%

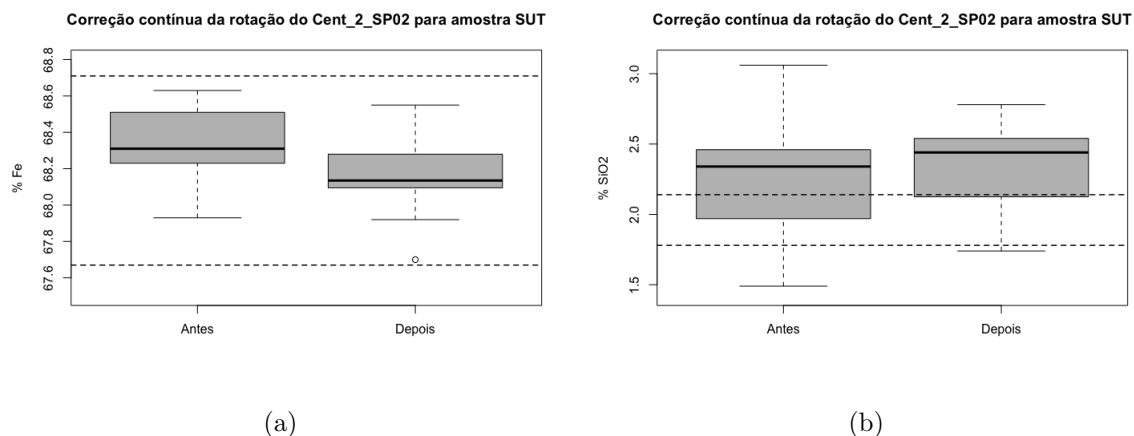


Figura 5.6: Distribuição estatística dos dados químicos das amostras SUT com correção contínua.

- ALP (Alimentação)

O segundo padrão utilizado novamente foi o ALP. O tempo de moagem utilizado para esse tipo de amostra nos Centaurus também foi 150 segundos. Usando o sistema fuzzy, Figura 5.7, pode-se observar que foi necessário uma menor variação desse tempo de moagem para realizar as correções para as amostras do conjunto ALP, cujos valores variaram entre 135 e 175 segundos. Percebe-se, ainda, uma melhora considerável dos resultados tanto para os teores de ferro (Fe) quanto de sílica (SiO₂).

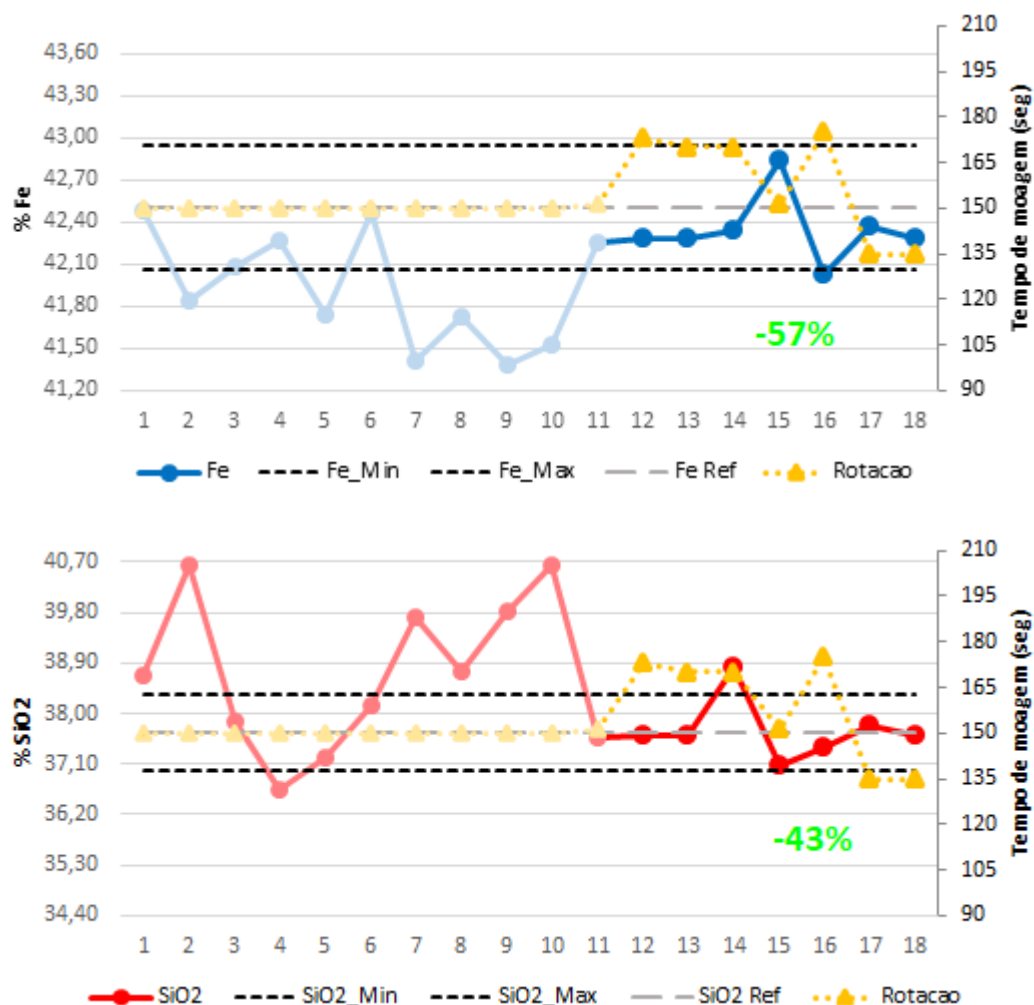


Figura 5.7: Correção contínua do tempo de moagem do Cent_2.SP02 - ALP.

Analisando o box plot da Figura 5.8 verifica-se uma melhora considerável e substancial dos resultados das amostras considerando os dois elementos químicos principais em análise, ferro e sílica, tanto em relação ao desvio em relação à média, Tabela 5.4, quanto em relação à variabilidade. Isso evidencia que o sistema fuzzy implementado teve grande assertividade para definir os valores mais corretos para o Centaurus de forma dinâmica. Isso permitiria que o laboratório fornecesse um resultado mais correto e estável para que seus diversos clientes internos usem uma informação mais correta e sejam mais assertivos em suas decisões operacionais.

Tabela 5.4: Erro quadrático médio – correção contínua - ALP

Erro quadrático médio			
	Antes	Depois	Redução
% Fe	0,3144	0,1353	-57%
% SiO ₂	1,9526	1,1183	-43%

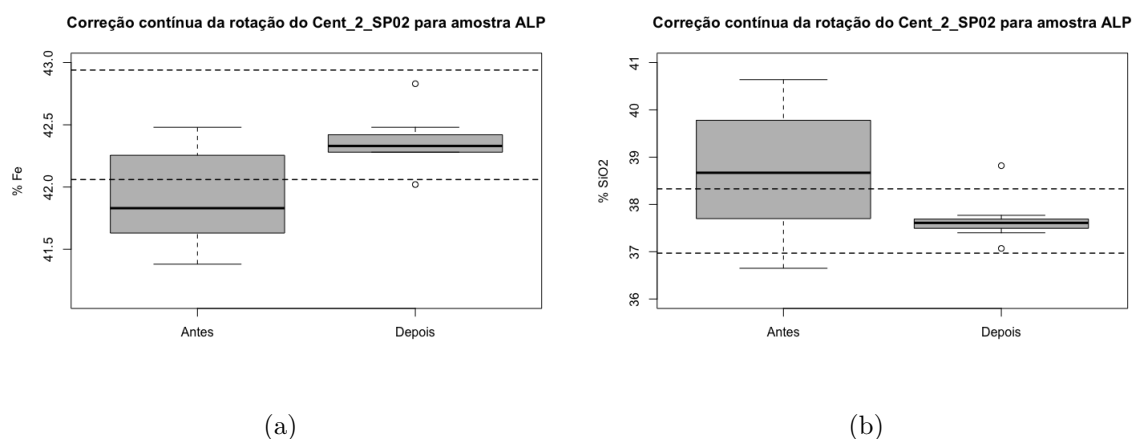


Figura 5.8: Distribuição estatística dos dados químicos das amostras ALP com correção contínua.

5.3 Discussão dos resultados

A implementação do sistema especialista baseado em lógica fuzzy como um sugeridor das melhores configurações de parâmetros dos Centaurus se mostrou eficiente. Para a grande parte das amostras das usinas processadas e analisadas no laboratório de Itabira (amostras das etapas intermediárias dos processos) foi possível garantir resultados mais estáveis e mais próximos dos limites de referência da amostra padrão, com redução considerável do erro médio.

Contudo, para as amostras de produto final das usinas, a redução do erro médio não foi tão significativa quanto a observada nas amostras de processo, em virtude do baixo percentual de sílica presente em sua composição (%SiO₂). Com isso, mesmo após ajustes no tempo de moagem, não foi observado uma grande interferência nos resultados, haja visto que os elementos já estão relativamente bem segregados.

Tais resultados são importantes na medida em que se consegue garantir uma maior estabilidade nos resultados, reduzindo o erro médio e a variabilidade. Com isso, reduz-se o tempo de resposta para tomada de decisão para realização de ajustes nos diversos processos existentes nas usinas, auxiliando na garantia de obtenção de um produto com maior qualidade e com eficiência no uso de insumos.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

6.1 Considerações finais

Neste trabalho foi implementado uma campanha de testes baseado na técnica de *Design of Experiments* (DoE) para determinação de quais parâmetros da receita de cominuição, prensagem e limpeza do equipamento Centaurus tinham maior correlação com o resultado químico das amostras analisadas nos espectômetros de fluorescência de raios-x. A partir da definição desse parâmetro, foi implementado um sistema sugestor para apoio a tomada de decisão do operador, baseado em lógica fuzzy, cujo objetivo era determinar a melhor parametrização de cada um dos 8 equipamentos para cada conjunto de amostras existentes no laboratório atualmente.

- Existe alguma relação de causa-efeito entre os parâmetros do equipamento de pulverização e prensagem Centaurus e o resultado obtido da leitura dos teores químicos das amostras?

De acordo com os resultados apresentados no Capítulo 3, verifica-se que há, sim, influência dos parâmetros de pulverização e prensagem na leitura das amostras de minério de ferro nos equipamentos de raios-x.

- É possível determinar se um parâmetro do equipamento exerce maior influência sobre os teores químicos das amostras em relação aos demais?

A partir da utilização da técnica de *Design of Experiments* apresentada no Capítulo 3, foi possível realizar uma campanha de testes, baseado em um rigoroso procedimento experimental, que permitiu concluir que os fatores de tempo de moagem e velocidade de rotação do moinho são extremamente correlacionados com o teor percentual do elemento químico. Outros fatores como tempo de limpeza e força de prensagem, por exemplo, exercem pouco ou nenhum efeito nas características químicas das amostras do minério.

- Como suportar a decisão do operador, dinamicamente, sobre a configuração mais adequada para cada equipamento Centaurus nas diferentes condições operacionais, de forma que todos consigam garantir a exatidão da leitura dos teores químicos?

A implementação de um sistema sugestor de apoio a tomada de decisão do operador, baseado em lógica fuzzy, conforme apresentado no Capítulo 4, permite verificar dinamicamente o teor percentual de cada um dos elementos químicos presentes na amostra. A partir desses dados, utiliza-se as regras fuzzy estabelecidas para determinar quão distantes os teores percentuais estão do valor de referência. Dessa forma, faz-se um ajuste no tempo em que a amostra permanece dentro do moinho sendo cominuída, compensando, dessa forma, os efeitos provocados pelos diversos fatores que contribuem para que o resultado químico resultante esteja fora da referência desejada.

A realidade do mundo está em contínua e rápida mudança. Nas indústrias essa realidade também já não está tão distante. É necessário adequar rapidamente os processos, as tecnologias e as pessoas para essa nova realidade. Possivelmente, as mineradoras do futuro serão equipadas com equipamentos de grande porte autônomos, sistemas especialistas tomando decisões para ajustes e melhorias dos processos, laboratórios automatizados e o aumento da utilização da robótica nas usinas.

Dessa forma, garantir uma caracterização minero-metalúrgicas do minério desde a mina, passando pelas frentes de lavra, pelos processos de beneficiamento até o produto final irá garantir uma maior eficiência da empresa no intuito de obter produtos cada vez melhores, mesmo que a qualidade dos depósitos minerais fiquem cada vez piores. Garantir que essas informações dos teores químicos dos principais elementos sejam fornecidas de forma rápida, correta e assertiva à equipe de produção se tornará uma importante ferramenta de garantia de desempenho do negócio da mineração e um poderoso fator de redução de risco das empresas.

6.2 Trabalhos futuros

Como trabalhos futuros, propõe-se as seguintes atividades:

- Replicação do sistema implementado para os demais tipos de amostras existentes hoje no laboratório de Itabira e garantir uma rotina de utilização prática e rotineira pela equipe do laboratório;
- Integrar o sistema fuzzy desenvolvido ao controlador dos equipamentos, de forma que a atualização dos parâmetros, hoje manual, se faça de forma automática.

Referências Bibliográficas

- BAUM, W. “Ore characterization, process mineralogy and lab automation a roadmap for future mining”, *Minerals Engineering*, v. 60, pp. 69–73, 2014. ISSN: 08926875. doi: 10.1016/j.mineng.2013.11.008.
- BENVINDO DA LUZ, A., SAMPAIO, J. A., MATOS DE ALMEIDA, S. L. *Tratamento de Minérios*. 4a edição ed. Rio de Janeiro, 2004. ISBN: 8572272046.
- CHAI, T., QIN, S. J., WANG, H. *Optimal operational control for complex industrial processes*, v. 38. IFAC, 2014. ISBN: 9783902823052. doi: 10.1016/j.arcontrol.2014.03.005. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.3182/20120710-4-SG-2026.00196>>.
- CHAVES, A. P., PERES, A. E. C. *Britagem, peneiramento e moagem. Teoria e prática do tratamento de minérios*, v. Volume 3. 2a edição ed. São Paulo, 2003. ISBN: 9788587803252.
- CHEN, X., ZHAI, J., LI, Q., et al.. “Fuzzy logic based on-line efficiency optimization control of a ball mill grinding circuit”, *Proceedings - Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery, FSKD 2007*, v. 2, n. Fskd, pp. 575–580, 2007. doi: 10.1109/FSKD.2007.329.
- DAVIS, R., JOHN, P. “Application of Taguchi-Based Design of Experiments for Industrial Chemical Processes”. Em: Silva, V. (Ed.), *Statistical Approaches With Emphasis on Design of Experiments Applied to Chemical Processes*, IntechOpen, cap. 9, Rijeka, 2018. doi: 10.5772/intechopen.69501. Disponível em: <<https://doi.org/10.5772/intechopen.69501>>.
- DING, J., CHAI, T., WANG, H., et al.. “Knowledge-based global operation of mineral processing under uncertainty”, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, v. 8, n. 4, pp. 849–859, 2012. ISSN: 15513203. doi: 10.1109/TII.2012.2205394.
- DOS ANJOS, A. *Planejamento De Experimentos I*. Relatório Técnico 1, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2005.

- DURAKOVIC, B. “Design of Experiments Application , Concepts , Examples : State of the Art”, v. 5, n. 3, 2018. doi: 10.21533/pen.v5i3.145.
- GARUD, S. S., KARIMI, I. A., KRAFT, M. “Design of computer experiments: A review”, *Computers and Chemical Engineering*, v. 106, pp. 71–95, 2017. ISSN: 00981354. doi: 10.1016/j.compchemeng.2017.05.010. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2017.05.010>>.
- HODOUIN, D., JÄMSÄ-JOUNELA, S. L., CARVALHO, M. T., et al.. “State of the art and challenges in mineral processing control”, *Control Engineering Practice*, v. 9, n. 9, pp. 995–1005, 2001. ISSN: 09670661. doi: 10.1016/S0967-0661(01)00088-0.
- MAZZINGHY, D. B. *Modelagem e Simulação de Circuito de Moagem Através da Determinação dos Parâmetros de Quebra e da Energia Específica de fragmentação*. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2009.
- MEECH, J. “Expert systems for teaching and training in the mineral industry”, *Minerals Engineering*, v. 3, n. 1, pp. 129–136, 1990. ISSN: 08926875. doi: 10.1016/0892-6875(90)90086-Q.
- MEECH, J. A. “the Evolution of Intelligent Systems in the Mining Industry”, *Mineral Process Modelling, Simulation and Control Conference*, , n. January, pp. 1–30, 2006. Disponível em: <<http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.122.9062{&}rep=rep1{&}type=pdf>>.
- MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. Eighth edi ed. Tempe, Arizona, John Wiley & Sons, Inc., 1984. ISBN: 9781118146927.
- MOORE, D., MCCABLE, G., CRAIG, B. *Introduction to the practice of statistics*. 2009. ISBN: 9781429216234.
- OLIVIER, L. E., CRAIG, I. K. “A survey on the degree of automation in the mineral processing industry”, *2017 IEEE AFRICON: Science, Technology and Innovation for Africa, AFRICON 2017*, pp. 404–409, 2017. doi: 10.1109/AFRCON.2017.8095516.
- ROMANS, B. “The Potential of Knowledge Based Systems in the Mineral Industry”, 1993.
- SANTOS, R. R., MEECHB, J. A., SILVA, L. T. “Thickener Operations At Carajas using a Fuzzy Logic Controller”, *IEEE*, pp. 1636–1639, 1995. ISSN: 08843627.

- SEN, G. A. “Application of Full Factorial Experimental Design and Response Surface Methodology for Chromite”, *Minerals*, v. 6, n. 1, pp. 5, 2016. doi: 10.3390/min6010005.
- SHABBIR, M., SARWAR, M., KAUSAR, R. “A Technical Guide to the Basics of Experimental Designs for Analyzing Experimental Data in Occupational Research”, *International Journal of Applied Science and Mathematics*, v. 1, n. 2, pp. 46–51, 2014.
- STÉZOWSKI, O., ASTIER, A., PRÉVOST, A., et al.. “Automatic energy calibration of germanium detectors using fuzzy set theory”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, v. 488, n. 1-2, pp. 314–322, 2002. ISSN: 01689002. doi: 10.1016/S0168-9002(02)00437-0.
- ULISSES, R. G. *Otimização do Processo de Laminação a Frio através de planejamentos de Experimentos*. Dissertação mestrado em engenharia industrial, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2007.
- VALADÃO, G. E. S., VIANA, P. R. M., ARAÚJO, A. C. *Introdução ao tratamento de Minérios*. Belo Horizonte, 2004.
- VALE S.A. *Vale: nossa história*, v. 1. 1 ed. Rio de Janeiro, Verso Brasil Editora, 2012. ISBN: 20511-330. doi: 10.1590/S0103-49792016000200007. Disponível em: <http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0103-49792016000200295&lng=pt&tlng=pt>.
- VIEIRA, C. B., ROSIÈRE, C. A., ASSIS, P. S. “Avaliação técnica de minérios de ferro para sinterização nas siderúrgicas e minerações brasileiras : uma análise crítica”, v. 56, n. 2, pp. 97–102, 2003.
- ZADEH, L. “Fuzzy Sets”, *Information and Control*, v. 8, pp. 338–353, 1965.
- ZHOU, P., CHAI, T., SUN, J. “Intelligence-based supervisory control for optimal operation of a DCS-controlled grinding system”, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, v. 21, n. 1, pp. 162–175, 2013. ISSN: 10636536. doi: 10.1109/TCST.2012.2182996.
- ZHOU, P., LU, S., YUAN, M., et al.. “Survey on higher-level advanced control for grinding circuits operation”, *Powder Technology*, v. 288, pp. 324–338, 2016. ISSN: 1873328X. doi: 10.1016/j.powtec.2015.11.010. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.powtec.2015.11.010>>.

Apêndice A

Apendice A

Seguem abaixo os trabalhos gerados ao longo do desenvolvimento desta dissertação.

Artigos publicados:

- LOTT, G. D.; GUIMARÃES, F. G.; EUZÉBIO, T. A. M.; Method for Dynamically Adjusting the Parameters of an Iron Ore Mill in a Chemical Analysis Laboratory. In: 6th International Congress on Automation in Mining, 2018, Santiago. Automining 2018 Proceedings. Santiago: Gecamin, 2018;
- LOTT, G. D.; COTA, E.; GUIMARAES, F. G.; TORRE, M. P.; EUZÉBIO, T. A. M. Method for dynamically adjusting the parameters of an iron ore mill in a chemical analysis laboratory. Abstracts of the First International Conference Mines of the Future, 2018, Aachen, p. 65.

Artigo em edição para publicação:

- LOTT, G. D.; GUIMARÃES, F. G.; EUZÉBIO, T. A. M.; Decision Support System for Calibration of Laboratory-Scale Mill Parameters. Computer in Industry.

Artigos relacionados:

- LOTT, G. D.; PAIVA, F. S.; DUARTE, G. O.; GOMES, M. A; ACOSTA, R. A; Automação de laboratório de análises de amostras de minério de ferro, p. 156-163. In: 21º Seminário de Automação e TI, São Paulo, 2017.