



**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

SIMULAÇÃO E CONTROLE DE SISTEMAS DE FLOTAÇÃO NA MINERAÇÃO

Mário Vinícius Pelegrini Guimarães

**Ouro Preto
Novembro de 2021**

Mário Vinícius Pelegrini Guimarães

SIMULAÇÃO E CONTROLE DE SISTEMAS DE FLOTAÇÃO NA MINERAÇÃO

Dissertação apresentado 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.

Linha de Pesquisa: Análise e Projeto de Sistemas de Controle Avançado

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

Coorientador: Prof. D.Ing. Guilherme Vianna Raffo

Ouro Preto, MG – Brasil

Novembro de 2021

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G963s Guimarães, Mário Vinicius Pelegrini.

Simulação e controle de sistemas de flotação na mineração.
[manuscrito] / Mário Vinicius Pelegrini Guimarães. - 2021.
50 f.: il.: color., tab..

Orientador: Prof. Dr. Thiago Antonio Melo Euzébio.

Coorientador: Prof. Dr. Guilherme Vianna Raffo.

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

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

1. Controle de processo. 2. Controle Fuzzy. 3. Flotação. I. Euzébio, Thiago Antonio Melo. II. Raffo, Guilherme Vianna. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 681.5:622.2

Bibliotecário(a) Responsável: Angela Maria Raimundo - SIAPE: 1.644.803



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
PROGR. POS GRAD. PROF. INST. CONT. E AUT.
PROCESSOS DE MIN.



FOLHA DE APROVAÇÃO

Mário Vinícius Pelegrini Guimarães

Simulação e controle de sistemas de flotação na mineração

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração (PROFICAM), Convênio Universidade Federal de Ouro Preto/Associação Instituto Tecnológico Vale - UFOP/ITV, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Controle e Automação na área de concentração em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração.

Aprovada em 09 de novembro de 2021

Membros da banca

Doutor - Thiago Antonio Melo Euzébio - Orientador - Instituto Tecnológico Vale
Doutor - Guilherme Vianna Raffo - Universidade Federal de Minas Gerais
Doutor - Neymayer Pereira Lima - Vale
Doutor - Tito Luís Maia Santos - Universidade Federal da Bahia
Doutor - José Mário Araújo - Instituto Federal da Bahia
Mestre - Thomás Vargas Barsante e Pinto - Instituto Tecnológico Vale

Thiago Antonio Melo Euzébio, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito no Repositório Institucional da UFOP em 09/02/2022



Documento assinado eletronicamente por **Bruno Nazário Coelho, COORDENADOR(A) DE CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM INST. CONTROLE AUTOMAÇÃO DE PROCESSOS DE MINERAÇÃO**, em 10/02/2022, às 17:03, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0278534** e o código CRC **B20E972D**.

*Dedico este trabalho à minha
família por todo incentivo e apoio
incondicional.*

Agradecimentos

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 ciência é muito mais que um
corpo de conhecimentos. É uma
maneira de pensar.”
(Carl Sagan)*

Resumo

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.)

SIMULAÇÃO E CONTROLE DE SISTEMAS DE FLOTAÇÃO NA MINERAÇÃO

Mário Vinícius Pelegrini Guimarães

Novembro/2021

Orientadores: Thiago Antonio Melo Euzébio
Guilherme Vianna Raffo

O processo de flotação é o principal método de separação de minério de ferro e rejeitos utilizados na indústria. Devido ao empobrecimento dos depósitos minerais e à redução da margem de lucro, a otimização da operação de flotação ganhou ainda mais importância. O controle regulatório não é suficiente para otimizar o ganho econômico desse processo, e técnicas avançadas de controle estão sendo estudadas para solucionar esse problema. O uso de simuladores de células e colunas de flotação possibilita o estudo de técnicas avançadas de controle de processos. Os controladores fuzzy são eficientes neste meio devido à sua simplicidade e flexibilidade para aplicação em processos complexos, não lineares e multivariáveis. Este trabalho teve como objetivo a modelagem de um processo industrial de flotação de minério de ferro da usina Conceição II, localizada em Itabira/MG, e o projeto de um controlador baseado em lógica fuzzy para controle e estabilização do processo modelado. Os resultados da simulação mostram um erro relativo médio do modelo de 0,86% no teor de concentração dos minerais. O controlador desenvolvido foi capaz de aumentar em 3,82% a recuperação metalúrgica do processo.

Palavras-chave: Flotação, Controle, Fuzzy.

Macrotema: Usina; **Linha de Pesquisa:** Análise e projeto de sistemas de controle avançado; **Tema:** Aumento de Recuperação Metalúrgica; **Área Relacionada Vale:** Tecnologia.

Abstract

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.)

SIMULATION AND CONTROL OF FLOTATION SYSTEMS IN MINING

Mário Vinícius Pelegrini Guimarães

November/2021

Advisors: Thiago Antonio Melo Euzébio
Guilherme Vianna Raffo

The flotation process is the main method for separating iron ore and tailings used in the industry. Due to the impoverishment of mineral deposits and the reduced profit margin, optimization of flotation operation has gained even more importance. Regulatory control is not sufficient to optimize this process economic gain, and advanced control techniques are being studied to solve this problem. The use of cell and flotation columns simulators enables the study of advanced process control techniques. Fuzzy controllers are efficient in this medium due to their simplicity and flexibility for application in complex, non-linear and multivariable processes. This work aimed to model an industrial process of iron ore flotation from the Conceição II plant, located in Itabira/MG, and design a controller based on fuzzy logic to control and stabilize the modeled process. The simulation results show a model's mean relative error of 0.86% in the concentration content of the minerals. The developed controller was able to increase by 3.82% the metallurgical recovery of the process.

Keywords: Flotation, Control, Fuzzy.

Macrotheme: Beneficiation Plant; **Research Line:** Analysis and Project of Advanced Control Systems; **Theme:** Increased Metallurgical Recovery; **Related Area of Vale:** Technology.

Lista de Figuras

1.1	Diferentes processos para separação de minérios.	2
2.1	Sistema especialista de controle de <i>mass-pull</i> pela velocidade de escoamento da espuma em uma flotação de cobre Fonte:(DAWSON e KOORTS, 2014).	9
3.1	Balanco de massa de uma célula de flotação Fonte:Elaborada pelo autor.	11
3.2	Estágios <i>rougher, cleaner, recleaner</i> e <i>scavenger</i> da flotação da Usina de Conceição II Fonte:Elaborada pelo autor.	13
3.3	Instrumentos de uma célula de flotação da usina Conceição II Fonte:Elaborada pelo autor.	14
3.4	Câmera para análise das características da espuma da flotação (MEHRABI et al. , 2014).	14
4.1	Linha de flotação da usina de conceição II simulado no ambiente IDEAS Fonte:Elaborada pelo autor.	19
4.2	Mapeamento da entrada de erro aos subconjuntos de variáveis linguísticas Fonte: Elaborada pelo autor.	21
4.3	Exemplo de funções de pertinência da variável de saída de um controlador Fonte: Elaborada pelo autor.	23
4.4	Aplicação do método da centróide para defuzzificar a saída Fonte: Elaborada pelo autor.	24
4.5	Estrutura do sistema de controle Fonte: Elaborada pelo autor.	25
4.6	Estrutura do controlador incremental de massa flotada Fonte: Elaborada pelo autor.	26
4.7	Funções de pertinência do erro de controle Fonte: Elaborada pelo autor.	26
4.8	Funções de pertinência da variação do erro de controle Fonte: Elaborada pelo autor.	27
4.9	Funções de pertinência do setpoint de nível da célula Fonte: Elaborada pelo autor.	27
4.10	Funções de pertinência do Setpoint de vazão de ar da célula Fonte: Elaborada pelo autor.	28
4.11	Superfícies de saída do controlador de massa flotada Fonte: Elaborada pelo autor.	29

4.12	Funções de pertinência da recuperação metalúrgica da linha	Fonte: Elaborada pelo autor.	30
4.13	Funções de pertinência do teor de SiO ₂ do concentrado	Fonte: Elaborada pelo autor.	30
4.14	Funções de pertinência da variação do pedido de massa flotada para <i>Rougher I</i>	Fonte: Elaborada pelo autor.	31
4.15	Funções de pertinência da variação do pedido de massa flotada para <i>Rougher II</i>	Fonte: Elaborada pelo autor.	31
4.16	Teste de resposta ao degrau na massa flotada da <i>rougher I</i>	Fonte: Elaborada pelo autor.	32
4.17	Teste de resposta da flotação ao degrau de massa flotada nas <i>rouguers I e II</i>	Fonte: Elaborada pelo autor.	32
4.18	Superfícies de saída do controlador de qualidade para <i>rouguers I e II</i>	Fonte: Elaborada pelo autor.	34
5.1	Variação no teor de quartzo (SiO ₂) na alimentação do circuito	Fonte: Elaborada pelo autor.	36
5.2	resposta do Teor de quartzo (SiO ₂) no concentrado final (<i>releaner</i>) à variação do teor de alimentação	Fonte: Elaborada pelo autor.	37
5.3	Variação na taxa de alimentação do circuito	Fonte: Elaborada pelo autor.	37
5.4	Resposta do teor de quartzo no concentrado final (<i>releaner</i>) à variação na taxa de alimentação	Fonte: Elaborada pelo autor.	38
5.5	Resposta do processo à distúrbios com <i>rouguer</i> no limite de operação	Fonte: Elaborada pelo autor.	39
5.6	Resposta em malha fechada do controlador de massa flotada para <i>rouguer I e II</i>	Fonte: Elaborada pelo autor.	42
5.7	Resposta em malha fechada do controlador de massa flotada da <i>rouguer I</i> aos distúrbios aplicados	Fonte: Elaborada pelo autor.	43
5.8	Resposta de teor e recuperação metalúrgica do circuito com controle e sem controle	Fonte: Elaborada pelo autor.	44

Lista de Tabelas

4.1	Recuperação mássica máxima Fonte:Elaborada pelo autor baseado em (LIMA et al. , 2013).	17
4.2	Parâmetro máximo de camada de espuma Fonte: Elaborada pelo autor.	18
4.3	Massa total de alimentação de cada estágio Fonte:Elaborada pelo autor.	20
4.4	Regras de controle de massa flotada Fonte: Elaborada pelo autor.	28
4.5	Regras de controle de teor de SiO ₂ e recuperação Fonte: Elaborada pelo autor.	33
5.1	Constante cinética dos minerais por estágio Fonte: Elaborada pelo autor.	35
5.2	Teores de Fe e SiO ₂ simulados e reais por estágio e erro relativo Fonte: Elaborada pelo autor.	36

Sumário

1	Introdução	1
1.1	Contexto	1
1.2	Motivação	4
1.3	Objetivo	5
1.4	Perguntas	5
2	Revisão bibliográfica	6
2.1	Simuladores e o processo de flotação	6
2.2	Controle do processo de flotação	7
3	Processo de Flotação	10
3.1	Processo de flotação	10
3.1.1	Variáveis monitoradas e controladas	12
3.2	Circuito de flotação da Usina de Conceição II	13
4	Proposta do Trabalho	16
4.1	Ambiente simulado	16
4.1.1	Calibração do modelo	18
4.1.2	Lógica difusa	20
4.1.3	Controlador <i>fuzzy</i>	20
4.1.4	Estrutura do controlador	25
4.2	Controlador de <i>mass-pull</i>	25
4.2.1	Controlador de qualidade	30
5	Resultados e Discussão	35
5.1	Modelo e calibração	35
5.2	Controlador de massa flotada	39
5.3	Controlador de qualidade	40
6	Conclusão	45
7	Trabalhos Futuros	47

Capítulo 1

Introdução

1.1. Contexto

O objetivo do processo de beneficiamento de minério de ferro é extrair os contaminantes de forma a aumentar o teor de ferro no produto final, que é chamado de concentrado. O teor de ferro determina a qualidade do concentrado e, por sua vez, o seu valor comercial.

O processo de beneficiamento pode ser dividido em duas etapas principais, a cominuição e a concentração. A cominuição consiste em utilizar britadores e moinhos para reduzir a granulometria do minério de forma a liberar os contaminantes e possibilitar a separação nas etapas seguintes do processo.

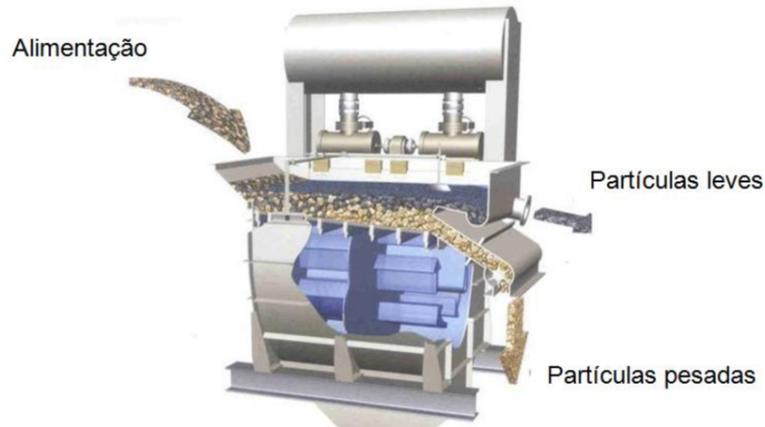
O processo de concentração utiliza das diferentes características entre o minério de ferro e o seu principal contaminante, o quartzo, para realizar a separação. A jigagem, mostrada na Figura 1.1a, separa os materiais por diferença de densidade. A separação magnética, vista na Figura 1.1b, como o nome sugere, utiliza as propriedades magnéticas do ferro para separá-lo do rejeito. A Figura 1.1c mostra o processo de flotação que, por sua vez, utiliza propriedades físico-químicas para concentrar os minerais de ferro.

O minério de ferro é extraído de jazidas, onde a concentração de óxidos de ferro são mais altas. Com o passar do tempo, estas jazidas vão sendo exauridas levando as empresas a lavrar minérios mais pobres, com teores menores de ferro. Devido ao empobrecimento das jazidas de minério de ferro, o aumento de eficiência dos processos de concentração se torna cada vez mais relevante, uma vez que a variabilidade destes processos está diretamente ligada à qualidade do produto final.

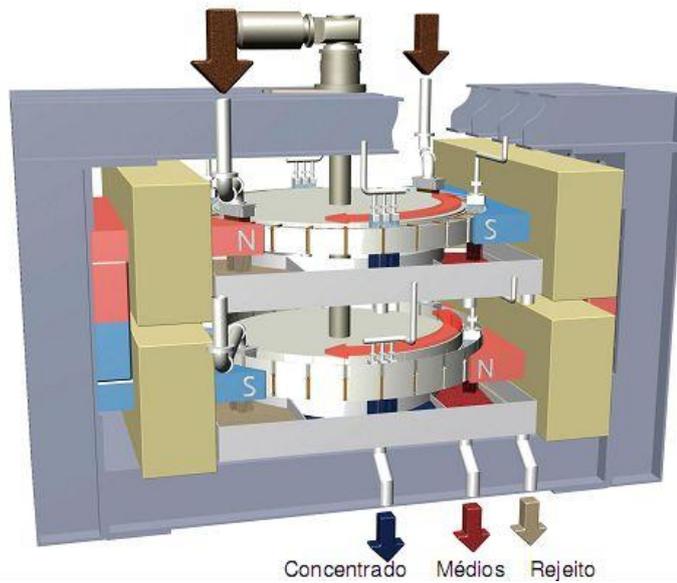
Assim, é importante aproveitar ao máximo as jazidas existentes de forma a maximizar o ferro extraído, mantendo a qualidade do produto. A relação entre a massa de ferro no concentrado e a massa de ferro na alimentação do processo é chamada de recuperação metalúrgica. Este parâmetro é o principal indicador utilizado na avaliação do processo de separação.

O processo de flotação é muito atrativo economicamente devido à grande capacidade de escalonamento, boa taxa de recuperação metalúrgica e alta capacidade de produção. Conse-

quentemente, os processos de flotação mecânica e de colunas se tornaram os principal métodos de separação utilizados na indústria.



(a) Jigagem Fonte:(ANGULO e FIGUEIREDO, 2011).



(b) Concentrador magnético Fonte:(GOMES, 2009).



(c) Flotação de espuma Fonte:(DA SILVA, 2011).

Figura 1.1: Diferentes processos para separação de minérios.

As diversas variáveis envolvidas e características não lineares deste processo, aliado à falta de técnicas de medição de algumas propriedades minerais, são desafios para o primeiro nível de controle, também chamado de controle regulatório. Este nível tem o objetivo de estabilizar as variáveis controladas, mantê-las em pontos de operação desejados e rejeitar as perturbações. Estes controladores dependem de operadores para determinar os pontos de operação, por isso, estão sujeitos a grande variabilidade no processo e na forma de operação da planta. Assim, é necessária a implantação de controles avançados de processo (APC, do inglês *Advanced Process Control*). Estes controladores atuam gerando pontos de operação para o controle regulatório e têm como objetivo reduzir a variabilidade do processo.

As principais variáveis controladas da flotação são a altura da camada de espuma, a vazão de ar e as dosagens de amina e de amido. Os operadores determinam os pontos de operação destas variáveis observando aspectos como coloração, textura e aparência da espuma no transbordo das células, com o objetivo de obter o menor teor de contaminantes no concentrado enquanto a produção é aumentada. Os operadores mais experientes conseguem estimar bons valores para estas variáveis. Porém, fatores como disponibilidade de pessoal, incerteza de medição, falta de robustez em relação a distúrbios e baixa frequência de amostragem, tornam esta abordagem ineficiente e passível de melhoria (SILVA, 2015; SZATKOWSKI e FREYBERGER, 1988).

Dentre as diversas técnicas de APC utilizadas na indústria, os controladores *fuzzy* têm se popularizado por lidarem com sistemas multivariáveis e não lineares de forma simples. Estes controladores replicam o raciocínio lógico humano, sendo calibrados com base no conhecimento de especialistas, por isso, dependem de um conhecimento profundo do processo. Alguns trabalhos têm mostrado bons resultados utilizando auxílio de modelos do processo e da visão computacional (DAWSON e KOORTS, 2014; JOVANOVIĆ e MILJANOVIĆ, 2015).

Uso de modelos confiáveis é importante, pois possibilita a simulação do processo para compreender seu comportamento e a criação de controladores mais robustos, com melhor rejeição a distúrbios e menor variabilidade. No caso da flotação, o processo é o principal determinante da qualidade do produto final e os testes necessários para sintonia de controladores precisam ser demorados, devido à velocidade do processo. Portanto, simulações realistas são peça fundamental no desenvolvimento de controladores, pois evita-se a realização de testes invasivos do processo e não se prejudicam a produção da usina por várias horas.

A criação de modelos da flotação depende do sensoriamento das propriedades físico-químicas do processo. Porém, as propriedades abrasivas da polpa de minério inviabilizam grande parte dos sensores de contato por aumentar o desgaste, diminuindo a vida útil e aumentando a manutenção. Desta forma, muitas soluções se voltaram para a utilização de sistemas de visão computacional. Por serem equipamentos de medição sem contato, a manutenção é reduzida e a disponibilidade destes sistemas torna-se superior a métodos de contato.

Estes sistemas conseguem, com auxílio de técnicas de inferência e inteligência artificial, medir características do processo, sendo a principal delas a velocidade de escoamento da es-

puma flotada. A velocidade da espuma é usada como parâmetro de medição da massa extraída pela espuma, permitindo controlar o balanço de massa da célula e, com isso, a recuperação de cada estágio. Este tipo de controle é chamado de *mass-pull*.

A utilização da visão computacional associada a técnicas de controle avançado tem gerado diversas soluções de melhoria da qualidade e aumento da produção. Deste modo, este tipo de controle se torna um diferencial competitivo na indústria de mineração.

Neste trabalho, é descrita a modelagem de um processo de flotação e a implantação de controle avançado para o processo simulado, baseado em um controlador de *mass-pull* existente na literatura.

1.2. Motivação

O empobrecimento das jazidas de minério de ferro, somado a uma maior competitividade do mercado, levou a uma redução da margem de lucros e forçou as grandes mineradoras à maior dependência do processo de beneficiamento. Diante disso, as empresas vêm buscando maximizar esta margem, utilizando ferramentas de controle avançado para melhorar a qualidade do produto e a recuperação metalúrgica.

Este trabalho se baseia no processo de flotação da Usina de Conceição II, localizada na cidade de Itabira-MG. O produto da usina é o minério de ferro do tipo Hematita (Fe_2O_3). O preço de mercado deste minério é fixado com base em um teor de ferro, geralmente 65%. O preço base recebe bônus e penalidades quando o minério está fora da especificação. Desta forma, quanto mais puro o minério, maior seu preço de mercado. Vários contaminantes influenciam o teor do produto, sendo o principal deles a sílica. O principal produto desta usina é o *pellet feed*, um minério com baixo teor de sílica e baixa granulometria, utilizado para produção de pelotas que são utilizadas na produção de ferro e aço.

No processo de flotação desta usina, existe a oportunidade de redução da variabilidade no teor do produto. Para ser considerado viável para o *pellet feed*, o produto deve conter até 1,23% de sílica. Na usina de Conceição II, o teor deste contaminante chega a atingir de 5 a 10% em alguns momentos. Um controlador capaz de manter o produto dentro da meta de qualidade, que é de 1,23% de sílica no concentrado, trará um retorno econômico considerável para esta usina. A manutenção deste teor também é importante para o mercado, por isso a meta de variabilidade de sílica é de 0,3% deste teor. A meta de aproveitamento do material lavrado é medida pela recuperação metalúrgica. O limite mínimo deste indicador, programado pela operação, é de 76,79% de recuperação de ferro. Desta forma, a maior parte dos minerais de ferro são aproveitados no produto final, garantindo o volume de produção. Outro ponto importante é o consumo de reagentes na flotação. Reagentes como amina e amido são utilizados induzirem propriedades diferenciadoras na superfície das partículas por meio de interações moleculares. Com isso, um sistema de controle avançado pode ser viabilizado, realizando alterações nos pontos de operação da flotação de modo a melhorar a qualidade, aumentar a produtividade sem

o desperdício de insumos, levando a uma maior eficiência do processo de concentração.

Os analisadores químicos em linha, necessários para o controle de processo, são instrumentos muito caros, chegando a centenas de milhares de reais. Estes instrumentos, em contato com a polpa de minério de ferro e sílica, altamente abrasiva, apresentam problemas de desgaste e sujeira, por isso, requerem manutenção contínua levando a uma baixa disponibilidade física. Para sanar estes problemas, a utilização de sensores baseados em visão computacional vem sendo proposta por diversos autores. Estes sistemas são mais baratos, requerem menos manutenção e, conseqüentemente, maior disponibilidade.

1.3. Objetivo

O objetivo geral deste trabalho é desenvolver um sistema de controle avançado para o processo de flotação da usina de Conceição II, localizada em Itabira-MG, para obter um aumento da qualidade do *pellet feed* trazendo um aumento na margem de ganho das usinas do complexo Itabira. Além disto, este trabalho tem os seguintes objetivos específicos:

- Modelar o processo de flotação de uma linha completa da usina Conceição II
- Reduzir de variabilidade do teor de sílica no concentrado para menos de 0.3%
- Manter a recuperação metalúrgica da usina Conceição II acima de 76,79%

1.4. Perguntas

Além destes objetivos, este trabalho procura responder algumas perguntas relevantes para o processo estudado. As questões abaixo englobam dúvidas sobre simulação do processo, controlabilidade e operação do processo:

- É possível simular uma linha completa de flotação com precisão?
- O controle de *mass-pull* é efetivo para controle de qualidade na planta?
- É possível reduzir o consumo de reagentes alterando o ponto de operação das células de flotação?
- A taxa de amostragem é suficiente para redução da variabilidade do teor?
- A taxa de amostragem dos teores é suficiente para tomada de decisão?

Estas questões ajudarão a guiar futuros trabalhos e investimentos para controle e operação do processo nas plantas do complexo Itabira.

Capítulo 2

Revisão bibliográfica

Neste capítulo serão apresentados trabalhos que usam simuladores para desenvolvimento de controladores aplicados ao processo de flotação. São expostas diversas propostas de controle e tendências apontadas pelos principais trabalhos apresentados. Por fim, são apresentados trabalhos com foco em visão computacional e os ganhos trazidos por estes sistemas.

2.1. Simuladores e o processo de flotação

Os simuladores baseados em modelos dinâmicos possibilitam que os engenheiros de controle de processo três principais ganhos: O desenvolvimento de estratégias de controle sem perturbação do processo, sintonia dos controladores antes da implantação do projeto e utilização dos modelos em controles preditivos (BOUCHARD *et al.*, 2009). Os simuladores utilizam modelos matemáticos baseados em dados levantados do sistema ou em teorias físico-químicas do processo. Por isso, as simulações emulam o comportamento real e, desta forma, possibilitam estudos mais profundos das respostas de sistemas complexos e permitem a criação de controladores mais otimizados com menos intervenções no processo real.

A maioria dos simuladores utilizam modelos lineares ou linearizados em torno de um ponto de operação do processo, de modo a simplificar a formulação e reduzir o custo computacional. Modelos simplificados também são usados em controladores baseados em modelos (MPC, do inglês (*Model Predictive Control*) e possibilitam o uso de técnicas menos custosas computacionalmente (DESBIENS *et al.*, 1998; HODOUIN *et al.*, 2000; RIQUELME *et al.*, 2016). Porém, estudos mais recentes se concentram em utilizar modelos não lineares, visto que estes representam uma região maior de operação e conseguem melhores resultados na otimização quando em condições extremas do processo (DESBIENS *et al.*, 1994; MALDONADO *et al.*, 2009; VIEIRA *et al.*, 2005). Entretanto, a implantação destes controladores depende de uma boa medição ou estimativa das variáveis de processo, de um modelo dinâmico ou estático do sistema e de um controle regulatório com bom desempenho (BERGH e YIANATOS, 2011).

Hodouin *et al.* (2000), utilizando um simulador do processo de flotação, criou um controlador preditivo baseado em modelo linear com ações *feedback* e *feedforward*, conseguindo

uma redução da variabilidade do teor de concentrado. Porém, os autores alertam para a possibilidade de distúrbios não modelados causarem pioras nos resultados quando utilizando a estratégia *feedforward*.

Desbiens **et al.** (1994) utilizaram simulações de modelos fenomenológicos de uma flotação para desenvolver e avaliar os ganhos de um GPC (*Generalized Predictive Control*) para controle de vazão de ar e nível de espuma para controlar o teor de concentrado. Por causa das características não lineares do processo, foi implementada uma estratégia com ganhos adaptativos.

Em (DESBIENS **et al.**, 1998) um controlador GlobPC não linear foi desenvolvido utilizando modelos locais e foi comparado a modelos lineares em um simulador. O controlador não linear se mostrou mais estável quando operando em uma ampla variedade de pontos de operação. Os controladores lineares se mostraram instáveis quando fora do ponto linearizado do processo.

(VIEIRA **et al.**, 2005) propoe o uso modelagem para colunas de flotação utilizando lógica *fuzzy* de modo a lidar com as não linearidades e incertezas do processo. A metodologia proposta utiliza dados do processo aplicando critérios de regularidade e clusterização para criar um modelo acurado do processo. Em comparação com um processo laboratorial, o modelo encontrado demonstrou um bom desempenho.

2.2. Controle do processo de flotação

O objetivo de controle do processo de flotação é maximizar a produção enquanto o teor do produto é mantido dentro dos parâmetros adequados de qualidade (DESBIENS **et al.**, 1994). Para tanto, uma estrutura adequada de controle deve ser estabelecida.

Há um consenso entre a comunidade científica de que os controles convencionais não são suficientes para o controle de teor no concentrado da flotação, sendo necessária a aplicação de técnicas avançadas de controle. Para reduzir a complexidade das estruturas de controle, diversos autores sugerem a divisão do controlador em camadas hierárquicas de controle, chegando até a 5 camadas (JOVANOVIĆ e MILJANOVIĆ, 2015; SHEAN e CILLIERS, 2011).

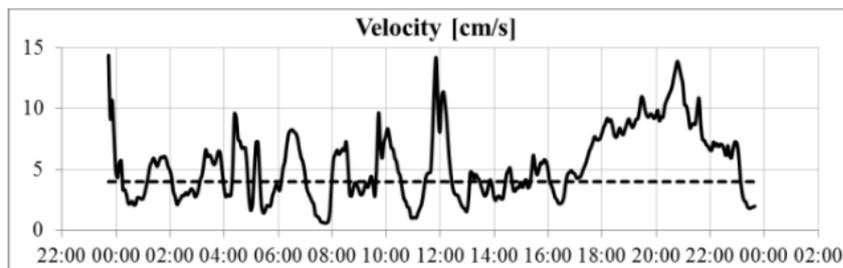
O número de camadas utilizadas muda de acordo com projeto do controlador e o processo em que ele é implementado, mas existe uma concordância em separar camadas de controle regulatório, controle avançado e otimização. Ao separar o sistema em diferentes camadas é possível manter os níveis mais baixos em operação, mesmo quando há falha nos níveis superiores (JOVANOVIĆ e MILJANOVIĆ, 2015). Além disso, o problema é dividido em partes mais simples de modelar e manter. As características multivariáveis, não lineares e atrasos significativos do processo de flotação fazem com que o controlador PID, que é muito utilizado em processos SISO, seja inadequado para o controle de teor do concentrado, mesmo quando utilizado em um controle distribuído. Estudos sugerem que uma estratégia de controle preditivo e multivariável é mais adequada e proporciona melhores resultados (ROJAS e CIPRIANO, 2011; SUICHIES **et al.**, 2000).

A falta de dados de processo, porém, é um grande problema na flotação. Em muitas plantas não existem dados químicos (teor e granulometria) em tempo real, em outros casos, falta a tecnologia para a medição da variável. Muitos operadores, por experiência, conseguem propor pontos de operação baseando-se nas características da espuma da célula. Por isso, o uso de câmeras para análise de imagem vem sendo proposto para auxiliar no controle do processo (DAWSON e KOORTS, 2014; JOVANOVIĆ e MILJANOVIĆ, 2015; RIQUELME *et al.*, 2016; SHEAN e CILLIERS, 2011; SUPOMO *et al.*, 2008).

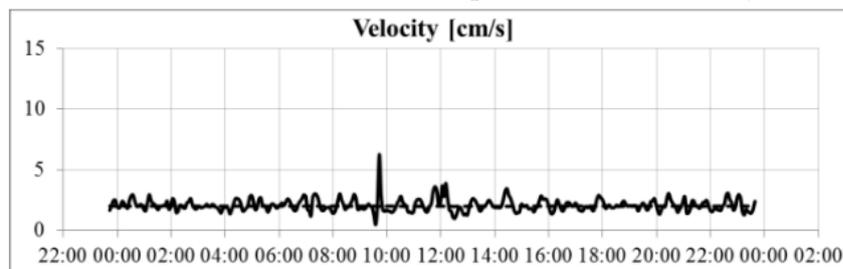
Supomo *et al.* (2008) e Dawson e Koorts (2014) utilizaram os sistemas de visão computacional para estimar e controlar a recuperação em massa da flotação. A informação de velocidade de escoamento é utilizada para inferir a massa retirada pelo *overflow* da célula. Ambos os sistemas propostos foram baseados em lógica *fuzzy* para controle de velocidade de escoamento. Estes trabalhos mostram um ganho considerável de produção aplicando a estratégia de recuperação em massa ou *mass-pull* em inglês.

A Figura 2.1 mostra o sistema de controle proposto por Dawson e Koorts (2014) em operação. Na Figura 2.1c vemos o sinal controle de velocidade baseado em um analisador químico em linha. Os dados de teor de alimentação da célula vindos do analisador são utilizados para controle de *mass-pull* de modo a maximizar a recuperação metalúrgica mantendo o teor de concentrado dentro de limites aceitáveis.

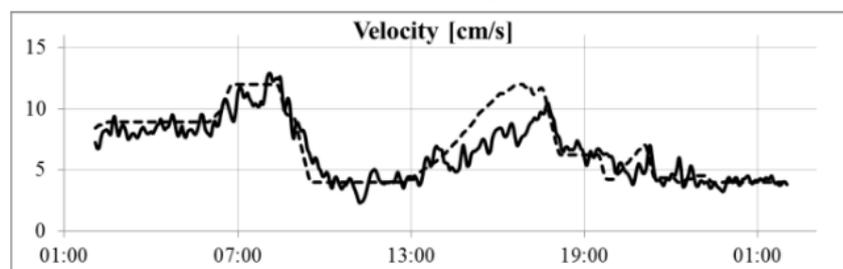
Hadler *et al.* (2010) discute a relação entre *mass-pull* e recuperação metalúrgica. Os autores demonstram que a análise somente da recuperação metalúrgica pode levar a um empobrecimento do concentrado e que é importante levar em consideração a vazão de ar junto à velocidade de escoamento, de forma a aumentar a recuperação e manter a qualidade do produto.



(a) Velocidade de escoamento de espuma com sistema desligado.



(b) Velocidade de escoamento de espuma com sistema ligado.



(c) Controle de velocidade baseado no teor do material de alimentação.

Figura 2.1: Sistema especialista de controle de *mass-pull* pela velocidade de escoamento da espuma em uma flotação de cobre Fonte:(DAWSON e KOORTS, 2014).

Capítulo 3

Processo de Flotação

Este capítulo apresenta o processo de flotação. Serão apresentadas as principais características e variáveis do processo de separação. Também será apresentada a flotação da usina Conceição II, os instrumentos disponíveis e o esquema do circuito.

3.1. Processo de flotação

A flotação em espuma é um processo de concentração que se baseia na diferença entre características de hidrofobicidade da superfície das partículas para realizar a separação. A polpa, contendo o mineral de interesse e contaminantes, é colocada em uma célula, ou coluna, o ar é injetado na parte inferior do tanque para formação de bolhas e as partículas mais hidrofóbicas tendem a ser carregadas pelas bolhas de ar formadas no processo. Já as partículas mais hidrofílicas têm características parecidas com a da água e, por isso, tendem a ficar na polpa. Na flotação convencional o minério de interesse é extraído na espuma. Entretanto, na flotação de minério de ferro, a hematita é coletada na polpa, enquanto os contaminantes, em sua maioria silicatos, são extraídos junto da espuma. Este processo é chamado de flotação catiônica reversa.

Os reagentes são utilizados para melhorar a separabilidade do processo. Eles são usados para tornar a superfície do quartzo hidrofóbica e aumentar a hidrofobicidade dos minerais que contêm ferro. Os reagentes são adicionados previamente à flotação em tanques de agitação, também chamados de condicionadores, para uniformizar a mistura. Só então a polpa é bombeada para as células de flotação. Os principais reagentes utilizados na flotação de minério de ferro são as aminas e os amidos. As aminas agem como coletoras de sílica aumentando a hidrofobicidade das partículas, fazendo com que sejam agregadas às bolhas de ar. Os amidos agem como depressores e têm função de evitar que as aminas interajam com a superfície dos minerais de ferro, desta forma, tornam estes minerais mais hidrofílicos e mais propícios a se manterem na polpa (SILVA, 2015).

Uma maneira de calcular a eficiência do processo é através da recuperação em massa. A Figura 3.1 demonstra a massa de entrada e de saída de um dos minerais presentes na polpa.

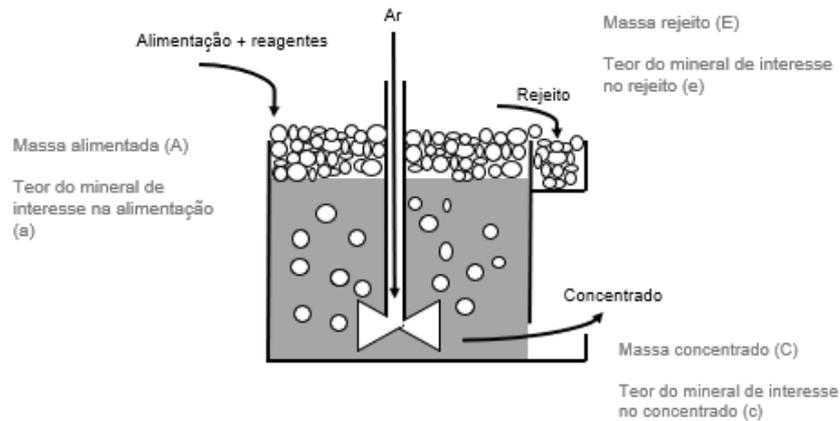


Figura 3.1: Balanço de massa de uma célula de flotação Fonte:Elaborada pelo autor.

Pela lei da conservação das massas, temos

$$Aa = Cc + Ee, \quad (3.1)$$

onde A , C e E são, respectivamente, a massa total alimentada, a massa do concentrado e a massa do rejeito, a , c e e são os teores do mineral avaliado na alimentação, concentrado e rejeito.

A recuperação em massa, R , é o percentual de massa recuperado no concentrado, podendo ser expressado por

$$R = C/A. \quad (3.2)$$

Porém, a recuperação em massa não leva em consideração o tipo de material em cada saída do processo. Para avaliar a recuperação de material de interesse do processo, utilizamos a recuperação metalúrgica. A recuperação metalúrgica, R_m , que indica o percentual de massa do mineral de interesse enviado para o concentrado, é dada por

$$R_m = Cc/Aa. \quad (3.3)$$

Entretanto, este único parâmetro não é indicativo de qualidade, visto que para obter 100% de recuperação metalúrgica, a solução mais simples é não rejeitar nada. Dessa forma, temos $A = C$ e todo o minério é recuperado, mas nada é separado.

Outro parâmetro utilizado para a avaliação do processo é a qualidade do concentrado. A qualidade é o teor de contaminante presente no concentrado. Porém, este parâmetro também não é absoluto na determinação de eficiência do processo. Um ajuste baseado somente em qualidade pode causar uma perda muito alta de minério de interesse no rejeito.

Desta forma, o controle com uma só entrada se mostra ineficiente para controle do processo. Por isso, muitos trabalhos sugerem controladores com múltiplas entradas.

3.1.1. Variáveis monitoradas e controladas

Diversas variáveis afetam este processo de separação, dentre elas, somente 4 são controladas: Vazão de ar, nível de espuma, dosagem de amido e dosagem de amina.

O processo de separação ocorre quando o ar é injetado na polpa de minério. Assim, as partículas mais hidrofóbicas em suspensão na polpa, ou aquelas envoltas em amina, quando entram em contato com o ar tendem a ficar agregadas às bolhas e são carregadas para a espuma. As partículas mais hidrofílicas tendem a se manter na polpa. A espuma é recolhida por uma calha no topo da célula de flotação e enviada para o tratamento de rejeitos ou, caso ainda tenha alto teor de ferro, para outro processo de separação.

A vazão de ar injetada na célula de flotação é uma variável muito importante no controle deste processo. O aumento da vazão de ar aumenta a recuperação metalúrgica na flotação desde que se mantenha a estabilidade do processo. Isso acontece devido ao aumento da área superficial das bolhas. Porém, o aumento exacerbado da vazão de ar pode causar vários distúrbios no processo, como turbulência na camada de espuma, aumento do tamanho das bolhas, perda da interface e perda do regime de fluxo (SILVA, 2015). Existem dois tipos de célula de flotação, as auto aeradas injetam ar mecanicamente através da rotação do agitador da célula. As células de aeração forçada possuem uma tubulação de ar pressurizado e fazem o controle de vazão a partir de válvulas proporcionais nos ramais da tubulação, estas têm maior precisão no controle de vazão injetado no processo.

A altura da camada de espuma altera a seletividade da flotação. O aumento da camada de espuma aumenta o tempo para que a partícula se solte da bolha, desta forma, reduz a quantidade de material flotado. Assim, a altura da camada de espuma é fator determinante para aumento da recuperação metalúrgica, já que uma camada muito fina leva a um aumento do ferro na espuma e uma camada muito grossa reduz a quantidade de contaminantes retirados da polpa. A camada de espuma é controlada através de válvulas de controle que retiram a polpa no fundo da célula de flotação e, desta forma, controla-se o nível de interface e, indiretamente, o nível de espuma.

A dosagem de amina também age como coletor de quartzo e afeta a seletividade do processo. Esse reagente se adere às partículas em suspensão da polpa e as torna mais suscetíveis a serem flotadas. A baixa dosagem de amina causa uma redução na quantidade de material flotado, aumentando o teor de ganga no concentrado. Porém, a sobredosagem causa maior aderência da amina à hematita, o que prejudica a depressão dessas partículas, causando uma perda de ferro para o rejeito.

O amido, na flotação, age como depressor dos óxidos de ferro. O amido absorve na superfície dos minerais de ferro para evitar que sejam afetados pelas aminas e também pelas bolhas. A subdosagem deste reagente causa um aumento da perda de ferro para o rejeito. Porém, em caso de sobredosagem as partículas de quartzo também são afetadas. Isso reduz a quantidade de quartzo flotado e causa um empobrecimento do concentrado.

Outros fatores como teor de minerais na alimentação e granulometria afetam o processo,

mas não são controlados. Estes fatores são considerados distúrbios do processo.

Os teores na alimentação afetam diretamente o consumo de reagentes pelo processo. Porém, devido aos custos dos equipamentos de análise química, estes dados não estão sempre disponíveis para o controle. Novas técnicas e tecnologias tentam aumentar a disponibilidade de acesso a estes dados para permitir o controle destes distúrbios (MEHRABI et al., 2014).

A granulometria do material alimentado afeta a separabilidade, estabilidade das bolhas e consumo de reagentes. Partículas grandes têm baixa liberação dos minerais, prejudicando a separabilidade. Além disso, as partículas grandes prejudicam a estabilidade de bolhas o que prejudica o processo de separação na zona de coleta (FENG e ALDRICH, 1999). Já as partículas muito finas tem uma superfície específica muito elevada o que gera um aumento no consumo de reagentes (?).

3.2. Circuito de flotação da Usina de Conceição II

O processo de flotação da usina de Conceição II possui 3 linhas com 11 células de flotação divididas em estágios de *rougher*, *cleaner*, *recleaner* e *scavenger*. A Figura 3.2 mostra uma linha e a divisão dos estágios.

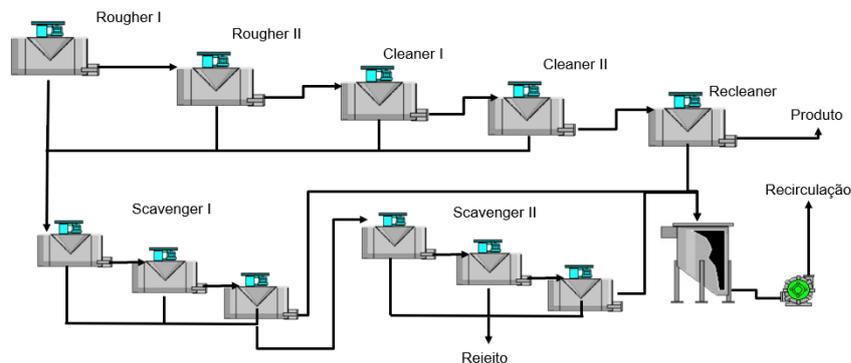


Figura 3.2: Estágios *rougher*, *cleaner*, *recleaner* e *scavenger* da flotação da Usina de Conceição II Fonte:Elaborada pelo autor.

A Figura 3.3 mostra uma única célula presente na flotação da usina de Conceição II. Todas as células estão equipadas com medidores de nível (2) do tipo boia para medição indireta do nível de espuma. O controle do nível é feito por controladores PID que acionam válvulas dardo na saída de cada célula (4), sendo a referência do nível de cada célula definida pelo operador. Para atenuar a perturbação gerada entre as células, adotou-se uma compensação *feedforward* entre a abertura da válvula da célula anterior e o controlador de nível da célula.

As células também possuem controle de vazão de ar, realizado por válvulas borboleta (3) e transmissores de vazão individuais (1) para cada célula, sendo a referência do valor de vazão de ar também definida pelo operador.

Um sistema de visão computacional (5), similar ao apresentado na Figura 3.4, monitora a espuma da célula de flotação e fornece ao sistema de controle dados de velocidade de esco-

amento, tamanho de bolha, número de bolhas, desvio padrão do tamanho de bolhas e desvio padrão de número de bolhas.

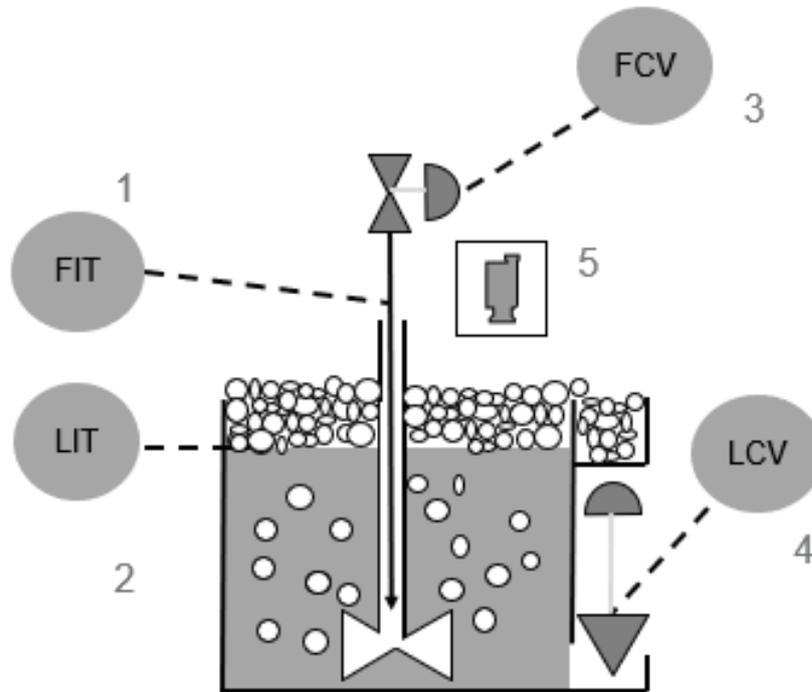


Figura 3.3: Instrumentos de uma célula de flotação da usina Conceição II Fonte:Elaborada pelo autor.



Figura 3.4: Câmera para análise das características da espuma da flotação (MEHRABI et al., 2014).

O controle de adição de reagentes é feito em condicionadores que alimentam os circuitos de cada linha, através da razão de reagentes pela massa alimentada no circuito onde é calculado a massa de reagentes em gramas por toneladas de massa alimentada. Um controlador *fuzzy* gera a referência para a dosagem de amina Costa **et al.** (2018). Parte da amina pode ser adicionada na terceira célula da linha por decisão do operador de sala, sendo que uma malha existe para controlar este fluxo de reagente. A referência para dosagem de amido também é definida pelo operador da sala de controle.

Capítulo 4

Proposta do Trabalho

Neste capítulo é apresentado o modelo do processo e o sistema de controle desenvolvido para controle do processo de flotação da usina Conceição II.

4.1. Ambiente simulado

O processo foi modelado utilizando o *software* IDEAS da Andritz Automation, um software de simulação dinâmica de diversos processos industriais. O programa possui modelos de diversos equipamentos industriais parametrizáveis, sendo possível a criação de uma planta com comportamento semelhante à real. Para tanto, foi utilizado o modelo de célula de flotação presente no IDEAS.

O modelo da célula de flotação utiliza como base a equação de recuperação instantânea de um mineral i na espuma flotada. A equação, proposta por Garcia Zuñiga (1935), que descreve o percentual da massa total do mineral recuperado ($R_{t,i}$) dependente da recuperação máxima ($R_{\alpha,i}$) e da constante cinética do mineral flotado (k_i) é dada por:

$$R_{t,i} = R_{\alpha,i}(1 - e^{-k_i t}), \quad (4.1)$$

Quanto maior a constante cinética do mineral mais rapidamente é atingida a recuperação máxima e quanto maior a recuperação máxima, mais material é flotado na espuma. Porém, esses fatores sofrem efeitos de outras variáveis do processo como tamanho de bolha, granulometria do mineral, densidade do mineral e características de superfície da partícula.

Para modelar o efeito do tamanho de bolha na cinética da flotação, é utilizado um fator de correção que depende da vazão de ar injetada na célula este fator depende da velocidade superficial de ar (J_g), calculada como a vazão de ar injetado pela área da seção transversal da célula de flotação,

$$J_{g,i} = \frac{Q_{ar,i}}{A_{cel,i}}, \quad (4.2)$$

em que $Q_{ar,i}$ é a vazão de ar injetado na célula e $A_{cel,i}$ é a área da seção transversal da célula.

Quanto maior a velocidade superficial do ar, maiores as bolhas, com isso mais empuxo é gerado e mais rápida é a ascensão das bolhas na polpa. Também possibilitando a recuperação de partículas mais pesadas. Para simular este efeito, o modelo aplica um fator modificador às constantes cinéticas dos minerais proporcional à velocidade superficial para qual a célula foi projetada,

$$k_i^* = \frac{k_i J_{g,i}}{J_{g_0,i}}, \quad (4.3)$$

em que J_{g_0} é a velocidade superficial do ar projetado para a célula.

A recuperação máxima do mineral depende das propriedades de superfície da partícula e da granulometria. O efeito das propriedades de superfície foi modelado a partir de dados de dosagem de reagentes de estudos realizados com um minério similar (?). A recuperação máxima do minério de ferro e do quartzo foram modelados linearmente de acordo com os dados da Tabela 4.1.

Dosagem Amina (g/t)	R_{max} Fe (%)	R_{max} SiO2 (%)
60,00	29,28	98,96
100,00	39,01	99,30

Tabela 4.1: Recuperação mássica máxima Fonte:Elaborada pelo autor baseado em (LIMA et al., 2013).

Outro fator importante a ser considerado é o tempo em que o material permanece dentro da célula. Quanto maior o tempo de residência (t_{res}) maior a probabilidade da partícula se chocar com uma bolha e ser carregada para a espuma. O tempo de residência é estimado como um fator do volume do material entrando na célula pelo volume da mesma,

$$t_{res,i} = \frac{V_{Cel,i}}{Q_{alim,i}}, \quad (4.4)$$

em que V_{Cel} é o volume útil da célula e Q_{alim} é a vazão volumétrica de material alimentado. Assim, quanto maior o tempo de residência, o percentual de massa do mineral flotado aumenta, tendendo à recuperação máxima. Desta forma, a recuperação de cada mineral flotado, se liberado, é limitada pelo seu tempo de residência por características das partículas.

A força de interação entre partícula e bolha nem sempre é suficiente para carregar a partícula até a superfície da célula. Quando chegam na camada de espuma, muitas partículas perdem a aderência e se desprendem, retornando à polpa. Este fenômeno ocorre em uma camada entre a espuma e a polpa chamada de zona de recuperação. Quanto mais alta a camada de espuma maior o tempo na zona de recuperação e maior a probabilidade de desprendimento da partícula.

No modelo a zona de recuperação é calculada como um fator proporcional à camada máxima de espuma (FH_{max}) que é a altura de camada de espuma onde a espuma não transborda

da célula de flotação sendo assim a massa flotada é zero. Assim a fração recuperada é dada por,

$$FR_i = 1 - FH_i / FH_{max,i}, \quad (4.5)$$

em que FR_i é a fração de massa recuperada na espuma e FH_i é a altura instantânea da espuma.

Sendo assim, o *mass-pull*, ou a massa total recuperada na espuma (W_f), é dado pela somatória das massas dos minerais flotados.

$$W_f = FR \sum R_i(k_i^*, R_{\alpha,i}, t_{res}) A_i \quad (4.6)$$

Onde A_i é a massa do mineral i alimentado na célula.

4.1.1. Calibração do modelo

As células deste modelo foram usadas para criar o circuito de uma linha de flotação da usina de Conceição II. A Figura 4.1 mostra o circuito montado no IDEAS. Todas as células têm configuração igual à primeira, em evidência na figura, com transmissor de nível de espuma (CF1430CN01_LI1), uma entrada para ajuste da vazão de ar (CF1430CN01_FI1) e uma variável de abertura da válvula de controle de nível (LIC1430CN501_JSD). A figura também mostra os transmissores para medição de densidade (ALFT_DI), vazão mássica (WIT_ALFT), vazão (ALFT_FI) e de teores (AIT_ALFT).

Um balanço de massa do processo foi utilizado de base para calibração do modelo. Desta forma, foram separados os dados de massa e concentração de cada estágio, realizada a calibração e validação separadamente para simplificar o procedimento e garantir o desempenho adequado do simulador.

As dimensões das células foram retiradas de parâmetros de projeto das células. O parâmetro de vazão superficial de ar foi ajustado como o máximo encontrado entre as células, uma vez que a área transversal de todas as células é a mesma. Já a altura máxima de espuma, foi ajustada como os pontos máximos de dados históricos de cada célula, a Tabela 4.2 contém os parâmetros de FH_{max} utilizados no modelo.

	Nível máximo de espuma $FH_{max}(cm)$
Rouguer I e II	100
Cleaner I	33
Cleaner II	30
Recleaner	25
Scavenger I e II	50

Tabela 4.2: Parâmetro máximo de camada de espuma Fonte: Elaborada pelo autor.

A calibração baseou-se no ajuste das constantes cinéticas do ferro e do quartzo em cada estágio da flotação, enquanto as variáveis do processo foram mantidas fixas, de forma que os teores de concentração simulados de cada mineral no concentrado e rejeito dos estágios

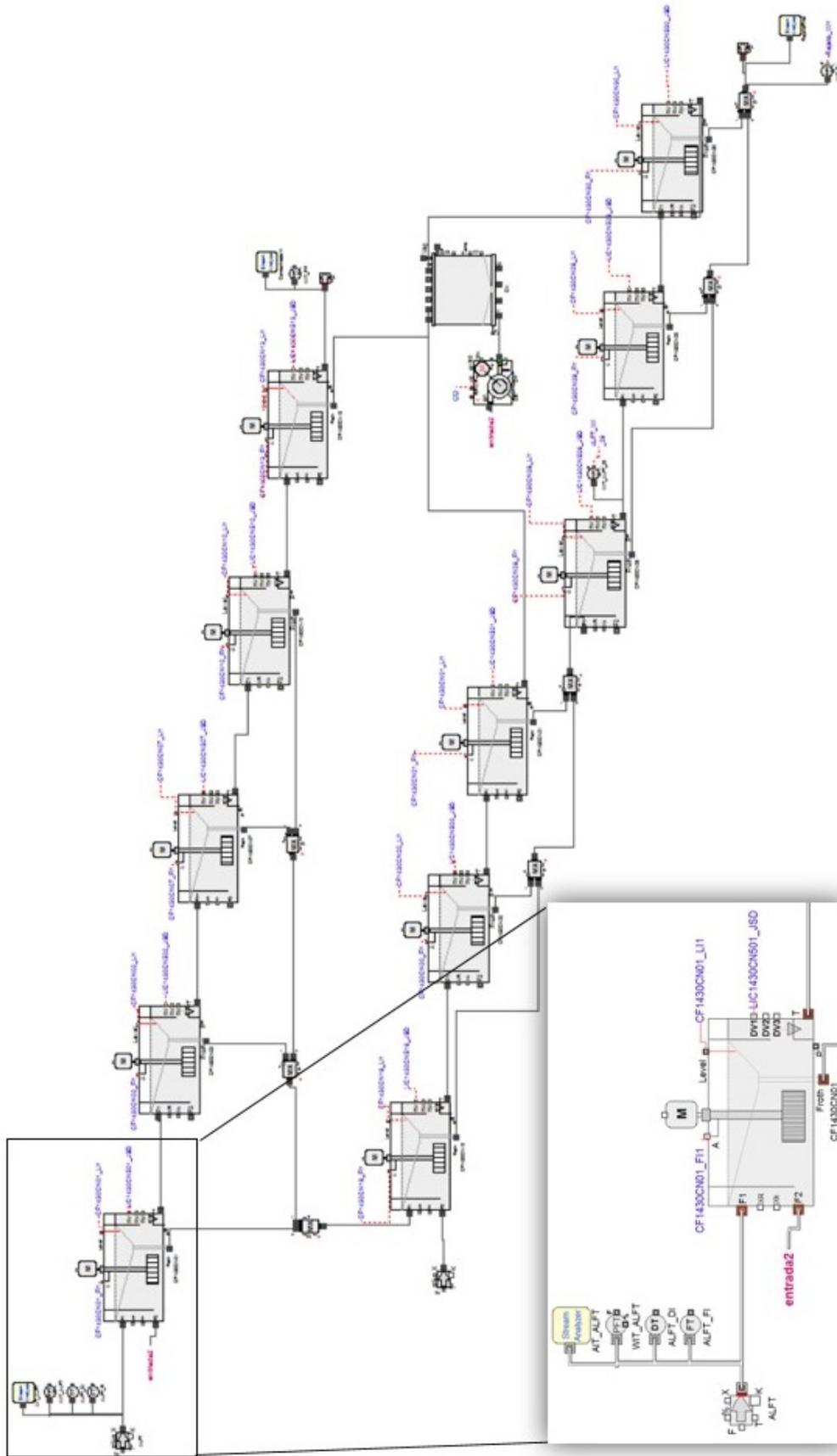


Figura 4.1: Linha de flotação da usina de conceição II simulado no ambiente IDEAS
 Fonte:Elaborada pelo autor.

estivessem próximos aos valores reais. A massa de material usada para alimentar cada estágio é apresentada na Tabela 4.3.

Estágio	Massa total (t/h)
<i>Rougher</i>	1710,65
<i>Cleaner</i>	1436,72
<i>Recleaner</i>	1257,95
<i>Scavenger I</i>	1630,04
<i>Scavenger II</i>	1152,81

Tabela 4.3: Massa total de alimentação de cada estágio Fonte:Elaborada pelo autor.

4.1.2. Lógica difusa

Segundo Klir e Yuan (1995) uma mudança de paradigma ocorre no final do século 19, quando a física começou a se preocupar com processos a nível molecular. A visão de que a ciência é exata e que incertezas são indesejadas foi substituída por métodos estatísticos mais adequados para descrever estes processos. Um grande avanço na teoria probabilística ocorreu em 1965, quando Zadeh (1965) propôs a ideia de conjuntos difusos, do inglês *fuzzy sets*, onde o pertencimento de algo no conjunto não é binário, mas sim grau de pertencimento ao conjunto que pode variar.

A capacidade dos conjuntos difusos de representar uma transição gradual entre pertencimento e não pertencimento a um conjunto possibilita a representação de incerteza presente na linguagem humana, possibilitando a transcrição do raciocínio linguístico para a lógica matemática inteligível pelos computadores (LEE; COX, 1992; KLIR e YUAN, 1995; ZADEH, 1965).

Em meados do século 20, ? propôs a utilização dos conjuntos difusos para controle de um motor a vapor, a partir desse momento os controladores baseados em lógica *fuzzy* ganharam mais espaço à medida que a necessidade de controle de processos complexos cresceu e a capacidade computacional dos computadores ainda era o principal fator limitante para os controladores. Isso porque o uso de lógica difusa possibilita a simplificação de processos muito complexos para serem modelados ou onde os parâmetros são difíceis de ser obtidos (LI e GATLAND, 1995). Desta forma, esta técnica de controle permite a conversão do conhecimento explícito e tácito dos especialistas e operadores experientes em regras utilizadas pelo controlador.

4.1.3. Controlador *fuzzy*

O controlador foi desenvolvido no ambiente Simulink do MATLAB. A comunicação com o simulador é realizada através de um servidor OPC presente na máquina.

Os controladores baseados em lógica *fuzzy* operam em 3 etapas: a conversão de valores numéricos para variáveis linguísticas (fuzzificação), a aplicação de regras lógicas para inferência de resultados linguísticos e a conversão dos resultados em saídas numéricas do controlador (defuzzificação).

Fuzzificação

A fuzzificação é o processo de mapeamento das variáveis de entrada aos subconjuntos difusos de variáveis linguísticas através de uma função de pertinência $\mu = U \rightarrow (0,1)$ que associa um valor no intervalo (0,1) a cada elemento u pertencente ao espaço amostral U (MAM-DANI, 1974). O primeiro passo é definir as variáveis de entrada, por exemplo o erro de controle. Cada elemento de entrada é decomposto em subconjuntos de variáveis aos quais são atribuídos rótulos linguísticos com características da variável de entrada, como por exemplo "Muito negativo"(MN), "Negativo"(N), "Zero"(Z), "Positivo"(P) e "Muito positivo". O grau de pertencimento da entrada é, então, mapeado nesses subconjuntos utilizando funções de pertinência.

As funções de pertinência podem ter diversos formatos, as mais utilizadas são funções triangulares, trapezoidais e gaussianas e podem ser distribuídas de acordo com a necessidade do projetista. Entretanto, em todos os pontos do universo amostral da variável de entrada o valor total da soma dos graus de pertinência dos conjuntos deve estar no intervalo [0,1].

A Figura 4.2 mostra o exemplo da distribuição da variável de erro no conjunto de variáveis linguísticas. Como pode ser visto, a variável de erro foi mapeada no intervalo de [-3, 3], valores menores que o intervalo são mapeados no subconjunto de valores MN e valores maiores que o intervalo são mapeados no conjunto MP. No entanto, valores dentro do intervalo são mapeados com diferentes graus de pertinência. Por exemplo, o valor 0,75 pertence aos conjuntos Z e P com um grau de pertencimento de $\mu_Z(0,75) = 0,5$ e $\mu_P(0,75) = 0,5$. Já um erro de -1,80 tem grau de pertinência $\mu_{MN}(-1,80) = 0,2$ no subconjunto MN e $\mu_N(-1,80) = 0,8$ no subconjunto N.

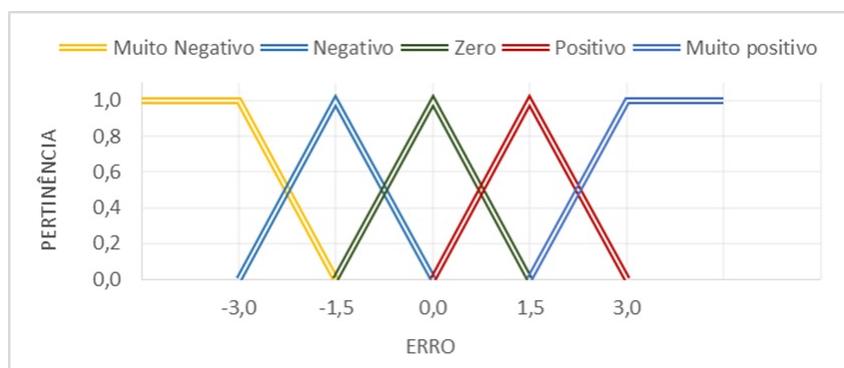


Figura 4.2: Mapeamento da entrada de erro aos subconjuntos de variáveis linguísticas Fonte: Elaborada pelo autor.

Deste modo, podemos transcrever uma ideia comum na lógica humana de um "erro meio positivo" ou "erro quase muito negativo" e aplicar estes valores no controle do processo.

Regras fuzzy

A determinação do comportamento de um controlador *fuzzy* começa pela determinação do conjunto de regras em forma de premissas lógicas. Cada regra é expressa em texto, na forma:

Se x é A **Então** y é B

Este conjunto de regras deve ser criado por profissionais experientes, conhecedores do processo e de seu comportamento (COX, 1992). Porém, diferente de métodos tradicionais de controle, as regras de controle *fuzzy* não requerem um modelo matemático preciso do processo.

Para a criação de controladores com múltiplas entradas, porém, é necessária uma etapa extra, a de agregação das variáveis de entrada. Os dois principais operadores de agregação são:

Conjunção: indica que uma proposição é verdadeira apenas se ambas as outras também são verdadeiras. Por exemplo:

Se erro é Positivo **E** derivada é Zero **Então** Saída é Reduzir.

Mamdani (1974) define como a interseção dos subconjuntos A e B , esta operação é expressa por:

$$A.B = \min(\mu_A(u), \mu_B(u)) \quad (4.7)$$

Disjunção: indica que uma proposição é verdadeira quando uma ou ambas as proposições são verdadeiras.

Se erro é Positivo **OU** derivada é Muito Positiva **Então** Saída é Reduzir.

Mamdani (1974) define como a união dos subconjuntos A e B , esta operação é expressa por:

$$A + B = \max(\mu_A(u), \mu_B(u)) \quad (4.8)$$

Negação: indica que uma proposição é o complemento da proposição.

Se derivada não é Muito Positiva **Então** Saída é Aumentar.

Mamdani (1974) define como o complemento de um subconjunto A , esta operação é expressa por:

$$\neg A = 1 - \mu_A(u) \quad (4.9)$$

Assim, com mudanças simples nas regras é possível fazer controles de múltiplas entradas e única saída (MISO) ou até mesmo a criação de múltiplas saídas (MIMO). Porém, os controladores devem ter um conjunto de regras completo, isto é, todos os estados das entradas

devem ser cobertos. Por isso a complexidade do conjunto de regras cresce exponencialmente com o número de entradas. Por exemplo, se tivermos duas entradas mapeadas em 3 subconjuntos cada, devemos escrever 9 regras para englobar todos os estados possíveis. Se aumentarmos para 5 subconjuntos cada, o número de regras sobe para 25. Por isso, é importante escolher apenas as variáveis de entrada mais relevantes para o controle, de maneira a evitar um aumento de complexidade desnecessário.

Defuzzificação

Na lógica tradicional, este mapeamento do conjunto de saída seria binário, a saída pertence ou não ao conjunto. Na lógica *fuzzy*, entretanto, como as premissas das entradas não são, sempre, totalmente pertencentes aos conjuntos avaliados, uma última etapa é necessária para mapear os conjuntos resultantes nas variáveis de saída do controlador. Este processo é chamado de defuzzificação.

Assim como na fuzzificação, a primeira etapa da defuzzificação é definir os conjuntos de variáveis linguísticas da saída do controlador. A Figura 4.3 mostra um conjunto de funções de pertinência, o qual é dividido em 5 subconjuntos.

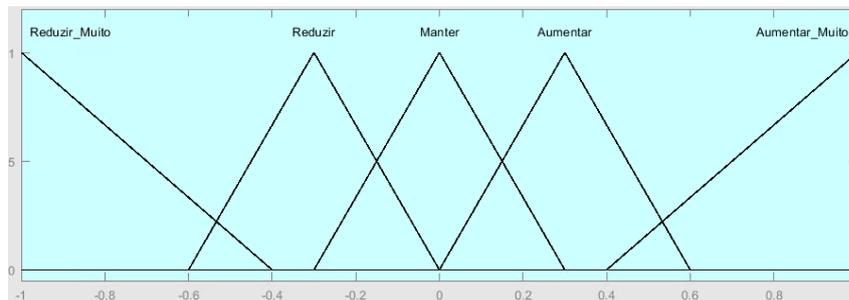


Figura 4.3: Exemplo de funções de pertinência da variável de saída de um controlador Fonte: Elaborada pelo autor.

Este controlador opera gerando uma variação aplicada à saída atual, a amplitude desta variação é definida pelas regras e pelo formato dos conjuntos de saída. As regras O principal método usado na defuzzificação de controladores é o método da centróide.

O método da centróide consiste em calcular o ponto médio dos conjuntos, levando em conta o grau de pertinência da saída a cada conjunto. A Figura 4.4 mostra um exemplo de cálculo da centróide da saída do controlador de exemplo.

Neste exemplo, a saída do controlador tem um maior grau de pertinência ao conjunto "Aumentar", mas também pertence ao conjunto "Aumentar Muito". O resultado, em vermelho, é o ponto central da área do conjunto resultante. A alteração das formas geométricas das funções de pertinência alteram a área do conjunto resultante e podem ser usadas como ajuste da saída do controlador.

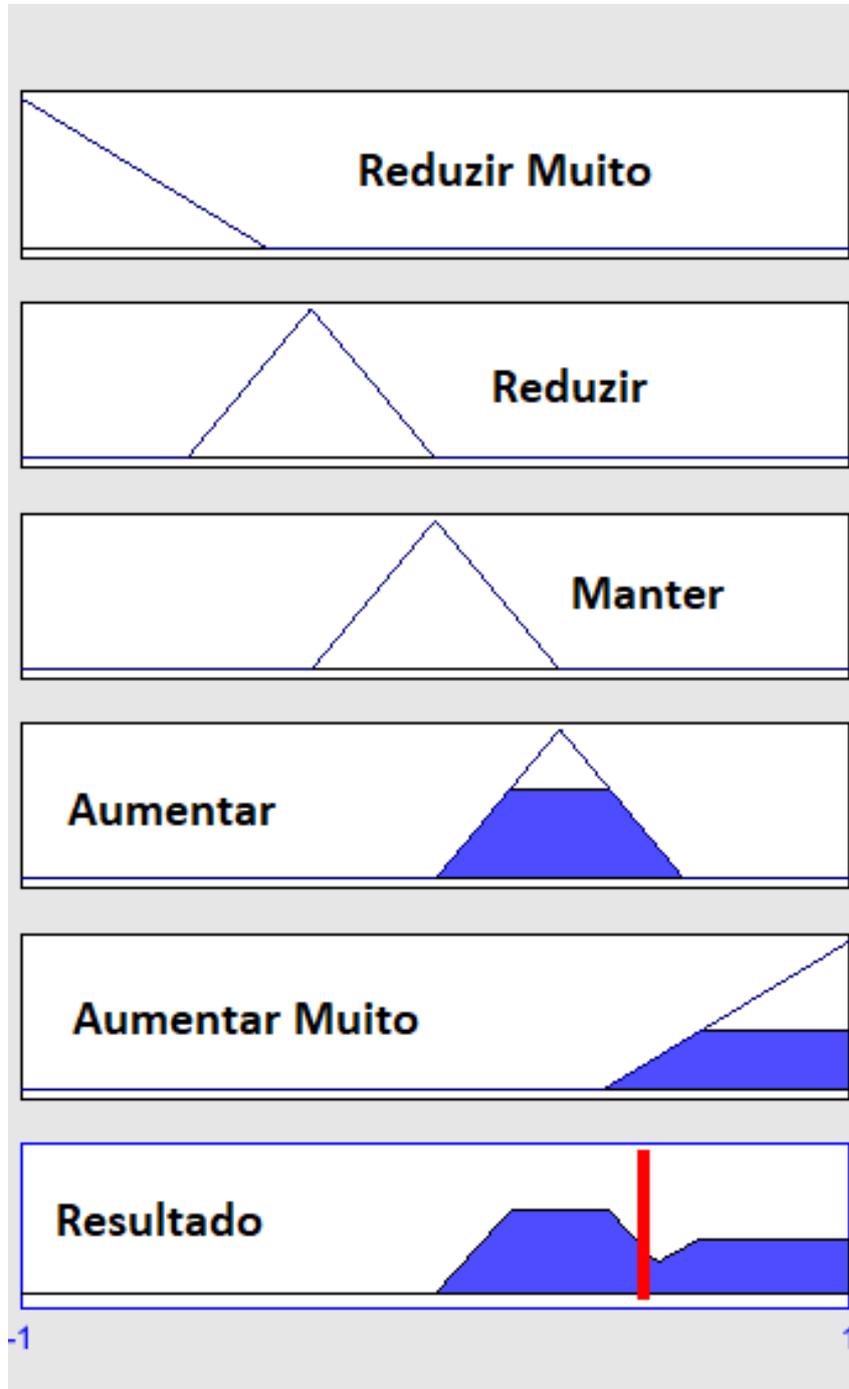


Figura 4.4: Aplicação do método da centróide para defuzzificar a saída Fonte: Elaborada pelo autor.

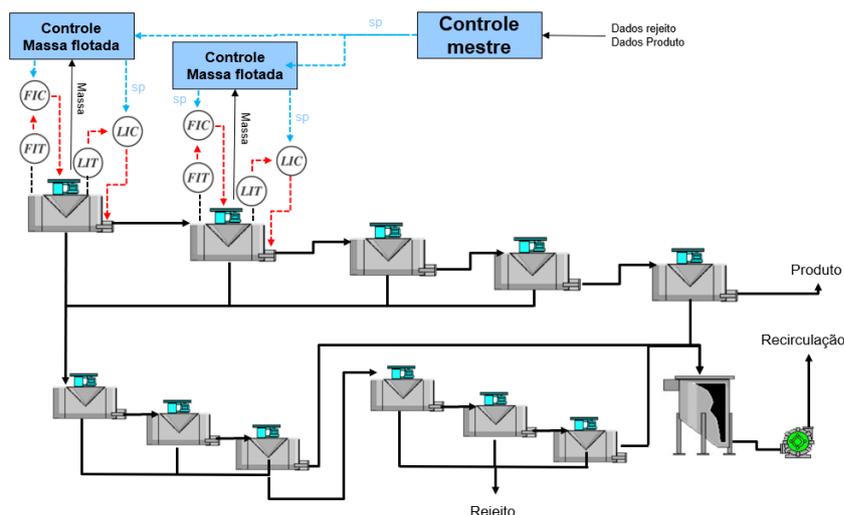


Figura 4.5: Estrutura do sistema de controle Fonte: Elaborada pelo autor.

4.1.4. Estrutura do controlador

O sistema de controle proposto é composto de três camadas. A primeira camada é composta pelo controle regulatório. Esta camada já está presente na planta e é composta de malhas PID para controle de nível e vazão de ar como apresentado na seção 3.2.

A segunda camada é composta por dois controladores de velocidade de escoamento que serão utilizados no estágio *rougher*. Estes controles utilizam os dados de velocidade de espuma vindos do sistema de visão computacional e geram as referências para o nível inferior. A velocidade de espuma está ligada à recuperação em massa e ao grau de seleção do processo. Nas células *rougher* as massas flotadas são mais altas, uma vez que o ferro flotado neste estágio pode ser recuperado nas células *scavenger*.

O sistema em três camadas de hierarquia, apresentado na Figura 4.5, tem como objetivo modularizar os controladores e simplificar cada módulo, facilitando a implementação e manutenção do sistema. O uso de um controlador *fuzzy* na segunda camada visa simplificar o controlador da camada superior. O ideal é obter respostas lineares para adoção de técnicas robustas de controle. Porém, um estudo mais aprofundado é necessário.

O controlador da terceira camada tem o objetivo de aumentar os ganhos de processo. Nesta camada, um controlador *fuzzy* utiliza as respostas obtidas dos testes com o controlador da segunda camada, assim como conhecimento de especialistas do processo e dados de campo para melhorar a classificação e manter o processo dentro das restrições adotadas.

4.2. Controlador de *mass-pull*

Os controladores *fuzzy* implementados neste trabalho foram baseados nos controladores de *mass-pull* apresentado por Dawson e Koorts (2014). No trabalho em questão, o sistema implantado controla a velocidade da espuma das células visando controlar a massa total que

é flotada. Porém, no ambiente simulado, a velocidade de escoamento é muito mais difícil de modelar, devido a diversos fatores, como altura da camada de espuma acima da borda, densidade de espuma, estabilidade de bolha e tamanho de bolhas. A massa de material flotado, por outro lado, é calculada no modelo proposto. Por isso, a variável controlada foi alterada em relação ao trabalho original.

A estrutura do controlador é mostrada da Figura 4.6. As variáveis de entrada são erro e a derivada da variável de processo, a massa flotada na célula. As Figuras 4.7 e 4.8 mostram as funções de pertinência das variáveis de entrada. O erro foi usado para uma ação mais rápida do controle, desta forma, menos conjuntos são necessários, simplificando a criação de regras. A variação da massa flotada, por outro lado, foi utilizada como um freio da ação de controle, e foi necessária uma maior precisão, por isso foram adicionados 5 conjuntos para este parâmetro. As gaussianas foram utilizadas no controlador para suavizar a ação de controle e evitar instabilidade do processo simulado.

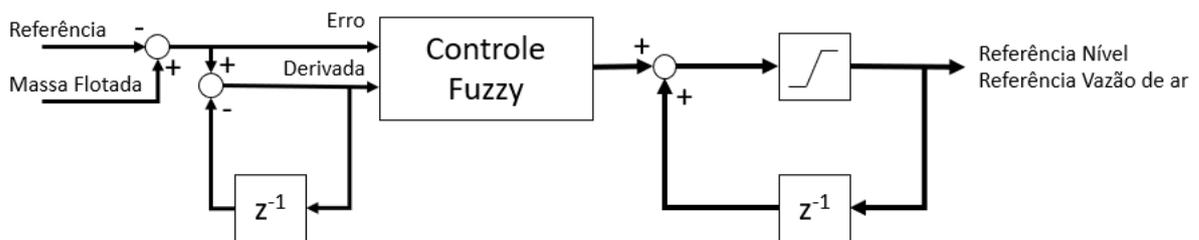


Figura 4.6: Estrutura do controlador incremental de massa flotada Fonte: Elaborada pelo autor.

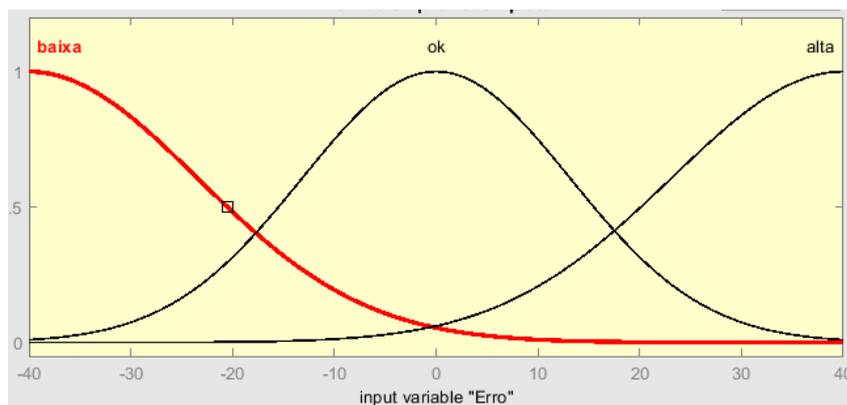


Figura 4.7: Funções de pertinência do erro de controle Fonte: Elaborada pelo autor.

As variáveis manipuladas do controlador foram definidas como a vazão de ar injetada na célula e o nível da camada de espuma. Pela equação 4.2 sabemos que a vazão de ar gera uma resposta diretamente proporcional à variação, ou seja, para aumentar a massa flotada deve-se aumentar o volume de ar injetado na célula. Já a Equação 4.5 nos mostra que a camada de espuma tem uma relação inversamente proporcional à massa flotada, isto é, quanto maior a camada de espuma, menos massa é flotada.

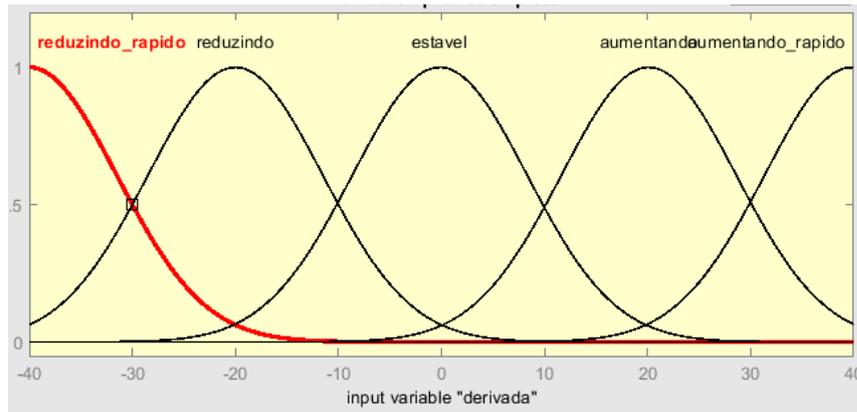


Figura 4.8: Funções de pertinência da variação do erro de controle Fonte: Elaborada pelo autor.

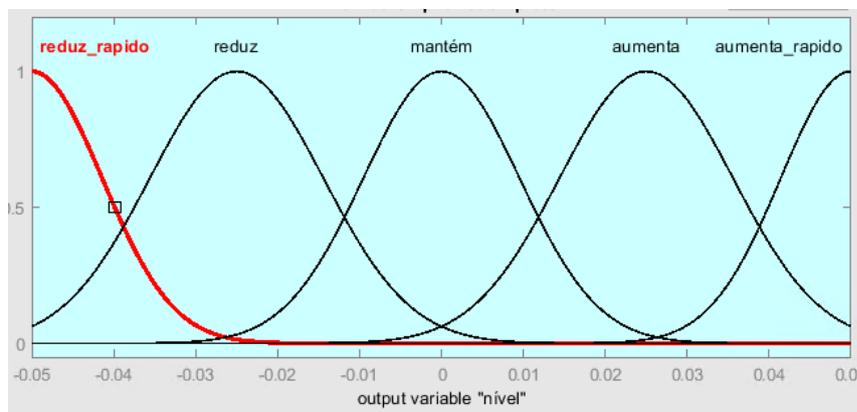


Figura 4.9: Funções de pertinência do setpoint de nível da célula Fonte: Elaborada pelo autor.

Os conjuntos de saídas são mostrados nas Figuras 4.9 e 4.10. Na saída do controlador foi adicionado um sistema integrador para utilizar o último ponto calculado como referência para o novo cálculo. O integrador faz com que a ação proporcional ao erro e a ação derivativa sejam integradas fazendo com que o controlador se comporte como um controlador Proporcional e integral baseado em regras fuzzy. O efeito integrador gera saturação dos atuadores da planta, para evitar o efeito de *Wind-up*, foi incluído nestra estrutura um saturador com os limites físicos dos atuadores. Este saturador cessa a integração quando o controlador esta saturado reduzindo o efeito indesejado da ação integral nestes momentos. Para o controle da flotação, esta opção foi mais viável, pois as variáveis que causam distúrbios, como vazão de entrada da flotação, densidade e qualidade de do minério não são lidas pelo controlador. Utilizando uma saída integradora, o controlador pode contornar estes distúrbios e chegar ao erro nulo.

Os valores de saída da variação de nível de espuma e de vazão de ar foram ajustados para operar a cada 1 segundo e foram encontrados a partir de testes empíricos. Durante os testes, foi observado que uma variação muito brusca no nível ou na vazão de ar causa distúrbios na massa flotada. Quando a vazão de ar sofre um aumento brusco, ou o nível de espuma é reduzido muito rapidamente, a massa de material flotado sofre um pico causado pela espuma sendo empurrada para cima pela polpa. O contrário também ocorre quando a vazão de ar é reduzida ou a camada

de espuma aumenta bruscamente. Como a espuma não se forma instantaneamente e o ponto de interface polpa/espuma cai bruscamente, a massa flotada cai instantaneamente. Este distúrbio foi um dos fatores limitadores nos ganhos do controlador e limitantes na velocidade de atuação do mesmo.

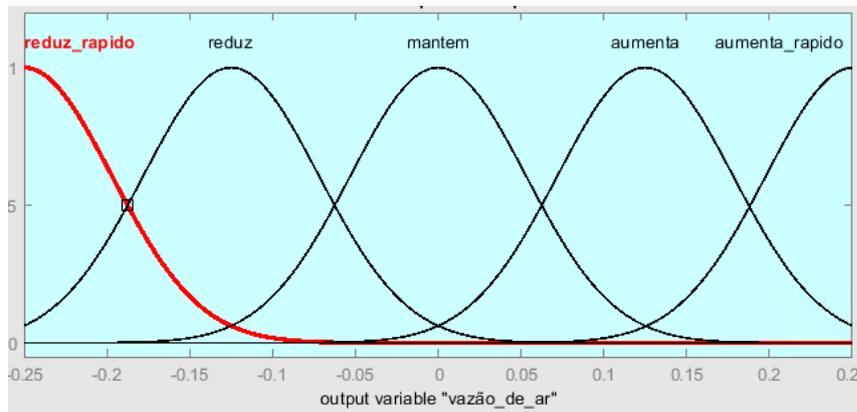


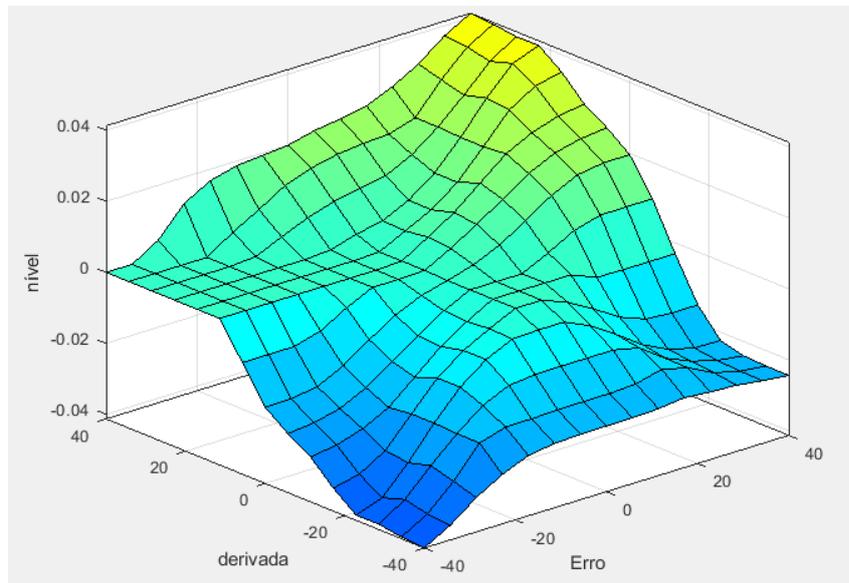
Figura 4.10: Funções de pertinência do Setpoint de vazão de ar da célula Fonte: Elaborada pelo autor.

A Tabela 4.4 mostra as regras de controle do controlador. As regras foram baseadas no controle de (DAWSON e KOORTS, 2014), é importante notar a coluna do erro "Ok" onde o controlador só atua como freio para uma variação brusca na massa flotada, de outro modo ele mantém a saída atual de controle.

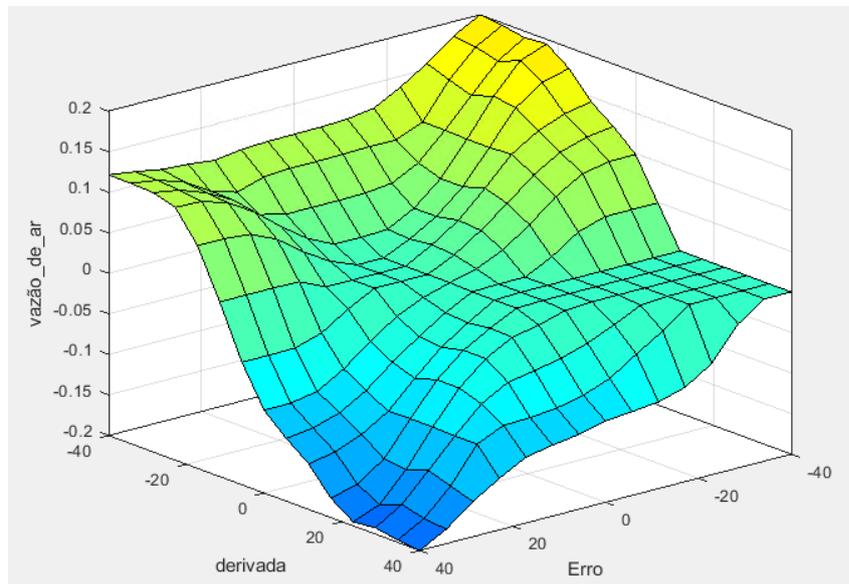
Variação da massa (Derivada)	Massa flotada (Erro)		
	Baixa	Ok	Alta
Reduzindo_rapido	Nível ReduzRápido Ar Aumenta rápido	Nível Reduz Ar Aumenta	Nível Reduz Ar Aumenta
Reduzindo	Nível Reduz_rápido Ar aumenta rápido	Nível mantém Ar Mantém	Nível Reduz Ar Aumenta
Estável	Nível Reduz Ar Aumenta	Nível Mantem Ar Mantém	Nível Aumenta Ar Reduz
Aumentado	Nível Reduz Ar Aumenta	Nível Mantém Ar Mantém	Nível Aumenta Rápido Ar Reduz Rápido
Aumentando rápido	Nível Aumenta Ar Reduz	Nível aumeta Ar Reduz	Nível Aumenta Rápido Ar Reduz Rápido

Tabela 4.4: Regras de controle de massa flotada Fonte: Elaborada pelo autor.

As superfícies de saída do controlador podem ser vistas na Figura 4.11. Os eixos do erro e da derivada da Figura 4.11a estão invertidos com relação a Figura 4.11b de forma a mostrar o espelhamento entre as respostas. Como a ação do nível é inversa e a ação da vazão de ar é direta para a massa flotada, a resposta oposta é esperada. O efeito das regras podem ser vistos nas superfícies. Quando a derivada é muito negativa, a tendência de reduzir o nível e aumentar a vazão é evidente. Em oposição está um platô pelo freio implementado quando o erro esta no patamar baixo e a derivada está aumentando rápido.



(a) Saída de referência nível.



(b) Saída de referência vazão.

Figura 4.11: Superfícies de saída do controlador de massa flotada Fonte: Elaborada pelo autor.

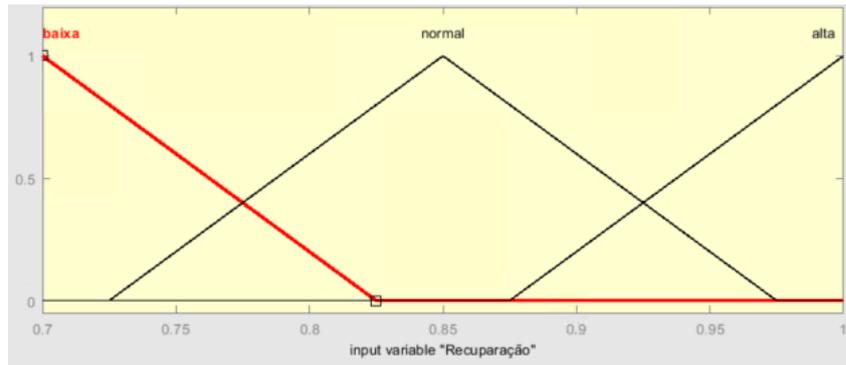


Figura 4.12: Funções de pertinência da recuperação metalúrgica da linha Fonte: Elaborada pelo autor.

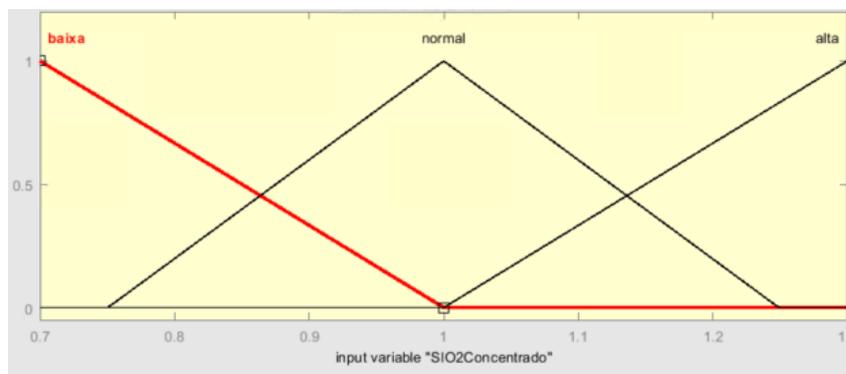


Figura 4.13: Funções de pertinência do teor de SIO2 do concentrado Fonte: Elaborada pelo autor.

4.2.1. Controlador de qualidade

A amplitude das variáveis manipuladas (massa flotada das *roughers*) foram definidas através de testes de resposta ao nível de espuma e vazão de ar. Para a primeira célula *rougher* variando a vazão de ar e nível para seus níveis extremos enquanto mantendo a entrada fixa. Para determinar o limite superior, a vazão de ar da célula foi ajustada para o máximo, $1000 \text{ m}^3/\text{h}$, e o nível de espuma para o mínimo, 30 cm. O valor de massa flotada em estado estacionário foi de, aproximadamente, 1000 t/h . O limite mínimo foi simulado de forma similar com a vazão de ar em $500 \text{ m}^3/\text{h}$ e nível de espuma em 50 cm. O valor de limite mínimo de massa foi de, aproximadamente, 500 t/h . De forma similar, para a segunda célula *rougher* foram encontrados os limites máximo de 600 t/h e mínimo de 300 t/h . Estes limites foram aplicados à saída do controlador para reduzir o efeito de *wind up*.

Os conjuntos de saída deste controlador são mostradas nas Figuras 4.14 e 4.15. Os formatos das funções de pertinência foram escolhidos de forma a acelerar a ação de controle nas extremidades e frear quando próxima do valor "normal". Os limites da saída da célula II foram definidos como metade da primeira célula de forma a manter uma consistência em relação ao tamanho da faixa de operação de cada célula. Como a faixa de operação da célula II é menor, a variação do pedido de massa foi reduzida pela metade. Entretanto, proporcionalmente

o controle da segunda célula é mais rápido para rejeitar o distúrbio causado pela primeira célula do banco.

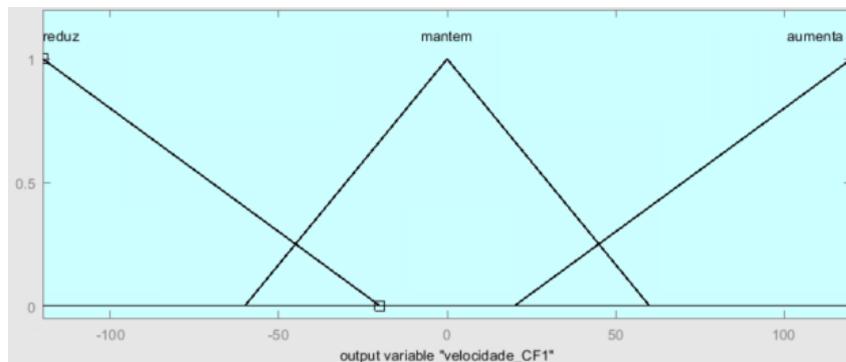


Figura 4.14: Funções de pertinência da variação do pedido de massa flotada para *Rougher I*
Fonte: Elaborada pelo autor.

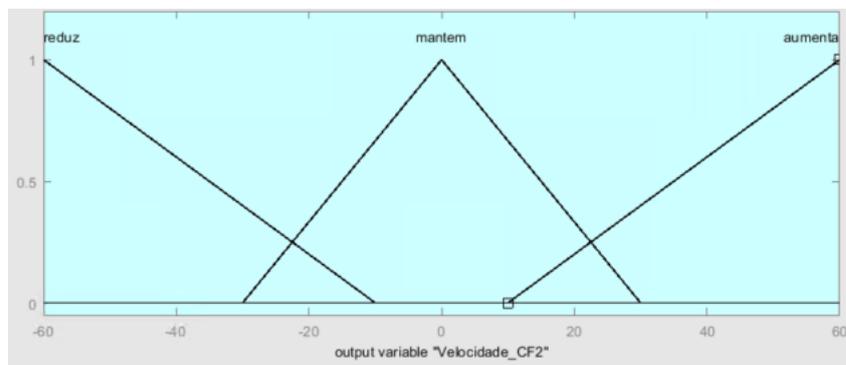


Figura 4.15: Funções de pertinência da variação do pedido de massa flotada para *Rougher II*
Fonte: Elaborada pelo autor.

Para criar as regras de controle, primeiro foi necessário entender o funcionamento do sistema. Diferentes técnicas podem ser empregadas para a análise do processo, a mais utilizada, por sua simplicidade, é o método da resposta ao degrau. Porém, devido à complexidade do processo de flotação, muitos autores utilizam de métodos como as redes neurais e lógica fuzzy para realizar a modelagem (JAHEDSARAVANI *et al.*, 2016; VIEIRA *et al.*, 2005).

A primeira etapa do teste de resposta ao degrau é estabilizar o processo em um ponto de operação adequado. Em seguida, um distúrbio em degrau é aplicado na massa de material flotado da *rougher I*. Os efeitos deste distúrbio em vários pontos do processo são analisados para entendimento do comportamento do processo. A Figura 4.16 mostra algumas das possíveis respostas do processo ao degrau.

A Figura 4.17 mostra a resposta obtida a partir do aumento da massa flotada na célula *rougher I*. É visível que a resposta é inversamente proporcional para o teor de SiO₂, o que é esperado, pois quando aumentamos a massa flotada, mais sílica é retirado concentrado aumentando o teor final. A resposta da recuperação metalúrgica também é esperada, uma vez que o

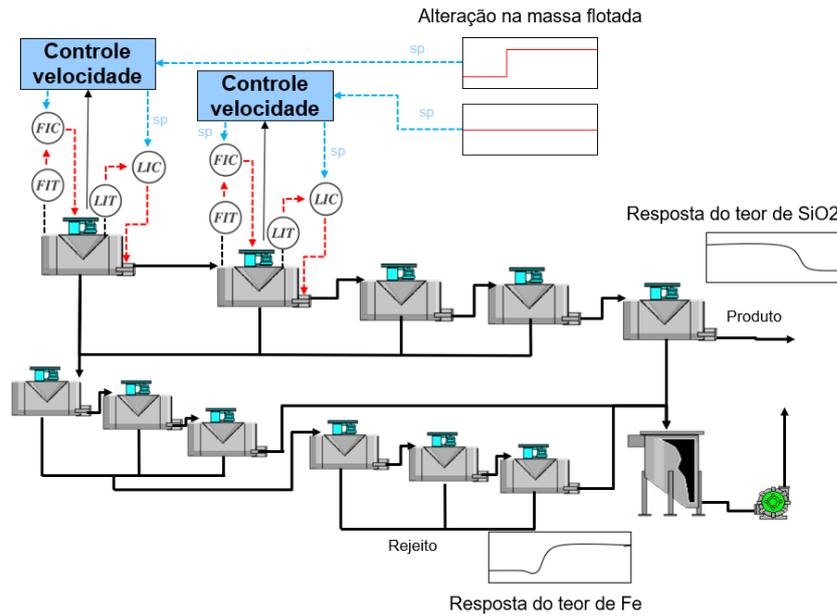
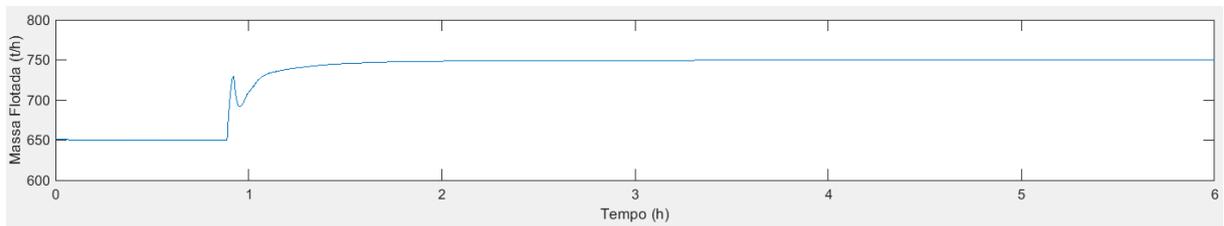
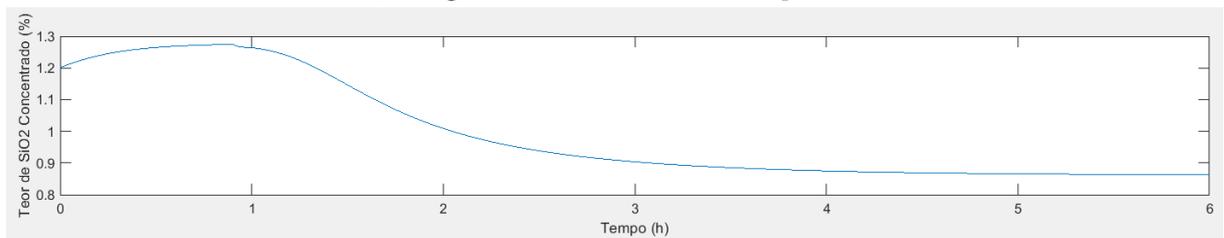


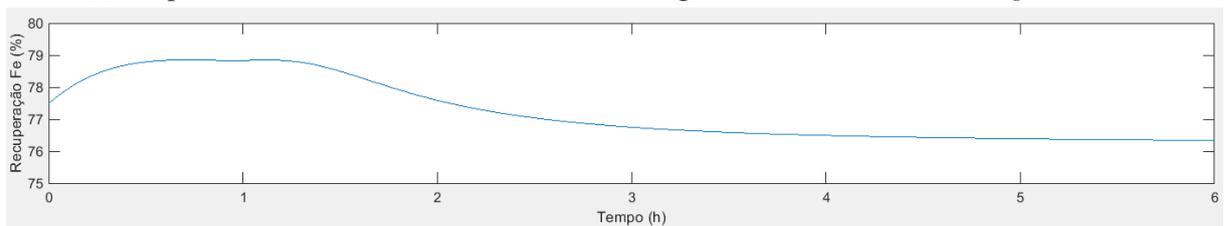
Figura 4.16: Teste de resposta ao degrau na massa flotada da *rougher I* Fonte: Elaborada pelo autor.



(a) Degrau de massa flotada na *rougher I*.



(b) Resposta do teor de SiO2 no concentrado ao degrau de massa flotada na *roughers I e II*.



(c) Resposta da recuperação de Ferro ao degrau de massa flotada nas *roughers I e II*.

Figura 4.17: Teste de resposta da flotação ao degrau de massa flotada nas *rougers I e II* Fonte: Elaborada pelo autor.

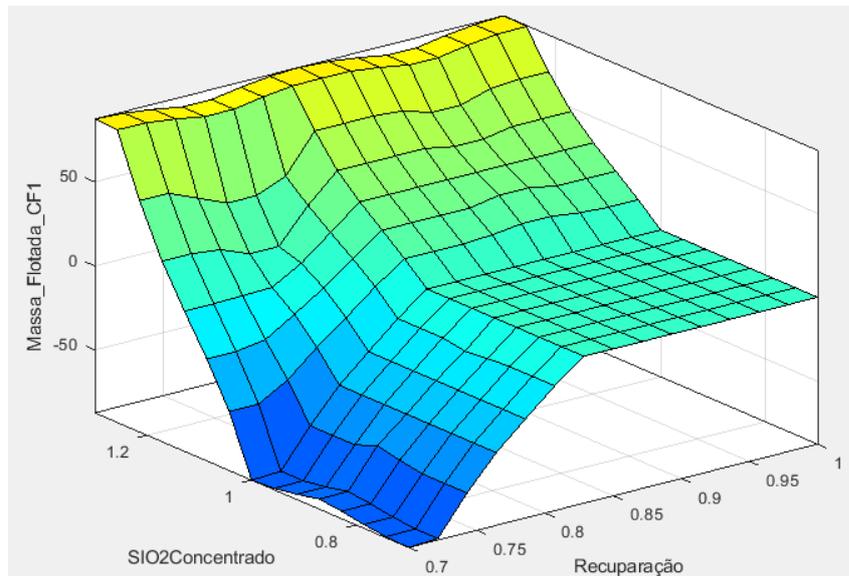
aumento da massa flotada reduz a massa de ferro no concentrado, levando a uma redução na sua recuperação.

A Tabela 4.5 mostra as regras aplicadas a este controle, as regras foram definidas para priorizar o controle de teor. Os testes de resposta ao degrau mostram uma redução no teor SiO₂ no concentrado quando aumentamos a massa flotada nas *roughers*, por conta disso, sempre que o teor de quartzo está "alto" o valor de referencia de massa flotada aumenta e o oposto ocorre quando o teor está "baixo". A única exceção a esta regra acontece quando a recuperação metalúrgica está "baixa" e o teor está "normal". Neste caso a massa flotada é reduzida para tentar recuperar mais ferro no concentrado.

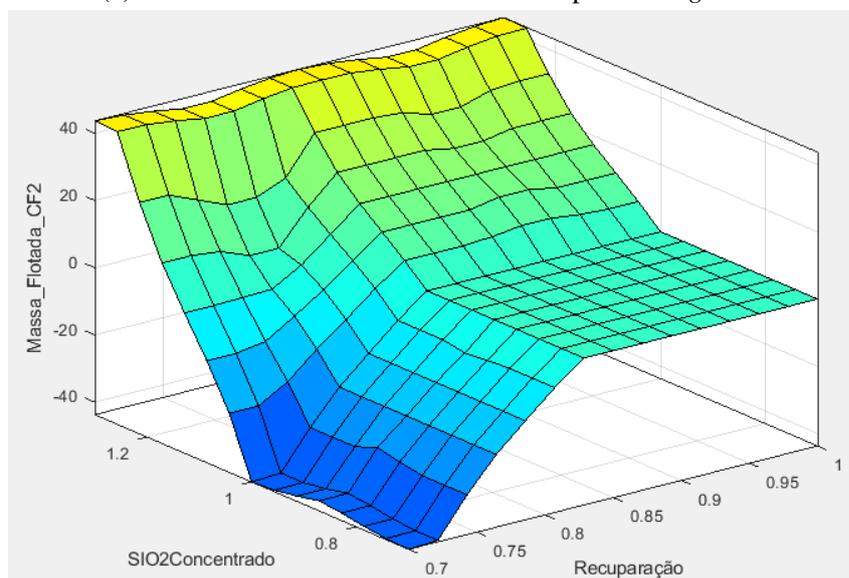
Recuperação metalúrgica	Teor de SiO ₂ no concentrado		
	Baixo	Normal	Alto
Baixa	Reduz	Reduz	Aumenta
Normal	Reduz	Mantém	Aumenta
Alta	Reduz	Mantém	Aumenta

Tabela 4.5: Regras de controle de teor de SiO₂ e recuperação Fonte: Elaborada pelo autor.

As superfícies de saída do controlador podem ser vistas na Figura 4.18. A diferença entre as saídas de controle está apenas na magnitude, tendo a saída para *rougher I* 50% mais de ganho em relação à *rougher II*. O platô visto na superfície é relativo ao quadrante onde o teor de SiO₂ e a recuperação estão dentro das especificações, por isso o controlador não altera a saída. Porém, quando o teor de SiO₂ está acima de 1% o controlador tende a aumentar a massa flotada, quando a recuperação está alta esta resposta é mais rápida, pois já começa de um patamar superior na superfície.



(a) Saída de referência de massa flotada para a *rougher I*.



(b) Saída de referência de massa flotada para a *rougher II*.

Figura 4.18: Superfícies de saída do controlador de qualidade para *roughers I e II* Fonte: Elaborada pelo autor.

Capítulo 5

Resultados e Discussão

Neste capítulo serão mostrados os resultados dos testes aplicados ao modelo, e aos controladores. São discutidos os resultados obtidos na fidelidade do modelo à planta e é feita uma análise estatística do comportamento por estágio do processo. Também são apresentados os resultados de resposta do controlador de massa flotada ao degrau e a distúrbios do processo. Por fim, é analisada a resposta do controlador de teor no concentrado quando aplicados distúrbios no processo.

5.1. Modelo e calibração

A calibração das constantes cinéticas do ferro e do quartzo foi feita por método iterativo para cada estágio separadamente. Os valores para cada estágio são mostrados na Tabela 5.1. Podemos notar a redução brusca na constante cinética do ferro no estágio recleaner, isso porque esta célula é responsável por um desbaste final na qualidade do produto. Como o teor de ferro na polpa de alimentação desta célula é muito alto, é necessária uma redução na cinética deste componente para atingir o balanço de massa desta célula.

Mineral	Constante cinética, $k(\text{min}^{-1})$				
	<i>Rougher</i>	<i>Cleaner</i>	<i>Recleaner</i>	<i>Scavenger I</i>	<i>Scavenger II</i>
Fe	0,180	0,455	0,080	0,356	0,640
SiO ₂	0,490	0,535	0,387	0,380	0,310

Tabela 5.1: Constante cinética dos minerais por estágio Fonte: Elaborada pelo autor.

O resultado de cada estágio foi avaliado de acordo com o teor de ferro e SiO₂ no concentrado de cada estágio. Como os parâmetros de entrada foram mantidos constantes, não é necessário analisar os valores do rejeito, estando os valores do concentrado próximos do esperado, pelo balanço de massa, podemos inferir o mesmo para o rejeito. Os valores de teores esperados e simulados são apresentados na Tabela 5.2 foi calculado o erro relativo para cada estágio. Os valores encontrados estão todos abaixo de 1,5% com exceção do teor de SiO₂ da *recleaner* em 4,92%. Este erro aumentado ocorre pois a massa de quartzo no concentrado deste

estágio é muito baixa em relação à massa total o erro de 5% representa uma massa de 0,150 t/h de quartzo.

	<i>Rougher</i>		<i>Cleaner</i>		<i>Recleaner</i>		<i>Scavenger I</i>		<i>Scavenger II</i>	
	Ferro	SiO2	Ferro	SiO2	Ferro	SiO2	Ferro	SiO2	Ferro	SiO2
Dados de usina	45,88	5,56	47,92	1,43	48,84	0,61	31,16	6,84	29,75	11,25
Simulado	45,78	5,49	47,87	1,43	48,83	0,64	31,16	6,76	29,53	11,17
Erro (%)	0,22	1,27	0,10	0,00	0,02	4,92	0,00	1,18	0,74	0,72

Tabela 5.2: Teores de Fe e SiO2 simulados e reais por estágio e erro relativo Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram realizados dois testes de resposta à perturbação de forma a avaliar o modelo e subsequentemente o desempenho do controlador. Ambos os testes realizados foram baseados em perturbações recorrentes na planta, uma perturbação na qualidade do minério alimentado e na taxa de alimentação da linha. Em nenhum dos testes houve alteração de outra variável.

Variações na qualidade do minério podem ser causadas por diversos fatores, dentre eles, redução da qualidade do ROM, falta de um pátio de homogeneização ou problemas nos processos de moagem e deslamagem. O distúrbio aplicado representa um aumento no teor de ferro e consequente redução no teor de SiO2 na alimentação. A Figura 5.1 mostra o distúrbio aplicado no teor de quartzo, o valor foi alterado de 37,66% para 22,71% durante 2,5 horas e depois retornado ao patamar inicial.

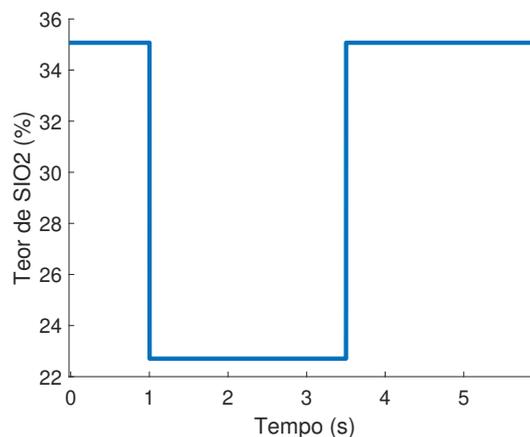


Figura 5.1: Variação no teor de quartzo (SiO2) na alimentação do circuito Fonte: Elaborada pelo autor.

O resultado deste distúrbio é visto na Figura 5.2. A resposta do sistema mostra que mudanças no teor de entrada do circuito impactam significativamente o teor no concentrado final. O teste também demonstra o baixo tempo morto do processo para responder ao distúrbio, o que não é intuitivo tendo em vista os diversos tanques entre entrada e saída do sistema. No entanto, a resposta lenta dos processo é esperada, pois o tempo de residência do sistema é bem alto o que atrasa o tempo de acomodação. Por fim, a resposta mostra uma redução do teor

de quartzo no concentrado. Este efeito também é esperado, visto que uma melhora no teor de entrada, mantidos os outros parâmetros, leva a uma melhora na qualidade final.

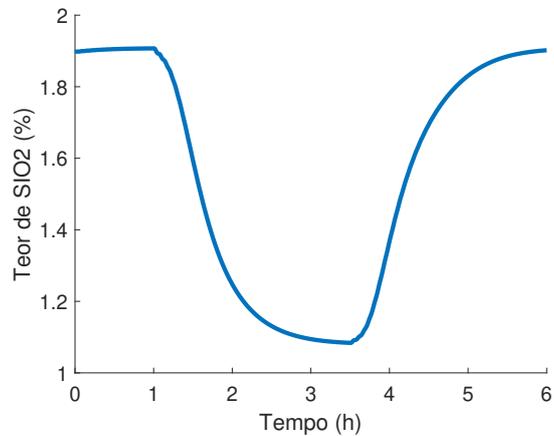


Figura 5.2: resposta do Teor de quartzo (SiO₂) no concentrado final (*re cleaner*) à variação do teor de alimentação Fonte: Elaborada pelo autor.

O segundo teste consistiu em variar a taxa de alimentação do circuito. Este tipo de distúrbio também é muito comum na planta, sendo causado por paradas de linha, cortes na alimentação da usina, defeitos em equipamentos, dentre outros. A Figura 5.3 mostra o distúrbio aplicado no sistema. A taxa de alimentação do circuito foi reduzida de 1710,65 t/h para 1650 t/h, assim como no teste anterior, o distúrbio teve duração de 2,5h.

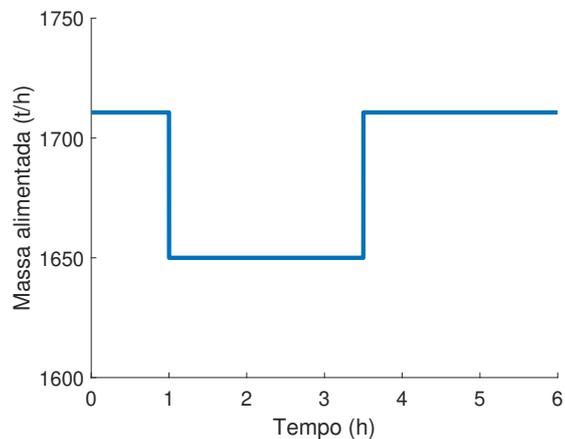


Figura 5.3: Variação na taxa de alimentação do circuito Fonte: Elaborada pelo autor.

A resposta do segundo teste é apresentada na Figura 5.4. Similar ao teste anterior, o tempo morto do processo é muito curto, na ordem de segundos, o que pode ser causado por uma resposta em cadeia das células corrigindo o nível de polpa. O alto tempo de resposta transitória também é esperado devido ao tempo de residência nas células. Já a redução do teor de SiO₂ no concentrado final da flotação, causada pela redução na massa alimentada pode ser explicada por um aumento no tempo de residência de cada célula. Como o fator de recuperação máxima R_{max} é maior para o quartzo do que para o minério de ferro, e o valor das constantes

cinéticas são geralmente maiores para o quartzo, um aumento no tempo de residência leva a um aumento na massa flotada quartzo maior que para o minério de ferro, desta forma, o teor de contaminante no concentrado final diminui.

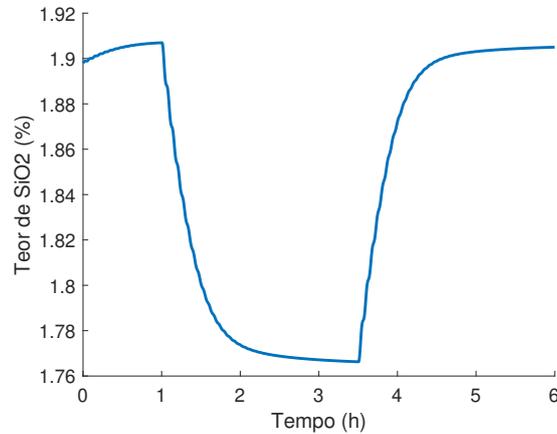
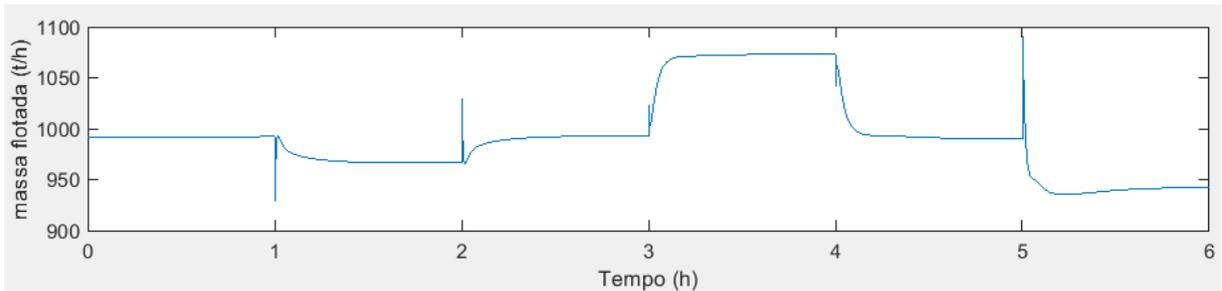


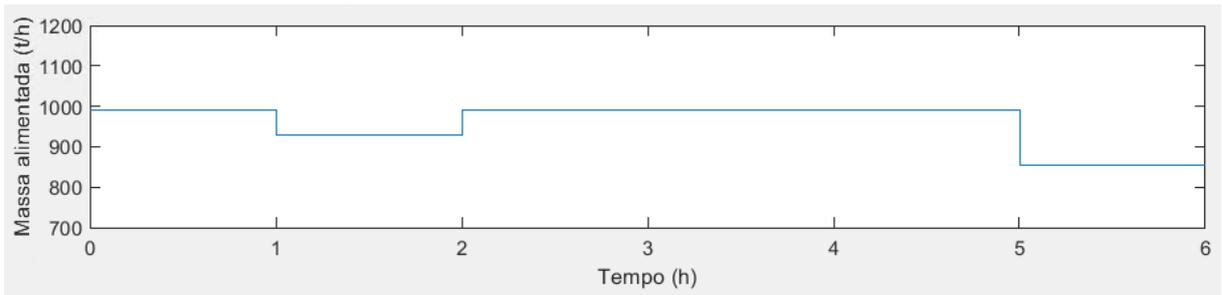
Figura 5.4: Resposta do teor de quartzo no concentrado final (*releaner*) à variação na taxa de alimentação Fonte: Elaborada pelo autor.

Com os resultados dos testes em mãos, é possível analisar o desempenho dos controladores projetados. Foi implementado uma simulação com distúrbios a cada hora, a Figura 5.5 mostra os distúrbios aplicados ao processo e a resposta do teor quando as células estão no limite máximo de massa flotada.

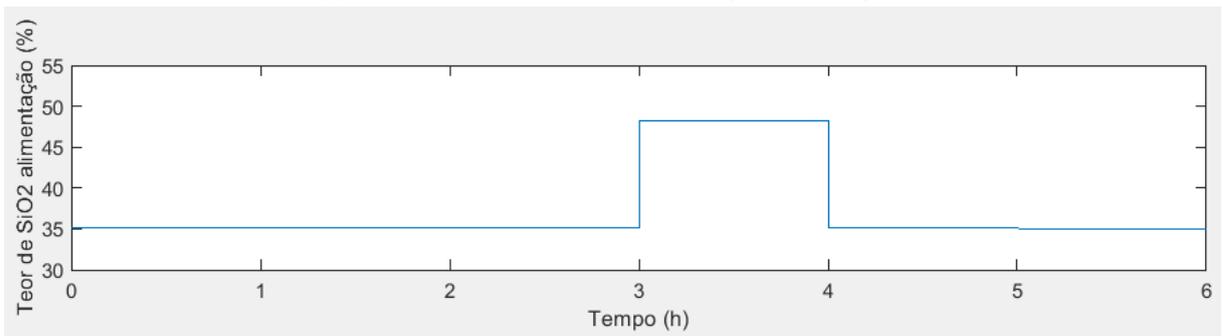
A Figura 5.5a mostra a resposta da massa flotada na célula *rougher I* aos distúrbios. Na primeira e quinta horas da simulação, foram aplicados distúrbios reduzindo a massa alimentada na célula, como mostrado na Figura 5.8b, nota-se neste momento uma redução na massa total flotada na célula proporcional ao total de massa alimentada. Isto é esperado, pois o modelo calcula a massa flotada como um percentual da massa na célula e, assim, reproduz uma redução na densidade da polpa da célula. Na terceira hora de simulação podemos notar que o distúrbio de teor na alimentação, mostrado na Figura 5.5c, causa um efeito de aumentar a massa de material flotado na célula. Isto ocorre por que a recuperação máxima SiO₂ é maior do que a do Fe, desta forma, quanto maior o teor de SiO₂ na alimentação, maior o percentual de massa carregado pela espuma. Com isso o próprio processo age como um amortizador de distúrbios elevando o corte de SiO₂ quanto maior o teor e reduzindo a variabilidade do produto final como mostrado na Figura 5.5d. Este comportamento pode não ser detectado na planta real. Na realidade, um aumento no teor de SiO₂ pode levar à saturação das bolhas e ao rompimento das mesmas criando um limite físico para o massa que pode ser recuperada pela célula, o que não foi contemplado neste modelo.



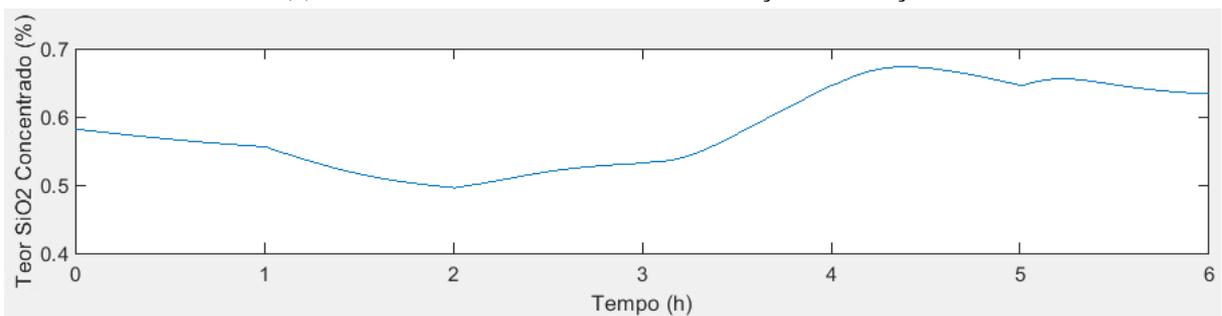
(a) Resposta em malha aberta da massa flotada da *rougher I*.



(b) Distúrbio na massa de alimentação da flotação.



(c) distúrbio no teor de SiO₂ na alimentação da flotação.



(d) Resposta de teor de SiO₂ no concentrado.

Figura 5.5: Resposta do processo à distúrbios com *rougher* no limite de operação Fonte: Elaborada pelo autor.

5.2. Controlador de massa flotada

Os controladores de massa das *roughers* foram avaliados de acordo com a resposta em malha fechada ao degrau de referência e a distúrbios na taxa e qualidade do ROM alimentado.

No primeiro teste, foram aplicados degraus simultâneos aos controladores, 100 t/h para

a primeira célula e 50 t/h para a segunda. A resposta dos controladores pode ser vista na Figura 5.6.

A resposta da *rougher I* mostra um transitório com um pico inicial causado pela resposta do nível da célula. Este pico é causado pois a redução do nível de espuma leva a uma elevação da camada de polpa que empurra a espuma para a calha de transbordo. Por essa mesma razão o ganho do controlador é reduzido, para evitar que o transitório de nível cause instabilidade na célula. Após a saturação do nível em 30 cm a massa flotada se reduz e passa a ser controlada apenas pela vazão de ar. O transitório da vazão de ar também tem o efeito de "empurrar" e "puxar" a espuma e é um fator limitante para o ganho do controlador para que fique na região estável estabilidade.

A resposta da *rougher II* apresenta um transitório muito mais turbulento, causado principalmente pelos distúrbios da primeira célula, principalmente no teor de concentrado. Podemos perceber uma resposta mais lenta neste estágio pois o percentual de quartzo é menor, o que afeta a vazão mássica total da célula. Para balancear o fato de ter menos massa, a célula precisa de uma vazão de ar muito mais elevada. Também é possível perceber que o nível desta célula se mantém saturado por toda a duração do teste.

No segundo teste, a referência de massa foi mantida fixa e distúrbios iguais aos mostrados na Figura 5.5 foram aplicados ao sistema. A resposta do comportamento do controlador e das saídas de controle podem ser vistas na Figura 5.7.

Os resultados mostram que o controlador é capaz de rejeitar os distúrbios, porém com uma resposta lenta, de quase uma hora para alcançar o erro zero. Os picos de massa flotada na transição são respostas referentes aos distúrbios. Podemos ver que o nível e a vazão de ar reagem para atenuar estes picos, mas não são capazes de evitá-los.

5.3. Controlador de qualidade

A avaliação do controlador de qualidade e recuperação metalúrgica foi realizada utilizando os mesmos distúrbios mostrados na Figura 5.5. Os resultados do teste podem ser vistos na Figura 5.8.

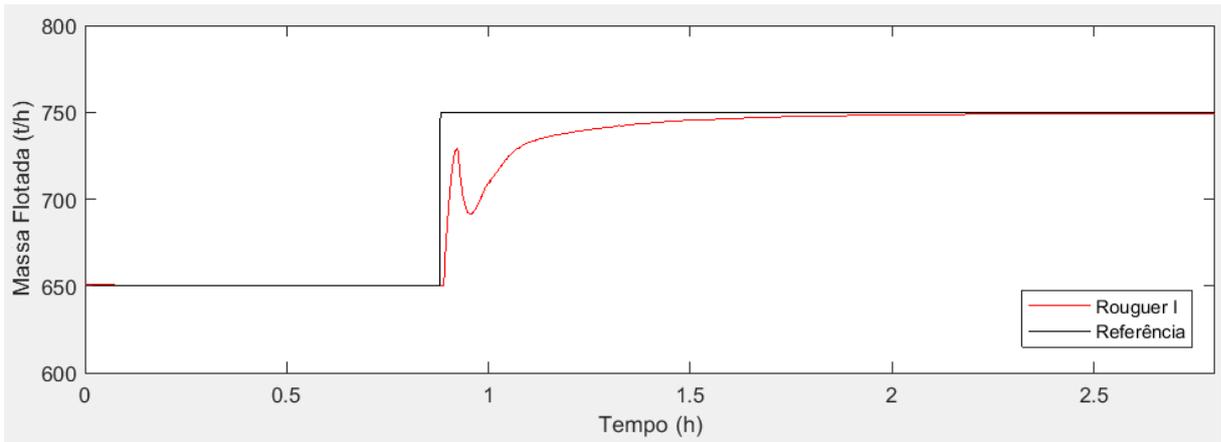
O primeiro ponto a ser notado é a grande variação de massa flotada em relação ao circuito não controlado, isso ocorre devido à resposta do controlador para balancear recuperação metalúrgica e qualidade.

O segundo ponto importante é que na terceira hora, quando a qualidade do ROM é reduzida, a recuperação metalúrgica cai bruscamente. Essa queda é devida ao aumento da qualidade da alimentação. Como este parâmetro é utilizado na Equação 3.3 de recuperação metalúrgica, um aumento repentino, sem tempo para resposta do circuito, leva a uma queda instantânea o que prejudica o controlador. enquanto o distúrbio na qualidade do ROM está ativo, entre a terceira e quarta hora do teste, o controlador entende que a recuperação está muito baixa e, por isso, não deve aumentar a massa flotada. Por outro lado, vemos um aumento na

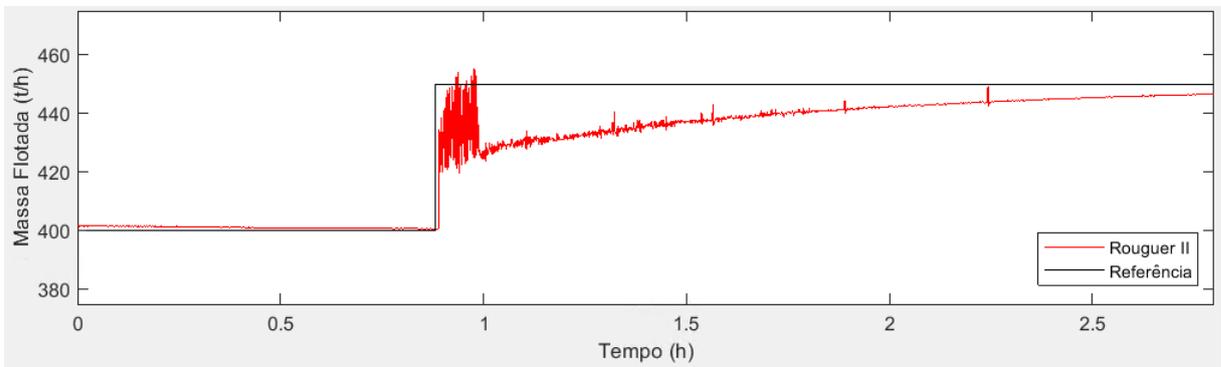
massa flotada no circuito não controlado, isso por que uma grande massa de quartzo foi inserida na célula e, como a recuperação é constante, nessas condições, o quartzo é retirado do sistema com facilidade.

Na quarta hora, quando o distúrbio é eliminado, notamos uma reação do controlador para retomar a qualidade, entretanto, o pico visto no teor de SiO₂ fica evidente. O pico é causado pela resposta pobre do controlador ao distúrbio na terceira hora. Como o tempo de transitório do circuito de flotação é de 2,5 horas, o pico de teor é o final da resposta ao distúrbio.

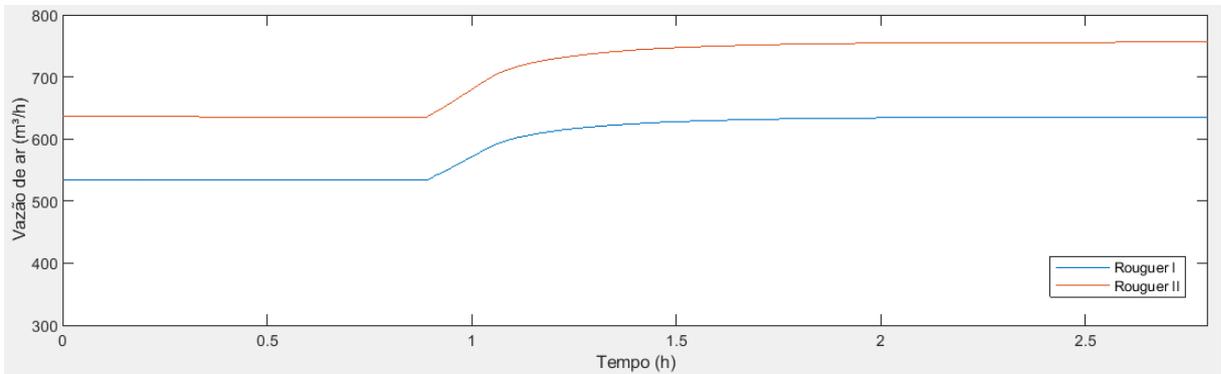
O último ponto a ser notado é o aumento na recuperação metalúrgica do ferro, que é esperado, pois a flotação está operando com um volume menor de massa de ferro enviada para as *scavengers*. A recuperação de ferro no período ficou em média 3,82% mais alta quando utilizado o controlador e a média do teor de quartzo ficou do sistema controlado foi de 1,308%. O que mostra um melhor aproveitamento do ferro alimentado, em detrimento da qualidade do produto.



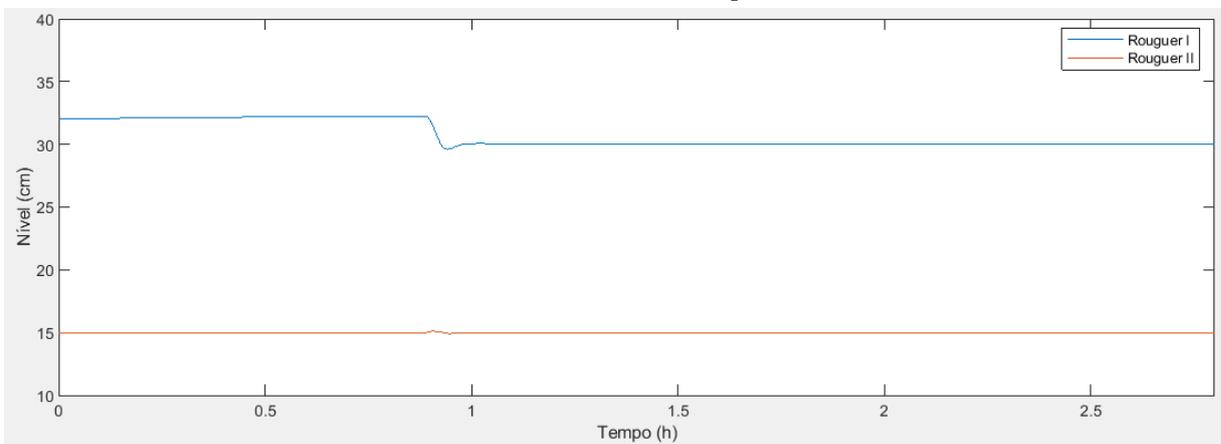
(a) Resposta em malha fechada da massa flotada da *rouguer I*.



(b) Resposta em malha fechada da massa flotada da *rouguer II*.

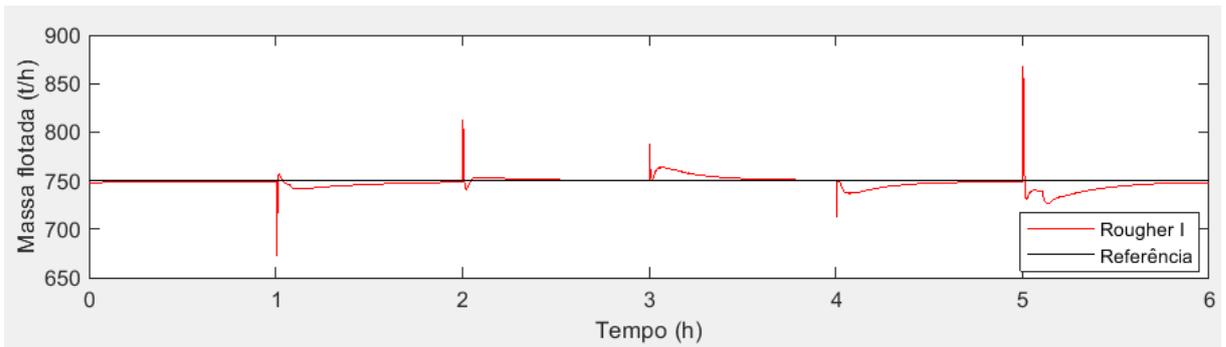


(c) Vazão de ar das células *rouguer I e II*.

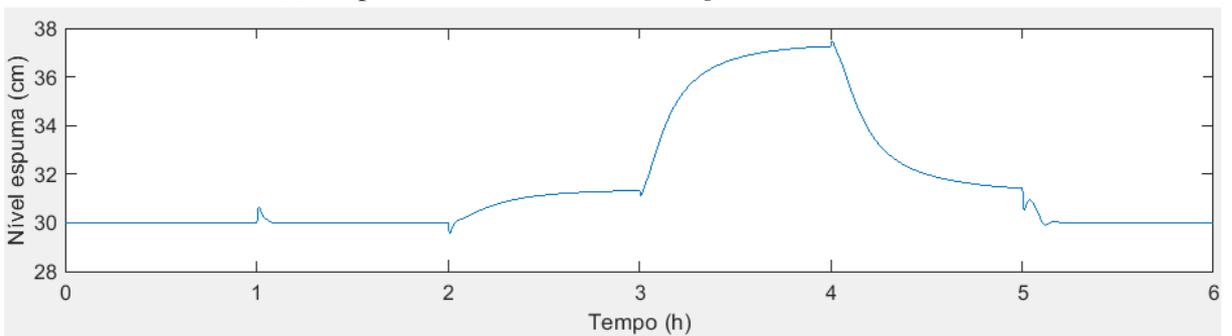


(d) Nível de espuma das células *rouguer I e II*.

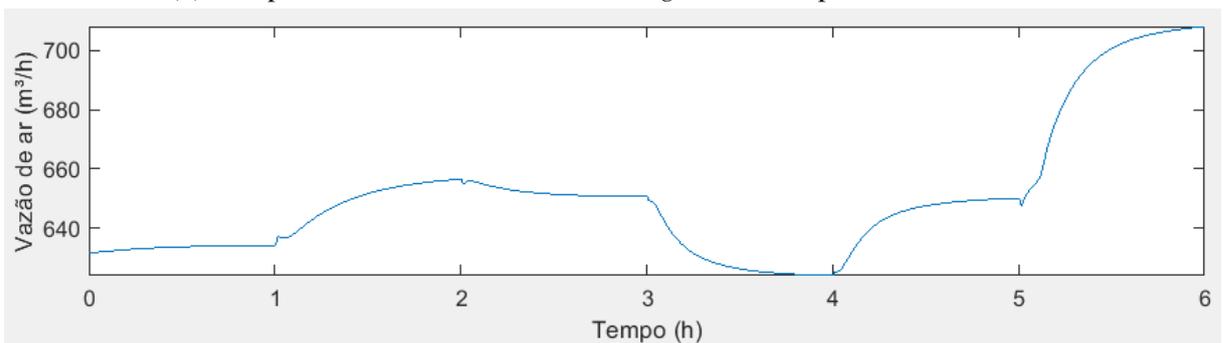
Figura 5.6: Resposta em malha fechada do controlador de massa flotada para *rouguer I e II*
 Fonte: Elaborada pelo autor.



(a) Resposta da massa flotada da *rougher I* aos distúrbios.

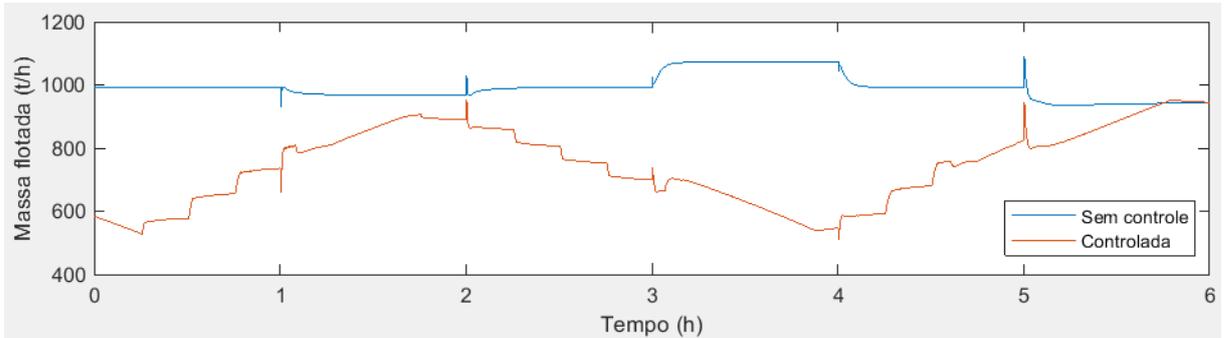


(b) Comportamento do nível da célula *rougher I* em resposta aos distúrbios.

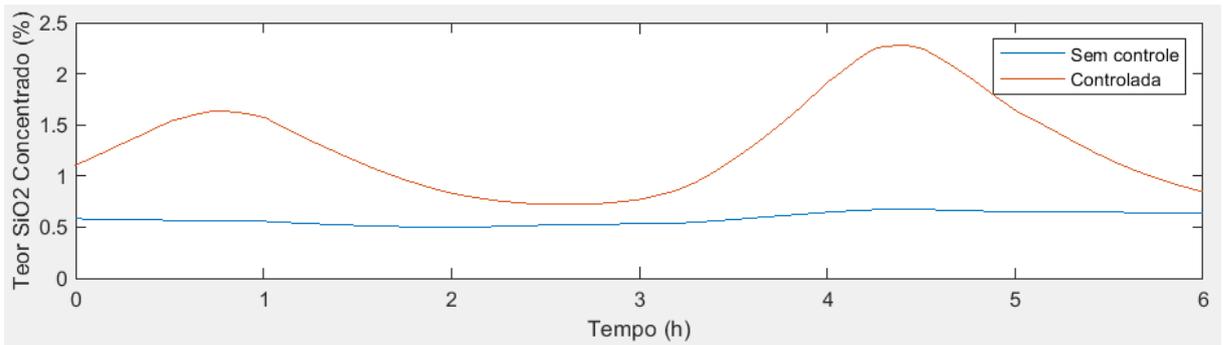


(c) Comportamento da vazão de ar da célula *rougher I* em resposta aos distúrbios.

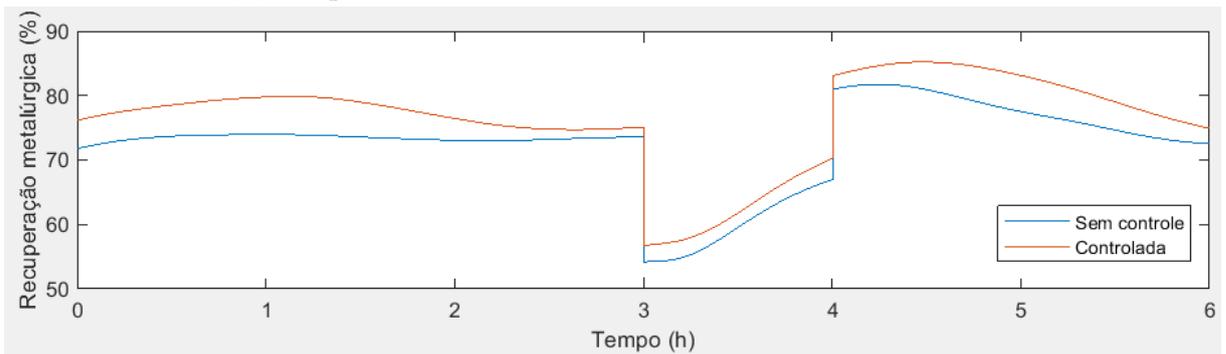
Figura 5.7: Resposta em malha fechada do controlador de massa flotada da *rougher I* aos distúrbios aplicados Fonte: Elaborada pelo autor.



(a) Comportamento da massa flotada da *rougher I* com controle e sem controle.



(b) Comportamento do teor de SiO₂ com controle e sem controle.



(c) Comportamento da recuperação metalúrgica do Ferro com controle e sem controle.

Figura 5.8: Resposta de teor e recuperação metalúrgica do circuito com controle e sem controle
Fonte: Elaborada pelo autor.

Capítulo 6

Conclusão

Um modelo do circuito de flotação da usina Conceição II foi criado e usado para simular dinamicamente um controlador de qualidade e recuperação metalúrgica da linha. O modelo se mostrou condizente com os dados da planta real com um erro relativo médio de 0,86% no teor de concentração mineral nos estágios do processo.

A simulação mostrou que, variando o ponto de operação das células *rougher* do circuito estudado, é possível alterar em muito o ponto de operação da linha. Vemos que, quando operando em máxima capacidade de massa flotada, a célula *rougher* foi capaz de manter a qualidade do concentrado muito abaixo do limite. Desta forma, os testes mostram que é possível reduzir o consumo de reagentes se um controle avançado for aplicado às células de flotação. Porém, os controladores de dosagem de reagentes e de ponto de operação das células devem ser desenvolvidos para atuar em conjunto, pois a utilização de controles concorrentes pode prejudicar ainda mais o processo e o consumo de reagentes.

Utilizando o simulador, um controlador foi desenvolvido utilizando lógica *fuzzy* para controle de massa flotada de uma célula de flotação. Os testes demonstram a capacidade deste controlador de rejeitar distúrbios comuns no processo de flotação e manter estável o *mass-pull*. O controle foi prejudicado e teve de ter os ganhos reduzidos, reduzindo o tempo de resposta, para evitar instabilidade do sistema.

O controlador de qualidade e recuperação metalúrgica se mostrou capaz de aumentar a recuperação metalúrgica do ferro quando respondendo a distúrbios na massa, qualidade e densidade do material alimentado no processo. Quando comparado com um circuito ajustado para máxima qualidade, o controlador aumentou a recuperação metalúrgica em 3,82 %, demonstrando a viabilidade da técnica aplicada. Porém o controlador se mostrou pouco eficaz em responder a distúrbios no processo, causando uma maior variabilidade na qualidade do produto.

Vemos que o controlador de *mass-pull* precisa ser mais estudado antes de ser implantado no processo. O controlador se mostrou muito lento em responder aos distúrbios, isso é devido a dependência do controle às saídas do sistema e do alto tempo de transitório do mesmo. O tempo de resposta da flotação reversa do ferro é amplificado em relação às flotações diretas de cobre e ouro, utilizadas como referência. Este fator é crucial para uma boa controlabilidade.

Assim, para viabilizar o controle de massa flotada é necessário acrescentar variáveis de entrada do circuito, de forma a acelerar a resposta de controle e melhorar a resposta aos distúrbios.

Por fim, o controlador desenvolvido, mesmo utilizando uma taxa de amostragem de 15 minutos, não foi capaz de lidar com os distúrbios na qualidade. Na realidade, as análises químicas são feitas em laboratório e têm resultados a cada hora por linha. Os cortes de amostragem são feitos a cada 15 minutos, com isso a análise de laboratório indica uma média da hora analisada com um atraso ainda maior para realização dos testes laboratoriais. Com isso, o controlador sairia ainda pior que o projetado dada que a resposta iria ocorrer apenas horas mais tarde que o distúrbio. Por isso, a instalação de analisadores químicos em linha, o uso de inferência e modelos matemáticos é essencial para o controle deste processo tão importante na indústria de beneficiamento de minério de ferro.

Capítulo 7

Trabalhos Futuros

Os trabalhos futuros devem focar em melhorias no modelo da célula, da interação entre células, melhorias no controlador e aplicação na planta real.

O modelo pode ser aperfeiçoado incluindo o efeito de granulometria dos minerais, efeito dos reagentes na recuperação das células, incluir efeito de tamanho de bolha, estabilidade de espuma e, por fim, reduzir o efeito de fase não mínima existente no modelo atual.

Melhorias no sistema de controle incluem utilização de dados de alimentação da linha para melhorar a resposta a distúrbios, extensão do controle para todas as células do sistema, melhorias nas regras fuzzy, integração do controle de dosagem de reagentes no controlador e utilização modelos preditivos no controlador de forma a utilizar modelos dos distúrbios para reduzir a variabilidade do processo.

Por fim, as etapas finais devem focar em testar e validar os controladores propostos na planta de Conceição II e replicar a estratégia de controle para outras plantas de Itabira.

Referências Bibliográficas

- ANGULO, S., FIGUEIREDO, A. **Concreto com agregados reciclados**. 01 2011. ISBN: 9788598576206.
- BERGH, L. G., YIANATOS, J. B. “The long way toward multivariate predictive control of flotation processes”, **Journal of Process Control**, v. 21, n. 2, pp. 226–234, 2011. ISSN: 09591524. doi: 10.1016/j.jprocont.2010.11.001.
- BOUCHARD, J., DESBIENS, A., DEL VILLAR, R., et al.. “Column flotation simulation and control: An overview”, **Minerals Engineering**, v. 22, n. 6, pp. 519–529, 2009. ISSN: 08926875. doi: 10.1016/j.mineng.2009.02.004.
- COSTA, C. P., COUTO, P. H. D. M., NUNES, T. C., et al.. “Sistema Especialista Fuzzy Para Dosagem De Amina No Processo De Beneficiamento De Minério De Ferro”, **19º Simpósio de Mineração**, pp. 444–454, 2018. doi: 10.5151/2594-357x-32028.
- COX, E. “Fuzzy fundamentals”, **IEEE Spectrum**, v. 29, n. 10, pp. 58–61, 1992. ISSN: 00189235. doi: 10.1109/6.158640.
- DA SILVA, J. P. P. **Mecanismo de ação do silicato de sódio como depressor em flotação**. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, 2011.
- DAWSON, P., KOORTS, R. “Flotation Control Incorporating Fuzzy Logic and Image Analysis”, **IFAC Proceedings Volumes**, v. 47, n. 3, pp. 352–357, 2014. ISSN: 1474-6670. doi: <https://doi.org/10.3182/20140824-6-ZA-1003.01864>. 19th IFAC World Congress.
- DESBIENS, A., HODOUIN, D., NAJIM, K., et al.. “Long-range predictive control of a rougher flotation unit”, **Minerals Engineering**, v. 7, n. 1, pp. 21–37, 1994. ISSN: 08926875. doi: 10.1016/0892-6875(94)90144-9.
- DESBIENS, A., HODOUIN, D., MAILLOUX, M. “Nonlinear Predictive Control of a Rougher Flotation Unit Using Local Models”, **IFAC Proceedings Volumes**, v. 31, n. 23, pp. 287–292, 1998. ISSN: 14746670. doi: 10.1016/s1474-6670(17)35893-7.

- FENG, D., ALDRICH, C. “Effect of particle size on flotation performance of complex sulphide ores”, **Minerals Engineering**, v. 12, n. 7, pp. 721–731, 1999. ISSN: 08926875. doi: 10.1016/S0892-6875(99)00059-X.
- GARCIA ZUÑIGA, H. “The efficiency obtained by flotation is an exponential function of time”, **Boletín Minero**, pp. 83–86, 1935.
- GOMES, M. A. **Caracterização Tecnológica do Aproveitamento do Rejeito de Minério de Ferro**. Tese de Mestrado, Universidade Federal de Ouro Preto, 2009.
- HADLER, K., SMITH, C. D., CILLIERS, J. J. “Recovery vs. mass pull: The link to air recovery”, **Minerals Engineering**, v. 23, n. 11-13, pp. 994–1002, 2010. ISSN: 08926875. doi: 10.1016/j.mineng.2010.04.007.
- HODOUIN, D., BAZIN, C., GAGNON, E., et al.. “Feedforward-feedback predictive control of a simulated flotation bank”, **Powder Technology**, v. 108, n. 2-3, pp. 173–179, 2000. ISSN: 00325910. doi: 10.1016/S0032-5910(99)00217-X.
- JAHEDSARAVANI, A., MASSINAEI, M., MARHABAN, M. H. “Application of Image Processing and Adaptive Neuro-fuzzy System for Estimation of the Metallurgical Parameters of a Flotation Process”, **Chemical Engineering Communications**, v. 203, n. 10, pp. 1395–1402, 2016. ISSN: 15635201. doi: 10.1080/00986445.2016.1198897.
- JOVANOVIĆ, I., MILJANOVIĆ, I. “Contemporary advanced control techniques for flotation plants with mechanical flotation cells - A review”, **Minerals Engineering**, v. 70, pp. 228–249, 2015. ISSN: 08926875. doi: 10.1016/j.mineng.2014.09.022.
- KLIR, G. J., YUAN, B. O. **Fuzzy sets and fuzzy logic Theory and Applications**. Prentice Hall PTR, 1995. ISBN: 0131011715.
- LI, H. X., GATLAND, H. B. “A New Methodology for Designing a Fuzzy Logic Controller”, **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. 25, n. 3, pp. 505–512, 1995. ISSN: 21682909. doi: 10.1109/21.364863.
- LIMA, N. P., VALADÃO, G. E. S., PERES, A. E. C. “Effect of particles size range on iron ore flotation”, **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 66, n. 2, pp. 251–256, 2013. ISSN: 0370-4467. doi: 10.1590/s0370-44672013000200018.
- MALDONADO, M., DESBIENS, A., DEL VILLAR, R. “Potential use of model predictive control for optimizing the column flotation process”, **International Journal of Mineral Processing**, v. 93, n. 1, pp. 26–33, 2009. ISSN: 03017516. doi: 10.1016/j.minpro.2009.05.004.

- MAMDANI, E. H. “Application of Fuzzy Algorithms for Control of Simple Dynamic Plant.” **Proceedings of the Institution of Electrical Engineers**, v. 121, n. 12, pp. 1585–1588, 1974. ISSN: 00203270. doi: 10.1049/piee.1974.0328.
- MEHRABI, A., MEHRSHAD, N., MASSINAEI, M. “International Journal of Mineral Processing Machine vision based monitoring of an industrial flotation cell in an iron flotation plant”, **International Journal of Mineral Processing**, v. 133, pp. 60–66, 2014. ISSN: 0301-7516. doi: 10.1016/j.minpro.2014.09.018.
- RIQUELME, A., DESBIENS, A., DEL VILLAR, R., et al.. “Predictive control of the bubble size distribution in a two-phase pilot flotation column”, **Minerals Engineering**, v. 89, pp. 71–76, 2016. ISSN: 08926875. doi: 10.1016/j.mineng.2016.01.014.
- ROJAS, D., CIPRIANO, A. “Model based predictive control of a rougher flotation circuit considering grade estimation in intermediate cells”, **DYNA (Colombia)**, v. 78, n. 166, pp. 29–37, 2011. ISSN: 0012-7353.
- SHEAN, B. J., CILLIERS, J. J. “A review of froth flotation control”, **International Journal of Mineral Processing**, v. 100, n. 3-4, pp. 57–71, 2011. ISSN: 03017516. doi: 10.1016/j.minpro.2011.05.002.
- SILVA, A. **Modelagem Da Relação Teor-Recuperação Da Célula De Flotação Pneumática**. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Minas Gerais, 2015.
- SUICHIES, M., LEROUX, D., DECHERT, C., et al.. “An implementation of generalized predictive control in a flotation plant”, **Control Engineering Practice**, v. 8, n. 3, pp. 319–325, 2000. ISSN: 09670661. doi: 10.1016/S0967-0661(99)00185-9.
- SUPOMO, A., YAP, E., ZHENG, X., et al.. “PT Freeport Indonesia’s mass-pull control strategy for rougher flotation”, **Minerals Engineering**, v. 21, n. 12-14, pp. 808–816, 2008. ISSN: 08926875. doi: 10.1016/j.mineng.2008.07.002.
- SZATKOWSKI, M., FREYBERGER, W. L. “The effect of bubble size distribution on selectivity of iron ore flotation”, **International Journal of Mineral Processing**, v. 23, n. 3-4, pp. 213–227, 1988. ISSN: 03017516. doi: 10.1016/0301-7516(88)90016-6.
- VIEIRA, S. M., SOUSA, J. M., DURÃO, F. O. “Fuzzy modelling strategies applied to a column flotation process”, **Minerals Engineering**, v. 18, n. 7, pp. 725–729, 2005. ISSN: 08926875. doi: 10.1016/j.mineng.2004.10.008.
- ZADEH, L. A. “Fuzzy sets”, **Information and Control**, 1965. ISSN: 00199958. doi: 10.1016/S0019-9958(65)90241-X.