

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas

Tiago Caixeta Nunes

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS E PROPRIEDADES
VISUAIS DE ESPUMA NO DESEMPENHO E CONTROLE DA
FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO**

Belo Horizonte

2025

Tiago Caixeta Nunes

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS OPERACIONAIS E PROPRIEDADES
VISUAIS DE ESPUMA NO DESEMPENHO E CONTROLE DA
FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas.

Área de Concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Prof. Antônio Eduardo Clark Peres

Coorientador: Prof. Thiago Antonio Melo Euzébio

Belo Horizonte

2025

N972i

Nunes, Tiago Caixeta.

Influência das variáveis operacionais e propriedades visuais de espuma no desempenho e controle da flotação de minério de ferro [recurso eletrônico] / Tiago Caixeta Nunes. - 2025.

1 recurso online (216 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Antônio Eduardo Clark Peres.

Coorientador: Thiago Antonio Melo Euzébio

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

Exigências do sistema: Adobe Acrobat Reader.

1. Engenharia de minas - Teses. 2. Tecnologia mineral - Teses. 3. Minério de ferro - Teses. 4. Flotação - Teses. 5. Controle de processo - Teses. 6. Espuma - Teses. I. Peres, Antônio Eduardo Clark. II. Euzébio, Thiago Antonio Melo. III. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. IV. Título.

CDU: 622(043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS
ENGENHARIA - COLEGIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA METALÚRGICA MATERIAIS E
DE MINAS - SECRETARIA

ATA DE DEFESA DE TESE

Às 14h horas do dia 17 (dezessete) de outubro de 2025, realizou-se a sessão pública, por vídeo conferência de forma remota, a defesa de tese de Doutorado do aluno **Tiago Caixeta Nunes**, para a obtenção do grau de Doutor em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, na área de concentração de Tecnologia Mineral. O presidente da sessão, Prof. Antônio Eduardo Clark Peres, orientador do aluno, apresentou a comissão examinadora, composta pelo Engº. Thiago Antônio Melo Euzebio (coorientador) - Dr. (UFOP), Prof. Gilberto Rodrigues da Silva - Dr. (UFMG), Engº. Neymayer Pereira Lima - Dr. (VALE), Engº. Rodrigo Fina Ferreira - Dr. (VALE) e Engº. Klaydison Carlaile Silva - Dr. (VALE). Na sequência, o candidato realizou a apresentação de sua Tese de Doutorado, intitulada "**Influência das Variáveis Operacionais e Propriedades Visuais de Espuma no Desempenho e Controle da Flotação de Minério de Ferro**". Após a apresentação, os examinadores procederam à arguição do candidato. Concluída essa etapa, a comissão reuniu-se em caráter reservado, sem a presença do candidato e do público, e decidiu por **APROVAR** a Tese de Doutorado. O resultado final foi comunicado publicamente ao candidato pelo presidente da sessão. Não havendo mais nada a tratar, o presidente encerrou a sessão e lavrou a presente ata, que, após lida, foi assinada pelos membros da comissão examinadora e pelo coordenador do Programa.

Belo Horizonte, 17 de outubro de 2025.

Assinatura dos membros da banca examinadora:



Documento assinado eletronicamente por **Gilberto Rodrigues da Silva, Professor do Magistério Superior**, em 28/10/2025, às 09:33, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Rodrigo Fina Ferreira, Usuário Externo**, em 28/10/2025, às 09:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Antonio Eduardo Clark Peres, Professor Magistério Superior - Voluntário**, em 28/10/2025, às 10:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Klaydison Carlaile Silva, Usuário Externo**, em 28/10/2025, às 13:07, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Thiago Antonio Melo Euzébio, Usuário Externo**, em 04/11/2025, às 09:58, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Neymayer Pereira Lima, Usuário Externo**, em 05/01/2026, às 08:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Henrique Martins Nunes, Coordenador(a) de curso de pós-graduação**, em 19/02/2026, às 09:56, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 5º do [Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://sei.ufmg.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador 4683024 e o código CRC 4B60AA05.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e a todos que contribuíram para a minha formação pessoal e profissional.

Aos meus filhos, Pedro Santos Caixeta e Thomás Santos Caixeta, pela inspiração.

À minha esposa, Rizza, pelo apoio e compreensão.

Ao meu irmão, Cristiano Caixeta Nunes, pelo exemplo.

Aos meus pais, João e Vilma, pelo alicerce dos meus ensinamentos.

Aos amigos e referências técnicas: Cássio Costa, Eric Vieira, Felipe Novaes e Nilson Paula.

Aos colegas de processamento mineral, tecnologia e operações da Vale, pelas contribuições.

Aos líderes na Vale, Vicentino Rodrigues, Pedro Porto, Ivan Pena, Marco Túlio, Victor Padula e Bruno Pelli, pelo incentivo, confiança e oportunidade de desenvolvimento.

A todos os colaboradores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas da UFMG, pelo curso oferecido e em especial ao suporte da secretária Maria Aparecida Pacheco.

Ao meu coorientador, Thiago Antonio Melo Euzébio, pelas contribuições nesta pesquisa.

Ao meu orientador, professor Antônio Eduardo Clark Peres, pela disponibilidade e confiança, acreditando na relevância da integração das disciplinas de Flotação e Controle de processo.

Aos membros da banca, Dr. Gilberto Rodrigues Silva, Dr. Neymayer Pereira Lima, Dr. Rodrigo Fina Ferreira e Dr. Klaydison Carlaile Silva, por participarem nesta defesa e colaborarem para a discussão e conclusão do trabalho.

Agradeço a CAPES-PROEX, CNPq e FAPEMIG pelo apoio nesta pesquisa.

Dedico este trabalho à minha mãe, Vilma Caixeta Nunes, não da forma como eu queria, pois ela partiu desta vida pouco antes da conclusão desta pesquisa. Ela sempre foi minha principal incentivadora, me ensinando desde criança com muita dedicação o valor dos estudos para progredir na vida. Hoje, há um vazio no meu coração, entretanto, repleto de boas lembranças, que não voltam mais!

RESUMO

A flotação catiônica reversa de quartzo é a etapa mais importante na concentração de minério de ferro para produção de *pellet feed*, sendo seu desempenho fundamental para melhor aproveitamento das reservas disponíveis. Neste contexto, esta pesquisa propõe utilizar sistema de visão de máquina para avaliar o comportamento das propriedades de espuma na flotação e investigar seus efeitos para diferentes condições de operação. Este estudo visa uma abordagem integrada para otimização do processo, combinando análise estatística, visão computacional e avaliação tecnológica de células de flotação, baseado em condições operacionais da planta, monitoramento de desempenho e controle de processo. Dessa forma, foram identificadas oportunidades para maximizar a recuperação metalúrgica e a aderência da qualidade do produto especificado. Foram realizados nove testes industriais no estágio rougher utilizando um Arranjo Composto Central (CCD), investigando o efeito da vazão de ar e da altura da camada de espuma em respostas de processo e propriedades de espuma, evidenciando a importância de abordagens experimentais estruturadas para otimização. Também foram realizados testes industriais na flotação mecânica convencional, conduzidos também no estágio rougher para comparativo das tecnologias de células autoaeradas e ar forçado, considerando na análise variáveis de processo e propriedades de espuma na superfície da célula. Os resultados demonstraram que as células com ar forçado proporcionam melhor condição hidrodinâmica, acarretando melhor desempenho na separação e menor custo operacional. Essa constatação técnica ofereceu subsídio para um estudo de viabilidade econômica de uma planta objeto deste estudo, visando modernizar todo o parque de células de flotação mecânica convencional de autoaerada para ar forçado. O resultado foi atrativo, gerando uma taxa interna de retorno de 240,7%. Assim, esta integração entre condições operacionais e visão de máquina mostrou-se eficaz para compreender e otimizar o desempenho da flotação.

Palavras-chave: condições operacionais; controle de processo; flotação; minério de ferro; propriedades de espuma.

ABSTRACT

Reverse cationic quartz flotation is the most important step in iron ore concentration for pellet feed production, and its performance is crucial for optimal utilization of available reserves. In this context, this research proposes using a machine vision system to evaluate the behavior of froth properties during flotation and investigate their effects under different operating conditions. This study aims to take an integrated approach to process optimization, combining statistical analysis, computer vision, and technological evaluation of flotation cells, based on plant operating conditions, performance monitoring, and process control. Thus, opportunities were identified to maximize metallurgical recovery and adherence to the specified product quality. Nine industrial tests were conducted in the rougher stage using a Central Composite Design (CCD), investigating the effect of air flow rate and froth depth on process responses and froth properties, highlighting the importance of structured experimental approaches for optimization. Industrial tests were also conducted on conventional mechanical flotation, also in the rougher stage, to compare self-aerated and forced-air cell technologies, considering process variables and froth properties on the cell surface. The results demonstrated that forced-air cells provide better hydrodynamic conditions, resulting in better separation performance and lower operating costs. This technical finding supported an economic feasibility study for a plant subject to this study, aiming to modernize the entire conventional mechanical flotation cell fleet from self-aerated to forced-air. The result was attractive, generating an internal rate of return of 240.7%. Thus, this integration of operational conditions and machine vision proved effective in understanding and optimizing flotation performance.

Keywords: *operational conditions; process control; flotation; iron ore; froth properties.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Flotação reversa de minério de ferro e seus fluxos.	25
Figura 3.2 - Relação das variáveis conforme condições operacionais da flotação.	29
Figura 3.3 - Exemplo de célula mecânica autoaerada e ar forçado de dois fabricantes.....	31
Figura 3.4 - Problemas operacionais que influenciam no desempenho da flotação.....	31
Figura 3.5 - Exemplos de problemas em célula mecânica autoaeradas.	32
Figura 3.6 - Problema de corrente alta em motores de célula de flotação que provocam desarmes.	32
Figura 3.7 - Fluxograma resumido da relação das variáveis das condições operacionais na flotação.	36
Figura 3.8 - Evolução da região de ponto ótimo da trajetória de operação de múltiplas condições de trabalho.	38
Figura 3.9 - Fatores que influenciam no processo de flotação.	40
Figura 3.10 - Representação do fluxo de sólidos na célula de flotação.	45
Figura 3.11 - Métodos de transferência de massa no processo de flotação.....	46
Figura 3.12 - Seção vertical de uma bolha na superfície e principais componentes da estrutura da espuma.....	47
Figura 3.13 - Interação partícula e bolha.....	47
Figura 3.14 - Direções dos efeitos da variável de entrada na probabilidade de colisão na fase polpa.	48
Figura 3.15 - Diagrama esquemático da concentração crítica de coalescência e tamanho de bolha na flotação.....	52
Figura 3.16 - Comparação da estrutura da flotação conforme altura da camada de espuma.	54
Figura 3.17 - Curva típica de recuperação e teor indicando o sentido de melhoria de performance. ...	61
Figura 3.18 - Definições de parâmetros hidrodinâmicos relacionados à dispersão do gás.	64
Figura 3.19 - Esquema de diferentes zonas hidrodinâmicas de melhor performance de recuperação para diferentes tamanhos de partículas.....	65
Figura 3.20 - Tamanho de bolhas aumenta ao longo da direção y na fase espuma por coalescência. ..	67
Figura 3.21 - Diâmetro de bolha versus velocidade superficial para quatro tipos de células em três plantas.	68
Figura 3.22 - Ilustração de parâmetros da flotação.	69
Figura 3.23 - Modelos simplificados para velocidade u e altura espuma acima da borda Z	70
Figura 3.24 - Sequência de imagens mostrando linhas na superfície de uma bolha quando ocorre coalescência (a) com bolha adjacente na superfície; (b) com bolha adjacente abaixo da superfície da espuma.....	72
Figura 3.25 - Relação entre o hold-up e vazão de ar mostrando as duas principais regiões de fluxo. ..	74
Figura 3.26 - Esquema mostrando o efeito geral da otimização da recuperação de ar no desempenho da flotação.	75
Figura 3.27 - Relação da altura da camada de espuma, vazão de ar e recuperação de ar.	76
Figura 3.28 - Medição de estabilidade da espuma em dois frames consecutivos.....	78
Figura 3.29 - Frames consecutivos em região onde ocorreu colapso de bolhas.....	79
Figura 3.30 - Variação do diâmetro médio de Sauter da bolha em função da altura da camada de espuma para diferentes hidrofobicidades.	79
Figura 3.31 - Pico de correlação cruzada (a) Imagem bolhas; (b) Transformada Fourier; (c) Domínio do espaço para o Pico de correlação cruzada.	80
Figura 3.32 - Medições aplicadas no controle de processo na flotação de minério de ferro.....	83

Figura 3.33 - Carta de controle para saúde da variável de processo.	85
Figura 3.34 - Tipos de CCD (a) Circunscrito; (b) Face centrada; (c) Inscrito.	87
Figura 3.35 - Integração do objetivo de controle e do negócio.	90
Figura 3.36 - Bloco de processamento de dados do controle de processo (u - variáveis manipuladas; d - variáveis de perturbação; x - variáveis da condição interna do processo; y - variáveis controladas).	94
Figura 3.37 - Classificação de modelos da flotação conforme objetivo.	95
Figura 3.38 - Categorias de <i>Machine Learning</i> aplicados no processamento mineral (a) Baseado em dados; (b) Detecção e/ou diagnóstico de falha; (c) Visão de máquina.	99
Figura 3.39 - Diagrama simplificado de Inteligência Artificial.	100
Figura 3.40 - Fontes de dados de aplicação de Gen-AI na concentração de minério de ferro.	102
Figura 3.41 - Interface de Gen-AI com exemplo de resposta a perguntas baseada em documentos.	102
Figura 4.42 - <i>Software</i> para medições de propriedades de bolhas na superfície da espuma.	106
Figura 4.43 - Proteção e painel de câmera instalada sobre célula de flotação.	106
Figure 10.44 - Summary flowchart of iron ore reverse flotation.	128
Figure 10.45 - Measurements and actuators of the forced air mechanical cell of the reverse flotation of iron ore.	129
Figure 10.46 - Mass transfer methods in the quartz reverse cationic flotation process.	130
Figure 10.47 - Relationship between overall rate constant and froth depth.	130
Figure 10.48 - “Vbolhas” software for image analysis of the froth surface.	133
Figure 10.49 - Relationship between froth depth, air rate and air recovery.	134
Figure 10.50 - Photomicrographs with main minerals found in the sample.	140
Figure 10.51 - Main effects of variation air flow rate and froth depth for process responses and froth variables.	143
Figure 10.52 - Contour and response surface graphs of variation air flow rate and froth depth for process responses and froth image.	144
Figure 10.53 - Appearance of bubbles on the surface of the 4 cells of the rougher bench during industrial testing.	144
Figure 10.54 - Univariate correlation matrix of inputs and responses.	145
Figure 10.55 - Air flow rate and froth depth during 9 tests.	145
Figure 10.56 - Behavior of air recovery during 9 tests.	146
Figure 11.57 - Schematic diagrams of the bubble formation mechanism in a reverse mechanical flotation cell.	154
Figure 11.58 - Summary flowchart of iron ore reverse flotation.	156
Figure 11.59 - Image of the behavior of the froth surface in the self-aerated and forced-air cell.	163
Figure 11.60 - Bubble and froth properties in the Vbolhas Application.	164
Figure 11.61 - Summary flowchart of iron ore reverse flotation.	166
Figure 11.62 - Cell types and instrumentation for rougher comparative testing (a) Forced air modernized; (b) Forced air with old technology; (c) Self-aerated with old technology.	167
Figure 11.63 - Device with machine vision in the cell and application window with bubble properties. (a) Panel protection; (b) Camera; (c) Machine vision interface software window.	167
Figure 11.64 - Appearance of bubbles in the overflow on the rougher bench of mechanical flotation.	169
Figure 11.65 - Cell types and instrumentation for rougher comparative testing (a) Forced air modernized; (b) Forced air with old technology; (c) Self-aerated with old technology.	170
Figure 12.66 - Summary flowchart of iron ore flotation plants in the Iron Quadrangle region.	183

Figure 12.67 - Diagram of the methodology for the practical application of known techniques for flotation analysis, control, and monitoring.....	184
Figure 12.68 - Mass transfer methods in the quartz reverse cationic flotation process.	185
Figure 12.69 - “Vbolhas” software for image analysis of the froth surface.....	187
Figure 12.70 - Control chart for process variable stability index for froth height.	190
Figure 12.71 - Steady-state step test cycles for sample collection and/or analysis.....	193
Figure 12.72 - Flowchart for evaluating and applying multivariate statistical analysis.....	195
Figure 12.73 - (a) Boxplot Bubble Autocorrelation (b) Boxplot Bubble Mean.	196
Figure 12.74 - Process control applied to Flotation. (Adapted from Shao et. al (2019)).	197
Figure 12.75 - Typical control structure in flotation with circulating load feeding the rougher stage.	198
Figure 12.76 - Concentrate %SiO ₂ soft sensor using operational variables and image properties as input in the ANN.	200
Figure 12.77 - Advanced Process Control and Optimization in Flotation.	202
Figure 12.78 - Structure of the MPC controller.	203
Figure 12.79 - Specific dosage of amine and %SiO ₂ in the concentrate in Quality Control and Recovery in Plant 2.	203

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Relação de fluxos das partículas sólidas internamente	46
Tabela 3.2 - Relação de <i>softwares</i> comerciais para análise de imagem	63
Tabela 3.3 - Recomendação de ajustes para mudanças de variáveis operacionais visando maximizar a recuperação de sólidos e teor de concentrado	81
Tabela 3.4 - Medições no circuito de flotação de minério de ferro.....	83
Tabela 3.5 - Características fundamentais das principais técnicas de DOE	86
Tabela 3.6 - Materiais e métodos utilizados nos artigos desta pesquisa.....	103
Table 10.7 - Example of experimental matrix of the CCD design to be carried out in the plant	139
Table 10.8 - Example of experimental matrix of the CCD design to be carried out in the plant	139
Table 10.9. Distribution of the main chemical elements of the global samples that form the flotation feed.....	140
Table 10.10 - Responses of industrial flotation rougher tests	141
Table 10.11 - Identification of influential factors in each test by analysis of variance (ANOVA).....	141
Table 11.12 - Comparative tests on self-aspirated and forced air rougher mechanical cells	166
Table 11.13 - Answers to the comparison of rougher tests with self-aerated cells and forced air	167
Table 11.14 - Variables result using video analysis in rougher feeding and discharging	169
Table 11.15 - Current behavior for rougher cells during the testing	171
Table 11.16 - Gains from modernizing forced air technology	173
Table 11.17 - Distribution of the average relative cost of investment associated with equipment	173
Table 11.18 - Summary of cost and relative gain with forced air	173
Table 12.19 - Process standard variables for flotation	189
Table 12.20 - Stability Index and Standard Process values for iron ore flotation plants	191
Table 12.21 - Example of experimental matrix of the CCD design to be carried out in the plant	194
Table 12.22 - Estimated factor loads for each factor	195

LISTA DE ABREVIACOES E SMBOLOS

Q_A	Taxa de fluxo de ar da aeração (m^3/h)
$Q_{A'}$	Taxa de fluxo de ar que sai do volume de polpa para o volume de espuma (m^3/h)
Q_{AC}	Taxa de fluxo de ar que deixa o volume de espuma na borda de concentrado (m^3/h)
Q_{AT}	Vazão de ar que sai do volume de polpa para os rejeitos (m^3/h)
Q_c	Vazão de volume líquido do concentrado (m^3/h)
Q_E	Taxa de fluxo de volume líquido Q_E da polpa para volume de espuma (m^3/h)
Q_{feed}	Vazão de volume líquido da alimentação da polpa (m^3/h)
Q_R	Vazão do volume líquido da drenagem da espuma para a polpa
Q_T	Vazão de volume líquido dos rejeitos (m^3/h)
S_{BF}	Partículas aderidas às bolhas do volume de espuma
S_{BP}	Partículas aderidas às bolhas do volume polpa
S	rea da seção transversal da célula de flotação (m^3)
S_{LF}	Partículas na fase líquida do volume de espuma
S_{LP}	Partículas na fase líquida do volume de polpa
V	Volume da célula de flotação (m^3)
V_{BF}	Volume da fase de ar na camada de espuma (m^3)
V_{BP}	Volume da fase de ar na camada de polpa (m^3)
V_{LF}	Volume da fase líquida na camada de espuma (m^3)
V_{LP}	Volume da fase líquida na camada de polpa (m^3)
V_{TF}	Volume da camada de espuma na célula de flotação (m^3)
V_{TP}	Volume da camada de polpa na célula de flotação (m^3)
Ψ_{ij}^{feed}	Número de partículas de tamanho i e espécie j por unidade de volume líquido na alimentação
Ψ_{ij}^F	Número de partículas de tamanho i e espécies j por unidade de volume líquido na espuma
Ψ_{ij}^P	Número de partículas de tamanho i e espécies j por unidade de volume líquido na polpa
CCD	<i>Central Composite Design</i> – Arranjo Composto Central
DOE	<i>Design of Experiments</i> – Planejamento de Experimentos
MSR	Metodologia de Superfície de Resposta

PCA	<i>Principal Component Analysis</i> - Análise das Componentes Principais
pH	Potencial de Hidrogênio
L	Nível da célula de flotação (%)
ρ	Densidade (t/m^3)
h	Altura da camada de espuma (m)
h_{max}	Altura da célula flotação (m)
τ	Tempo de residência da polpa (s)
u	Velocidade espuma (cm/s)
z	Altura da espuma acima da borda
w	Comprimento da borda da célula que transborda (m)
ϵ_g	Fração volumétrica de gás na espuma (%)
i	Espécie mineral
F	Alimentação
T	Rejeito
C	Concentrado
t_f	Flotação verdadeira
e	<i>Entrainment</i>

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	21
2. OBJETIVOS	23
2.1 Objetivo Geral	23
2.2 Objetivos Específicos	23
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	24
3.1 Flotação	24
3.1.1 Variáveis	25
3.1.2 Influências da Instrumentação, Controle e Otimização no Desempenho	26
3.1.3 Relação das Variáveis na Flotação	28
3.2 Células de Flotação Mecânica Autoaeradas e Ar Forçado	29
3.2.1 Comparação entre células de Flotação Mecânica Autoaeradas e de Ar Forçado ..	32
3.3 Condições Operacionais da Flotação	35
3.3.1 Variáveis de Entrada	36
3.3.1.1 Variáveis de Distúrbio	37
3.3.1.2 Variáveis de Ajuste do Circuito	39
3.3.1.3 Variáveis Manipuladas.....	41
3.3.2 Variáveis Internas	44
3.3.2.1 Mecanismos Internos	44
3.3.2.2 Fase Polpa	50
3.3.2.3 Fase Espuma	53
3.3.3 Variáveis de Saída	57
3.3.3.1 Variáveis Controladas	58
3.3.3.2 Variáveis Objetivo	60
3.3.3.3 Variáveis de Imagem	62
3.4 Variáveis de Propriedades Visuais de Espuma	62
3.4.1 Ferramentas de Visão de Máquina	62

3.4.2	Parâmetros relacionados a dispersão de gás	63
3.4.2.1	Tamanho de Bolha (d_b)	64
3.4.2.2	Diâmetro Médio da Bolha (D_{32} - <i>Sauter Mean</i>).....	65
3.4.2.3	<i>Hold up</i> (ϵ_g).....	66
3.4.2.4	Altura da Espuma (h_f)	66
3.4.2.5	Velocidade Superficial do Gás (J_g)	67
3.4.2.6	Fluxo da Área de Superfície da Bolha (S_b)	68
3.4.2.7	Velocidade da Espuma (u_n).....	69
3.4.2.8	Altura da Espuma acima da Borda (Z_n)	70
3.4.3	Formato das Bolhas	71
3.4.4	Carregamento de Sólidos na Superfície da Espuma (<i>Solids loading</i>)	71
3.4.5	Estabilidade da Espuma	73
3.4.5.1	Efeito Operacional da Vazão de Ar	74
3.4.5.2	Efeito Operacional da Altura da Camada de Espuma	75
3.4.5.3	Importância de Vazão de Ar e Camada de Espuma	76
3.4.5.4	Recuperação de Ar	77
3.4.5.5	Taxa de Estouro de Bolhas (<i>Bubble Burst Rate</i>).....	78
3.4.5.6	Taxa de Coalescência de Bolha.....	79
3.4.5.7	Pico de Correlação Cruzada	79
3.4.6	Recomendações Práticas dos Sistema de Visão de Máquina na Flotação	80
3.5	Monitoramento do Desempenho da Flotação	81
3.5.1	Instrumentação aplicada à Flotação	82
3.5.2	Índice de Estabilidade de Processo	84
3.5.3	Análise de Experimento	86
3.5.4	Estatística Multivariada	87
3.6	Controle de Processo, Modelagem e Machine Learning aplicado à Flotação	88
3.6.1	Controle Avançado e Otimização de Processo	89
3.6.1.1	Sistema Especialista baseado em Lógica Fuzzy	92
3.6.2	Modelagem	93
3.6.2.1	Modelagem de Flotação para Controladores.....	95
3.6.2.2	<i>Soft Sensors</i>	96
3.6.3	<i>Machine Learning</i> aplicados no Processamento Mineral	98

3.7 Inteligência Artificial	99
3.7.1 Inteligência Artificial Generativa	100
4. MATERIAIS E MÉTODOS	103
4.1 Amostras e Medições de Variáveis.....	104
4.2 Condições Experimentais para Variáveis Operacionais.....	104
4.3 Análise de Granulometria, Química e Mineralogia	104
4.4 Reagentes.....	105
4.5 Propriedades de Bolhas na Fase Espuma.....	105
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	107
6. CONCLUSÕES	109
7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS.....	111
8. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	112
9. REFERÊNCIAS	113
10. ARTIGO A - Evaluation of Iron Ore Reverse Mechanical Rougher Flotation - Part I: Statistical Investigation of Air Flow Rate and Froth Depth Using RSM-CCD	124
10.1 Abstract	125
10.2 Introduction	126
10.3 Iron Ore Reverse Flotation Process	128
10.4 Operational Conditions.....	129
10.4.1 Importance of Air Flow Rate and Froth Depth.....	129
10.4.2 Visual Properties on the Froth Surface.....	132
10.4.3 Air Recovery	133
10.5 Statistical Tools.....	135
10.5.1 Response Surface Methodology	136
10.6 Materials and Methods	137
10.6.1 Experimental Procedure.....	138
10.6.2 Results and Discussion.....	139
10.6.3 Sample Characterization	140

10.6.4	Modeling the Responses.....	140
10.6.5	Analysis of the main effects of the parameters.....	142
10.6.6	Analysis of parameter interaction effects	143
10.6.7	Effect on Peak Air Recovery	144
10.7	Conclusions	146
10.8	Acknowledgments.....	147
10.9	References	147
11.	ARTIGO B - Evaluation of Iron Ore Reverse Mechanical Rougher Flotation - Part II: Comparison of Self-Aspirated and Forced Air Cells.....	150
11.1	Abstract	151
11.2	Introduction	152
11.3	Background.....	154
11.3.1	Importance of Air Flow Rate and Froth Depth.....	155
11.3.2	Froth Stability and Process Efficiency	157
11.3.3	Self-aspirated and Forced air Mechanical Flotation Cells	159
11.3.4	General Comparison between Self-aspirated and Forced air Mechanical Flotation Cells	160
11.3.5	Machine Vision in Flotation on the Froth Surface.....	163
11.3.6	Economic Evaluation of Improvements in the Flotation Circuit.....	164
11.4	Experimental.....	165
11.5	Results and Discussion	168
11.5.1	Tradeoff between Self-aspirated and Forced air Cells	169
11.5.2	Evaluation of Scenario for Replacing Self-Aspirated Cells with Forced Air Cells 172	
11.6	Conclusions	174
11.7	Acknowledgments.....	175
11.8	References	175
12.	ARTIGO C - Integration of Operating Conditions and Froth Properties in Iron Ore Flotation.....	179
12.1	Abstract	180
12.2	Introduction	181

12.3 Process Description	182
12.4 Methodology for Practical Applications in Flotation Control.....	183
12.4.1 Plant Operating Conditions	184
12.4.2 Flotation Performance Monitoring	187
12.4.3 Process Control Applied to Flotation	197
12.5 Conclusions	204
12.6 Acknowledgments.....	205
12.7 References	206
13.ANEXOS	210

ROTEIRO DA TESE

Esta tese baseada em artigos está organizada em treze capítulos. No **Capítulo 1**, apresentam-se os pressupostos iniciais para contextualizar o problema que motivou o desenvolvimento desta pesquisa e sua relevância, seguido do **Capítulo 2**, onde são elencados o objetivo geral e os específicos.

No **Capítulo 3**, apresentam-se as fundamentações teóricas para o desenvolvimento desta pesquisa, abordando-se assuntos relacionados à flotação, considerando os tipos de células mecânicas convencionais, as condições operacionais conforme classificação dos tipos de variáveis da flotação e propriedades visuais de espuma. Em seguida, inicia-se uma revisão da literatura relativa ao monitoramento do desempenho da flotação, considerando-se a instrumentação, estabilidade de processo e estatística. Para finalizar as referências do objeto de estudo deste trabalho, apresentam-se conceitos de controle de processo, modelagem, *machine learning*, *soft sensor* e inteligência artificial aplicados na flotação.

No **Capítulo 4**, apresenta-se um resumo descritivo dos materiais e métodos envolvendo os três artigos propostos para submissão relacionados a esta pesquisa, conforme os **Capítulos 10 a 12**.

No **Capítulo 5**, são sumariados os principais resultados deste trabalho, seguidos pelas conclusões no **Capítulo 6** e relevância dos resultados no **Capítulo 7**. Já o **Capítulo 8** apresenta algumas sugestões para trabalhos futuros inerentes ao tema. Por fim, encerra-se no **Capítulo 9**, listando as referências de literatura consultadas na elaboração dos fundamentos teóricos.

Os **Capítulos 10 a 12** apresentam em detalhes e de forma independente os resultados obtidos, discutidos através da relação de artigos submetidos (Artigo A, B e C) como requisitos mínimos para integralização desta Tese, conforme a seguir:

- Artigo A - “*Evaluation of Iron Ore Reverse Mechanical Rougher Flotation - Part I: Statistical Investigation of Air Flow Rate and Froth Depth Using RSM-CCD*”.
- Artigo B - “*Evaluation of Iron Ore Reverse Mechanical Rougher Flotation - Part II: Comparison of Self-Aspirated and Forced Air Cells*”.

- Artigo C – “Integration of Operating Conditions and Froth Properties in Iron Ore Flotation”.

Ao final de cada capítulo contendo os artigos, estão relacionadas as referências bibliográficas citadas especificamente em cada sessão.

No **Capítulo 13**, apresentam-se certificados de pesquisas publicadas em conferências nacionais, internacionais e revista com temas originados em função desta pesquisa, que enriquecem o propósito desta tese.

- *Flotation '23 (South Africa) - “Performance Monitoring and Control of Iron Ore Flotation Integrating Operational Variables and Froth Image Analysis Properties”;*
- *ABM 2023 (Brasil) - “Predictability to Maximize Adhesion of Pellet Feed Split in Iron Ore Flotation”;*
- *Procemin 2024 (Chile) - “Iron Ore Flotation Monitoring Integrating Operational Variables and Froth Image Analysis”;*
- *ABM 2025 (Brasil) - “Virtual Assistant using Generative AI applied to Iron Ore Concentration”;*
- *Flotation '25 (South Africa) - “Virtual Assistant using Generative AI applied to Iron Ore Concentration”;*
- *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração (TMMM), 2025 (Brasil) – “Virtual Assistant using Generative AI applied to Iron Ore Concentration”.*

1. INTRODUÇÃO

O processo de concentração de minério de ferro por flotação catiônica reversa de quartzo é um processo de separação físico-química trifásica que ocorre internamente em duas zonas, polpa e espuma, explorando as diferenças nas características da superfície de diversos minerais presentes na polpa com a adição de reagentes. Em condições alcalinas, as partículas de quartzo são tornadas hidrofóbicas em função da adição do coletor amina, aderem às bolhas e são direcionadas para a camada espuma, enquanto os minerais portadores de ferro tornam-se hidrofílicos devido à adição do depressor amido, sendo direcionados para o fluxo de afundado na polpa (LIMA *et al.*, 2016). Na fase de polpa, a taxa de colisão e adesão da partícula bolha governa o processo, assim, o número e o tamanho das bolhas, o tamanho das partículas, a concentração e as propriedades da superfície são importantes. Já a fase espuma é governada por dois mecanismos, a recuperação seletiva de partículas hidrofóbicas por flotação verdadeira, e a recuperação não seletiva por arraste, onde partículas suspensas dentro da polpa ficam presas na espuma e permanecem livres na interface ar/água.

O desempenho da flotação depende das condições operacionais de diversas variáveis de processo, em que qualquer variação pode resultar em mudanças nas condições químicas e subprocessos físicos na fase polpa, ocasionando em alteração na estrutura e na estabilidade da espuma, influenciando a composição química de concentrado, rejeito e na recuperação metalúrgica. Essas variações normalmente afetam atributos como a agregação, dispersão, hidrofobicidade das partículas e a concentração de espécies minerais nos fluxos da flotação.

Visando melhor conhecer a fase espuma, a visão de máquina é uma tecnologia amplamente empregada, que tem o potencial de medir propriedades da espuma que podem estar relacionadas ao desempenho, como o tamanho, formato e quantidade de bolhas, e análise da velocidade e estabilidade da espuma na superfície. Medições de estabilidade podem ser correlacionadas comparando-se imagens consecutivas, verificando se a estrutura da espuma é semelhante em faixas estreitas de condições. Entretanto, ainda não são representativas para efeito de mudanças de condições que causam espumas que possuem uma variação estrutural significativa. Nas aplicações industriais existentes, a velocidade da espuma e tamanho de bolhas são as medições de visão de máquina utilizadas com mais frequência para auxiliar no controle de recuperação.

Já foram propostas diversas propriedades para avaliar o desempenho da flotação, no entanto, as relações não se mostram robustas em uma ampla faixa de condições operacionais, o que é agravado por relações mal compreendidas entre as medições atualmente disponíveis na superfície e processos no interior da espuma.

As mudanças das condições operacionais no processo afetam tanto o desempenho da fase de polpa quanto de espuma. O efeito de atributos individuais na estabilidade da espuma, como a propriedade de espumantes e hidrofobicidade das partículas são razoavelmente compreendidos. No entanto, as interações entre as propriedades das partículas, mecanismos internos da espuma e sua contribuição para a estabilidade da espuma e desempenho de flotação não foram claramente definidas.

Apesar da flotação ser um processo bem estabelecido, diversas plantas ainda necessitam de operadores monitorando visualmente a superfície da espuma eventualmente para realizar ajustes de processo. O cenário atual na indústria mineral requer um processo operando em condições ótimas, assim, é crucial monitorar o desempenho do processo, pois se possibilita detectar, identificar e reestabelecer parâmetros operacionais para as condições desejadas por meio de iniciativas envolvendo controle e otimização.

Nesta pesquisa, será aplicado um sistema de visão de máquina para avaliar o comportamento das propriedades de espuma na flotação catiônica reversa de quartzo e investigar seu efeito para diferentes condições de operação. Este estudo visa utilizar ferramentas para monitorar o desempenho das variáveis de processo para identificar condições que possibilitam antecipar ações para melhor tomada de decisão e ajuste de parâmetros, gerando subsídio para implementar soluções de controle, propiciando maximizar a recuperação aderência de qualidade do produto especificado. Também serão realizados testes industriais na flotação mecânica convencional conduzidos no estágio rougher para avaliar um comparativo de células autoaeradas e ar forçado na flotação reversa de minério de ferro, considerando indicadores de processo e propriedades de imagem das bolhas na superfície da célula.

2. OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral

O objetivo desta pesquisa é investigar as influências das condições operacionais e propriedades na superfície da camada de espuma no contexto de desempenho e controle na flotação de minério de ferro, visando identificar oportunidades de ações e proporcionar ajustes de controle de processo em termos de recuperação metalúrgica e aderência na especificação da qualidade.

2.2 Objetivos Específicos

- Investigar as respostas de indicadores de processo e avaliar propriedades de espuma na flotação em função de testes industriais baseados em Planejamento de Experimento;
- Comparar o desempenho industrial de células de flotação mecânica autoareada e ar forçado, avaliando indicadores de processo e propriedades de espuma utilizando visão de máquina;
- Integrar informações de variáveis operacionais e propriedades de espuma para maximizar benefícios considerando três pilares: condições operacionais da planta, monitoramento de desempenho e controle de processo.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Flotação

A flotação é um processo de concentração aplicado a partículas sólidas que explora diferenças nas características de superfície das espécies minerais, tratando misturas heterogêneas de partículas suspensas em fase aquosa, denominada polpa, nas quais se introduz uma fase gasosa (PERES *et al.*, 1980; PERES *et al.*, 2012). Este processo requer três requisitos fundamentais para a flotação seletiva de uma partícula:

- Liberabilidade: liberação dos grãos de diferentes minerais constituintes do minério, possibilitando expor partículas do mineral de interesse, obtida nas etapas de cominuição;
- Diferenciabilidade: existência de propriedade diferenciadora entre os minerais, que é a base da seletividade para a concentração;
- Separabilidade dinâmica: relacionada aos equipamentos empregados no processo de concentração.

Uma etapa de processo para concentração de minério de ferro praticada é a flotação catiônica reversa do quartzo, indicada para ganga que apresenta o quartzo liberado para um fluxo de partículas inferiores a 0,150 mm (ARAÚJO *et al.*, 2005). Tal processo explora diferenças nas propriedades da superfície dos minerais, onde partículas de quartzo (SiO_2) são tornadas hidrofóbicas, aderem às bolhas e sobem à superfície para formar uma camada na fase espuma, que é coletada no fluxo de *overflow* em função da adição do coletor amina em condições alcalinas, enquanto minerais portadores de ferro são deprimidos para a parte inferior por injeção do depressor amido, permanecendo na fase polpa e direcionados para o fluxo de concentrado no afundado (LIMA *et al.*, 2016). No estágio recleaner, o fluxo inferior gera o concentrado final denominado industrialmente de *pellet feed* (ARAUJO *et al.*, 2003). Este processo é ilustrado conforme Figura 3.1.

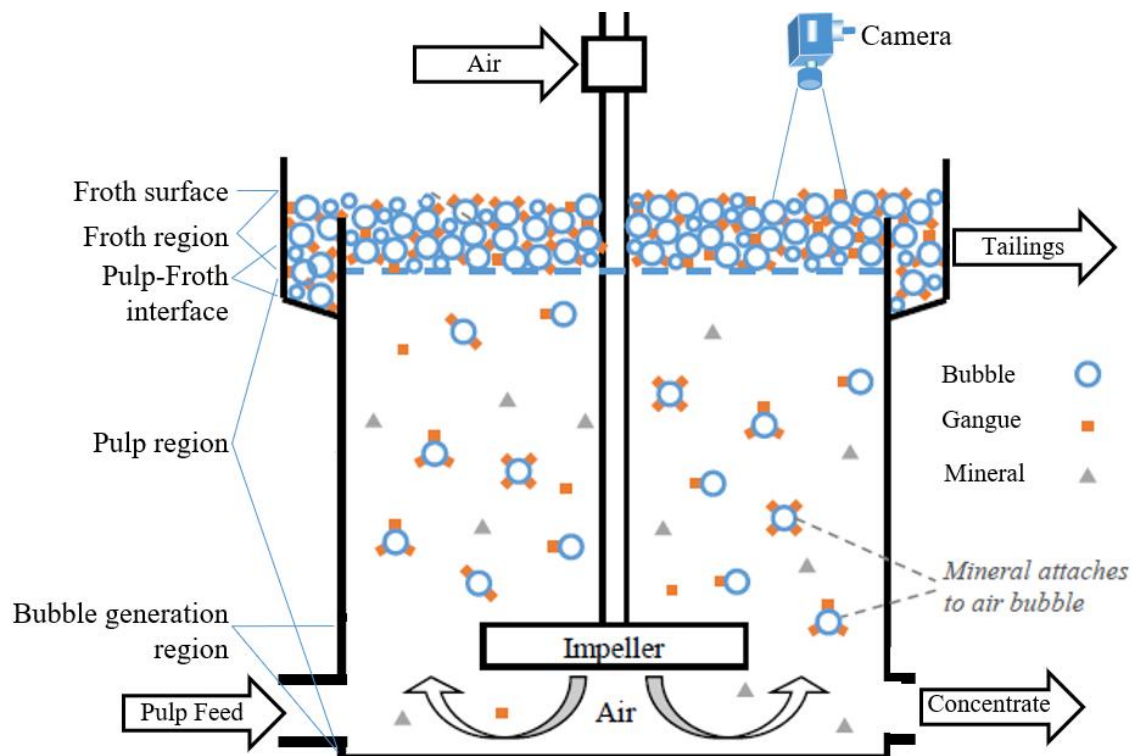


Figura 3.1 - Flotação reversa de minério de ferro e seus fluxos.
Fonte: Adaptado de Hu (2004).

Apesar desta pesquisa ser aplicada à flotação reversa, grande parte da revisão bibliográfica será baseada na flotação direta, pois a maioria da literatura consultada utiliza este tipo de flotação, exceto onde é mencionado algum caso particular da flotação catiônica reversa do quartzo.

3.1.1 Variáveis

De acordo com Laurila *et al.* (2002) e Uusi-Hallila (2014), estima-se que cerca de 100 variáveis de diversas naturezas influenciam no processo de flotação, sendo as mais importantes: características das partículas (distribuição de tamanho, forma, grau de liberação mineral), composição mineralógica do minério, propriedades da polpa, taxa de alimentação, tempo de residência, parâmetros e potenciais eletroquímicos (pH, E_h , condutividade), reagentes químicos e sua taxa de adição (espumantes, coletores, depressores, ativadores), níveis de polpa e camada de espuma nas células, vazão de ar das células, propriedades de espuma (velocidade, distribuição do tamanho da bolha, estabilidade da espuma), teor do mineral de interesse e minerais contaminantes na alimentação, concentrado e rejeitos, recuperação metalúrgica, dentre outros.

Além do elevado quantitativo de variáveis, suas complexas e não lineares inter-relações dificultam os esforços de controle, tornando-se um desafio para a obtenção dos resultados desejados (SHEAN e CILLIERS, 2011). Por exemplo, aumentar a vazão de ar pode resultar em tamanhos de bolhas maiores, implicando em mudança na velocidade de espuma e taxa de adesão.

Pesquisadores apresentam diversas formas de agrupar estas variáveis, como por exemplo, de acordo com Wright (1999): características da alimentação (vazão mássica, composição mineral, tamanho de liberação, distribuição granulométrica, gravidade específica, etc.), fatores físico-químicos (qualidade da água, temperatura, tipos e concentrações de reagentes, interações entre reagentes e partículas, etc.) e hidrodinâmica (projeto de circuito de flotação, tipo de célula, taxa de aeração, distribuição espacial de bolhas e partículas, etc.). Também são classificadas em termos de variáveis para controle de processo: manipuladas, distúrbios, controladas e estado interno da flotação (JOVANOVIĆ e MILJANOVIĆ, 2015).

Algumas variáveis de processo como vazão, densidade de polpa e nível de célula são medidas on-line e apresentam uma ampla variedade de fornecedores com diversas tecnologias de instrumentação disponíveis, assim como algumas medições aplicadas à análise de imagem na fase espuma. No entanto, propriedades essenciais como grau de liberação, composição química do minério, fluxo entre estágios da flotação, taxa de carregamento de bolhas permanecem difíceis de medir, embora tenham casos isolados aplicados industrialmente, grande parte é possível ser medida em laboratório. Em alguns casos é possível realizar inferências com sensores virtuais aplicando técnicas de modelagem (BERGH e YIANATOS, 2011).

3.1.2 Influências da Instrumentação, Controle e Otimização no Desempenho

A confiabilidade dos ativos disponíveis e aplicáveis no controle de processo deve ser monitorada de forma aprimorada e devidamente tratada em programas de manutenção, pois o sucesso dos controles depende principalmente da qualidade das informações e estratégias elaboradas com base em conhecimento do processo (UUSI-HALLILA, 2014). Problemas com a instrumentação disponível podem ser considerados como um dos maiores desafios em escala industrial, pois afetam diretamente a estabilidade do processo, desempenho da recuperação e a

qualidade do produto (QUINTANILLA *et al.*, 2021). Em geral, quanto mais instrumentadas e confiáveis as medições no circuito de flotação, melhor será a aderência do controle regulatório envolvendo malhas de controle, entretanto, a utilização de técnicas mais avançadas de controle, otimização e modelagem são necessárias para maximizar os resultados. Além disso, de acordo com Laurila *et al.* (2002), as plantas de concentração dependem de operadores capacitados, que utilizam a experiência anterior para definir manualmente os pontos de ajuste dos sistemas de controle para otimização na flotação. Assim, antes de alavancar a otimização e o controle de processo, é necessário mapear informações sobre distúrbios de entrada, parâmetros operacionais do processo e da qualidade do produto final, que podem contribuir como habilitador para o ajuste de regiões ótimas de controle.

Para auxiliar na elaboração e implantação das estratégias de controle de processo é praticada a manipulação das principais variáveis que influenciam no resultado da flotação (SHEAN e CILLIERS, 2011). Esta manipulação pode ser planejada e realizada em testes industriais e em escala laboratorial, visando avaliar o efeito utilizando ferramentas do sistema de controle e Planejamento de Experimentos (*Design of Experimentos* - DOE), como a Metodologia de Superfície de Respostas (*Response Surface Methodology* - RSM).

Outro aspecto que influencia no desempenho da flotação está relacionado à rota e a eficiência das etapas unitárias de processo com funções específicas anteriores à flotação, como a cominuição, classificação e deslamagem. Uma planta pode ser vista como um fluxo e uma rede de processamento na qual um processo unitário ou um único equipamento atua como um nó. No caso da flotação, esta é interconectada com outros processos unitários por meio de transferências de massa e adição de insumos, podendo ocorrer recirculação em alguns casos. Como consequência, as condições de entrada de um processo unitário são propensas a variações diversas como: propriedades físico-químicas, composição mineralógica, reagentes, variações na vazão de alimentação, distúrbios em processos unitários a montante e ajuste em toda a planta causado por mau funcionamento, manutenção, dentre outros.

O desempenho da concentração por flotação é medido pela qualidade e massa do concentrado e rejeito, ou seja, o teor e a recuperação. Os materiais no concentrado não apenas incluem os minerais hidrofóbicos que são coletados ao serem aderidos às bolhas, mas também parte da

ganga hidrofílica que é transportada no fluxo ascendente e subsequentemente arrastada nos canais de água entre as bolhas e presa na espuma (HU, 2014). De acordo com o ponto de vista industrial de Thwaites (2007), as curvas de teor-recuperação variam conforme teor de alimentação e podem ser controladas principalmente pela manipulação de variáveis operacionais como: adição de reagentes, nível de polpa e vazão ar.

Avanços no controle e otimização do processo de flotação são de grande relevância, pois mesmo pequenos incrementos na recuperação podem resultar em grandes benefícios econômicos. Alguns aspectos importantes a serem considerados em estratégias de controle: instrumentação disponível, reconciliação de dados, reconhecimento de padrões, detecção e diagnóstico de falhas, sensores virtuais e monitoramento do processo (QUINTANILLA *et al.*, 2021). No entanto, a implementação de estratégias avançadas de controle e otimização nem sempre são bem-sucedidas na flotação, pois distúrbios não mensuráveis no processo podem influenciar negativamente. Para melhorar o desempenho, pode-se recorrer a modelagem matemática para representar fenômenos físicos e químicos, comportamentos estáticos e dinâmicos e relações causais das variáveis. Dentre a finalidade dos modelos utilizados, destacam-se: *soft sensor*, controle preditivo, monitoramento de processo, detecção e diagnóstico de falhas, otimização operacional, projeto de planta, simulação e avaliação do desempenho do processo, dentre outros (SUN *et al.*, 2020).

3.1.3 Relação das Variáveis na Flotação

Visando agrupar e classificar as variáveis relacionadas ao processo de flotação, além de integrar também recursos de controle de processo, *machine learning* e monitoramento, foi elaborado um diagrama conforme Figura 3.2.

- **Entrada:** condições operacionais (distúrbio, ajuste do circuito e manipuladas);
- **Internas:** fase polpa, fase espuma e tipos de células de flotação;
- **Saída:** visão de máquina, objetivo e controladas;
- **Performance:** estabilidade, controle de processo, *machine learning*, monitoramento e planejamento.

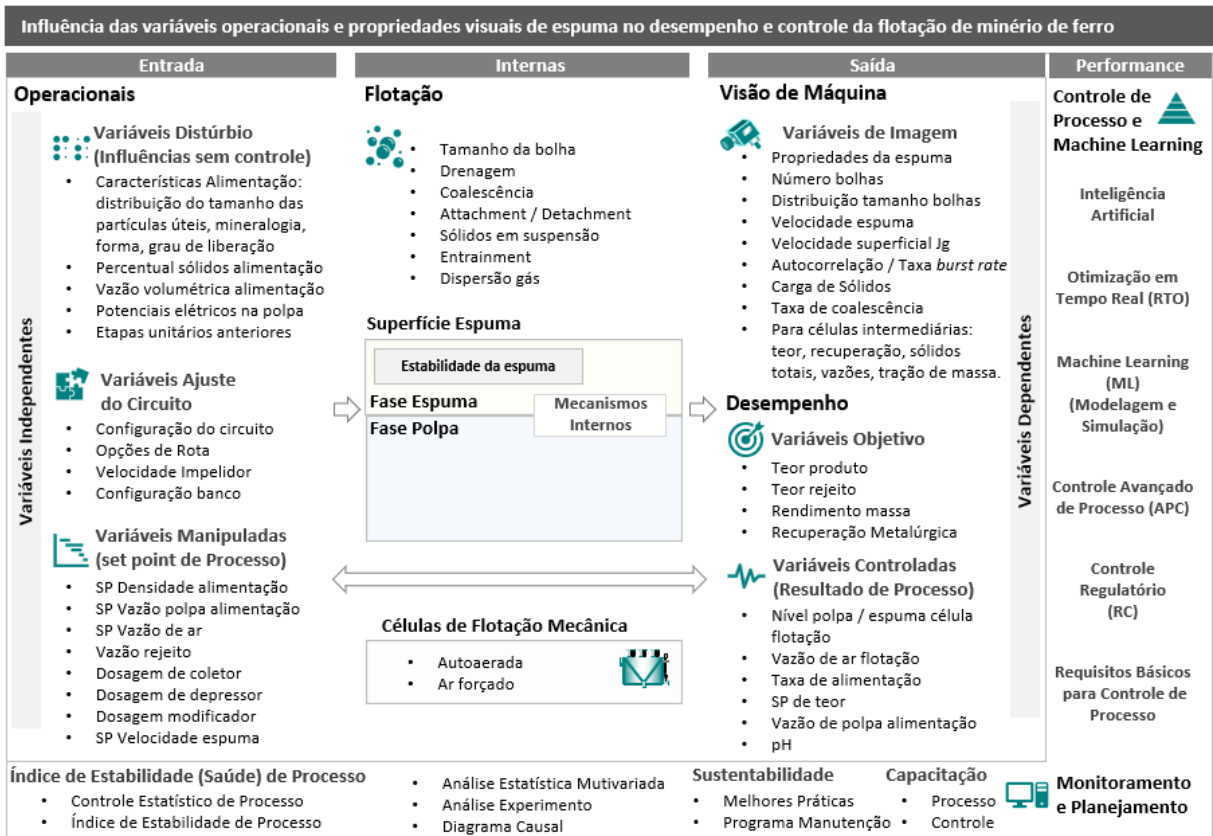


Figura 3.2 - Relação das variáveis conforme condições operacionais da flotação.

Fonte: Adaptado de Hodouin (2011), Bergh e Yianatos (2011), Jovanović e Miljanović (2015) e Quintanilla et al. (2021).

3.2 Células de Flotação Mecânica Autoaeradas e Ar Forçado

As células de flotação mecânica são as mais utilizadas na indústria mineral, possuindo um tanque que armazena a polpa de alimentação, que é agitada por um mecanismo composto de rotor e estator acionado para dispersar o ar na polpa (Wills e Napier-Munn, 2006). Na célula, as colisões entre as bolhas de ar e as partículas hidrofóbicas promovem a separação das partículas hidrofóbicas das hidrofílicas. Assim, a eficiência da flotação é influenciada pelas condições operacionais, dosagem de reagentes e está diretamente relacionada ao perfil do mecanismo gerador de bolhas que promove o fluxo hidrodinâmico dentro da célula (RAO, 2023).

À medida que o impelidor gira, o ar injetado na polpa é quebrado em pequenas bolhas. A cavitação também ocorre durante o processo, no qual o fluxo de líquido se rompe na borda da pá do impulsor e uma cavidade se forma na região de baixa pressão. Essa cavidade é então

dispersada em bolhas por uma ação de cisalhamento (SUN *et al.*, 2020). Uma redução adicional no tamanho das bolhas ocorre devido às pás estacionárias do estator. O mecanismo não apenas agita a polpa para suspender as partículas, mas também produz bolhas de ar e as dispersa na polpa, cisalhando continuamente o ar de entrada.

Para ser eficiente, uma célula mecânica necessita da geração de três zonas hidrodinâmicas distintas. A região próxima ao impulsor abrange a região turbulenta necessária para a suspensão de sólidos, dispersão de gás em bolhas e interação bolha-partícula para a coleta de minerais na superfície das bolhas. Acima da região turbulenta encontra-se a zona quiescente, onde os agregados de bolha-partícula sobem em uma região relativamente menos turbulenta. Essa região também ajuda a reduzir o número de minerais de ganga que podem ter sido arrastados mecanicamente ou aprisionados entre bolhas para a valorização de minerais valiosos. Já a região acima da zona quiescente é a zona de espuma, que serve como uma etapa adicional de limpeza e melhora a qualidade do produto concentrado (WANG e LIU, 2021).

As bolhas produzidas apresentam uma distribuição de tamanho dependente da capacidade do mecanismo de cisalhar o volume do ar de entrada e, tipicamente, os tamanhos das bolhas estão bem abaixo do limite de 3 mm, com maior ênfase na produção de bolhas abaixo de 1 mm (SCHWARZ e WIIT, 2024). A distribuição do tamanho de bolhas depende de vários fatores, como os perfis do impulsor e do conjunto do estator, a velocidade tangencial da ponta do impulsor, a relação entre o tamanho do impulsor e o tamanho do tanque de flotação, a vazão de ar e a concentração do espumante na polpa.

Para aprimorar o desempenho das células de flotação, fabricantes desenvolveram novos mecanismos para geração de bolhas por ar forçado na flotação que demonstram ganhos em termos de aumento do teor, recuperação do mineral de interesse e redução consumo de energia, embora a recuperação e teor tenham uma relação inversa (RAO, 2023). A Figura 3.3 ilustra exemplos de célula mecânica autoaerada e ar forçado de dois fabricantes.

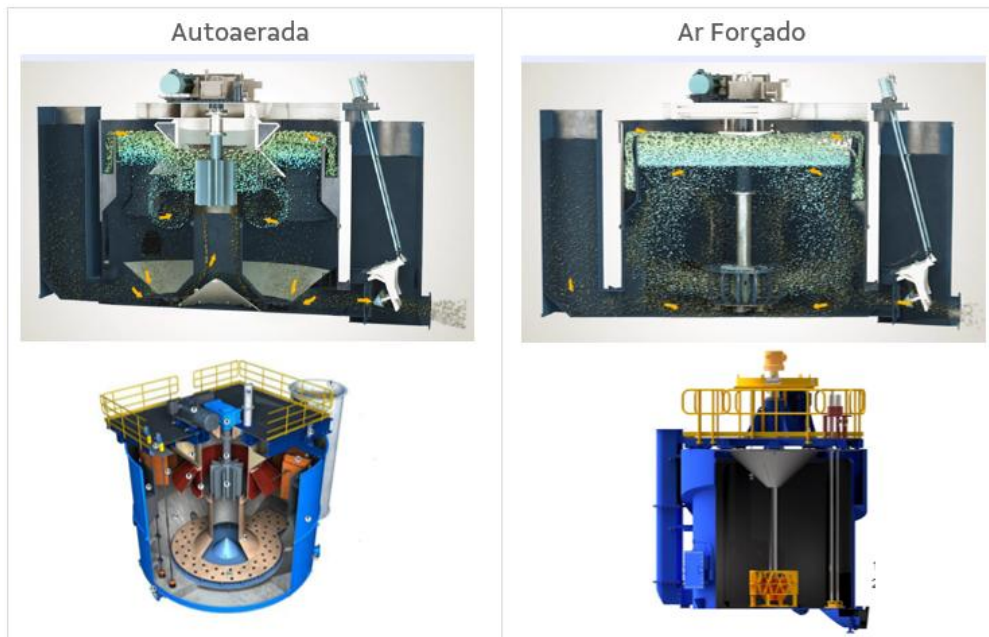


Figura 3.3 - Exemplo de célula mecânica autoaerada e ar forçado de dois fabricantes.
 Fonte: Adaptado de Lelinski (2024) e Rao (2023).

Durante o regime de operação, diversos problemas podem impactar no desempenho da flotação. Na Figura 3.4, Figura 3.5 e Figura 3.6, são ilustrados diversos exemplos de problemas na flotação mecânica autoaerada.



Válvula Manual para entrada ar autoaerada fechada

Falta de padrão de Diâmetro de sede das válvula de controle de nível

Ar Instrumentação Fechado

Água Manual aberta

Cleaner

Scavenger

Perda de Fe para rejeito no scavenger
 Aspecto espuma da scavenger similar ao da cleaner

Figura 3.4 - Problemas operacionais que influenciam no desempenho da flotação.



Figura 3.5 - Exemplos de problemas em célula mecânica autoaeradas.

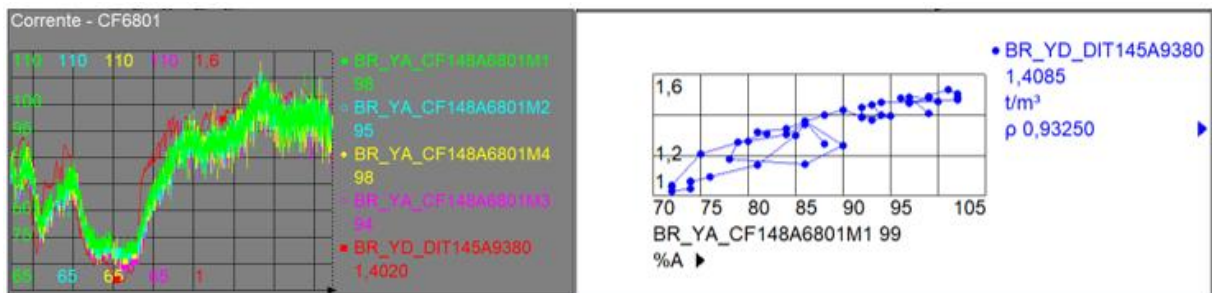


Figura 3.6 - Problema de corrente alta em motores de célula de flotação que provocam desarmes.

3.2.1 Comparação entre células de Flotação Mecânica Autoaeradas e de Ar Forçado

As células de flotação mecânicas ou convencionais são classificadas do ponto de vista do suprimento de ar em duas grandes categorias conforme método de geração de bolhas do tipo rotor-estator na célula: autoaerada e ar forçado. Na célula autoaerada, o ar é introduzido na polpa usando o vácuo criado na região próxima ao rotor, enquanto na célula com ar forçado, o ar é gerado externamente à célula por um soprador de baixa pressão e bombeado pelo eixo da célula de flotação até o rotor (MURPHY e HEATH, 2013). Há diversas diferenças entre esses dois tipos de células:

- **Localização do rotor:** na máquina autoaerada o rotor normalmente está localizado próximo ao topo do tanque, enquanto na máquina de ar forçado fica localizado na parte inferior, o que implica na eficiência do bombeamento e na circulação da polpa no tanque. Nas células autoaeradas são necessários componentes adicionais de desgaste na polpa, como o tubo de sucção e fundo falso, esses componentes são necessários para facilitar o fluxo na célula, garantindo que as partículas cheguem à zona de coleta onde

ocorre a fixação das bolhas de partículas (MURPHY e HEATH, 2013). Os tanques de flotação por ar forçado têm o rotor localizado na parte inferior do tanque, o que significa que as partículas que entram no tanque são imediatamente atraídas para a zona ativa de mistura e coleta, maximizando a chance de colisão entre partículas e bolhas, fixação de bolhas e recuperação de partículas. O único outro componente do mecanismo interno necessário é o estator, que é composto por um grupo estacionário de defletores localizados ao redor da parte externa do rotor, que auxilia no direcionamento do fluxo de polpa do rotor;

- **Diferenças operacionais:** em cenário de falha de energia, geralmente é mais fácil reestabelecer a operação de uma célula tanque do tipo ar forçado. Isso se deve, em parte, à localização do rotor no fundo do tanque, onde as partículas podem se desprender da suspensão, e, em parte, à capacidade de operar o rotor de ar forçado sem a presença de ar. Essas duas características de projeto permitem que o operador maximize a potência transferida para qualquer material na região do rotor, proporcionando assim ao operador a melhor chance de promover a suspensão de quaisquer sólidos sedimentados (MURPHY e HEATH, 2013). Por outro lado, na máquina autoaerada com o rotor localizado próximo ao topo, ficando acima de quaisquer partículas sedimentadas, dificulta a ressuspensão do material sedimentado;
- **Estabilidade na camada superior da espuma:** a máquina de flotação por ar forçado normalmente apresenta um fluxo de espuma estável e consistente sobre a borda na parte superior da máquina. Isso ocorre porque o rotor está localizado no fundo do tanque e a distância do rotor até a zona de espuma minimiza a turbulência na região superior, o que contribui para uma zona de espuma estável. Como discutido anteriormente, na máquina de flotação autoaerada o rotor localizado próximo ao topo da célula promove maior turbulência na região superior da célula. Além disso, a turbulência da fase de espuma é frequentemente observada em uma célula autoaerada especialmente à medida que o rotor se desgasta, resultando em queda do desempenho (MURPHY e HEATH, 2013);
- **Potência consumida:** mesmo incluindo a potência consumida pelo soprador de ar, a literatura indica que máquinas de flotação por ar forçado incluindo o soprador, normalmente apresentam menor consumo de energia do que máquinas autoaeradas equivalentes (NELSON *et al.*, 2002);
- **Dispersão do ar:** a dispersão de ar ideal é um dos requisitos básicos para um bom desempenho metalúrgico. Plantas que operam com células de ar forçado frequentemente

notaram que os melhores resultados são obtidos usando taxas de alimentação de ar individuais e variáveis em cada célula. Em mecanismos de flotação autoaeradas, a alimentação de ar é limitada, tornando a superfície da espuma instável, que acarreta em colapso de bolhas na camada de espuma;

- **Desgaste de componentes:** uma máquina de flotação por ar forçado tem menos componentes de desgaste expostos à polpa em comparação com uma máquina de flotação autoaerada (MURPHY e HEATH, 2013). Como exemplo, os componentes da célula autoaerada como fundo falso, draft tube, colar de ajuste, rotor, estator e saia estabilizadora são substituídos na célula com ar forçado por rotor e estator, com devido controle da malha de vazão de ar, incluindo medidor e válvula de controle;
- **Controle de processo:** diversos pesquisadores relataram melhorias no desempenho do circuito de flotação convencional por meio do controle e otimização das vazões de ar em cada célula nos bancos de flotação (DOUCET *et al.* 2006; HADLER *et al.*, 2010; MURPHY e HEATH, 2013). Há uma região de taxa de ar ideal que proporciona melhor teor e recuperação denominada de pico na recuperação de ar (Peak Air Recovery - PAR). A recuperação de ar é a fração de ar que entra em uma célula que transborda por overflow na célula como bolhas não estouradas (HADLER e CILLIERS, 2009). Hadler *et al.* (2012) descobriram que o pico na recuperação de ar para uma célula variava com a profundidade da espuma, indicando que há um efeito de interação entre ar e nível, que possui grau de liberdade para controle apenas em células de ar forçado. À medida que a profundidade da espuma aumentava, a taxa de ar precisava aumentar para atingir o pico de recuperação de ar. Isso indica que há combinações de profundidade de espuma e taxa de ar que resultam em desempenho. Plantas mais antigas possuem máquinas de flotação mecânica autoaeradas, entretanto, a maioria das plantas modernas possuem a máquinas com capacidade de controlar a vazão de ar na célula, incluindo sistemas de controle integrados conforme resultados de análise químicas dos fluxos na flotação. Estes controles integrados também podem incluir medições de nível de espuma e visão computacional para análise de imagens para monitoramento, como por exemplo, tamanho das bolhas, velocidade superficial das bolhas e taxa de estouro das bolhas, que serão utilizados para melhor otimização do desempenho da célula, aplicando técnicas de controle avançado para controle de estabilidade e recuperação. Há limitações em células autoaerada convencionais, pois normalmente possuem apenas malhas de controle de nível de camada de espuma por banco, entretanto alguns são compostos por

diversas células. Já nas células tanque ou mecânicas com ar forçado, cada tanque ou reator possui seu próprio mecanismo, controle da vazão de ar e nível da camada de espuma, o que proporciona maior grau de liberdade no controle.

Dessa forma, quando comparado à célula autoaerada, o ar forçado possui maior dispersão de ar na região abaixo do rotor e estator para melhorar a hidrodinâmica na célula. Também possui cinética mais rápida em função de bolhas menores, que resultam em recuperação mais eficiente de partículas mais finas, melhor agitação promove maior interação partícula-bolha e promove a taxa média de fixação, redução de custos operacionais com manutenção, otimização do consumo de reagentes, além de redução de consumo energético evitando paradas por sobrecarga e desgaste.

3.3 Condições Operacionais da Flotação

O processo de flotação é frequentemente descrito em termos de duas fases, denominadas fases de espuma e polpa. Baseado nos mecanismos e interações descritas na literatura, tem-se que o efeito das variáveis operacionais no desempenho da flotação mudará sob diferentes condições de hidrofobicidade e concentração de sólidos flotáveis (VERA *et al.*, 2002; MATHE *et al.*, 2000). Assim, é importante considerar a relação entre as variáveis de entrada e saída que afetam este processo.

Do ponto de vista de relacionar as condições de operação com o desempenho da flotação, estudos indicam relações mais significativas entre as características de desempenho da flotação e os aspectos relacionados à estabilidade da espuma, em oposição às variáveis operacionais que podem ser manipuladas para controle da célula de flotação. Assim, verifica-se que a relação entre as condições de operação são essenciais no desenvolvimento de sistema de controle e otimização (MORAR, 2010). O resumo da relação das variáveis para as condições operacionais é ilustrado na Figura 3.7.

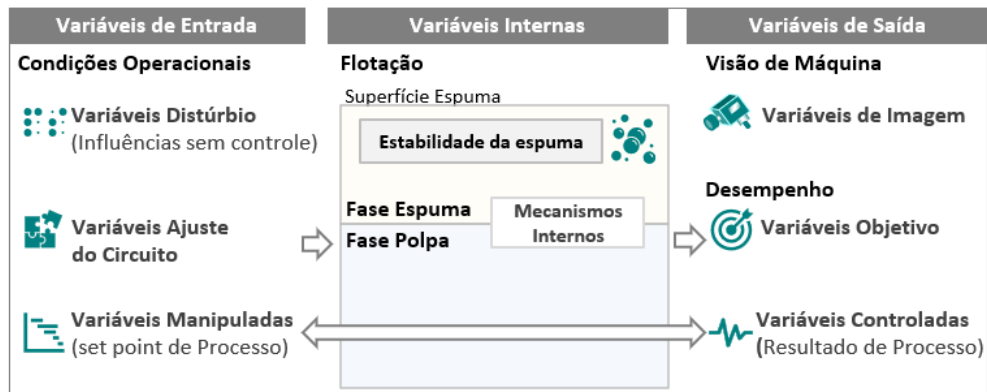


Figura 3.7 - Fluxograma resumido da relação das variáveis das condições operacionais na flotação.
Fonte: Autor.

Algumas variáveis assumem tanto a função de manipuladas, quanto de controladas. Por exemplo, segundo Hodouin (2011), o set-point do nível de polpa em cada célula ou banco é considerado uma variável manipulada, enquanto Laurila *et al.* (2002) a classifica como variável controlada, uma vez que pode ser controlado como consequência da manipulação da vazão de ar, ao invés de ser manipulado diretamente pelo operador (QUINTANILLA *et al.*, 2021).

3.3.1 Variáveis de Entrada

Uma condição desejada para tomada de decisão operacional no processo de flotação seria gerar um modelo matemático abrangente e *on-line* do circuito. No entanto, em função da indisponibilidade de diversas medições, desafios de múltiplas condições de trabalho, vários fatores de influência e dinâmicas de processo que variam no tempo, tem-se um grande desafio devido à complexidade do processo (QUINTANILLA *et al.*, 2021). As condições operacionais das variáveis de entrada que podem afetar a condição de trabalho do processo de flotação podem ser classificadas em três grupos:

- **Variáveis de distúrbios:** são aquelas que não podem ser modificadas ou controladas e, somente em alguns casos, podem ser medidas ou estimadas. Estão relacionadas em sua maioria às perturbações das condições e características da alimentação, como taxa de alimentação, porcentagem de sólidos, tamanho de partícula e distribuição da composição da superfície, teores de minerais e espécies mineralógicas (BERGH e YIANATOS, 2011);

- **Variáveis de ajuste do circuito:** relacionadas às configurações do circuito de flotação, opções de estágios e rotas de processo, além de alguns ajustes operacionais dos componentes físicos e mecânicos dos reatores de flotação;
- **Variáveis manipuladas:** definidas como aquelas que podem ser modificadas para alterar os estados internos por uma ação de controle no sistema, como por exemplo: vazão de ar, dosagem específica de reagente, vazão de rejeitos, vazão de massa de alimentação e vazão de água de lavagem (QUINTANILLA *et al.*, 2021). É importante conhecer o papel da influência destas variáveis nos resultados da flotação, visto que algumas também podem ser variáveis controladas. De acordo com Skogestad (2004), as propriedades desejadas das variáveis manipuladas devem ser consistentes entre si, confiáveis e capazes de afetar variáveis controladas com dinâmica razoável. As manipuladas devem ser suficientes para atender os requisitos e estruturas de controle, além de diferentes condições operacionais (GONZALEZ, 2018).

3.3.1.1 Variáveis de Distúrbio

3.3.1.1.1 Características do Minério na Alimentação

Para realizar a otimização e o controle da flotação é necessário uma quantidade mínima de informações sobre os distúrbios de entrada da etapa, que em sua maioria estão atrelados às propriedades dos minerais no fluxo que alimentam o circuito, como taxa de alimentação, percentagem de sólidos, tamanho, formato e grau de liberação das partículas, reologia da polpa, teores e composição mineralógica que compõem o minério (HODOUIN *et al.*, 2001). A vazão e percentual de sólidos na alimentação são amplamente medidos, já os teores em sua maioria são provenientes de análise de laboratório com atraso considerável, entretanto em alguns casos com analisadores *on-line* de fluxo pode-se fornecer informações com frequência inferior a 5 minutos. As demais propriedades são difíceis de serem medidas e até mesmo inferidas, podendo em alguns casos ter a previsibilidade de propriedades em função do modelo de blocos. Assim, a maioria dos distúrbios são frequentes e obter modelos dinâmicos do processo é um desafio.

De acordo com Sun *et al.* (2021), a influência de características da alimentação e condições operacionais propiciam múltiplas condições de trabalho, conforme ilustrado na Figura 3.8. o *framework* considerando o conceito de Espaço de Estado Abrangente (*Comprehensive State Space - CSS*). Um espaço de três dimensões considerando **variáveis controladas, condições**

de alimentação e condições operacionais compõem este modelo, onde verificam-se diversas condições de trabalho que correspondem a subespaços do CSS, que possuem condições dinâmicas semelhantes, mas que variam gradualmente ao mudar para outro subespaço conforme comportamento das variáveis controladas.

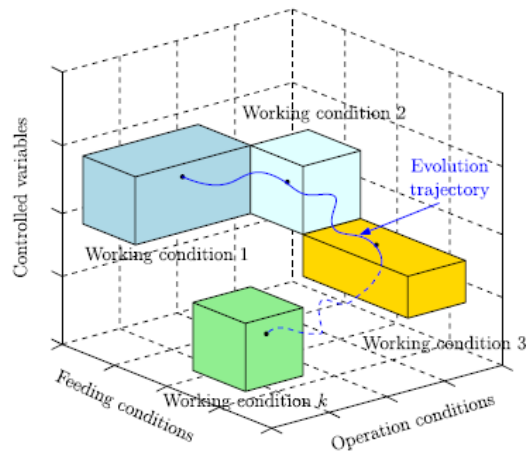


Figura 3.8 - Evolução da região de ponto ótimo da trajetória de operação de múltiplas condições de trabalho.

Fonte: Sun *et al.* (2021).

3.3.1.1.2 Distribuição do Tamanho das Partículas

É importante avaliar se há superfície exposta suficiente do mineral a ser coletado que consiga interagir com o reagente. Assim, a distribuição do tamanho das partículas é escolhida de forma a possibilitar uma liberação suficiente do mineral de interesse, além de tamanho favorável para flotar (HORN, 2018). Caso a granulometria de liberação seja maior que aquela que possibilite o transporte das partículas pelas bolhas de ar, esse fator passa a governar o tamanho máximo na alimentação (LEJA, 1982; PERES e ARAÚJO, 2009). A eficiência de partículas grossas na flotação é influenciada pela dificuldade de permanecer aderida à bolha ao longo da zona de coleta, apesar de apresentar capacidade de aderir-la (LIMA, 2010). A recuperação das partículas grossas depende de sua hidrofobicidade, pois são pesadas para serem recuperadas por arraste e também apresentam menor tendência de serem transportadas por bolhas devido ao seu peso. As partículas finas têm menor dependência das propriedades da superfície e possuem menor probabilidade de colidir com uma bolha. Além disso, também têm uma alta probabilidade de serem coletadas por arraste (BHONDAYI, 2010).

Na flotação reversa de quartzo, a fração inferior a 0,010 mm é normalmente removida nos hidrociclones para reduzir a presença de ultrafinos e colóides, enquanto o tamanho máximo é

limitado em cerca de 5 a 10% da fração retida superior a 0,150 mm. O tamanho de partículas nestas frações prejudica a seletividade do processo devido a possíveis diferenças de comportamento em relação às propriedades, como hidrofobicidade, área superficial específica e peso (LIMA *et al.*, 2013). Para partículas inferiores a 0,045 mm estudadas por Schulze (1984) e Lima (2010), foi demonstrado uma dificuldade de recuperação, que pode ser atribuída a fatores hidrodinâmicos e ao efeito da carga elétrica das partículas e das bolhas.

3.3.1.1.3 Etapas Unitárias Anteriores

O limite inferior do tamanho das partículas é determinado pelo tamanho dos grãos minerais no minério e pelo custo de cominuição. O minério deve ser fragmentado e separado para adequar à granulometria do fluxo para permitir a liberação dos minerais de interesse, dado que a flotação de minério de ferro é uma técnica consolidada e eficiente para partículas minerais na faixa entre 0,15 a 0,010 mm (LIMA *et al.*, 2013). A distribuição de tamanho de partícula deve equilibrar os requisitos concorrentes de custos de cominuição, liberação mineral e tamanho máximo para flotação (HORN, 2018). Esta distribuição também depende da eficiência da classificação do minério na etapa de deslamagem que antecede a flotação, que pode contribuir para evitar perdas significativas de partículas de minério de ferro junto às frações finas removidas (MAPA, 2006).

As perdas de seletividade e recuperação em massa na flotação resultam-se do efeito prejudicial provocado pela presença de lamas, que pode gerar um fenômeno comum conhecido como “*slimes coating*”, que é o recobrimento da superfície de um mineral por lamas de outras espécies, alterando suas características superficiais. Segundo Peres *et al.*, (2009), esta condição pode alterar a rigidez da espuma, interferir no contato bolha-mineral, tornando pouco efetiva a atuação dos reagentes devido interações com as lamas, que possuem áreas superficiais maiores que as partículas mais grossas.

3.3.1.2 Variáveis de Ajuste do Circuito

Além da química de superfície, a eficiência da concentração na flotação é governada por variáveis hidrodinâmicas. Apesar de sua importante influência na flotação de espuma, a hidrodinâmica da flotação ainda é pouco compreendida, quando comparada ao avanço de pesquisas envolvendo química da flotação. Os componentes hidrodinâmicos são responsáveis pela suspensão de sólidos e transporte de agregados, o que afeta o desempenho da flotação

(WANG e LIU, 2021). Algumas destas variáveis de ajustes do circuito de flotação são ilustradas conforme Figura 3.9 e descritas na sequência.

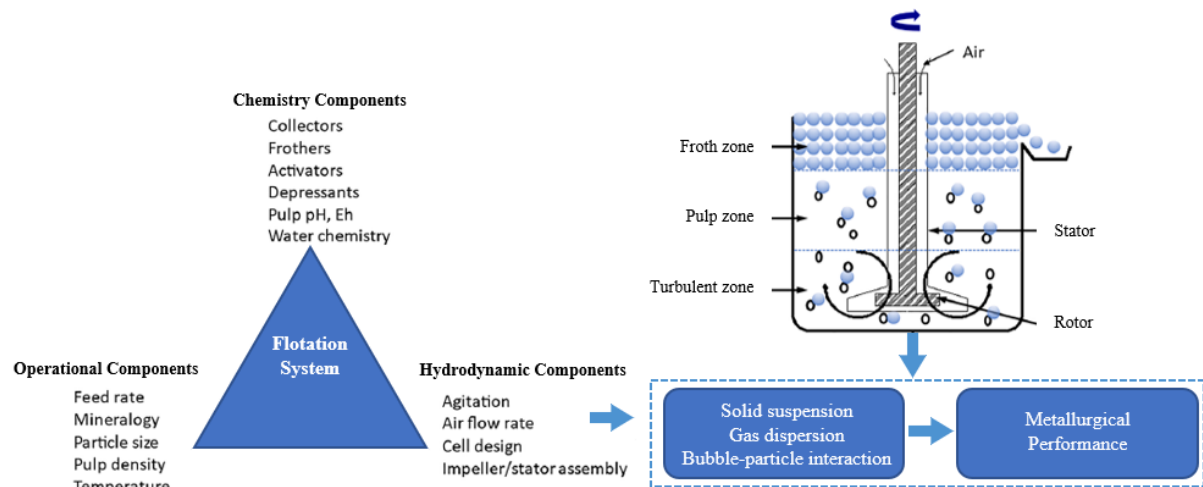


Figura 3.9 - Fatores que influenciam no processo de flotação.

Fonte: Adaptado de Nagaraj (2016) e Wang e Liu (2021).

3.3.1.2.1 Configuração do Circuito e Opções de Rota

Como as condições de alimentação e as condições de operação podem ter diferentes combinações, uma célula de flotação possui múltiplas condições de trabalho exibindo diferentes dinâmicas de processo. Para orientar a operação, é necessário construir um modelo que possa descrever a influência das variáveis essenciais do processo e a dinâmica do processo de múltiplas condições de trabalho, tanto qualitativa quanto quantitativamente (SUN *et al.*, 2021). Algumas plantas de flotação para minério de ferro têm empregado a segregação de rotas em 2 circuitos de flotação: finos e grossos. Esta estratégia possibilita melhor adequação das condições da polpa para dosagem de reagentes e percentual de sólidos, resultando em melhor eficiência (LIMA, 2010).

3.3.1.2.2 Velocidade do Impelidor

A dispersão de bolhas e a interação líquido/gás dentro de uma célula de flotação são controladas principalmente por meio de agitação mecânica por meio de um impelidor, e uma combinação da vazão de ar. A agitação mecânica é a principal força motriz do movimento do fluido, enquanto o padrão de fluxo é governado pelas características da célula como sua geometria, estabilidade, vazão de ar e impelidor. O impulsor tem a finalidade de transmitir energia cinética que permite uma eficiente dispersão de gás e suspensão de partículas, ao mesmo tempo em que facilita a interação bolha-partícula (HORN, 2018).

3.3.1.2.3 Efeitos do *Layout* da Planta e Localização da Célula no Circuito

O layout do processo é uma consideração chave no controle do processo. Os fluxos de recirculação, em particular, podem tornar o controle mais desafiador. Além disso, diferentes seções da planta requerem diferentes regimes de controle de processo; os estágios rougher e scavenger são operados com altura da camada de espuma baixa e associada a altas vazões de ar para obter alta recuperação mineral, enquanto os estágios cleaner operam com maiores camadas de espuma e menores vazões de ar, objetivando aumentar o teor do mineral de interesse no concentrado (LAURILA *et al.*, 2002). Adotar diversas células de flotação em um circuito para melhorar a concentração requer considerar técnicas de otimização, modelagem e simulação para definir a rota de processo adequada (SHEAN e CILLIERS, 2011).

3.3.1.3 Variáveis Manipuladas

3.3.1.3.1 Nível de Polpa

A altura da camada de espuma pode ser controlada modificando o nível de polpa dentro da célula de flotação. Este controle da interface polpa-espuma é um parâmetro importante pois altera o tempo de residência necessário da fase polpa, visto que influencia diretamente no desempenho para atingimento das variáveis objetivo (HORN, 2018).

A operação com maior altura da camada de espuma favorece a drenagem de líquido adicional na estrutura de espuma, resultando em camadas superiores da espuma com teor inferior às camadas mais profundas. De acordo com Morar (2010), em condições com altas concentrações de sólidos altamente hidrofóbicos na espuma, a altura da espuma terá um efeito reduzido na coalescência devido à saturação da cobertura da lamela e estabilização devido à blindagem. A blindagem é um mecanismo pelo qual o aumento da densidade de empacotamento de sólidos aderidos na interface ar/água estabiliza ainda mais a bolha. No entanto, em condições contrárias com menores concentrações de sólidos, resulta em maior quantidade de coalescência, causando uma diminuição na área de superfície disponível e um aumento do arraste sólidos.

3.3.1.3.2 Vazão de Ar

O ar admitido na célula de flotação transporta as partículas hidrofóbicas para a fase espuma devido à força de empuxo ascendente que atua em cada bolha. A vazão de ar é conhecida por influenciar na estabilidade da espuma e, conseqüentemente, também influenciar o desempenho

da célula de flotação (HADLER e CILLIERS, 2009; MARAIS, 2010). A diminuição da vazão de ar resulta em espumas mais estáveis contendo teor mais alto de minerais desejados, entretanto com uma menor recuperação mineral e rendimento de massa (HORN, 2018).

Um aumento de vazão ar requer que a região de geração de bolhas na célula de flotação quebre um volume maior de ar, geralmente resultando em um aumento no tamanho das bolhas geradas, que apresentam maior velocidade de subida e maior área específica para uma mesma quantidade de sólidos flotáveis presentes, ocasionando na diminuição das colisões entre partículas e bolhas. Isto acarreta menor carga de sólidos nas bolhas, causando uma diminuição de proporção de sólidos para líquido que entra na espuma. Isso tem implicações no que diz respeito à estabilidade da lamela através da espuma, o que influenciará o carregamento de sólidos da superfície da espuma e a taxa de estouro de bolhas (MORAR, 2010).

3.3.1.3.3 Condicionamento Químico de Reagentes

O estado químico da polpa na célula de flotação é importante para garantir condições adequadas para a seletividade das partículas. Para a aderência de uma partícula em uma bolha ascendente, ela deve repelir água, ou seja, apresentar caráter hidrofóbico. Para atingir o grau de hidrofobicidade desejado que possibilita a separação do mineral de interesse da ganga, vários reagentes podem ser adicionados à polpa (BHONDAYI, 2010). Os reagentes manipulam as propriedades da superfície das partículas e criam bolhas estáveis. Existem dois reagentes primários usados na flotação, o coletor e o espumante. Já os reagentes modificadores são frequentemente utilizados para manipular o ambiente químico para um desempenho ideal (MORAR, 2010).

3.3.1.3.4 Coletor

Os coletores são reagentes que se adsorvem na superfície do mineral, tornando a partícula mineral hidrofóbica. Os minerais hidrofóbicos aderem às bolhas de ar e são transportados para a fase espuma. Como a maioria dos minerais são naturalmente hidrofílicos, a flotação sem a adição de um coletor é impossível. O coletor é usado em pequenas quantidades para garantir uma camada inferior a monomolecular na superfície da partícula. Um excesso de adição de coletor à polpa pode, no entanto, diminuir a seletividade e, portanto, também diminuir a qualidade do produto. Também pode resultar no desenvolvimento de uma multicamada de

moléculas coletoras nas partículas, o que diminui a hidrofobicidade e afeta a recuperação metalúrgica (MORAR, 2010). É importante que os coletores de flotação sejam seletivos para evitar a recuperação de minerais indesejados (BHONDAYI, 2010). No processo de flotação de minério de ferro, a etermonoamina é o coletor mais utilizado e tem a função de modificar a superfície do quartzo, de hidrofílico para hidrofóbico, tornando-a com afinidade pelo ar (TURRER, 2007).

3.3.1.3.5 Espumante

Espumantes são reagentes surfactantes não iônicos, que desempenham diversas funções na flotação como facilitar dispersão de ar dentro de bolhas, estabilizar e dar mobilidade à espuma, prevenir a coalescência entre bolhas, reduzir o tempo de indução partícula-bolha e acelerar a taxa de flotação (GRAU *et al.*, 2005; NAKHAEI e IRANNAJAD, 2018). A estabilização da espuma ocorre quando o espumante adsorve na interface ar-água devido à sua atividade superficial. Um bom espumante produz uma espuma que é estável o suficiente para facilitar a transferência do mineral flotado da superfície da célula para a calha do *overflow* (BHONDAYI, 2010). Sua adição em excesso pode gerar uma espuma excessivamente estável, causando dificuldades em processos à jusante, como transporte por bombeamento e desaguamento por espessamento.

Na flotação de minério de ferro, além da função de coletor, a eteramina também atua como espumante devido à espécie molecular, que confere elasticidade à película interlamelar na espuma, aumentando a seletividade da separação. No momento da adesão partícula-bolha ocorre a interpenetração entre as espécies coletor e espumante, fazendo com que, também as espécies com papel espumante, permaneçam adsorvidas ao quartzo (BALTAR, 2008; ROCHA, 2017).

3.3.1.3.6 Modificadores

Os modificadores ou reguladores apresentam funções distintas quando comparados aos coletores e espumantes. São utilizados para manipular o ambiente da polpa para melhorar o desempenho de flotação, com funções como: modulador, ativador e depressor. O modulador do pH regula a composição iônica da polpa para aumentar a interação dos demais reagentes com a partícula desejada, os produtos químicos usados para controlar a alcalinidade são chamados de

modificadores de pH. Já o ativador atua na superfície da partícula mineral propiciando-se condições para a interação deste mineral com o coletor. Os depressores tornam certos minerais hidrofílicos quando adsorvidos à superfície do mineral. A ação dos depressores aumenta a seletividade, pois permite que o coletor atue sobre o mineral desejado (PERES e ARAÚJO, 2009). Os amidos depressores de óxidos de ferro utilizados na flotação catiônica reversa de quartzo são fubá de milho e raspa e farinha de mandioca (PERES, 2025).

3.3.2 Variáveis Internas

3.3.2.1 Mecanismos Internos

Embora o processo de flotação possa aparentar ser simples, outros subprocessos simultâneos também ocorrem com as variáveis internas. Estes estados internos por célula incluem: propriedades da espuma, como tamanho da bolha, taxa de estouro de bolhas, taxa de coalescência, velocidade de sedimentação das partículas, teores, arraste para a fase espuma, entre outros. Além disso, é importante considerar nas células intermediárias: teor, recuperação metalúrgica, %sólidos, vazão de polpa, recuperação em massa (SHEAN e CILLIERS, 2011; QUINTANILLA *et al.*, 2021).

Para otimizar o processo de flotação, um ambiente propício que maximize os subprocessos deve ser criado, como interações partícula-bolha e drenagem de partículas arrastadas. Essas interações requerem a geração de bolhas de tamanho específico na célula de flotação de acordo com o estágio (BHONDAYI, 2010). O comportamento dinâmico das partículas sólidas na flotação consideram diferentes funcionalidades na fase polpa e espuma. Para melhor compreensão desta dinâmica, a célula de flotação é dividida em duas seções: volume de espuma e volume de polpa, as quais são subdivididas nas fases líquida e ar com as partículas minerais associadas, conforme Figura 3.10 (SUN *et al.*, 2021). Os estados das partículas em uma célula de flotação incluem principalmente:

- S_{LP} : partículas na fase líquida do volume de polpa;
- S_{BP} : partículas aderidas às bolhas do volume de polpa;
- S_{LF} : partículas no líquido do volume de espuma;
- S_{BF} : partículas aderidas às bolhas do volume de espuma.

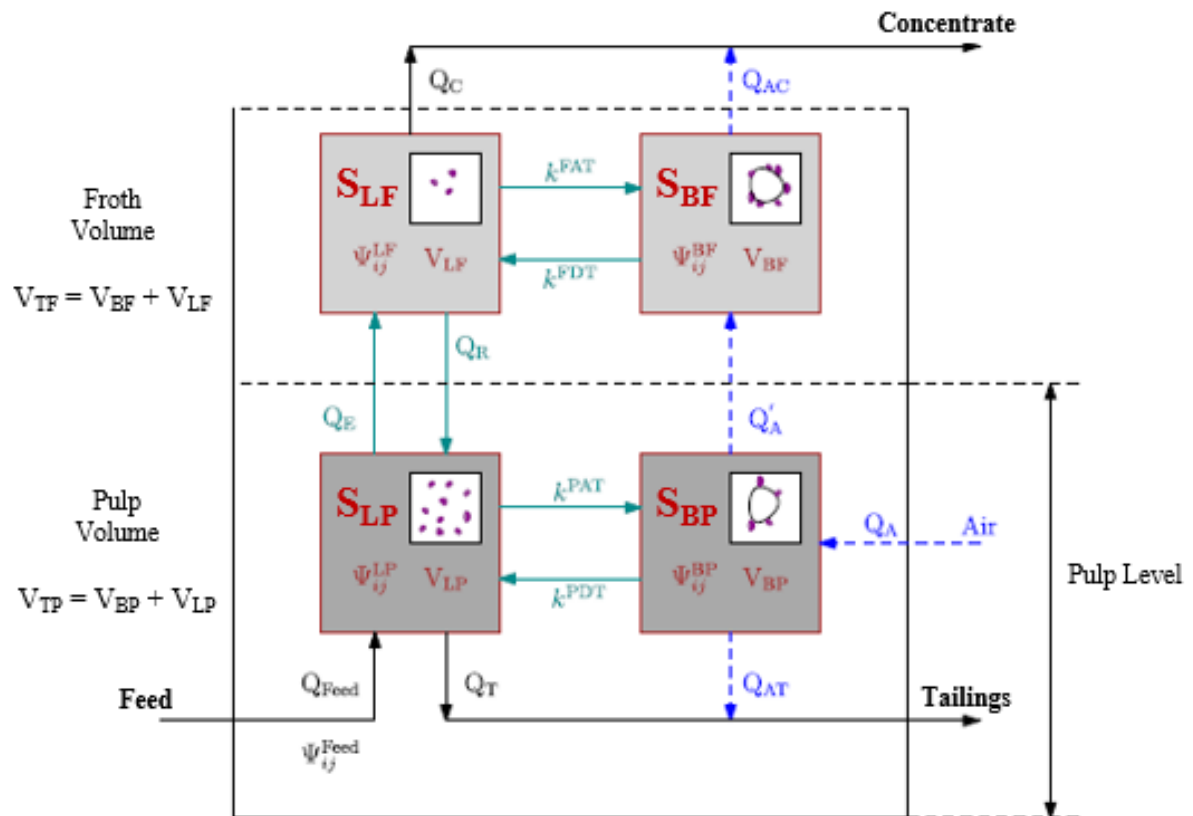


Figura 3.10 - Representação do fluxo de sólidos na célula de flotação.
Fonte: Sun *et al.* (2021).

A direção das partículas na flotação ocorre em 5 fluxos para duas categorias:

- Entrada: Alimentação $\rightarrow S_{LP}$;
- Saída: $S_{LF} \rightarrow$ Concentrado, $S_{BF} \rightarrow$ Concentrado, $S_{LP} \rightarrow$ Rejeito e $S_{BP} \rightarrow$ Rejeito.

Diversos modelos para representar o processo de flotação foram propostos visando reduzir a complexidade matemática em função do comportamento hidrodinâmico e elevado número de variáveis, normalmente assumindo algumas suposições para facilitar a modelagem (QUINTANILLA *et al.*, 2021). Os fluxos das partículas podem ocorrer internamente na célula de flotação, entre a célula de flotação e entre o ambiente externo e fluxos de alimentação, concentrado e rejeito. A relação de fluxos das partículas sólidas internamente na flotação é dado conforme Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Relação de fluxos das partículas sólidas internamente

Categories	Direction	Physical meaning
Pulp volume	$S_{LP} \rightarrow S_{BP}$	Adhesion of particles in the liquid phase
	$S_{BP} \rightarrow S_{LP}$	Detachment of particles in the pulp volume
Froth volume	$S_{LF} \rightarrow S_{BF}$	Adhesion of particles in the froth
	$S_{BF} \rightarrow S_{LF}$	Detachment of particles in the froth volume
Pulp ↔ Froth	$S_{LF} \rightarrow S_{LP}$	Particles draining from the froth volume to the pulp volume
	$S_{LP} \rightarrow S_{LF}$	Particles entrained from the pulp volume to the froth volume
	$S_{BP} \rightarrow S_{BF}$	Particles transport from the pulp volume to the froth volume

Fonte: Sun *et al.* (2021).

De forma resumida, Laplante *et al.* (1989), a flotação pode ser dividida em quatro subprocessos considerando os comportamentos de fase polpa (zona de coleta) e da fase espuma (zona de limpeza), representados conforme Figura 3.11 e descritos a seguir.

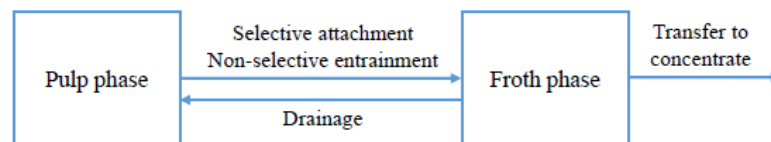


Figura 3.11 - Métodos de transferência de massa no processo de flotação.

Fonte: Adaptado de Hu (2014).

1. Transferência seletiva de material da fase polpa para espuma por fixação em bolhas;
2. Transferência não seletiva de material da fase polpa para espuma por arraste;
3. Perda de material da fase espuma para polpa devido à coalescência e estouro das bolhas e conseqüente drenagem do líquido;
4. Transferência de material da fase espuma para o concentrado.

3.3.2.1.1 Borda de Plateau, Lamelas e Vértice

As lâminas finas que dividem as bolhas na flotação são denominadas **lamelas**, já a região na qual três delas se encontram ao longo de uma borda é a **borda de Plateau**. Estas bordas retêm grande parte do líquido na espuma e formam uma rede contínua de canais por toda a espuma, a conexão de quatro bordas de Plateau adjacentes ocorre nos **vértices** (HU, 2014). A seção vertical de uma bolha e os principais componentes da estrutura de espuma próxima da superfície são representadas conforme Figura 3.12.

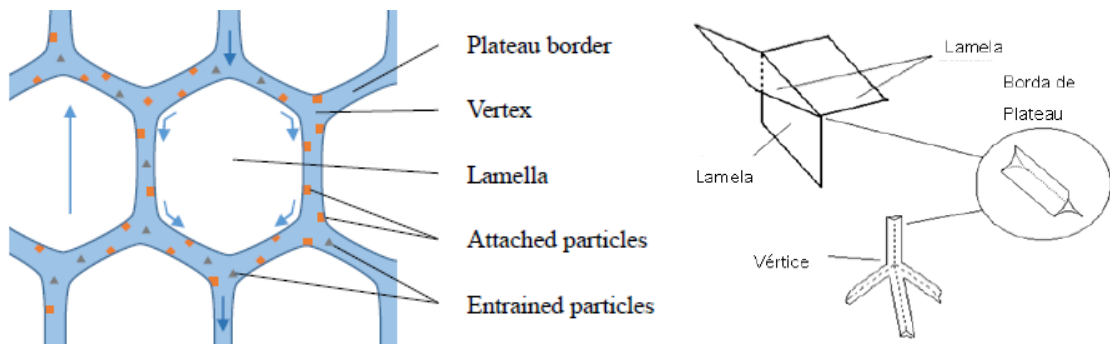


Figura 3.12 - Seção vertical de uma bolha na superfície e principais componentes da estrutura da espuma.
 Fonte: Adaptado de Ventura-Medina e Cilliers (2002) e Hu (2014).

3.3.2.1.2 Adesão (*Attachment*) e Descoleta (*Detachment*)

De acordo com (MORAR, 2010), é denominado **attachment** o processo de adesão envolvendo uma partícula colidindo e formando um agregado estável com a bolha ou lamela. Já **detachment** é o processo de separação ou descoleta de uma partícula aderida na interface ar/água, em uma bolha ou lamela. A fixação partícula-bolha é controlada principalmente pelas forças de tensão superficial, que são caracterizadas pelas forças de ruptura da superfície e da lamela de água ocorridas quando a partícula e a bolha estão próximas uma da outra. De acordo com (TSHIBWABWA, 2018), a probabilidade de colisão (P) de uma partícula sólido-bolha ser extraída por uma bolha de gás na fase polpa de uma célula de flotação é dado conforme Equação 3.1 e ilustrado na Figura 3.13.

$$P = P_c P_a (1 - P_d) \tag{3.1}$$

Onde: P_c é a probabilidade de colisão partícula-bolha, P_a é a probabilidade de adesão dado que a partícula colidiu, e P_d é a probabilidade de descoleta dado que a partícula sólida se aderiu (YOON, 2000).

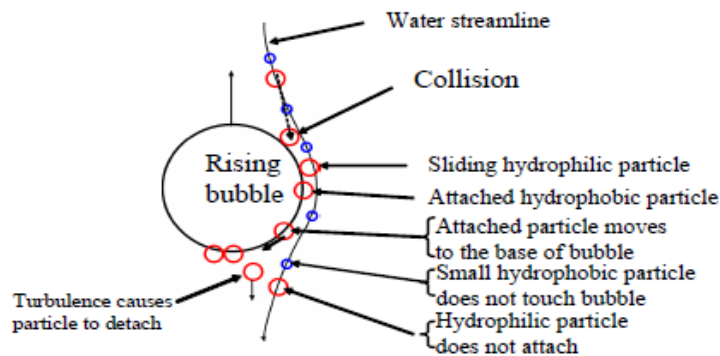


Figura 3.13 - Interação partícula e bolha.
 Fonte: Tshibwabwa (2018).

A probabilidade de colisão é influenciada por variáveis como o tamanho da abertura da entrada de ar, a vazão de ar, a adição de espumante, a velocidade do rotor e a concentração de sólidos dentro da célula de flotação. Suas direções de efeito sobre a probabilidade de colisão são ilustradas em ordem crescente de magnitude conforme Figura 3.14 (MARAIS, 2010).



Figura 3.14 - Direções dos efeitos da variável de entrada na probabilidade de colisão na fase polpa.
Fonte: Adaptado de Marais (2010).

3.3.2.1.3 Tempo de Indução

O tempo de indução é o tempo necessário para que uma partícula que colidiu com uma bolha venha a aderir a ela após a colisão. Se o tempo de deslizamento for maior que o tempo de indução, a partícula terá tempo de contato suficiente para afinar e romper a película de separação entre a partícula e a bolha. Segundo Ahmed e Jameson (1989), a eficiência da coleta e transporte de partículas é influenciada pelo tamanho de bolha e sua distribuição.

3.3.2.1.4 Coalescência

A minimização de energia e distúrbios aleatórios causados pelas interações de partículas sólidas e a química da solução podem causar a ruptura do filme entre duas estruturas de bolhas poliédricas. Essa união das duas bolhas para criar uma única bolha maior é denominada coalescência (MORAR, 2010). A concentração do espumante presente na solução afeta a adsorção na interface ar/água.

3.3.2.1.5 Flotação Verdadeira (*True Flotation*)

Durante o mecanismo de flotação, partículas hidrofílicas e hidrofóbicas são carregadas pelas bolhas da fase polpa para a espuma. Estes mecanismos são conhecidos como transferência

seletiva e não seletiva. A flotação seletiva ocorre exclusivamente através do processo de adesão partícula-bolha e corresponde à **recuperação por flotação verdadeira**, onde ocorre transferência seletiva de material da polpa para a espuma, e depois para o concentrado. A fração do material do *dettachment* que fica em suspensão na espuma e é transportado para o concentrado ainda é considerado parte da **flotação verdadeira** (NEETHLING, 2008). A eficiência da separação depende de características físico-químicas da superfície mineral em contato com os reagentes e a polpa, da recuperação de água, dentre outras variáveis do processo.

3.3.2.1.6 Arraste (*Entrainment*)

No processo de flotação, arraste ou *entrainment* é o processo mecânico (ou hidráulico) de transferência de massa pelo qual partículas minerais da região superior da polpa, suspensas na água contida na região entre bolhas de uma espuma de flotação, são transferidas para o concentrado. O material recuperado por arraste é o material que entrou de forma não seletiva na espuma com a água. Os sólidos aprisionados e não ligados dentro da fase espuma incluem sólidos não flotáveis e separados. Tanto partículas minerais hidrofóbicas quanto hidrofílicas sofrem arraste hidrodinâmico, especialmente as mais finas (LIMA *et al.*, 2016). Assim, o tamanho da partícula desempenha uma função importante na determinação do grau de arraste. De acordo com Smith e Warren (1989), partículas maiores que 50 μm sofrem pouco ou nenhum arraste. Como tal, à medida que o tamanho aumenta, as partículas provavelmente serão drenadas hidraulicamente ao atingir a fase espuma (ACHAYE, 2017). À medida que a espuma se acumula na superfície da polpa, parte da polpa é capturada (arrastada) na fase espuma como fluido que não sofreu espuma, reduzindo a seletividade da célula de flotação.

O arraste dos sólidos ocorre principalmente nas bordas do Plateau, ou canais de drenagem dentro da espuma (MORAR, 2010). Este processo pode ser explicado pelo mecanismo de arraste mecânico da polpa para a fase espuma pelas bolhas que adentram a fase por ascensão. Este fluxo ascendente de bolhas empurra parte da polpa entre os interstícios enquanto as novas bolhas formam a nova interface das duas fases. Desta forma, a composição final da espuma, em termo de teores de minerais de minério e da ganga, é heterogênea e dependente do grau de arraste apresentado pela máquina de flotação, e da eficiência da flotação verdadeira.

3.3.2.1.7 Drenagem (*Drainage*)

A drenagem corresponde ao fluxo de água e sólidos arrastados, não flotados e que foram descoletados das bolhas devido à ação da gravidade através das bordas do Plateau na fase espuma. A drenagem do concentrado da espuma ocorre devido às forças de dissipação gravitacional e viscosa que se opõem às forças capilares e fazem com que filmes finos se formem entre as bolhas. Deve-se notar que a perda de material por drenagem está incluída tanto na recuperação verdadeira, quanto por arraste (HU, 2014). Parte desse fluido, juntamente com partículas livres na superfície da bolha, são drenadas de volta para a fase polpa, entretanto, algumas das partículas livres podem aderir às bolhas como na flotação verdadeira, tornando este um processo importante para manter uma boa seletividade.

3.3.2.2 Fase Polpa

Na fase polpa, a coleta de minerais desejados é determinada por colisões, *attachment* e *detachment* de partículas e bolhas. Quanto mais bolhas, partículas e turbulência dentro da célula, maior a probabilidade de ocorrer colisão entre bolhas e partículas. Cada colisão dá origem à possibilidade de partículas se unirem ou se desprenderem das bolhas à medida que sobem pela polpa. As bolhas aderidas são afetadas por muitas forças intermoleculares, interfaces e outras forças físicas. A condição química na fase polpa determina quais partículas preferencialmente se ligam e se desprendem das bolhas, possibilitando que a separação ocorra dentro de uma célula de flotação (HORN, 2018). As principais influências cinéticas da ligação de partículas às bolhas são o tipo de minério, a distribuição do tamanho das partículas, proveniente de etapas anteriores de processo e entre estágios da flotação, e do número e distribuição do tamanho das bolhas dentro da polpa. É importante compreender a fase polpa, pois ela alimenta e tem impacto direto no desempenho da fase espuma (MORAR, 2010).

3.3.2.2.1 Comportamento da Partícula

Segundo Morar (2010), os principais fatores de interação bolha-partícula na fase polpa são:

- Probabilidade de colisão: é influenciada por dois fatores principais:
 - Número, tamanho e velocidade das bolhas;
 - Tamanho, forma e concentração das partículas.
- Tempo de indução;
- Estabilidade da partícula aderida.

De acordo com Morar (2010), o comportamento das partículas dentro da polpa é tal que o tamanho das partículas e das bolhas influenciam a probabilidade de colisão da partícula com a bolha. A hidrofobicidade da partícula influencia o tempo necessário para a formação de um agregado de partículas de bolha estável. A probabilidade de que o agregado permaneça estável e suba na espuma depende tanto da hidrofobicidade quanto do tamanho da partícula. Entretanto, apesar do progresso significativo feito para medir o tipo e a quantidade de partículas aderidas que entram na fase espuma dentro de uma célula industrial, ainda há uma lacuna para melhor confiabilidade destas medições. O comportamento das partículas na fase polpa em diversas pesquisas relacionadas indicam que:

- Bradshaw e O'Connor (1996) mediram a carga de bolhas em função do tamanho das partículas e mostraram que houve um aumento no número de partículas aderidas por bolha em função do tamanho das partículas;
- Existe um limite superior de tamanho de partícula, acima do qual a flotabilidade não aumenta;
- A recuperação seletiva de partículas flotáveis da polpa para a espuma ocorre na interface polpa-espuma. Resultados mostraram que maiores recuperações de partículas mais finas ocorrem na fase espuma, indicando que a energia necessária para a descoleta das partículas aumenta com o tamanho das partículas.

A extensa pesquisa realizada sobre a recuperação de partículas na polpa indica que a medição de sólidos recuperados na polpa, ou que entram na espuma, é importante na avaliação do desempenho da fase polpa. Assim, pesquisadores desenvolveram dispositivos para medir a carga de sólidos na fase polpa. Em sistemas industriais, Seaman *et al.* (2004) e Yianatos *et al.* (2008) desenvolveram dispositivos para medir a concentração e o tipo de partículas sólidas aderidas às bolhas em qualquer ponto da fase polpa. Esta medida é importante porque desacopla a transferência de massa dentro da flotação entre as fases de polpa e espuma. Isso permite a medição da recuperação de espuma e fornece mais informações sobre o comportamento cinético da fixação das partículas na fase polpa.

3.3.2.2.2 Formação de Bolhas e Comportamento na Polpa

As bolhas geradas no interior da célula de flotação dependem da vazão de ar, concentração de espumante, características da polpa e geometria física da célula (dispersor, impelidor,

configuração do defletor, etc.). Assim, a medição das propriedades hidrodinâmicas na fase polpa são importantes para caracterizar o desempenho. O comportamento da formação de bolhas na fase polpa em diversas pesquisas relacionadas mostraram que:

- O efeito das condições de operação na dispersão de gás em aplicações industriais relacionaram mudanças na distribuição do tamanho da bolha à concentração do espumante, mostrando que tanto o tamanho da bolha quanto o fluxo da área da superfície da bolha aumentam com a velocidade superficial do gás (CAPPUCCITI e NESSET, 2009);
- A dinâmica da adsorção do espumante controla o tamanho da bolha da polpa (GRAU *et al.*, 2005);
- O comportamento da velocidade das bolhas subindo dentro da polpa influencia o *hold-up* e na estabilidade das partículas aderidas.

Laskowski *et al.* (2003) mostraram que existe uma Concentração Crítica de Coalescência (CCC) de espumante, acima da qual não ocorre mais coalescência entre bolhas na zona de geração, conforme ilustrado na Figura 3.15. Isto é de particular importância, uma vez que acima desta concentração de espumante, a distribuição do tamanho das bolhas de polpa no sistema é mais consistente e apresenta bolhas menores. O tipo de espumante e a geometria do sistema determinam o tamanho mínimo da bolha, no entanto, a vazão de ar influencia o tamanho da bolha (NESSET *et al.*, 2005).

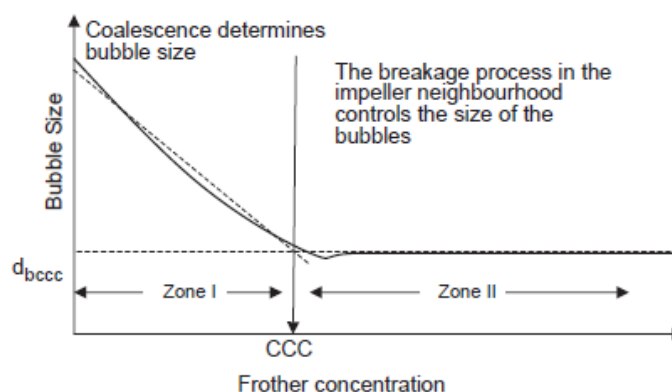


Figura 3.15 - Diagrama esquemático da concentração crítica de coalescência e tamanho de bolha na flotação.
Fonte: Grau *et al.* (2005).

Devido à importância da compreensão e alta complexidade relacionada à formação de bolhas, pesquisadores desenvolveram dispositivos para medir a velocidade superficial do gás, *hold up*

e a distribuição do tamanho das bolhas dentro da fase polpa em células de flotação, tanto em escala de laboratório, quanto industrial (MORAR, 2010). Empresas de processamento de minerais também têm desenvolvido instrumentos baseados em visão de máquina para aplicações na indústria, como por exemplo, a *Stone Three*, que possui dois tipos de dispositivos para medir a distribuição do tamanho das bolhas e a velocidade superficial do gás (J_g), ambos na fase polpa de uma célula de flotação. Um dispositivo é o *Anglo Platinum Bubble Sizer* (ABPS), portátil e manualmente utilizado para medições pontuais, enquanto o outro possibilita medições em tempo real, comunicando com o sistema de controle, denominando *On-line Pulp Sensor* (OPS).

3.3.2.3 Fase Espuma

Na beneficiamento mineral, o termo *froth* é empregado para sistemas que contêm partículas sólidas dispersas em um sistema trifásico, incluindo líquido e gás (SILVA, 2008). A fase espuma consiste em uma estrutura tipo espuma com partículas sólidas presas na interface ar/solução e arrastadas dentro da solução. Esta espuma está intimamente ligada à fase polpa. Embora os efeitos dentro da polpa possam levar a uma boa separação de minerais para a fase espuma, embora vários caminhos de transferência de material dentro da fase espuma que podem afetar a recuperação final e o teor de minerais pelo fluxo de *overflow* da espuma. A química da fase polpa tem o maior impacto na flotação verdadeira, pois as partículas se ligam seletivamente às bolhas devido aos efeitos hidrofóbicos (HORN, 2018).

Dois processos ligados na fase espuma e já discutidos são o arraste e a drenagem, que são diretamente influenciados pelo controle de vazão de ar e nível de polpa na célula de flotação. O desempenho da fase espuma é geralmente atribuído ao efeito da estabilidade da espuma, que pode ser controlada para otimizar o desempenho da flotação, incluindo o comportamento da espuma em relação à coalescência das bolhas e sua capacidade de transportar sólidos e líquidos para o *overflow* (MORAR, 2010).

3.3.2.3.1 Estrutura de Espuma

A formação e remoção de espuma são as últimas etapas do processo de flotação. A estrutura da espuma e o comportamento dos materiais na camada de espuma desempenham um papel importante na determinação do desempenho da flotação. Bolhas relativamente pequenas e esféricas com um diâmetro de alguns milímetros entram na região inferior da camada de espuma

e coalescem à medida que sobem à superfície, onde podem ser encontradas grandes bolhas poliédricas de até 200 mm. A extensão da deformação depende do tamanho da bolha e da tensão superficial na interface ar/polpa. Geralmente, bolhas superiores a 1,0 mm deformam-se facilmente, enquanto bolhas menores são capazes de manter uma forma esférica (MORAR, 2010). A Figura 3.16 representa a progressão da estrutura de espuma da interface polpa-espuma para a superfície.

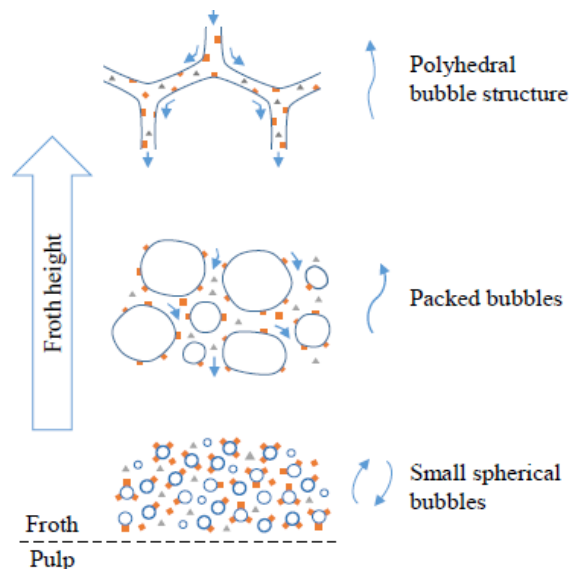


Figura 3.16 - Comparação da estrutura da flotação conforme altura da camada de espuma.
Fonte: Hu (2014).

Na região da superfície, bolhas grandes são propensas à coalescência e ao estouro, onde, toda ou parte da estrutura da bolha se rompe. As partículas que estavam presas à bolha tendem a descer na espuma e podem se reconectar a outras bolhas ou cair de volta na polpa. As bolhas na espuma sobem transportando as partículas aderidas, enquanto a água flui ao longo da borda de Plateau para baixo com as partículas arrastadas. No entanto, o movimento no líquido das partículas que foram arrastadas não é necessariamente para baixo para todas as partículas, de fato, a maioria das partículas de ganga recuperadas no concentrado são arrastadas para cima pelas bolhas ascendentes e transportadas na espuma excedente (HU, 2014).

A estrutura da espuma varia com a altura. A água das lamelas de bolhas drena para as bordas do Plateau e afina as lamelas que deixam o topo da espuma seca. O movimento horizontal da espuma estica as lamelas à medida que o fluxo diverge para transbordar na calha da célula. Esses comportamentos são afetados pela velocidade com que o ar percorre a célula e estimulam a coalescência e o estouro das bolhas. No geral, se a coalescência e o estouro das bolhas

puderem ser controlados e minimizados, a espuma se tornará mais estável e fornecerá maior área de superfície da bolha disponível para partículas aderidas, o que pode maximizar a recuperação (HU, 2014).

3.3.2.3.2 Concentração de Partículas

A concentração de sólidos na fase espuma também é influenciada conforme tamanho das partículas. O aumento da concentração de partículas na polpa aumenta o carregamento de bolhas, o que reduz a mobilidade da fase espuma. Isto conseqüentemente aumenta o tempo de residência da espuma, intervalo no qual pode ocorrer a coalescência, e a espuma torna-se menos estável com o passar do tempo. Por outro lado, o aumento da vazão de possibilita maior número de bolhas, o que pode reduzir os efeitos de coalescência e aumentar a estabilidade, acarretando maior quantidade de sólidos recuperados na espuma.

De acordo com Aktas *et al.* (2008), a estabilidade da espuma em altas concentrações ocorreu devido a um aumento na aglomeração do tamanho das partículas; enquanto a desestabilização em menor concentração de sólidos pode ser atribuída à hidrofobicidade (SHUMBA, 2014). Em geral, aumentos na concentração de espumante resultam em diminuição no tamanho da bolha gerada. No entanto, apesar das densidades de adsorção de espuma mais altas, as bolhas geradas dentro da polpa não diminuem de tamanho acima de uma concentração crítica de coalescência (CCC). Tipicamente, é praticado nas operações de flotação uma concentração de espumante acima da CCC (MORAR, 2010).

3.3.2.3.3 Comportamento da Partícula

Com base na pesquisa realizada sobre os fatores que afetam a estabilidade da espuma, verifica-se que as partículas exercem um papel fundamental. Entretanto, surge uma complexidade adicional, pois partículas na fase espuma são móveis e sua distribuição de partículas aderidas às bolhas muda devido à ocorrência de adesão e descoleção de partículas na espuma. Um estudo de Falutsu e Dobby (1992), verificou que a recuperação da espuma não era muito dependente da espuma, o que sugeriu que a religação de partículas ou desprendimento insignificante ocorre dentro da espuma. Essas observações também são consistentes com a visão de que o desprendimento de partículas ocorre na interface polpa-espuma. De acordo com Morar (2010), o comportamento das partículas na fase espuma em diversas pesquisas relacionadas indica que:

- O desprendimento das partículas deve ocorrer tanto na interface polpa-espuma quanto na fase espuma, em proporções variadas;
- A recuperação da espuma não era muito dependente da espuma, pois com base em observações, verificou-se é insignificante a ocorrência de uma nova adesão (*re-attachment*) ou descoleta na fase espuma. Essas informações são consistentes com a visão de que a descoleta de partículas ocorre na interface polpa-espuma;
- O percentual de material aparente da descoleta mostrou que a interface polpa-espuma desempenha um papel significativo na flotação;
- O desprendimento de partículas ocorre entre duas bolhas coalescentes;
- Os fatores que afetaram a taxa de descoleta foram o tamanho das partículas e a concentração do coletor. A descoleta das partículas foi atribuída à energia cinética das oscilações das lamelas nas bolhas resultantes que se transferem para a partícula e superam a inércia e a energia da adesão entre a partícula e a interface. Essas oscilações são provavelmente amortecidas na presença de espumante (MORAR, 2010);
- A taxa de *re-attachment* de sólidos na fase espuma é baixa, pois a área interfacial ar/água nas bordas do Plateau é pequena e provavelmente saturada (NEETHLING e CILLIERS, 2002).

3.3.2.3.4 Transporte de Espuma

Conforme já mencionado, a concentração de espumante e vazão de ar na célula influenciam no fluxo da área da superfície da bolha. A flotabilidade das partículas e a constante da taxa de flotação, que depende do fluxo da área da superfície da bolha, determinam o fluxo de partículas agregadas que entram na fase espuma. A eficiência do transporte da espuma é diretamente proporcional à estabilidade da mesma (MORAR, 2010). Uma contribuição importante para o transporte de espuma é o fluxo da área de superfície da bolha recuperado para o concentrado, que é um fator influenciado pelo tamanho das bolhas na superfície da espuma e velocidade de transbordo para o *overflow*.

Esta velocidade é influenciada pela quantidade de ar recuperado pelo transbordo, ou não perdido por estouro na superfície da espuma, em relação à quantidade de ar alimentada na célula. Assim, a recuperação de ar relacionada à recuperação de espuma, que varia conforme condições de operação tais como: vazão de ar, altura da camada de espuma e percentual de

sólidos, dentre outros. Esta recuperação de ar pode ser determinada medindo-se o volume da espuma que transborda na calha usando a altura da espuma e medindo a velocidade da espuma (VENTURA-MEDINA *et al.*, 2003).

Desta forma, o transporte de espuma pode ser considerado como uma extensão da estabilidade da espuma, pois nos extremos, o transporte de espuma é inteiramente dependente da estabilidade da espuma. Em condições de instabilidade da espuma, na qual todo o ar que entra na espuma escapa para a atmosfera, a espuma não se moverá em direção à borda. No caso oposto, onde nenhum ar escapa para a atmosfera, a taxa de ar que entra na fase espuma define a taxa de transporte de espuma. Já para a região intermediária, a quantidade de ar perdida para a atmosfera devido ao estouro de bolhas se relacionará com a taxa de transporte de espuma, no entanto, a taxa de transporte de espuma é um agregado de toda a estabilidade de espuma através da célula de flotação. Assim, o transporte de espuma não é necessariamente sensível para refletir uma ampla gama de comportamento de estabilidade de espuma (MORAR, 2010).

3.3.2.3.5 Recuperação de Espuma

A função primária da fase espuma é recuperar seletivamente o material sólido da polpa para o concentrado, que pode ocorrer por dois mecanismos: flotação verdadeira e arraste. O tamanho da partícula determina a capacidade de arraste do material e a quantidade de material arrastado recuperado para o concentrado está intimamente relacionada com a quantidade de água recuperada para o concentrado. É possível determinar a proporção de material recuperado por flotação verdadeira para o concentrado descontando a proporção arrastada da corrente de concentrado. No entanto, é difícil determinar a quantidade de sólidos que entram na espuma por flotação verdadeira, podendo-se recorrer a técnicas indiretas que não são adequadas na prática para determinar uma medida de recuperação de espuma durante a operação de rotina (MORAR, 2010).

3.3.3 Variáveis de Saída

Uma condição desejada para tomada de decisão operacional na flotação seria gerar um modelo matemático abrangente e em tempo real do circuito, possibilitando controlar ou influenciar as variáveis de saída. No entanto, em função da indisponibilidade de diversas medições, desafios

de múltiplas condições de trabalho, e dinâmica de processo que varia no tempo, tem-se um grande desafio devido à complexidade (JOVANOVIĆ e MILJANOVIĆ, 2015; QUINTANILLA *et al.*, 2021). As variáveis de saída que podem ser controladas ou influenciadas pela condição de trabalho da flotação podem ser classificadas em três grupos:

- **Variáveis controladas:** são o objetivo do controle da flotação, que podem proporcionar mudanças nas propriedades de imagem e que influenciam diretamente o desempenho das variáveis objetivo. São incluídas como controladas: nível de polpa, altura da camada de espuma, setpoints de teor, vazão de ar, pH, além dos setpoints de diversas manipuladas, como setpoints de dosagem específica e velocidade de espuma. A seleção de variáveis controladas é mais complexa quando comparada com as variáveis manipuladas, pois as controladas podem ser categorizadas com base em duas funções. A primeira é selecionada para tratar a instabilidade, responsável pela detecção de distúrbios e estabilização de processos conforme limites operacionais. Já a segunda deve ser selecionada por critérios técnicos e econômicos ótimos, considerando pontos de ajuste para otimizar a lucratividade (GONZALEZ, 2018);
- **Variáveis objetivo:** inclui medidas de qualidade e massa dos fluxos de alimentação, concentrado e rejeito, que são entradas para indicadores chave de desempenho (KPI's) na flotação, como a recuperação metalúrgica, recuperação em massa e especificações de qualidade (MARAIS, 2010);
- **Variáveis de visão de máquina:** são propriedades de bolhas utilizando câmeras para medições e algoritmos sofisticados para apresentar a informação desejada, como: tamanho e distribuição de bolha, velocidade de espuma, carregamento de bolhas, velocidade superficial (J_g), taxa de estouro de bolha (*burst rate*), dentre outras.

Devido à complexidade da flotação, é necessário determinar parâmetros e manipular as variáveis controladas para adaptar as condições de trabalho das variáveis de entrada e otimizar o desempenho da flotação.

3.3.3.1 Variáveis Controladas

3.3.3.1.1 Nível de Interface Polpa e Espuma

O nível de polpa é utilizado para controlar a altura da espuma em uma célula de flotação. Este parâmetro é importante pois direciona parte do fluxo de *overflow* flotado, com consequência

tanto na recuperação metalúrgica, quanto na recuperação em massa (MARAIS, 2010). Laurila *et al.* (2002) acrescentam que a medição precisa do nível é muitas vezes problemática, pois a transição polpa/espuma não é nítida e muitas vezes existem variações na densidade da polpa e/ou camadas de espuma muito densas. Grande parte das aplicações adotam instrumentos com princípio de medição ultrassônico, capacitivo ou radar (UUSI-HALLILA, 2014). Já em relação aos atuadores, as opções de válvulas de controle são limitadas devido às condições de grandes variações na vazão. Tem-se muitas aplicações utilizando posicionadores com válvulas dardo, que em algumas condições, operam fora da região ideal de controle, com cerca de 30 a 60% de abertura. Operar uma válvula perto da posição totalmente fechada causa maior desgaste, enquanto operar perto da posição totalmente aberta reduz a faixa de controle da válvula (SHEAN e CILLIERS, 2011).

3.3.3.1.2 Vazão de ar

O controle da vazão de ar na célula de flotação é uma variável muito importante, pois apresenta um rápido tempo de resposta quando submetido a uma variação para otimizar o desempenho da célula, comparado a mudanças na altura da camada da espuma e, por isso, a vazão de ar costuma ser uma variável de controle mais eficaz (Wills e Napier-Munn, 2006). Já comparada com a adição de reagentes, também pode ser priorizada a ação de controle na vazão de ar, sendo incorporada em estratégias de controle em conjunto com controle de nível de polpa e/ou adição de reagentes, como por exemplo, a manipulação simultânea da vazão de ar e do nível de polpa para controlar a recuperação em massa. De acordo com Smith *et al.* (2008), nas células com ar forçado, a possibilidade de controlar o perfil da vazão de ar individual das células ao longo dos estágios também é vantajoso, possibilitando ajustes automáticos que podem variar em função da qualidade do minério alimentado. Já nas células autoaeradas não há controle automático da vazão de ar, que é uma limitação e minimiza o grau de liberdade para implementação de estratégias de controle.

3.3.3.1.3 pH

O pH da polpa afeta as atividades dos íons hidrogênio (H^+) e íons hidróxido (OH^-), que alteram as cargas da superfície da bolha. O controle do pH interfere, tanto na carga elétrica na superfície do minério, quanto no desempenho dos reagentes. Em geral, a adsorção de OH^- na superfície gás-líquido faz com que as bolhas se carreguem negativamente, e o valor absoluto do potencial

zeta diminui com a diminuição da concentração de OH^- . Portanto, a redução do pH da polpa pode diminuir a concentração de OH^- , levando a uma diminuição do valor absoluto do potencial zeta da superfície gás-líquido, com diminuição da força eletrostática de dupla camada entre as bolhas, o que promove a coalescência e, assim, gera bolhas maiores. Para um espumante não iônico, OH^- compete com as moléculas de espumante pela adsorção na superfície da bolha, e uma pequena quantidade de moléculas de espumante pode substituir a adsorção de OH^- na superfície de uma bolha devido às moléculas de espumante terem uma alta concentração de excesso de superfície (WANG *et al.*, 2020). No minério de ferro, o pH pode ser controlado pela adição de soluções básicas, como soda cáustica (NaOH) e/ou substâncias que geram soluções ácidas, como o CO_2 líquido (SALES, 2012). O NaOH é o principal regulador de pH utilizado para minério de ferro e tem a função de elevar o pH para os patamares desejados.

3.3.3.1.4 *Setpoint* de Teor para Concentrado, Rejeito e Dosagem Específica de Reagentes
Os teores do mineral de interesse no concentrado e rejeito desejados são muitas vezes indiretamente controlados modificando os *setpoints* de variáveis manipuladas como a dosagem específica de reagentes, nível de polpa ou vazão de ar. Estes *setpoints* podem ser gerados adotando técnicas de controle avançado, como por exemplo, utilizando controles preditivos baseados em MPC (*Model Predictive Control*) ou fuzzy, que avalia condições de química e tamanho de partícula de alguns fluxos para tomada de decisão baseado em regras.

3.3.3.2 Variáveis Objetivo

3.3.3.2.1 Recuperação Metalúrgica

Para uma célula de flotação, a recuperação metalúrgica representa o efeito combinado das recuperações da fase polpa e espuma. O tempo de residência da espuma deve ser suficiente para permitir que o volume das partículas arrastadas retornem de volta na polpa de modo que a qualidade do concentrado não seja excessivamente comprometida (MARAIS, 2010). A eficiência da flotação é mensurada pela qualidade do teor do concentrado e recuperação do mineral de interesse (MATOS, 2017). Como ambos são fatores metalúrgicos, a eficiência metalúrgica de qualquer operação de concentração pode ser expressa pela curva de recuperação que apresenta a relação inversa característica entre recuperação atingível e teor do mineral útil do concentrado. A melhor condição para otimizar um processo é operar propiciando uma curva de recuperação e o teor na direção conforme indicado na Figura 3.17, que acarreta maximizar

tanto teor quanto a recuperação. Esta otimização pode ser facilitada com esforços para melhor aproveitamento dos recursos, maior estabilidade de processo, investimentos em instrumentação, analisadores *on-line*, *soft sensors*, câmeras na flotação, aplicação de técnicas de controle avançado e otimização em tempo real (RTO).

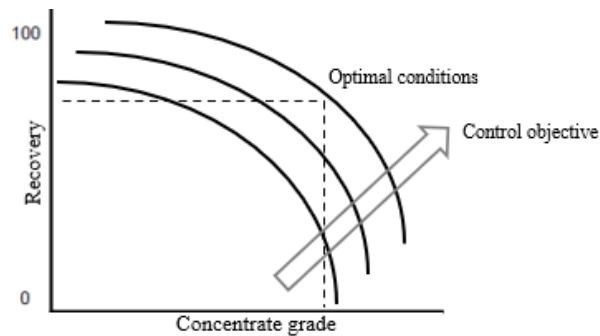


Figura 3.17 - Curva típica de recuperação e teor indicando o sentido de melhoria de performance.
Fonte: Adaptado de Wills e Napier-Munn (2006).

3.3.3.2.2 Recuperação em Massa

A recuperação em massa corresponde à massa do concentrado que transborda na calha do flotado. Este rendimento do circuito de flotação é considerado um indicador chave de desempenho, pois as plantas exigem uma certa produtividade do produto. A recuperação da fase polpa e o tempo de residência da espuma são parâmetros importantes que influenciam na recuperação em massa. De acordo com Marais (2010) e Hadler *et al.* (2010), a recuperação em massa é principalmente manipulada ajustando-se a vazão de ar e a altura da camada de espuma, entretanto, pode estar associada a demais estratégias de controle avançado. Foi demonstrado que otimizando a estabilidade da espuma através de variações na aeração da célula de flotação, o desempenho da flotação pode ser melhorado, seja em termos de teor de concentrado, recuperação mineral ou ambos.

3.3.3.2.3 Especificação do Produto

De acordo com Groenewald (2014), para maximizar a qualidade do produto na etapa de flotação, fatores importantes devem ser considerados, desde a concepção do projeto, relacionado ao *design* adequado da célula e do circuito de flotação, até as condições operacionais, como a operação adequada do estágio de condicionamento, boa seleção, preparação e dosagem de reagentes químicos, fatores que influenciam na seletividade como coleta e drenagem, além de ativos de instrumentação e sistema de controle que potencializam a recuperação metalúrgica.

3.3.3.3 Variáveis de Imagem

Certos efeitos das variáveis do processo e oportunidades de controle na flotação podem ser identificados avaliando propriedades de bolhas nas fases de polpa e espuma utilizando visão de máquina. Um detalhamento envolvendo propriedades de imagem na flotação é descrito conforme capítulo a seguir.

3.4 Variáveis de Propriedades Visuais de Espuma

3.4.1 Ferramentas de Visão de Máquina

O desenvolvimento de sistemas de visão de máquina na flotação tem a finalidade de conectar os recursos da imagem de bolhas visando extrair automaticamente e conhecer o comportamento das propriedades de imagem e características associadas às condições operacionais, possibilitando realizar inferências e controlar para manter o desempenho do processo no nível desejado (ZARIE *et al.*, 2020). Apresenta como vantagem a consistência com que a aparência da espuma pode ser analisada, possibilitando de forma não intrusiva ao processo e com alta disponibilidade, monitorar a espuma em tempo real, permitindo historiar e realizar uma análise consistente que contribui na tomada de decisão da operação e implementar estratégias de controle utilizando recursos de imagem (MARAIS, 2010). A quantidade de aplicações com sistemas de visão de máquina no processamento mineral tem aumentado a sua participação à medida que a tecnologia de visão computacional continua evoluindo (ALDRICH *et al.*, 2010).

Dentre algumas variáveis monitoradas, tem-se o tamanho da bolha, forma, velocidade, estabilidade e carregamento de sólido nas bolhas que afetam a aparência da espuma. O algoritmo *watershed* é comumente utilizado para segmentação das bolhas e para medição da velocidade da espuma rastreando o movimento de bolhas segmentadas pela análise de vários frames consecutivos (MORAR, 2010). Como a espuma é a saída final da célula de flotação, sua aparência pode ser utilizada para inferir várias condições do processo. Entretanto, a inferência de propriedades como teor e recuperação é uma tarefa difícil, pois são influenciados por diversas variáveis do processo (HORN, 2018). Algumas destas propriedades são afetadas por:

- Tamanho da bolha: drenagem da fase espuma e tempo de residência;
- Forma da bolha: além do efeito do tamanho da bolha, a altura da camada de espuma tem um grande impacto no formato da bolha;

- Velocidade espuma: diretamente relacionada à taxa de remoção da espuma;
- Estabilidade da espuma: afetada pela vazão de polpa na célula de flotação.

Além destas propriedades, componentes de cores também são utilizadas na flotação, entretanto, pouco explorada no minério de ferro, sendo mais comum aplicações as propriedades expressas em escala de cinza. Além disso, as mineradoras também têm desenvolvimento próprio de aplicações para análise de imagem, utilizando ferramentas como Python e LabVIEW. Alguns *softwares* comerciais com aplicação de visão de máquina na flotação são ilustrados conforme Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Relação de *softwares* comerciais para análise de imagem

System name	Country
1. Aceflot	Dictuc S.A. (Chile)
2. Froth Image Analyser	IMSOC (Sweden)
3. Froth Sensor	Stonethree (South Africa)
4. Frothmaster Advanced Control Tool (ACT) / FrothSense	Outotec (Finland)
5. JK FrothCam	JKMRC (Australia)
6. OPTVision Froth	Cemi, (Brazil)
7. SmartFroth	University of Cape Town (S. Africa)
8. VisioFroth	Metso-CISA (Finland)
9. Canty	JM Canty (USA)
10. ECS/Process Expert FrothVision	FL Smidth (Denmark)
11. ITS Flotation visualization package	Manchester (United Kingdom)
12. MetCam	SBS, (Switzerland)
13. Plant Vision	KnowledgeScape (USA)
14. Tempotrack	Bluecube (South Africa)
15. WipFroth	WipWare

Fonte: Adaptado de Jovanović e Miljanović (2015).

3.4.2 Parâmetros relacionados a dispersão de gás

Na flotação de espuma, a injeção de ar e sua dispersão em bolhas na polpa tem influência direta nas condições hidrodinâmicas. Nos estudos de Hadler *et al.* (2010) e Hadler *et al.* 2012), a recuperação de ar foi definida como a proporção de bolhas não estouradas na borda superior da célula para o volume total de gás que entra na célula, utilizada como uma medida da estabilidade da espuma e do desempenho da flotação. Foi verificado que para baixa vazão de ar, embora as bolhas fossem adequadamente estabilizadas através da fixação de partículas hidrofóbicas, a baixa mobilidade da espuma acarretava maior estouro de bolhas antes de saírem pelo *overflow*, resultando em baixas recuperações de ar, concentrado de alto teor mas baixas recuperações minerais foram alcançadas. Por outro lado, para espuma vertendo com maior velocidade em

função e maior vazão de ar, juntamente com um maior arraste de água, as bolhas tinham menor adesão a partículas hidrofóbicas, gerando concentrados com baixo teor, mas com recuperação elevada. Além da vazão de ar, outros parâmetros hidrodinâmicos empregados para caracterizar o estado de dispersão de gás na polpa de flotação incluem velocidade superficial do gás (J_g) e *hold-up* (ε_g). Em relação às bolhas geradas, os parâmetros usualmente medidos são o diâmetro médio (d_b) e fluxo superficial (S_b), conforme ilustrados na Figura 3.18 (WANG e LIU, 2021).

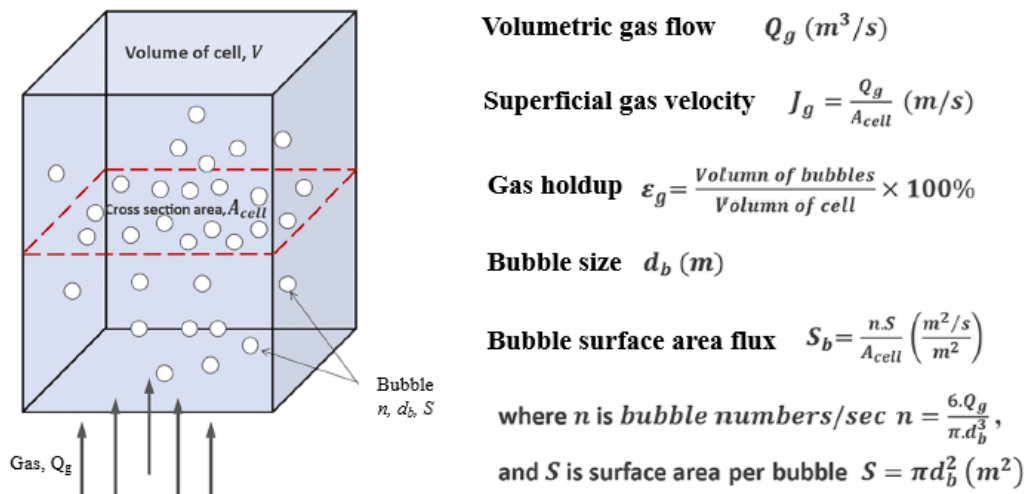


Figura 3.18 - Definições de parâmetros hidrodinâmicos relacionados à dispersão do gás.

Fonte: Adaptado de Wang e Liu (2021).

3.4.2.1 Tamanho de Bolha (d_b)

O tamanho da bolha na superfície da espuma é um produto das condições e desempenho das fases polpa e espuma. As condições da fase polpa que influenciam o tamanho do agregado bolha-partícula na interface polpa-espuma são a entrada de ar e a dispersão das bolhas. Já as condições da fase espuma que influenciam o tamanho da bolha na superfície da espuma são o tempo de residência da espuma e a taxa de drenagem conforme determinado pelas propriedades das lamelas (MARAIS, 2010).

Bolhas muito grandes têm área de superfície menor para a adesão de partículas. Já as bolhas muito pequenas podem não fornecer flotabilidade suficiente para transportar partículas da polpa. O teor na fase polpa também precisa ser ótimo, utilizando energia suficiente para manter as partículas em suspensão e contato constante com as bolhas. As partículas suspensas devem ter impulso suficiente para passar pela lamela líquida ao redor das bolhas. A mistura não deve ser muito intensa, pois isso pode causar a descoleta das partículas das bolhas e desestabilizar a

zona de espuma. O tempo de residência das partículas flotáveis na espuma também deve ser otimizado para permitir a drenagem de partículas pelo arraste, mas ao mesmo tempo não deve ser muito longo para que as partículas aderidas sejam perdidas na espuma (BHONDAYI, 2010). Já a coalescência é considerada um mecanismo que reduz a eficiência da dispersão do ar. A distribuição do tamanho das bolhas depende do equilíbrio entre os fenômenos de coalescência e estouro de bolhas (GRAU *et al.*, 2005). Existem muitos fatores que influenciam o tamanho da bolha, incluindo tipos e dosagem de espumante, vazão de a, defletor das bolhas, características construtivas do rotor e estator.

Recuperar partículas muito finas ou muito grandes por flotação tornou-se um desafio no processamento mineral. A análise das condições hidrodinâmicas mostram que diferentes frações de tamanho de partícula possuem uma região de recuperação ideal, conforme ilustrado na Figura 3.19, representando zonas hidrodinâmicas conflitantes de melhor desempenho de flotação para partículas finas e grossas na flotação (WANG e LIU, 2021).

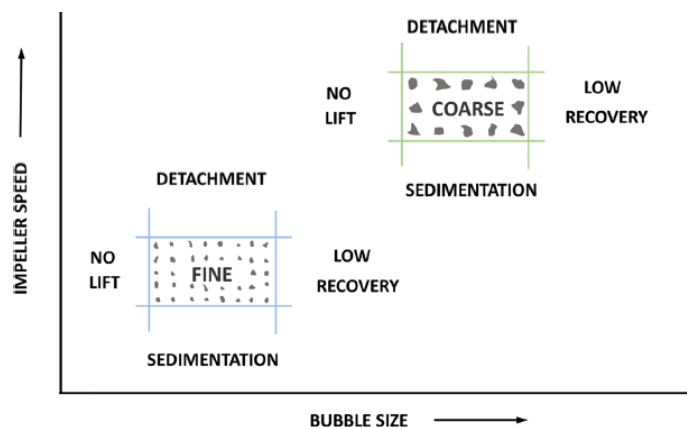


Figura 3.19 - Esquema de diferentes zonas hidrodinâmicas de melhor performance de recuperação para diferentes tamanhos de partículas.

Fonte: Adaptado de Wang e Liu (2021).

3.4.2.2 Diâmetro Médio da Bolha (D_{32} - *Sauter Mean*)

O desempenho do processo de flotação é fortemente influenciado pelo tamanho das bolhas. Portanto, a capacidade de controlar a formação de bolhas de ar com o objetivo de produzir uma faixa de tamanho adequada dentro de uma célula de flotação deve ser considerada (TSHIBWABWA, 2018). Assim, pode-se estimar o tamanho de bolhas em células industriais em função do diâmetro médio, denominado diâmetro médio da bolha de Sauter, que fornece a

mesma razão volume / área interfacial que a distribuição de bolhas de interesse na **fase polpa**. Esta métrica é apropriada para calcular o fluxo da área da superfície (S_b) da bolha. A faixa típica de tamanho de bolha é de 0,5 a 2,5 mm na zona da polpa (GORAIN *et al.*, 1995), conforme Equação 3.2.

$$D_{32} = \frac{\sum_{i=1}^n D_i^3}{\sum_{i=1}^n D_i^2} \quad (3.2)$$

Onde: D_i é o diâmetro da bolha esférico e n é o número total de bolhas esféricas estimadas.

3.4.2.3 Hold up (ϵ_g)

O ar de *hold up* (retenção de ar) dentro de um líquido é entendido como a fração contida de ar volumétrico, conforme Equação 3.3:

$$\epsilon_g = \frac{V_{bubbles}}{V_{bubbles} + V_{liquid}} 100 \quad (3.3)$$

A *hold up* depende do tipo e dosagem do espumante e da velocidade superficial do gás. A velocidade superficial do gás tem um efeito direto, e a medição em função de J_g pode ser empregada para determinar a faixa efetiva de operação de uma máquina de flotação, bem como contribuir na solução de problemas operacionais e de manutenção (TSHIBWABWA, 2018).

3.4.2.4 Altura da Espuma (h_f)

O diâmetro médio aumenta no tamanho da bolha à medida que a altura na fase espuma da interface aumenta. Na camada de espuma, o tamanho de bolha é maior nas seções próximas à superfície, enquanto na base da inferior da interface com a polpa predomina bolhas menores. À medida que uma bolha sobe ao longo da direção y em uma fase espuma, o número de bolhas diminui devido à coalescência das bolhas, pois as bolhas terão mais tempo para coalescer, conforme representado na Figura 3.20. De acordo com Seungwoo (2015), a razão do tamanho da bolha aumenta conforme aumento da altura na camada de espuma, dado pela Equação 3.4.

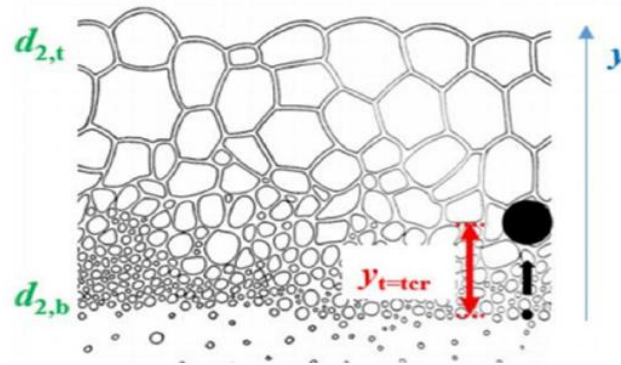


Figura 3.20 - Tamanho de bolhas aumenta ao longo da direção y na fase espuma por coalescência.
Fonte: Seungwoo (2015).

$$N_{d_{2,t}} = N_{d_{2,b}} \exp - C \frac{Y_{t=t_{cr}}}{h_f} 100 \quad (3.4)$$

Onde: C é a constante de decaimento, h_f é a altura da espuma, Y é a distância da base da espuma, $N_{d_{2,t}}$ e $N_{d_{2,b}}$ são os números das bolhas na parte superior e inferior de uma espuma, respectivamente, e $d_{2,t}$ e $d_{2,b}$ são os tamanhos de bolha correspondentes.

3.4.2.5 Velocidade Superficial do Gás (J_g)

A velocidade superficial do gás J_g é uma velocidade linear do fluxo de gás (m/s) que representa o fluxo volumétrico de gás que passa pela área da seção transversal da célula, ou seja, a velocidade efetiva do gás através da fase polpa, determinada pela medição da vazão volumétrica de gás por unidade de área. Devido à sua influência na cinética de flotação e efeito na fase espuma, a velocidade superficial do gás é um parâmetro importante que reflete a capacidade de aeração nas células de flotação. Os valores típicos da velocidade superficial do gás em máquinas industriais de flotação mecânica estão na faixa de 1,3 a 1,8 cm/s, conforme indicado em pesquisas anteriores (WANG e LIU, 2021). Assim, uma faixa operacional apropriada de vazão de ar é necessária para criar um ambiente hidrodinâmico adequado para a flotação. Dentro de uma faixa de operação, a velocidade superficial do gás (J_g) varia linearmente com o *holdup* (ϵ_g). Entretanto, o ϵ_g deixa de apresentar variação linear após um certo valor de J_g , que é considerado como a condição máxima de operação da vazão de gás. O J_g é calculado conforme Equação 3.5 (WANG *et al.*, 2020).

$$J_g = \frac{Q_g}{A_{cell}} \text{ (m/s)} \quad (3.5)$$

Onde: Q_g é a vazão de ar, e A_{cell} é a área da seção transversal da célula.

A Figura 3.21 ilustra a relação da velocidade superficial do gás com o tamanho médio de bolhas (D_{32}) para células mecânicas de flotação de diferentes fornecedores.

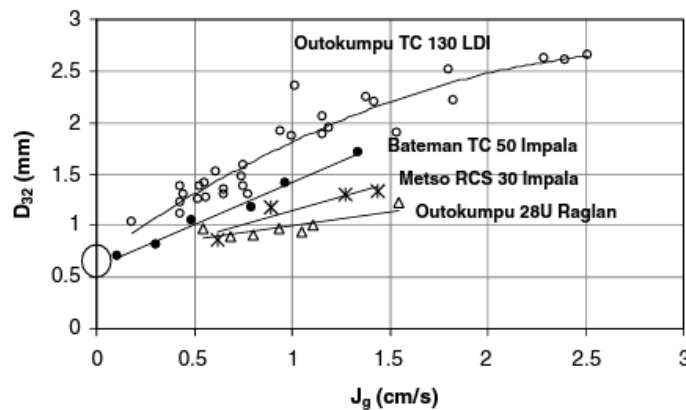


Figura 3.21 - Diâmetro de bolha versus velocidade superficial para quatro tipos de células em três plantas.
Fonte: Nasset *et al.* (2006).

3.4.2.6 Fluxo da Área de Superfície da Bolha (S_b)

O fluxo da área de superfície da bolha é um parâmetro importante que normalmente é empregado para descrever as propriedades de dispersão do gás. Este fluxo representa a área da superfície da bolha por unidade de tempo por unidade de área da seção transversal, incorporando tanto o tamanho da bolha quanto as taxas de fluxo de ar. Supondo que as bolhas têm forma esférica e são iguais, o S_b é definido conforme Equação 3.6 (WANG *et al.*, 2020).

$$S_b = 6 \frac{J_g}{D_{32}} \text{ (m/s)} \quad (3.6)$$

Pela equação, o fluxo da área da superfície da bolha é uma função tanto do tamanho da bolha quanto da taxa de fluxo de ar. Para uma vazão de ar constante, o fluxo da área da superfície da bolha aumenta com a diminuição do tamanho da bolha. Zhu *et al.* (2019) relatou esse comportamento e descobriu que o fluxo da área da superfície da bolha aumentava com o aumento da concentração do espumante a uma taxa de fluxo de ar constante. No entanto, a taxa de fluxo de ar tem um efeito significativo no tamanho da bolha, especialmente na diferente

concentração ou entrada de energia mecânica, o efeito da taxa de fluxo de ar no tamanho da bolha é diferente. Isso resulta no fluxo da área da superfície da bolha sendo uma função extremamente complexa da taxa de fluxo de ar.

3.4.2.7 Velocidade da Espuma (u_n)

A velocidade na superfície da espuma refere-se à velocidade do movimento horizontal da espuma em direção à calha de transbordo. A velocidade refere-se ao tempo de residência da espuma e é principalmente manipulada pelo nível de polpa e configurações de vazão de ar (MARAIS, 2010).

As câmeras posicionadas perto da borda de cada célula fornecem imagem para cálculo da velocidade da espuma (u_n). Já a altura acima da superfície livre (Z_n) pode ser calculada utilizando medidor de nível de espuma ou modelada por polinômios em função da velocidade, entretanto é complexo. Estas propriedades são representadas conforme Figura 3.22.

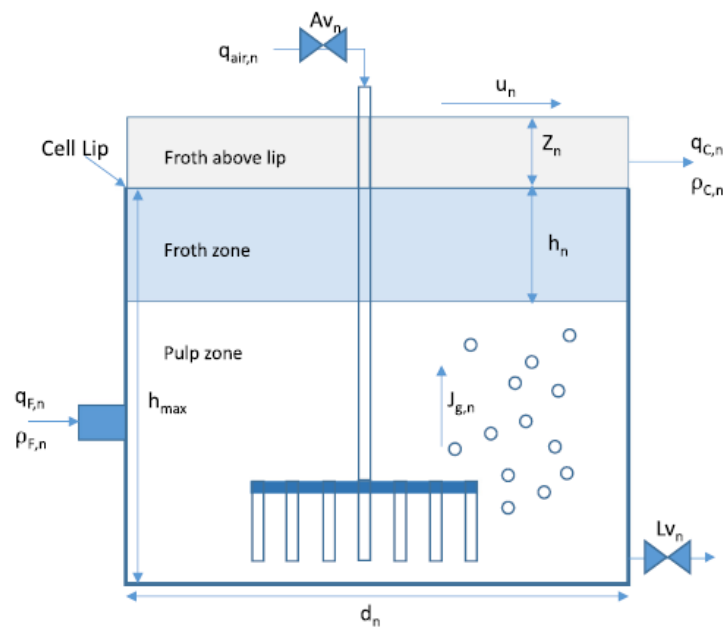


Figura 3.22 - Ilustração de parâmetros da flotação.
Fonte: Adaptado de Steyn e Sandrock (2021).

Como a velocidade da espuma u_n é afetada pela profundidade da espuma, espera-se um termo de interação com J_g . A velocidade da espuma, ou mobilidade da espuma, aumenta à medida que J_g aumenta (Hadler e Cilliers, 2009), $\partial u / \partial J_g > 0 \forall 0 \leq J_g \leq \infty$. Espera-se que esta relação

não possa permanecer linear e, eventualmente, deve se achatar e possivelmente reduzir com uma maior adição de ar. Consequentemente, termos lineares e de segunda ordem para J_g são esperados no modelo dado conforme Equação 3.7.

$$\hat{u}_n = a_{1,n}J_{g,n} + a_{3,n}h_n^2 + a_{5,n}J_{g,n}h_n \quad (3.7)$$

3.4.2.8 Altura da Espuma acima da Borda (Z_n)

A espuma começará a se formar e continuará subindo acima da borda à medida que o ar é introduzido na célula. Hadler e Cilliers (2009) explicam que S_b aumenta para promover a formação de espuma, mas que a estabilidade da espuma acabará por se deteriorar a um ponto em que Z é novamente zero em fluxo de ar mais alto. Foi observado por Hadler *et al.* (2012), uma parábola indicando o efeito da profundidade da espuma na recuperação do ar. Como a recuperação do ar depende da altura da espuma, postula-se que o efeito da profundidade da espuma em Z também será parabólico, conforme Figura 3.23. Portanto, como o *Peak Air Recovery (PAR)*, a altura acima da borda forma uma parábola tanto para J_g quanto para a altura da camada de espuma até a borda h . Um termo de interação também é esperado conforme Equação 3.8.

$$\hat{Z}_n = b_{1,n}h_n + b_{2,n}J_{g,n} + b_{3,n}h_n^2 + b_{4,n}J_{g,n}^2 + b_{5,n}J_{g,n}h_n \quad (3.8)$$

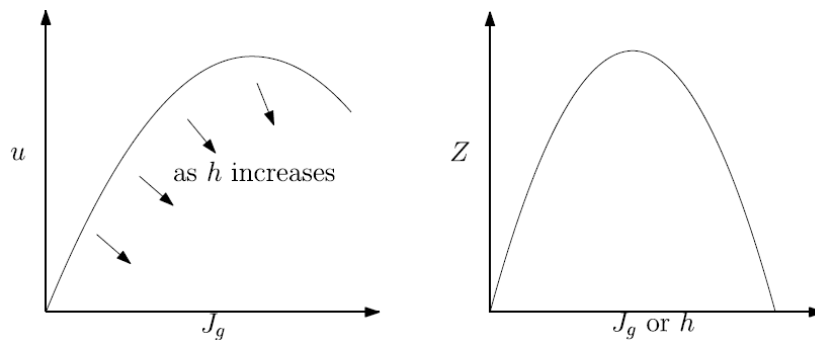


Figura 3.23 - Modelos simplificados para velocidade u e altura espuma acima da borda Z .
Fonte: Steyn e Sandrock (2021).

3.4.3 Formato das Bolhas

De acordo com a investigação realizada por Koh *et al.* (2009), além da hidrofobicidade, o formato da bolha também desempenha um papel na determinação da flotabilidade de uma partícula (MORAR, 2010). A forma das bolhas na superfície da camada de espuma é determinada principalmente pela profundidade da camada de espuma. Agregados de partículas-bolhas com conchas de bolhas aquosas e lamelas que são espessas e aquosas têm uma aparência muito mais arredondada devido ao fluido que preenche os espaços entre eles. À medida que as camadas se tornam mais finas devido à drenagem da água, os agregados se empurram e competem por espaço, assumindo uma forma poliédrica. A drenagem contínua também pode fazer com que o filme entre duas bolhas adjacentes se rompa e forme uma única bolha maior. Semelhante ao tamanho da bolha, os principais contribuintes da fase espuma para a forma da bolha da camada de espuma superior são o tempo de residência da espuma e a taxa de drenagem devido às propriedades das lamelas (MARAIS, 2010). O afinamento e a ruptura do filme líquido podem ocorrer em cerca 0,1 segundos por partículas arredondadas ou esféricas, porém partículas com bordas afiadas rompem o filme líquido em cerca de 0,02 segundos (CHEN, 2012).

Na interface polpa-espuma as bolhas apresentam um empacotamento hexagonal fechado com tamanhos semelhantes em sistemas monodispersos. À medida que as camadas de bolhas se acumulam, a água escoar entre as bolhas e as estruturas poliédricas se desenvolvem. A forma da estrutura poliédrica resultante consiste em tetradecaedros compactados. Weaire e Phelan (1994) mostraram que uma estrutura alternada de dodecaedros e tetradecaedros, é mais eficiente e ótima ao empacotar bolhas de igual volume.

3.4.4 Carregamento de Sólidos na Superfície da Espuma (*Solids loading*)

A quantidade de sólidos aderidos às bolhas na superfície da espuma (*solids loading*) está relacionada à recuperação de sólidos flotados. Este pode ser um parâmetro importante a ser considerado em estratégia de otimização de espuma baseada em modelo (MORAR, 2010). Esta concentração de sólidos ligados às bolhas na superfície da espuma afeta o aspecto da superfície da espuma. Quando mais sólidos estão presentes na superfície da bolha, a superfície é mais

definida, enquanto uma baixa carga de sólidos resulta em bolhas transparentes ou translúcidas, ou bolhas com “janelas”.

No contexto da superfície da espuma quando duas bolhas adjacentes coalescem resulta em um aumento na carga na lamela da superfície da espuma devido à concentração dos sólidos à medida que a razão entre a área da superfície e o volume diminui. A Figura 3.24-a mostra as linhas de varredura do valor do pixel em escala de cinza em uma bolha à medida que ela se coalesce com uma bolha adjacente. A variação na superfície da espuma permanece baixa antes, durante e após o evento de coalescência. No entanto, se a bolha na superfície da espuma coalescer com uma bolha adjacente abaixo da bolha na superfície da espuma, nenhuma partícula extra é adicionada às lamelas superiores, enquanto o ar adicionado diminui a razão entre a área da superfície e o volume da bolha.

Desta forma, enquanto a razão entre a área total da superfície e o volume da bolha diminui, o tamanho da lamela na superfície superior da bolha aumenta, resultando na diminuição da carga na superfície superior da bolha, conforme indicado pela mudança de textura na Figura 3.24-b. A variação na superfície da espuma aumentou à medida que o tamanho da bolha aumentou devido à coalescência com bolhas abaixo da superfície. Na superfície da espuma, as bolhas maiores presentes formaram-se a partir de mais eventos de coalescência do que as bolhas menores presentes. Dada a existência de mecanismos de coalescência que podem aumentar ou diminuir a carga de sólidos na lamela da superfície da espuma, a carga de sólidos na superfície da espuma mudará em função do tamanho da bolha.



Figura 3.24 - Sequência de imagens mostrando linhas na superfície de uma bolha quando ocorre coalescência (a) com bolha adjacente na superfície; (b) com bolha adjacente abaixo da superfície da espuma.

Fonte: Adaptado de Morar (2010).

3.4.5 Estabilidade da Espuma

De acordo com Marais, (2010), a estabilidade da espuma é definida como a quantidade de estouros de bolhas por unidade de área na camada superior da espuma. A instabilidade pode ser atribuída a bolhas não estáveis, que possuem uma estrutura fraca e estouram, ou bolhas muito estáveis e que não podem suportar a carga mineral pesada que leva ao colapso. A utilização de recursos de visão de máquina possibilita distinguir entre esses dois eventos, pois o tamanho, a forma e a cor da bolha podem revelar a origem da instabilidade.

É amplamente conhecido que a estabilidade da espuma depende muito da vazão de ar para a célula devido ao seu efeito nas características da fase espuma, principalmente na taxa de drenagem (HADLER e CILLIERS, 2009). O desempenho da fase espuma é geralmente atribuído ao efeito da estabilidade da espuma. Isso abrange o comportamento da espuma em relação à coalescência das bolhas e sua capacidade de transportar sólidos e líquidos para o *overflow* da célula. A estabilidade da espuma afeta tanto a recuperação da flotação quanto a seletividade. Espumas estáveis tendem a arrastar uma concentração significativa de material de ganga, o que às vezes causa uma queda no teor de concentrado. Por outro lado, espumas menos estáveis tendem a quebrar e fazer com que o material arrastado seja drenado da espuma, aumentando o teor, entretanto, diminuindo a recuperação da espuma (MORAR, 2010).

O espumante tem a função de adsorver na interface ar-água para diminuir a tensão superficial da água, estabilizando a espuma quando atinge o topo da polpa. Se as bolhas estourarem quando atingirem esse ponto, qualquer mineral que elas carreguem voltará para a polpa. O papel principal do espumante é estabilizar a espuma formada por tempo suficiente para que o concentrado seja removido da célula de flotação. Uma vez removida da célula, a espuma deve quebrar para permitir que as partículas minerais sejam repolpadas novamente para etapas posteriores (MATOS, 2022).

Efeito da estabilidade da espuma na recuperação da espuma: de acordo com Zanin *et al.* (2009), espumas estáveis garantem altas recuperações de espuma, enquanto espumas que mostram rápido colapso de bolhas e variação de volume são responsáveis por recuperações de espuma mais baixas. A recuperação da zona de espuma limitava significativamente a recuperação geral

da célula de minerais. Assim, espumas estáveis são desejáveis na flotação (HARRIS *et al.*, 2013).

3.4.5.1 Efeito Operacional da Vazão de Ar

A fase espuma consiste em grande parte de uma coleção de agregados de partículas de bolhas, com pequenas bolhas formando uma espuma mais estável do que bolhas maiores. Essas bolhas são formadas quando o ar é alimentado na zona de coleta da célula de flotação; as bolhas formadas então sobem através da fase polpa atraindo e se ligando a partículas hidrofóbicas que são eventualmente recuperadas para o *overflow*. A relação entre o *hold-up* e a vazão de ar é utilizada para a caracterização hidrodinâmica e é mostrada na Figura 3.25 (SHUMBA, 2014). Com um menor *hold-up*, a relação da vazão de ar e *hold-up* é linear formando um fluxo laminar, enquanto para um elevado *hold-up*, o fluxo se torna turbulento. A transição entre fluxo linear e turbulento geralmente ocorre entre 15 e 20% de *hold-up* em sistemas de flotação. No fluxo laminar as bolhas produzidas têm tamanho uniforme e sobem através da polpa com velocidade uniforme. Já o fluxo turbulento produz bolhas maiores que ascendem rapidamente pela zona de coleta, deslocando a lama e as bolhas finas para baixo.

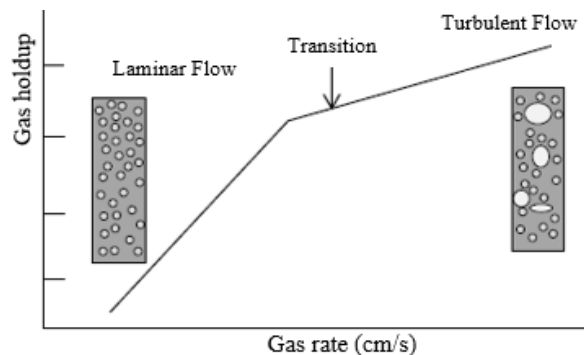


Figura 3.25 - Relação entre o hold-up e vazão de ar mostrando as duas principais regiões de fluxo.

Fonte: Adaptado de Finch *et al.* (2007).

Hadler e Cilliers (2009) descobriram que à medida que a taxa de ar superficial aumentava, a estabilidade da espuma passava por um máximo ou pico que correspondia a um pico na recuperação do ar (Peak Air Recovery - PAR). Para vazão de ar **inferior** ao PAR, a espuma produzida era altamente carregada e formava bolhas com baixa mobilidade, que eram propensas a estourar antes de transbordar na borda da célula. Estas espumas tiveram baixas recuperações de ar e minerais, mas altos teores de concentrado. Em condições de taxas de ar **superior** ao

PAR, o fluxo da espuma era livre, mas com bolhas com baixa carga de partículas, resultando também em bolhas estourando antes de transbordar. Essas espumas produziram recuperações minerais moderadas, mas baixos teores de concentrado. Em taxas de ar **intermediárias** houve equilíbrio entre o carregamento de bolhas e a mobilidade da espuma, o que resultou na formação de uma espuma estável. Como resultado, um pico na recuperação do ar e uma alta recuperação mineral e um teor de concentrado aceitável, conforme Figura 3.26.

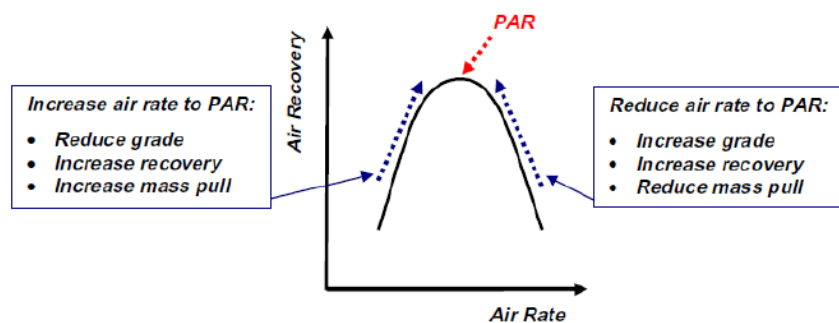


Figura 3.26 - Esquema mostrando o efeito geral da otimização da recuperação de ar no desempenho da flotação.
Fonte: Hadler *et al.* (2010).

3.4.5.2 Efeito Operacional da Altura da Camada de Espuma

Mudanças na altura da camada da espuma podem ser utilizadas para alterar as recuperações e o teor do concentrado final, tendo efeito sobre a estabilidade da fase espuma. Foi observado que o aumento da altura da espuma diminui a quantidade de água que é recuperada no concentrado. Pesquisadores anteriores também notaram que existe uma relação linear negativa entre esses dois fatores. O aumento da altura da espuma aumenta o tempo de retenção da espuma, o que permite uma maior drenagem do filme líquido da espuma de volta para a fase polpa. As lamelas e as bordas de Plateau tornam-se mais finas, causando mais coalescência de bolhas e eventos de ruptura que são indicativos de uma espuma menos estável (SHUMBA, 2014). Em uma amostragem industrial conduzida por Hadler *et al.* (2012) em um concentrador de platina, verificou-se que ao aumentar a altura da espuma, a recuperação do ar passou por um pico, a uma taxa de ar constante. A profundidade de espuma na qual o PAR foi observado era dependente da taxa de ar, com taxas de ar baixas resultando em profundidade de espuma mais rasa do que taxas de ar mais altas, conforme Figura 3.27.

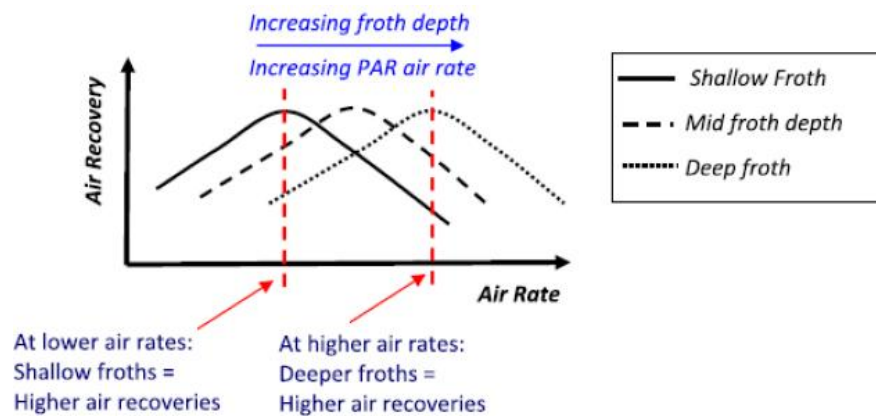


Figura 3.27 - Relação da altura da camada de espuma, vazão de ar e recuperação de ar.

Fonte: Hadler *et al.* (2012).

Efeito do ar e da profundidade da espuma no arraste: Zheng *et al.* (2006) mostraram que o aumento da taxa de ar aumentou o arraste devido ao aumento da água reportada ao concentrado. Da mesma forma, foi demonstrado que o aumento da camada de espuma (definida como a distância entre a interface polpa-espuma e a borda da célula de flotação) diminuiu o arraste principalmente como resultado do maior tempo de retenção da espuma e mais drenagem de partículas hidrofílicas. Também foi observado que o ar e a profundidade da espuma interagem fortemente entre si e influenciam o arraste alterando o tempo de residência da espuma, a estrutura da espuma e as propriedades da espuma. O teor do overflow é fortemente dependente da estabilidade da espuma, uma vez que a recuperação da ganga arrastada é diretamente proporcional à água recuperada (NEETHLING e CILLIERS, 2002).

3.4.5.3 Importância de Vazão de Ar e Camada de Espuma

Além dos espumantes, as partículas sólidas também afetam as características de estabilidade da espuma dentro de uma espuma trifásica. Os efeitos das partículas aderidas na estabilidade da espuma são bem conhecidos, mas não bem compreendidos (MORAR, 2010).

Diversos estudos da vazão de ar e profundidade de espuma na estabilidade e recuperação do overflow confirmam a importância do efeito e interação destes parâmetros no controle da flotação, conforme resumo listado a seguir.

- Fluxo da área de superfície da bolha: Gorain *et al.* (1995) mostraram que a constante da taxa de flotação em uma célula de flotação industrial aumenta quase linearmente com o fluxo da área de superfície da bolha;

- Interação entre o ar na fase de polpa e o efeito na fase de espuma: o aumento da camada de espuma resulta na diminuição da recuperação de espuma. Da mesma forma, foi demonstrado que o aumento da taxa de ar aumenta a taxa de flotação na fase de polpa, mas isso é prejudicial à fase de espuma porque reduz a recuperação de espuma (HARRIS *et al.*, 2013; VERA *et al.*, 1999);
- Efeito de interação entre o ar e a profundidade da espuma: Harris *et al.* (2013) observaram que o aumento da taxa de ar aumentou a velocidade da espuma, mas também diminuiu a altura da espuma acima da borda da célula e, portanto, a profundidade total da espuma;
- Efeito da profundidade de espuma e a recuperação de ar: de acordo com Pérez-Garibay *et al.* (2010) e Hadler *et al.* (2012), a relação entre a profundidade de espuma e a recuperação de ar medida em uma coluna em escala de laboratório, sugerindo que a recuperação de ar diminuiu conforme a profundidade de espuma aumentou;
- Velocidade da espuma: a eficiência do transporte da espuma é diretamente proporcional à estabilidade da mesma (MORAR, 2010), que é um fator influenciado pelo tamanho das bolhas na superfície da espuma e velocidade de transbordo para o overflow. Esta velocidade é influenciada pela quantidade de ar recuperado pelo transbordo, ou não perdido por estouro na superfície da espuma, em relação à quantidade de ar alimentada na célula.

3.4.5.4 Recuperação de Ar

Outro método que tem sido utilizado para medir a estabilidade da espuma é o de medição da recuperação de ar (α) que foi proposto e posteriormente modificado. A recuperação de ar é a fração de ar que transborda na borda da célula de flotação como bolhas não estouradas e pode ser calculada a partir da Equação 3.9 (SHUMBA, 2014).

$$\alpha = \frac{V}{a} = \frac{v_f h_{lip} w}{Q_a} \quad (3.9)$$

Onde: V é o volume de espuma transbordante, Q_a é a taxa de alimentação de ar para a célula de flotação, v_f é a velocidade da espuma na superfície superior, h_{lip} é a altura da espuma transbordando na borda e w é o comprimento da borda que transborda. Uma alta recuperação

de ar, portanto, indica uma espuma mais estável. O complemento da recuperação de ar ($1 - \alpha$) dá a fração de ar que sai por estouro. A operação de uma célula na taxa de ar que produz o pico de recuperação do ar (PAR), pode obter uma melhora no desempenho da recuperação metalúrgica. Um aumento do recuperação em massa por meio de um fluxo de ar mais alto, aumenta a recuperação mineral na medida em que o pico da taxa de ar ainda não é alcançado (HADLER *et al.*, 2010).

3.4.5.5 Taxa de Estouro de Bolhas (*Bubble Burst Rate*)

O *bubble burst rate* refere-se à taxa de colapso de bolhas em bolhas menores, o que desempenha um papel importante na evolução da bolha, pois o equilíbrio entre o rompimento e a coalescência determina a distribuição do tamanho das bolhas. A ruptura da bolha é o resultado de instabilidades após a deformação inicial da bolha, e o equilíbrio entre a tensão hidrodinâmica e a tensão superficial determina se uma ruptura ocorrerá (WANG *et al.*, 2020). O *burst rate* pode ser medido analisando quadros sucessivos e encontrando a taxa de mudança nas imagens conforme Figura 3.28 apresentada por Nakhaei *et al.* (2019).



Figura 3.28 - Medição de estabilidade da espuma em dois frames consecutivos.
Fonte: Adaptado de Nakhaei *et al.* (2019).

A diferença média absoluta entre os dois quadros pode então ser determinada e forma outra medida da estabilidade da espuma. As grandes bolhas formadas a partir da coalescência são geralmente muito mais fracas e propensas a estourar. A taxa na qual essas bolhas estouram pode ser usada como um indicador da estabilidade da espuma, onde quanto mais eventos de estouro indicam uma espuma mais instável (SHUMBA, 2014). A Figura 3.29 também ilustra uma região onde ocorreu o *bubble burst* de espuma obtidas por Morar *et al.* (2012).

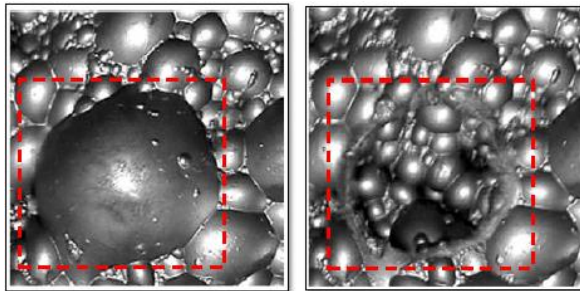


Figura 3.29 - Frames consecutivos em região onde ocorreu colapso de bolhas.
Fonte: Adaptado de Morar *et al.* (2012).

3.4.5.6 Taxa de Coalescência de Bolha

Espumas instáveis são caracterizadas pelo aumento da coalescência devido ao afinamento das lamelas entre as bolhas. A taxa na qual as bolhas coalescem em função da distância da interface polpa-espuma pode então ser usada como um indicador da estabilidade da espuma. O tamanho médio das bolhas em várias alturas de espuma é calculado usando o diâmetro médio de Sauter (d_{32}). Este método foi utilizado por Ata *et al.* (2003), que descobriram que havia um aumento no tamanho da bolha à medida que a distância da interfase aumentava conforme mostrado na Figura 3.30. Shumba (2014) também identificou neste estudo que a presença de ganga diminuiu a taxa de coalescência que foi atribuída a um aumento na viscosidade da polpa entre as bolhas que bloqueou os canais entre as lamelas e impediu a drenagem.

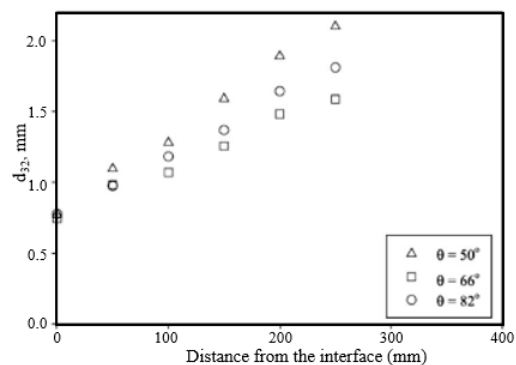


Figura 3.30 - Variação do diâmetro médio de Sauter da bolha em função da altura da camada de espuma para diferentes hidrofobicidades.

Fonte: Ata *et al.* (2003).

3.4.5.7 Pico de Correlação Cruzada

Hatfield (2006) desenvolveu medidas de estabilidade baseadas em visão de máquina, comparando uma medida da semelhança entre as duas imagens utilizado é uma técnica de correlação cruzada, realizada tomando uma transformada de Fourier de ambas as imagens,

conforme mostrado na Figura 3.31-a e Figura 3.31-b. A transformada de Fourier da primeira imagem é multiplicada pelo conjugado complexo da transformada de Fourier da segunda. O resultado é então transformado no domínio espacial e normalizado pela energia média das duas imagens, conforme mostrado na Figura 3.31-b. Esta operação resulta em matriz que possui o pico de correlação cruzada devido ao deslocamento espacial entre as duas imagens.

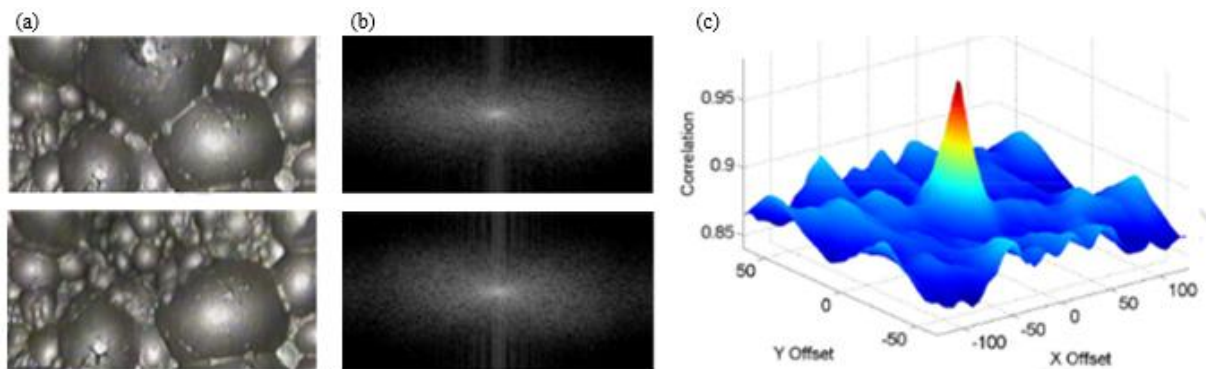


Figura 3.31 - Pico de correlação cruzada (a) Imagem bolhas; (b) Transformada Fourier; (c) Domínio do espaço para o Pico de correlação cruzada.

Fonte: Adaptado de Gorain *et al.* (2000) e Morar (2010)

Normalmente, dois tipos de mudanças ocorrem em imagens consecutivas de espuma; deformação, que é causada por bolhas que se movem em taxas diferentes umas das outras, o que pode ser uma função da mobilidade da espuma e da ruptura do filme superficial ou da lamela. Como a ruptura do filme superficial causa uma grande mudança no valor do pico de correlação, o pico de correlação pode ser usado para inferir a estabilidade da espuma.

3.4.6 Recomendações Práticas dos Sistema de Visão de Máquina na Flotação

Existem algumas restrições físicas relacionadas à configuração de um sistema de visão de máquina. Algumas premissas devem ser adotadas durante a especificação, como por exemplo, considerar presença de vibração, partículas em suspensão, condição de iluminação, infraestrutura de rede de comunicação, nivelamento da célula e local de instalação que tenha velocidade representativa. Os dados necessários para a construção do modelo baseados em propriedades de espuma devem incluir a maioria dos estados operacionais para garantir que a variabilidade do processo seja capturada.

É indicado realizar alterações nos pontos de ajuste para avaliar a resposta das propriedades de imagem em função das variáveis operacionais. Portanto, sugere-se que a construção do modelo seja feita em dados históricos por um longo período de tempo. É importante considerar condições de manutenção, como por exemplo, realizar a limpeza da lente da câmera. O modelo implementado também deve ser avaliado, visto que é influenciado pela variabilidade do minério, que é um distúrbio difícil de ser detectado (MARAIS, 2010).

A análise de algumas propriedades visuais em função das condições de processo operacionais do circuito, propiciam a tomada de ação em variáveis operacionais que irão influenciar positivamente alguma variável objetivo, conforme ilustrado na Tabela 3.3, para aumentar a recuperação de sólidos e teor de concentrado em uma célula de flotação.

Tabela 3.3 - Recomendação de ajustes para mudanças de variáveis operacionais visando maximizar a recuperação de sólidos e teor de concentrado

Solids conditions	Solids recovery		Concentrate grade	
	Stability factor	Operating variable ^a	Stability factor	Operating variable
High hydrophobicity	↑ Bubble size	↑AR, ↑FH	↑ Solids loading	↓AR, ↓FH
High concentration of solids (Copper rougher 1)	↓ Solids loading	↑FH	↑ Bubble size	↑AR, ↑FH
High hydrophobicity	–	↑FH, ↓FC	–	↑AR, ↑FC
High hydrophobicity	↑ Burst rate	↑AR, ↓FC	↑ Burst rate	↑AR, ↓FC
Low concentration of solids (Copper rougher 3)	↑ Solids loading	↓AR, ↓FH	↓ Solids loading	↑AR, ↑FH
Low hydrophobicity	↓ Bubble size	↓FH	↑ Bubble size	↑FH
Low hydrophobicity	–	↑AR, ↓FH, ↑FC	–	↑FH, ↑FC
Low hydrophobicity	↑ Burst rate	↑AR, ↓FH, ↑FC	↑ Burst rate	↑AR, ↓FH, ↑FC
High concentration of solids (Platinum rougher 1)	↑ Solids loading	↓AR, ↑FH, ↓FC, ↑AC	↑ Bubble size	↑AR, ↑AC
Low hydrophobicity	–	↑AR, ↓FH, ↑FC, ↓AC	–	↑AR
Low hydrophobicity	↓ Burst rate	↓FH, ↑FC	↑ Burst rate	↑FH, ↓FC
Low concentration of solids (Platinum rougher 3)	↑ Bubble size	↑FH, ↓FC	↑ Solids loading	↑FH, ↓FC, ↑AC
	–	↑FH, ↑FC	↓ Bubble size	↑FH, ↑FC
			–	↑FC

^a AR – Air rate; FH – Froth height; FC – Frother concentration; AC – Activator.

Fonte: Adaptado de Jovanović e Miljanović (2015).

3.5 Monitoramento do Desempenho da Flotação

O aumento da complexidade dos processos industriais traz consigo a crescente importância do monitoramento do processo para garantir a aderência dos principais indicadores de desempenho da planta, visto que é difícil desenvolver um modelo preciso que caracterize todos os fenômenos físicos e químicos que ocorrem. Monitorar este desempenho, ao contrário do monitoramento de falhas do processo, não visa apenas monitorar o processo em busca de condições de falha, mas também de oportunidades de melhorias (GROENEWALD, 2014). A detecção de falhas usando técnicas baseadas em conhecimento geralmente é um processo heurístico baseado no

conhecimento disponível do comportamento do sistema e na experiência de operadores experientes da planta. No entanto, a criação da base de conhecimento do processo é sempre uma operação demorada e difícil, exigindo o acúmulo do aprendizado de especialistas em longo prazo.

De acordo (GROENEWALD, 2014), a indústria de processamento mineral tem desenvolvido modelos baseados em dados, melhorias dos existentes, e técnicas de análise de dados estatísticos relacionados ao monitoramento do desempenho do processo, entretanto, as aplicações ocorrem de forma isolada, não fazendo parte de uma metodologia. Grande parte é realizada utilizando gráficos de tendências de dados brutos de instrumentos e Indicadores Chave de Desempenho (KPI) de processo calculados, com técnicas mais simples de análise de dados estatísticos e empregando causa raiz para problemas que influenciam nos indicadores de negócio da planta.

Já para facilitar o diagnóstico de falhas de processo, pode-se utilizar sistemas de monitoramento e identificação de gargalos online nas etapas de processo, que auxiliam na compreensão dos fatores e tomadas de decisões que impactam na estabilidade e desvios nos indicadores de qualidade e produtividade, proporcionando também identificar oportunidades de investimentos para instrumentação e controle de processo na flotação. O conjunto de dados que contém as informações do processo pode ser utilizado para modelagem e monitoramento do processo, utilizando planejamento de experimentos e algumas técnicas de controle estatístico, como por exemplo, Controle Estatístico de Processo, Análise de Componentes Principais e Análise Multifator.

3.5.1 Instrumentação aplicada à Flotação

A compreensão da função das variáveis da flotação é essencial para maximizar a eficiência operacional, minimizar custos e garantir a qualidade, onde cada variável desempenha um papel singular no contexto do processo de mineração.

Para monitorar o desempenho e gerar ações de controle de processo, é necessário que a flotação tenha disponível uma instrumentação conectada no sistema de controle pelo *Programmable*

Logic Controller (PLC), e estes conectados em ferramentas que armazenam dados históricos das medições, como o *Plant Information Management System* (PIMS). Esta instrumentação inclui medidores, analisadores, atuadores e sensores virtuais, conforme ilustrado na Figura 3.32, indicando uma relação da instrumentação aplicada ao controle de processo na flotação.

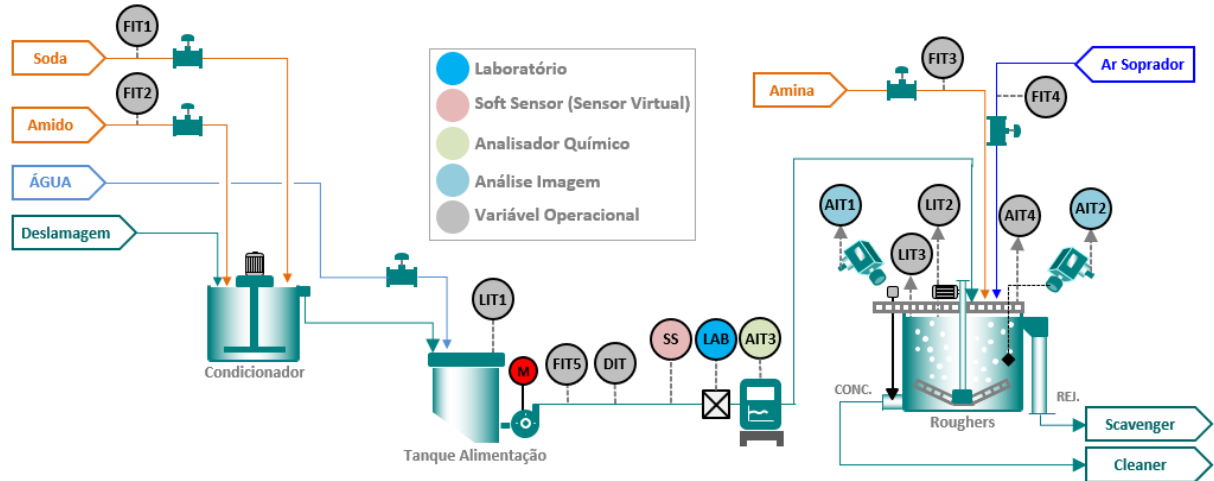


Figura 3.32 - Medições aplicadas no controle de processo na flotação de minério de ferro.
Fonte: Autor.

A relação de medições ilustrada na figura anterior é descrita conforme Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Medições no circuito de flotação de minério de ferro

Instrumento	Tag	Medição
Câmera fase espuma	AIT1	Análise imagem fase espuma
Câmera fase polpa	AIT2	Análise imagem fase polpa
Analisador online	AIT3	Analisador química online (%)
pH	AIT3	Analisador de pH
Nível laser	LIT1	Nível de polpa tanque alimentação (%)
Nível radar espuma	LIT2	Nível da espuma flotação (%)
Nível radar polpa	LIT3	Nível da interface polpa flotação (%)
Densímetro	DIT	Densidade alimentação (t/m ³)
Vazão modificador	FIT1	Modulador de pH (m ³ /h)
Vazão depressor	FIT2	Depressor de minerais de Fe (m ³ /h)
Vazão coletor/espumante	FIT3	Coletor de quartzo (SiO ₂) e espumante (m ³ /h)
Vazão de ar	FIT4	Controle da vazão de ar (m ³ /h)
Vazão alimentação	FIT5	Vazão alimentação flotação (m ³ /h)
Válvula manual	LAB	Coleta de amostra para análise laboratório
Sensor virtual	SS	Sensor virtual de teor e/ou granulometria (%)

Na flotação, algumas variáveis medidas têm maior importância no desempenho quando comparadas às demais. Um modo de avaliar esta importância é criando um **Padrão de Processo** para controle da flotação, que tem como objetivo estabelecer uma relação de variáveis como

requisitos básicos para controle com base nos padrões estabelecidos e melhores práticas de estratégia de controle e monitoramento dos efeitos, controlados ou observados, na flotação. Os requisitos podem ser classificados em:

- **Requisito Básico:** variável de processo recomendada para padrão de controle de processo da etapa unitária. Exemplo: vazão e densidade alimentação, nível célula, pH, tamanho bolha, velocidade espuma, dentre outros;
- **Requisito Não Básico:** variável de processo desejada para Padrão de Controle de Processo para controle de processo da etapa unitária. Exemplo: analisador online de teor e granulometria nos fluxos de alimentação, concentrado, rejeito.

Uma vez definido o padrão, ele pode ser comparado ao cenário existente da planta para fins de avaliação. O padrão das variáveis para o controle do processo de flotação pode ser medido de acordo com a Equação 10, onde: %PP = padrão do processo, i = variável do processo, n = enésima variável do processo, x = variável do processo existente, y = variável do processo necessária.

$$\%PP = \frac{\sum_{i=0}^n x(i)}{\sum_{i=0}^n y(i)} \quad (10)$$

Identificar os desvios dos padrões para controle de processo e investir na instrumentação adequada possibilita monitorar e controlar as variáveis, que pode resultar na redução da variabilidade e melhor eficiência, influenciando positivamente os indicadores de negócio, como produtividade, qualidade e redução de custos.

3.5.2 Índice de Estabilidade de Processo

A detecção precoce de condições anormais nas variáveis de processo possibilita antecipar ações que comprometam o desempenho da flotação para reduzir a variabilidade de processo. O principal objetivo da detecção de anomalias ou falhas é identificar qualquer evento anormal que indique um desvio de processo em relação ao seu comportamento normal, que possibilita direcionar esforços para avaliar a causa raiz da anomalia detectada (SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ *et al.*, 2018).

Dessa forma, pode ser utilizado o Controle Estatístico de Processo (SPC), que objetiva monitorar um processo para detecção de comportamento anormal. Ferramentas gráficas como cartas de controle estatísticas são utilizadas para monitorar as variáveis conforme limites estabelecidos, que não devem ser ultrapassados em condições normais de operação. Pontos fora dos limites de controle devem ser analisados para direcionar ações visando reestabelecer a condição normal. Assim, visando mensurar esta condição normal, foi utilizado o Índice de Estabilidade de processo, nomeado de **Saúde de Processo**, que tem como objetivo monitorar o percentual do tempo em que cada uma das variáveis de processo opera dentro dos limites estabelecidos, conforme ilustrado na Figura 3.33.

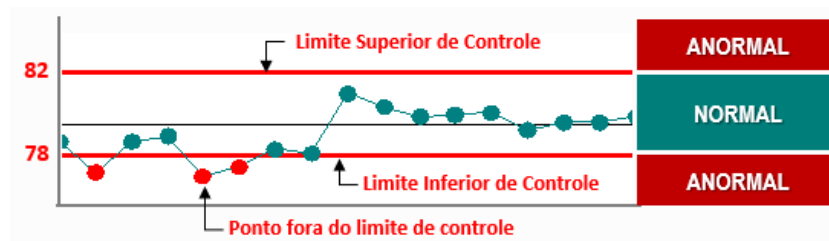


Figura 3.33 - Carta de controle para saúde da variável de processo.
Fonte: Autor.

A saúde de processo da flotação pode ser medida conforme cálculo %SP da Equação 3.11, gerando uma nota relativa a todas as variáveis de processo do circuito de flotação, onde: %SP: Saúde de Processo, k : variável de processo, n : enésima variáveis de processo, H_N : horas operando em condição normal, dentro dos limites de controle estabelecidos e H_o : horas operacionais para avaliação.

$$\%SP = \frac{\sum_{k=0}^n H_N(k)}{\sum_{k=0}^n H_o(k)} \quad (3.11)$$

Este mesmo conceito pode ser estendido para um índice de estabilidade (saúde) dos Controles Avançados de Processo e Predição, para monitoramento das variáveis e indicadores relacionados do controle de processo na flotação, como por exemplo, a saturação de variáveis manipuladas e controladas, dentre outros.

3.5.3 Análise de Experimento

Para facilitar a compreensão e propiciar ações de controle a partir do efeito de algumas variáveis importantes do processo, é comum a prática de realizar experimentos, tanto em escala de laboratório, quanto industrial. Este conhecimento prévio também contribui para a tomada de decisões a partir do monitoramento do desempenho na flotação. Um experimento pode ser definido como um teste ou uma série de testes de alterações propositalmente realizadas nas variáveis de entrada de um processo ou sistema, com o objetivo de observar e identificar como as respostas desse sistema são afetadas, em função de mudanças provocadas nessas variáveis. De acordo com Montgomery (2009), as variáveis que interferem nas respostas são denominadas fatores, classificados como controláveis e ruídos, às quais são atribuídas uma ou mais respostas.

O Planejamento de Experimentos (DOE) consiste em técnicas que objetivam planejar experimentos capazes de gerar dados apropriados para uma análise estatística que resulte em conclusões válidas com o objetivo de construir modelos de previsão para as respostas de interesse, a cada diferente combinação de níveis dos fatores. Dessa forma, qualquer problema experimental deve ser sustentado por dois elementos: o projeto de experimentos e a análise estatística dos dados (MONTGOMERY, 2009). Ao planejar um DOE utilizando-se níveis de fatores com dados atuais de um processo, é esperado que os resultados das variáveis de resposta sejam confiáveis e com representatividade prática. Duas técnicas de projetos experimentais muito utilizadas estão descritas conforme Tabela 3.5.

Tabela 3.5 - Características fundamentais das principais técnicas de DOE

Projeto experimental	Vantagens	Desvantagens	Aplicações
Fatorial Completo 2^k	Permite a varredura completa da região de estudo, pois utiliza todos os fatores e respectivos níveis.	Não identifica variação intermediária, pois só trabalha em dois níveis. Necessita de um alto número de corridas para problemas com grande número de variáveis	Processos em que já se tenha um prévio domínio e nos quais as realizações das corridas não demandem maior tempo ou custo.
Metodologia de Superfície de Resposta	Permite a verificação de variações intermediárias do processo	Pode apresentar erros na extrapolação dos pontos estrela, já que são realizadas poucas corridas nesses níveis	Otimização de processos, principalmente bem conhecidos e com baixa dispersão.

Fonte: Adaptado de Nilo Júnior (2003).

O arranjo composto central (*Central Composite Design - CCD*) é a classe de ajuste de modelos de segunda ordem mais utilizada na Metodologia de Superfície de Resposta (MSR) devido à eficiência com respeito ao número de experimentos necessários. Um arranjo CCD é composto por uma matriz formada com três grupos distintos de elementos experimentais: um fatorial completo ou fracionado, um conjunto de pontos centrais e um grupo de níveis extremos denominados pontos axiais. Considerando-se uma abordagem sequencial, o arranjo CCD possibilita a análise da curvatura na região investigada. Três a cinco pontos centrais são recomendados na literatura (MONTGOMERY, 2009). Quando constatada a curvatura, os pontos axiais são finalmente adicionados e pode-se estimar os termos quadráticos a serem inseridos no modelo de segunda ordem. Os arranjos CCD podem ser classificados em função da localização dos seus pontos axiais, que podem ser circunscritos, de face centrada ou inscritos, conforme Figura 3.34.

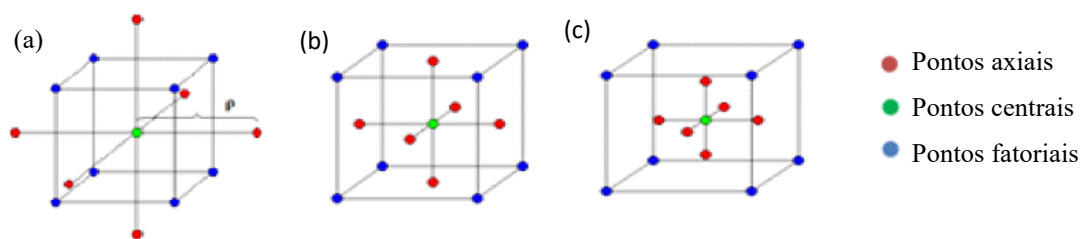


Figura 3.34 - Tipos de CCD (a) Circunscrito; (b) Face centrada; (c) Inscrito.
Fonte: Adaptado de Brito (2015).

3.5.4 Estatística Multivariada

As técnicas estatísticas multivariadas extraem informações sobre como diversas variáveis de processo se comportam umas em relação às outras enquanto simultaneamente comprimem os dados, reduzindo sua dimensionalidade, de forma a reter informações essenciais. Dentre as técnicas disponíveis com este fim, são comumente utilizados a análise de componentes principais (*Principal Component Analysis – PCA*) e a análise de fator multivariada (AF) para melhor compreensão do processo. A PCA refere-se a um método estatístico que tem por objetivo a redução da dimensionalidade de dados, com a menor perda possível da informação, permitindo identificar padrões e destacar possíveis diferenças e semelhanças nas informações disponíveis (HONGYU *et al.*, 2016). Já a análise de fator (AF) também apresenta foco semelhante, visando promover agrupamentos de variáveis correlacionadas (variância comum entre classes, variáveis), criar fatores/constructos que sejam apropriados a representar o

conjunto dessas variáveis exploradas, assim, possibilita resumir informações de variáveis correlacionadas em um conjunto de menores dimensões com uma perda pequena de informações (CRUZ *et al.*, 2018).

3.6 Controle de Processo, Modelagem e Machine Learning aplicado à Flotação

O termo “controle de processo” é frequentemente empregado para se referir a sistemas que têm como objetivo manter um conjunto de variáveis de uma planta industrial entre os seus limites operacionais desejáveis (CAMPOS, 2013). Na concentração por flotação, o controle de processo é uma tecnologia que requer a obtenção de dados em tempo real do comportamento do processo para manipular variáveis com o objetivo de maximizar o rendimento metalúrgico e qualidade do produto. Controlar um processo de flotação significa regular as propriedades do minério na alimentação e manter os parâmetros do processo de acordo com os set points e limites estabelecidos, visando implementar uma estrutura de controle com níveis hierárquicos apropriados (JOVANOVIĆ e MILJANOVIĆ, 2015).

De acordo com Hodouin (2001), a otimização e o controle do processamento mineral não podem ser realizados sem um quantitativo mínimo de informações sobre os distúrbios de entrada, os estados do processo e da qualidade do produto final. Este é, de fato, um gargalo do controle do processo mineral, pois a eficiência operacional é dependente da qualidade da informação que é utilizada para construir o conhecimento encapsulado nos modelos para as estratégias de controle e como entrada dos algoritmos de otimização (BERGH e YIANATOS, 2011).

Já o *Machine Learning* (ML) ou aprendizado de máquina é definido como o desenvolvimento e aplicação de modelos matemáticos e estatísticos com ênfase no uso de dados, em vez de conhecimento de domínio, para determinar a estrutura apropriada dos modelos. Um modelo de ML normalmente possui uma estrutura não paramétrica, pois o número de parâmetros do modelo não é definido com base no conhecimento do domínio. Isso contrasta com os primeiros princípios e modelos empíricos, que possuem estruturas e parâmetros claramente definidos, que geralmente têm uma interpretação física ou fenomenológica (MCCOY e AURET, 2019). É importante considerar que a tecnologia está se aprimorando em aplicações para medição

inteligentes, como por exemplo, a utilização de dados de visão de máquina com maior qualidade para modelagem, controle e otimização em tempo real (*Real Time Optimization – RTO*).

3.6.1 Controle Avançado e Otimização de Processo

As soluções envolvendo Controle Avançado de Processo (APC) englobam sistemas de controles com foco na estabilidade, buscando pontos de equilíbrio em toda etapa de processo de acordo com as restrições estabelecidas e previsões de comportamentos. Com as demandas sobre o desempenho dos sistemas de processo, a otimização eficiente está se tornando cada vez mais essencial. O objetivo final de qualquer sistema de controle de processo será desenvolver controladores capazes de atingir essa otimização em modelos de grande escala, não lineares, híbridos, com restrições, cálculo *on-line* rápido e adaptativo. Estes sistemas visam maximizar a viabilidade financeira do processo, determinando na curva teórica de recuperação onde é mais lucrativo operar para, posteriormente, deslocar o ponto de operação (SHEAN e CILLIERS, 2011). Este controlador ideal deve ser suscetível a uma solução de malha fechada, utilizando um número limitado de observações, e deve ser robusto a distúrbios *on-line*.

Embora as abordagens baseadas em sistemas com lógica fuzzy, programação matemática, como controle preditivo de modelo e otimização direta, tenham sido predominantes, vários pesquisadores também se concentraram em *Machine Learning*, como um método complementar, pois possibilita projetar controlador em *feedback* para interagir com seu ambiente e refletir a base de dados coletada ao longo de todo o processo industrial (GOPALUNI *et al.*, 2020).

O papel da **otimização** no controle de processo deve ser considerado como um elemento integrado do planejamento de negócios para apoiar a viabilidade e a otimização da operação do processo (GOODWIN *et al.*, 2008). As novas aplicações de APC e RTO podem possuir informações em termos de parâmetros econômicos para traduzir em decisões operacionais (GONZALEZ, 2018). A integração das funções de processo e produção é ilustrada em cinco níveis no domínio de controle e otimização de processo, conforme Figura 3.35.

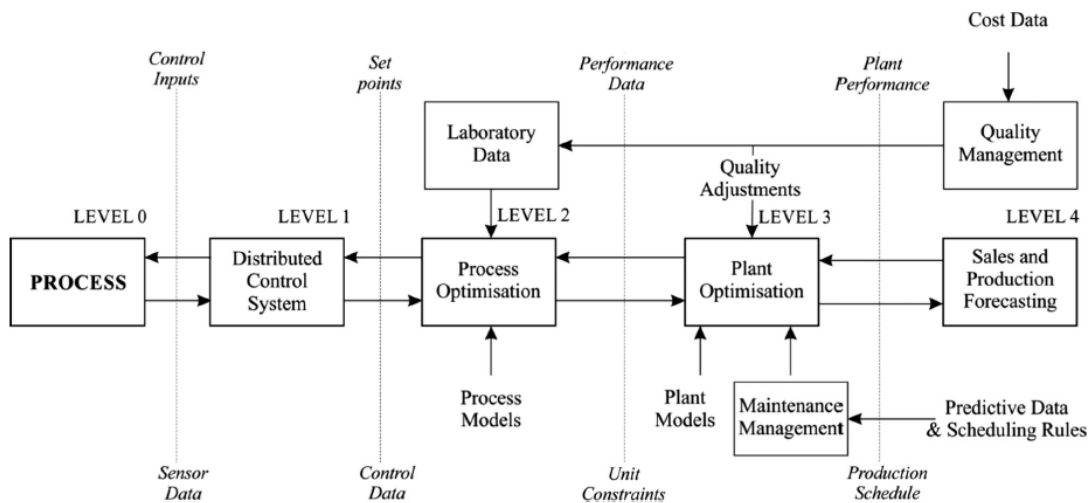


Figura 3.35 - Integração do objetivo de controle e do negócio.

Fonte: Jovanović e Miljanović (2015).

Segundo (GONZALEZ, 2018), durante a elaboração de qualquer projeto de sistema de controle e otimização de processo na flotação, devem ser considerados:

- **Objetivos de controle:** o objetivo do controle deve ser melhorar a eficiência metalúrgica produzindo a melhor curva de recuperação de teores, e estabilizar o processo no teor de concentrado com o melhor retorno econômico (MCKEE, 1991);
- **Hierarquia de controle:** de acordo com Downs e Skogestad (2011), o problema de projeto de controle de processo precisa ser resolvido e decomposto em subproblemas mais gerenciáveis, visando reduzir as complexidades do problema do processo;
- **Estrutura de Controle:** o projeto da estrutura de controle inicia considerando o cumprimento dos objetivos operacionais, otimizando as variáveis do processo para distúrbios importantes e determinando restrições ativas com ênfase nas restrições de rendimento/eficiência. O projeto começa na base, considerando a dinâmica, malhas de controle, incluindo instrumentação, controle regulatório, controle avançado, variáveis manipuladas e variáveis controladas (SKOGESTAD, 2004);
- **Seleção ótima de variáveis controladas:** a seleção das variáveis deve traduzir o objetivo econômico em objetivos de controle do processo, encontrando uma função das variáveis do processo que resulte no ajuste ótimo das variáveis. Os custos associados aos distúrbios não são os mesmos para duas variáveis controladas diferentes, o custo associado à manutenção de uma pode ser bem inferior a outra (SKOGESTAD, 2004).

De acordo com Jovanović e Miljanović (2015), embora tenha havido um progresso significativo nas áreas de controle e otimização de processos nos circuitos de flotação, existem questões importantes que ainda não encontraram uma resposta definitiva:

- Seleção da estratégia de controle adequada, que deve abranger níveis de controle da planta, segmentos de produção e negócios do processo geral;
- Métodos clássicos de controle do processo de flotação baseados nos controladores PID tradicionais, não são adequados para o controle abrangente de sistemas dinâmicos no que diz respeito à flotação, exceto, em parte, para os níveis hierárquicos inferiores;
- Técnicas baseadas em controle preditivo possuem abordagens adaptativas com potencial de melhorar o desempenho dos processos de flotação. As principais dificuldades de sua aplicação estão relacionadas ao desenvolvimento de modelos de processo confiáveis e manutenção da estabilidade do processo;
- Métodos inteligentes estão desempenhando um papel importante no controle do processo de flotação, embora nenhuma das variações disponíveis seja estabelecida que satisfaça completamente todos os aspectos do controle do processo.

De acordo com Laurila *et al.* (2002), apesar das várias estratégias de otimização do controle da flotação descritas na literatura, muitas plantas de processamento mineral ainda dependem de operadores e gerenciamento da planta para selecionar manualmente os pontos de ajuste dos sistemas de controle, baseado na experiência anterior para otimizar o processo. As aplicações de APC tem diversos desafios devido a constantes mudanças no sistema produtivo, como atualização da instrumentação, degradação de equipamentos e reconfiguração de parâmetros, que representam alguns desvios que os sistemas APC devem considerar.

As experiências dos usuários da APC mostram os benefícios consideráveis desses sistemas logo após a instalação, entretanto, observam a lenta degradação do desempenho com o tempo, indicando uma falta de adaptação das soluções da APC ao ambiente em mudança, gerando uma lacuna que deve ser tratada com uma constante atualização das aplicações. A seguir, é ilustrado um tipo de sistema de controle utilizando lógica fuzzy, que é amplamente aplicado na mineração, associado.

3.6.1.1 Sistema Especialista baseado em Lógica Fuzzy

Um sistema especialista pode ser definido como um sistema computacional que simula o comportamento ou tomada de decisão de profissionais especialistas em uma determinada área do processo. Estes especialistas possuem um base de conhecimento que possibilita gerar uma base de regras que codifica as relações causais: contém premissas, consequências e regras lógicas para emular um processo lógico (RUSSELL e NORVIG, 2015). Os sistemas especialistas são baseados em lógica booleana e, portanto, cada regra só pode ser verdadeira ou falsa.

Um tipo de sistema especialista muito empregado na mineração é o baseado em lógica Fuzzy, que é aplicado devido à complexidade do sistema real, falta de descrição matemática precisa do processo, dinâmica do processo, mudanças nas características o minério, e, em geral, a não linearidade da função de controle. O sistema especialista fuzzy combina termos descritivos frequentemente utilizados no meio operacional, permitindo que o conhecimento especializado seja aproveitado e aplicado na prática (DAWSON e KOORTS, 2014). A fuzzificação das regras permite uma descrição mais suave do sistema. Como consequência, as entradas do processo também possuem qualidade fuzzy e precisam de uma resposta pela etapa de defuzzificação, ou seja, a conversão de conclusões fuzzy em um valor numérico (TITELMAN, 2018).

Algumas variáveis da flotação podem ser monitoradas utilizando análise de imagem, eliminando a necessidade de enviar um operador à célula para inspeção (DAWSON e KOORTS, 2014). Isso pode permitir que operadores experientes analisem o estado atual e manipulem a vazão de ar e nível de polpa para direcionar o teor e a recuperação para seus pontos de ajuste especificados. No entanto, isso requer monitoramento constante do sistema, que atingido. Uma alternativa melhor é implementar um APC baseado em lógica fuzzy, pois apresentam como vantagens a facilidade para utilização, compreensão e por utilizar poucos recursos de matemáticos. Em geral, na flotação de minério de ferro são aplicadas estratégias de controle fuzzy como o objetivo de definir como variável de resposta a dosagem específica de reagentes, utilizando como entrada variáveis de processo e em alguns casos propriedades de imagem.

No caso da flotação, métodos típicos de controle de recuperação e teor dependem de resultados de ensaios de laboratório e da interpretação de um operador desses resultados. Como há um grande atraso entre os resultados da análise laboratorial, pode ser necessário um operador para ajuste do *setpoint* de nível ou vazão de ar no decorrer da operação. Mesmo utilizando *soft sensors* para estimar teor, é difícil manter um controle otimizado, podendo acarretar em perdas como baixas recuperações (DAWSON e KOORTS, 2014).

Para solução deste problema mencionado, pode-se utilizar um controle de processo de *feedback* rápido, e em tempo real que manipula consistentemente o ar e o nível para otimizar a recuperação enquanto atende um *setpoint* mínimo de teor. Isto é obtido controlando a recuperação em massa do overflow da espuma das células de flotação através da adição de ar, nível de polpa e adição de reagentes enquanto monitora as características da espuma, como velocidade e tamanho de bolha. O controle dos circuitos de flotação é baseado no monitoramento desses parâmetros. A recuperação em massa pode ser inferida a partir da velocidade da espuma sobre a borda da célula. Utilizando algoritmos baseados em visão de máquina, a velocidade é monitorada por um sistema de câmeras que realiza a análise de imagens na superfície da espuma em uma célula de flotação. Esta análise mede a quantidade de bolhas presentes, seu tamanho, cor e, mais importante, sua direção e velocidade de movimento (DAWSON e KOORTS, 2014).

3.6.2 Modelagem

Tradicionalmente, uma descrição de dinâmica de sistemas envolve o uso de um conjunto de modelos matemáticos para representar os fenômenos físicos e químicos, comportamentos estáticos e dinâmicos, bem como as relações causais entre as quantidades observadas, incluindo entradas manipuladas e referências técnicas. De acordo com Sun *et al.* (2020), esses modelos matemáticos são amplamente utilizados em controle preditivo de modelo, estimativa de estado, *soft sensor*, monitoramento de processo, detecção e diagnóstico de falhas, otimização operacional, projeto de planta, simulação de processo, avaliação de desempenho de controle, etc., conforme representado na Figura 3.36. De acordo com Hodouin, 2011, os modelos podem ser classificados considerando diferentes abordagens, tais como:

- Linear ou não linear;

- Empírica (regressão multivariada, redes neurais, método de análise de componentes principais) ou fenomenológica (considerando mecanismos de reação e transformação);
- Estado estacionário ou dinâmico;
- Determinístico ou estocástico;
- Causal (modelo de entrada-saída) ou não-causal (um conjunto de relações ligando variáveis de processo, como restrições de conservação de massa);
- Baseado em equações matemáticas ou regras fuzzy.

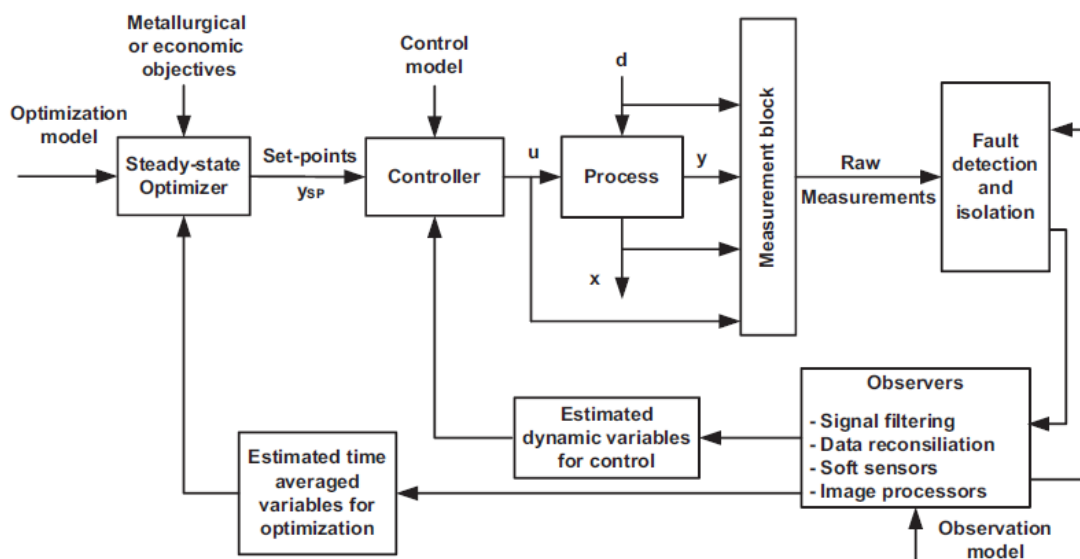


Figura 3.36 - Bloco de processamento de dados do controle de processo (u - variáveis manipuladas; d - variáveis de perturbação; x - variáveis da condição interna do processo; y - variáveis controladas).

Fonte: Adaptado de Hodouin (2011) e Jovanović e Miljanović (2015).

De acordo com Groenewald (2014), outra classificação considerando modelagem para monitoramento do processo pode ser utilizada conforme três técnicas:

- **Modelos fundamentais:** baseado em modelos fenomenológicos ou primeiros princípios, que são em sua maioria complexos e com alto custo para desenvolver (BLANKE *et al.*, 2006);
- **Modelos baseados em dados de processo:** baseados em dados de processo mais simples tornaram-se mais populares para aplicações industriais de grande escala;
- **Híbrido:** combinar estes tipos de modelos recorrendo a abordagens baseadas em dados de processo, derivadas de dados históricos de processo e suportadas pelos modelos fundamentais.

3.6.2.1 Modelagem de Flotação para Controladores

Os modelos de flotação são classificados em dois grupos principais de acordo com sua finalidade: Simulação ou Controle, como representado na Figura 3.37. Enquanto os modelos empíricos e fenomenológicos podem ser utilizados para fins de simulação e controle, os modelos híbridos foram desenvolvidos apenas para fins de controle. Apesar do fato de que um grande número de modelos de flotação foram desenvolvidos assumindo o estado estacionário, esses modelos têm sido usados principalmente para projeto, simulação e otimização off-line em vez de controle (QUINTANILLA *et al.*, 2021).

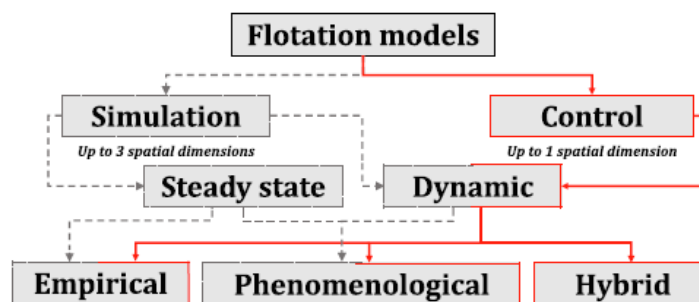


Figura 3.37 - Classificação de modelos da flotação conforme objetivo.
Fonte: Adaptado de Quintanilla *et al.* (2021).

A modelagem para fins de controle é uma tarefa difícil, pois a maioria dos modelos desenvolvidos possuem parâmetros físicos que não podem ser adequadamente medidos, ou mesmo estimados. Além disso, a complexidade da flotação deve-se ao seu comportamento estocástico, bem como à falta de instrumentação confiável, o que dificulta o desenvolvimento de modelos simples para fins de controle que possam ser calibrados tanto industrialmente (CASALI *et al.*, 2002; MALDONADO *et al.*, 2007; PUTZ e CIPRIANO, 2015) quanto em escala laboratorial (MALDONADO *et al.*, 2011; SHEAN *et al.*, 2018; QUINTANILLA *et al.*, 2021).

Modelos empíricos têm sido desenvolvidos principalmente para determinar constantes de taxa de flotação, constante de taxa de drenagem, vazão volumétrica de concentrado, entre outros parâmetros, usando ajustes aos dados da planta. Embora esses modelos sejam econômicos, eles só podem ser usados quando o processo está sob uma faixa bem conhecida de condições operacionais e, portanto, sua robustez fora dessa faixa é altamente discutível. Já os modelos fenomenológicos, assim como modelos híbridos, podem ser aplicados em qualquer sistema de flotação, uma vez que são derivados de primeiros princípios (QUINTANILLA *et al.*, 2021), entretanto, sua aplicação é um desafio.

3.6.2.2 *Soft Sensors*

A quantidade abundante de dados e eventos em tempo real coletados nos circuitos de flotação em uma planta de processamento mineral podem ser utilizados para resolver problemas operacionais e otimizar o desempenho da planta, como por exemplo, na implementação de *soft sensors* (sensores virtuais) para estimar teor e recuperação (BASCUR e SOUDEK, 2019). Os *soft sensors* ou sensores virtuais têm sido muito utilizados na indústria para predição da qualidade do produto e estimar as principais variáveis do processo (GOPALUNI *et al.*, 2020).

Eles podem ser categorizados em:

- **Modelo caixa branca:** *soft sensors* orientados por modelo, que são baseados nos modelos fenomenológicos ou de primeiros princípios (*First Principle Models*), que descrevem as leis físicas e químicas que governam um processo;
- **Modelo caixa preta:** *soft sensors* orientados por dados que não possuem informações sobre o processo e são baseados em observações empíricas que utilizam dados históricos do processo;
- **Modelo caixa cinza:** *soft sensor* orientado por modelo utiliza um método orientado por dados para estimar os parâmetros de um modelo de primeiros princípios.

Vários modelos fundamentais de flotação são projetados levando em consideração muitos parâmetros, mas devido à sua complexidade e variedade de parâmetros imensuráveis eles não têm sido amplamente aplicados em estudos de flotação industrial. Dentre os métodos de *Machine Learning*, modelos utilizando ANN (*Artificial Neural Networks*) são amplamente utilizados na indústria, inclusive no processamento mineral. Como exemplo, podem ser empregados nas estratégias de controle avançado da flotação. De acordo com (BAUER e CRAIG, 2008), estas estratégias implicam em ganhos financeiros significativos para a operação, justificando investimentos em *software* e serviço.

Para *soft sensors* rodando em aplicações de controle e otimização, faz parte da implementação da validação do sensor identificar e classificar eventuais falhas que possam ocorrer com sensores. De acordo com Brooks e Bauer (2018), cinco categorias de falhas diferentes são identificadas por meio de testes estatísticos em escala industrial:

- *Bias*: uma falha de polarização ocorre quando há uma mudança grande e persistente no valor indicado, sem um motivo de processo subjacente;

- *Drift*: refere-se a uma mudança lenta em uma direção do valor medido, novamente sem que haja um motivo de processo;
- Precisão: perda de precisão está associada a um aumento do ruído associado à medição;
- Congelamento: uma medição congelada não apresenta alteração, apesar de haver alterações no processo, que podem ser observadas em outras variáveis do processo. Geralmente está associado à falha completa do sistema de análise;
- Desconhecido: qualquer outra falha que não mostre claramente nenhum dos padrões descritos anteriormente é considerada desconhecida.

A seguir, são ilustrados dois tipos de modelos preditivos caixa preta utilizados na mineração:

Random Forest: modelos que combinam várias árvores de decisão (*Decision Tree* - floresta). Os modelos de árvore de decisão podem ser aplicados a base de dados (*datasets*) com grande número de condições operacionais e são extremamente resistentes a *outliers*. Uma árvore de regressão cresce via particionamento recursivo binário usando a soma dos quadrados como critério de minimização. Cada árvore de decisão de uma floresta é construída com base no espaço de recursos que é dividido em nós e, depois disso, a resposta é prevista pela média dos dados em cada espaço. Em cada fase, o algoritmo de divisão (um algoritmo de moda binária) determina os melhores pontos e, em seguida, a melhor variável de divisão entre todos os preditores é classificada com base na minimização da soma dos quadrados dos resíduos (SHAHBAZI *et al.*, 2017).

Redes Neurais (*Artificial Neural Network* - ANN): é uma técnica de computação não linear que inclui um grande número de unidades de processamento interconectadas denominadas neurônios, que simula o aprendizado do cérebro humano, sendo o tipo mais utilizado com alimentação direta multicamadas. Esse tipo de NN constrói uma aproximação de função global e, mesmo que sua resposta tenha se mostrado melhor que os métodos convencionais, há necessidade de melhorias adicionais em seu desempenho, ou capacidade de generalização (NAKHAEI *et al.*, 2019). O conhecimento é representado e armazenado pelos pesos das conexões entre os neurônios. Se os pesos corretos podem ser treinados, então uma RNA pode fazer uma função excepcional. Em geral, o processo de modelagem NN inclui as seguintes

etapas (POPLI, 2017): coleta de dados, divisão de dados, análise e pré-processamento dos dados, definição dos parâmetros da NN, treinamento e testes.

As redes neurais podem aprender com os dados, identificar o padrão e prever relacionamentos complexos com alta precisão. Dentre os tipos de modelos utilizando redes neurais, a classe de redes neurais de camada oculta **única** de *feedforward* que abrange *Multilayer perceptron* - MLP, *Radial Basis function Network* - RBFNN, etc. Há também aplicações de *soft sensors* baseado em redes neurais **recorrentes e profundas** como *Recurrent Neural Networks* - RNN, *Long Short-Term Memory Networks* - LSTM, *Convolutional Neural Network* - CNN, etc. O quantitativo de pesquisas envolvendo CNN tem crescido muito nos últimos anos com o desenvolvimento da tecnologia de câmeras e novas técnicas de processamento de imagem, às vezes até substituindo os sensores convencionais. O desempenho das redes neurais *feedforward* multicamada para modelagem do processo de flotação depende principalmente da representação dos dados, precisão e tempo de processamento do modelo.

3.6.3 *Machine Learning* aplicados no Processamento Mineral

Os modelos de ML podem ser classificados de diferentes maneiras, dependendo de suas características e propósitos. De acordo com uma revisão bibliográfica realizada por Mccoy e Auret (2019), no processamento mineral, três categorias de pesquisa e aplicação de técnicas de *Machine Learning* têm sido adotadas. A maior parte destas técnicas são aplicadas na etapa de processo de flotação, estão descritas a seguir e representadas conforme Figura 3.38:

- **Modelagem baseada em dados:** mais frequentemente aplicada como *soft sensors*, que usam medições frequentes da planta (como temperaturas, pressões, níveis, taxas de fluxo e espectros) como entrada para prever medições lentas, difíceis ou caras (como composição química, grau mineral ou carga do moinho);
- **Deteção e/ou diagnóstico de falhas:** também conhecido como monitoramento de processo. Na deteção de falhas, novas medições do processo são categorizadas como normais ou anormais, com a suposição subjacente de que qualquer medição anormal corresponde a uma falha no processo. O diagnóstico de falhas envolve determinar a causa das falhas detectadas;

- **Visão de máquina:** um tipo de modelagem baseada em dados que usa imagens ou vídeo, em vez de medições de processo, como entrada para a previsão de outras medições.

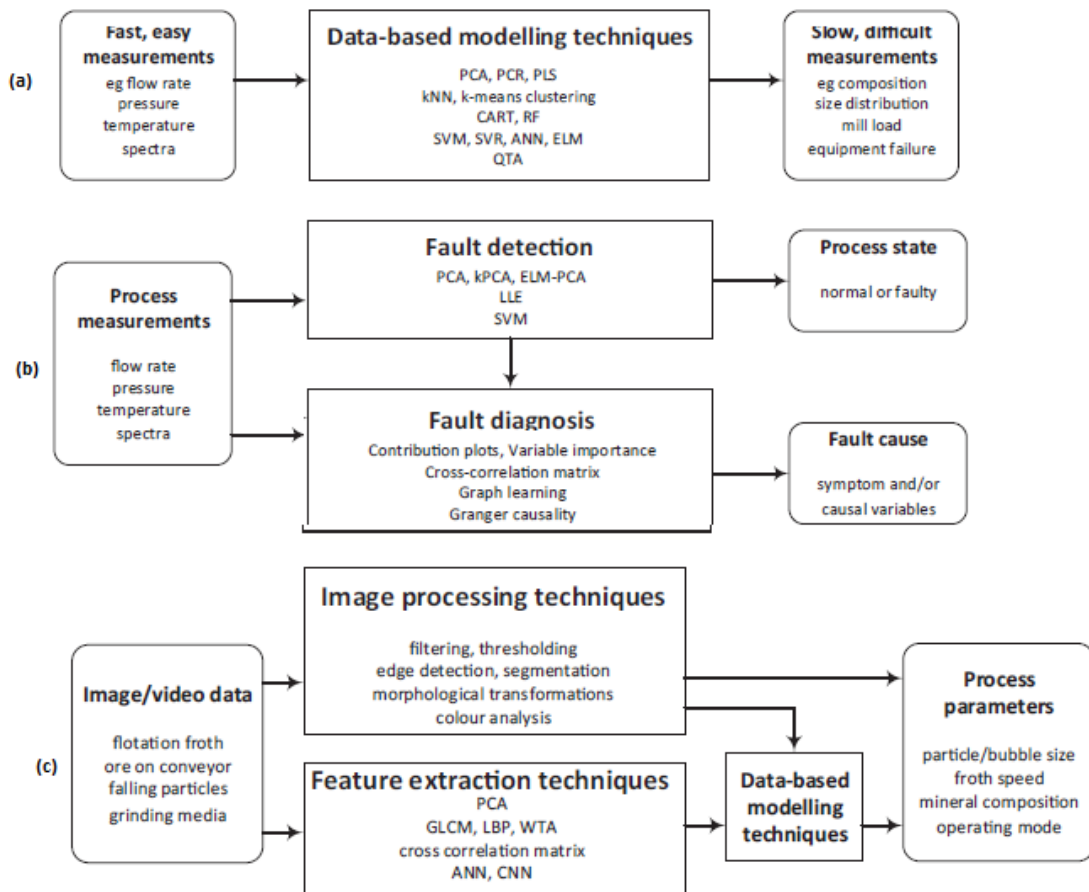


Figura 3.38 - Categorias de *Machine Learning* aplicados no processamento mineral (a) Baseado em dados; (b) Detecção e/ou diagnóstico de falha; (c) Visão de máquina.

Fonte: Adaptado de McCoy e Auret (2019).

3.7 Inteligência Artificial

A inteligência artificial (IA) é amplamente reconhecida como uma disciplina tecnológica voltada para o desenvolvimento de teorias, métodos e sistemas capazes de simular, aprimorar e expandir aspectos da inteligência humana (MCCARTHY *et al.*, 2006; SHEIKH *et al.*, 2023). Segundo Searle (1980), a IA pode ser classificada em duas categorias: IA forte e IA fraca. A IA forte refere-se à criação de sistemas capazes de raciocinar, planejar e resolver problemas de forma autônoma, com inteligência comparável à humana (LIU, 2021). Já a IA fraca diz respeito a sistemas que reproduzem funções específicas do cérebro humano em contextos delimitados,

geralmente sem capacidade de adaptação ou consciência (LIU, 2021). No contexto, no processamento mineral as aplicações atualmente de IA estão predominantemente inseridas no campo da IA fraca.

A IA é um campo multidisciplinar que abrange ciência da computação, neurociência, lógica, estatística e psicologia, no qual avanços importantes evoluíram gradualmente para componentes da IA, conforme mostrado na Figura 3.39. Em contraste com a IA orientada por conhecimento, que se baseia em regras e representações explícitas, a IA orientada por dados depende da análise de grandes volumes de informações para realizar previsões e tomar decisões. Nesse contexto, o aprendizado de máquina, um subcampo da inteligência artificial, permite que os computadores aprendam diretamente a partir dos dados, sem a necessidade de instruções programadas de forma explícita (JORDAN e MITCHELL, 2015).

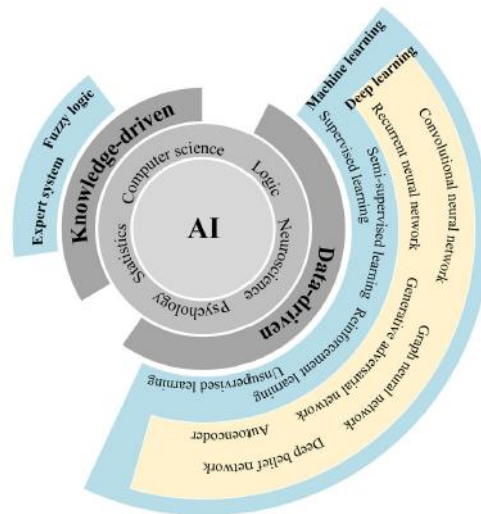


Figura 3.39 - Diagrama simplificado de Inteligência Artificial.
Fonte: Adaptado de Yang *et al.* (2024).

Dentre os avanços tecnológicos contínuos da IA, a Inteligência Artificial Generativa emergiu como uma ferramenta poderosa em diversos domínios (MA e HUO, 2023).

3.7.1 Inteligência Artificial Generativa

A Inteligência Artificial Generativa (Gen-AI) propicia a utilização de algoritmos e aprendizado de máquina para gerar soluções inovadoras ou aprimorar processos existentes. A Gen-AI desponta como uma subcategoria da IA, ganhando destaque por meio de plataformas como o

ChatGPT, Gemini, Grok e DeepSeek, Copilo. Dessa forma, a Gen-AI configura-se como um exemplo de aprendizado de máquina não supervisionado com enorme potencial.

A colaboração entre humanos e sistemas baseados em IA revela-se essencial para lidar com os desafios e aproveitar as oportunidades proporcionadas pela Gen-AI (KUMAR *et al.*, 2025). Com o avanço contínuo dos algoritmos generativos, observou-se uma intensificação nas pesquisas relacionadas a chatbots. Tradicionalmente, esses sistemas dependiam do Processamento de Linguagem Natural (PLN) para interpretar as solicitações dos usuários e associá-las às respostas mais adequadas (KECHT *et al.*, 2023). No entanto, os chatbots modernos evoluíram significativamente, incorporando modelos de linguagem e técnicas de aprendizado profundo para fornecer respostas imediatas, ampliando sua competência frente aos desafios do PLN durante interações em tempo real com os usuários.

A evolução da capacidade de linguagem natural com Gen-AI está mudando drasticamente a maneira como as empresas operam e os clientes consomem seus produtos e serviços. Esse impacto interdisciplinar ressalta a natureza abrangente da Gen-AI, moldando o cenário tecnológico e promovendo inovação e adaptação em um espectro de setores, e não é diferente para a mineração.

Para aplicar algoritmos de IA é importante a obtenção de uma base de dados pertinente. Entretanto, este pré-requisito continua sendo um obstáculo e pode impactar a eficácia dos algoritmos existentes (PATEL *et al.*, 2024). Embora as aplicações da Gen-AI estejam evoluindo rapidamente, grande parte dos estudos ainda se concentra na perspectiva do usuário final, deixando lacunas significativas quanto aos fatores, dinâmicas e resultados envolvidos na adoção da Gen-AI por gestores e tomadores de decisão. Também há lacunas existentes e cuidados a serem praticados durante sua implementação na indústria, sendo importante considerar cibersegurança e implicações éticas.

Visando ilustrar uma aplicação de Gen-AI aplicada a concentração de minério de ferro, foi desenvolvida uma ferramenta denominada Assistente Virtual Mineração (AVM), capaz de fornecer respostas a perguntas de usuários utilizando linguagem natural sobre os aspectos operacionais, baseado em diversas fontes de dados para auxiliar na tomada de decisão que influencia no desempenho da concentração de minério de ferro. Nesta aplicação, diversas

respostas para perguntas referentes à flotação podem ser respondidas, de acordo com quatro fontes de dados mapeadas: (1) Índice de estabilidade das variáveis de processo, (2) Informação de indicadores de produção, (3) Histórico de dados de processo e (4) Documentos técnicos: procedimentos, manuais e referências técnicas da área (NUNES *et al.*, 2025). Estas fontes de dados e exemplo de janela de interface são ilustradas conforme Figura 3.40 e Figura 3.41, respectivamente.

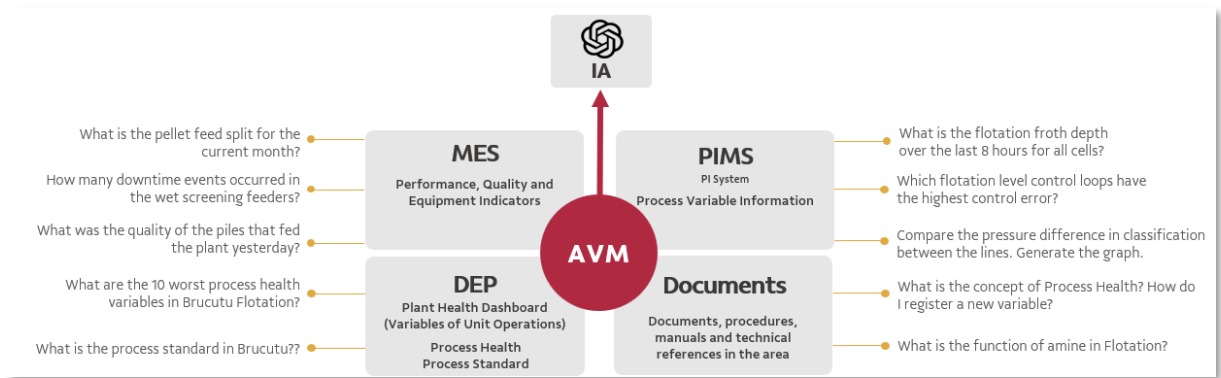


Figura 3.40 - Fontes de dados de aplicação de Gen-AI na concentração de minério de ferro. Fonte: Adaptado de Nunes *et al.* (2025).

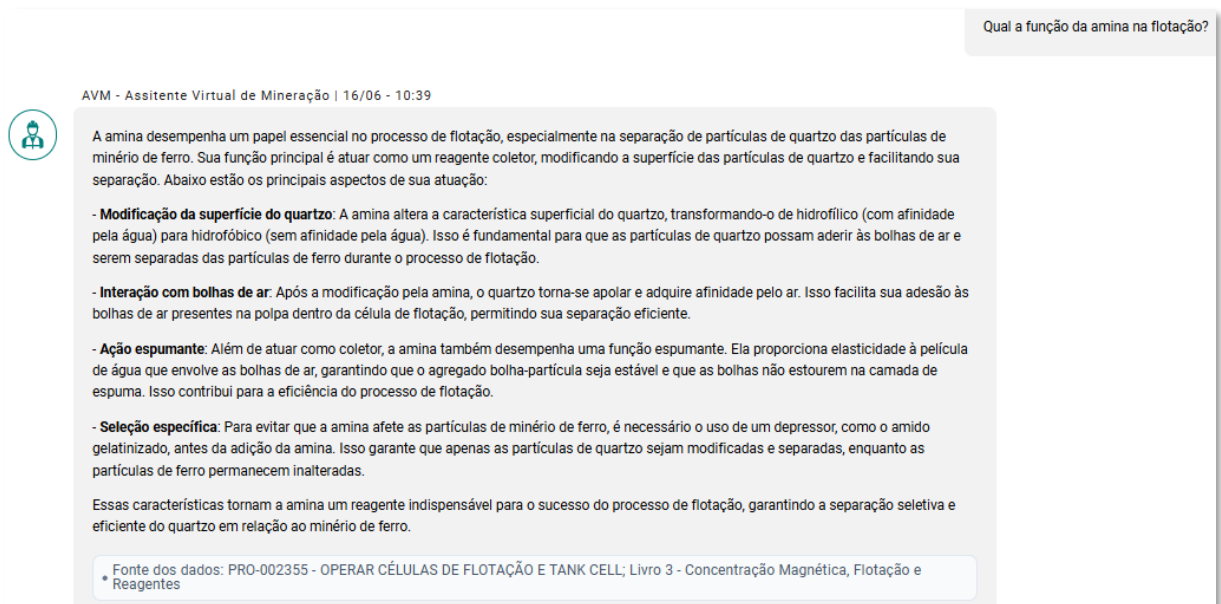


Figura 3.41 - Interface de Gen-AI com exemplo de resposta a perguntas baseada em documentos. Fonte: Adaptado de Nunes *et al.* (2025).

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Esta seção visa guiar o procedimento experimental para conduzir a preparação das amostras na flotação de minério de ferro em escala industrial e definir os parâmetros das variáveis de processo para as respostas desejadas, conforme planejamento para a coleta dos dados a serem utilizados na posterior análise e discussão.

Os materiais e métodos utilizados na execução experimental estão detalhados nos respectivos tópicos dos **Capítulos 10, 11 e 12**, referente aos artigos submetidos desta pesquisa conforme Tabela 3.6 (**Artigo A** - *Evaluation of Iron Ore Reverse Mechanical Rougher Flotation - Part I: Statistical Investigation of Air Flow Rate and Froth Depth Using RSM-CCD*; **Artigo B** - *Evaluation of Iron Ore Reverse Mechanical Rougher Flotation - Part II: Comparison of Self-Aspirated and Forced Air Cells* e **Artigo C** - *Integration of Operating Conditions and Froth Properties in Iron Ore Flotation*), objetivando avaliar a influência das variáveis operacionais e propriedades visuais de espuma no desempenho e controle da flotação de minério de ferro, quando submetida a diferentes condições operacionais. As informações das plantas de concentração de minério de ferro utilizadas neste trabalho foram obtidas de:

- Dados históricos de variáveis e indicadores de processo em diferentes condições de operação para análise de dados, modelagem, análise estatística e controle de processo;
- Propriedades de imagem na superfície da espuma da flotação obtidas de uma aplicação desenvolvida internamente na mineradora objeto de estudo desta pesquisa;
- Resultados de procedimento experimental delineado para investigar propriedades de bolhas e condições operacionais em escala industrial.

Tabela 3.6 - Materiais e métodos utilizados nos artigos desta pesquisa

	Artigo A	Artigo B	Artigo C
Dados históricos	✓	✓	✓
Amostragem	✓	✓	x
Planejamento de Experimentos e <i>Step Tests</i>	✓	✓	x
Análise de Granulometria, Química e Mineralogia	✓	✓	x
Reagentes	✓	✓	✓
Propriedades de Bolhas na Fase Espuma	✓	✓	✓

4.1 Amostras e Medições de Variáveis

Foram utilizadas neste trabalho amostras representativas do circuito de flotação de minério de ferro provenientes de unidades mineradoras na região do Quadrilátero Ferrífero, localizada no sudeste do estado de Minas Gerais, no Brasil. Estas unidades são caracterizadas por apresentar teores variando entre 37% até 48% de *Fe* na alimentação. A pesquisa contempla medições para avaliar o desempenho da flotação em diferentes condições operacionais. Além das variáveis operacionais com dados históricos do PIMS, amostras dos fluxos de alimentação, concentrado e rejeito foram coletadas nos estágios da flotação. O concentrado do estágio recleaner é o produto da flotação, que apresenta como limite superior de especificação cerca de 1,5% a 1,8% de $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$, para produzir o *pellet feed* com qualidade para redução direta. Para a aquisição e análise das propriedades de imagem utilizando visão de máquina na flotação durante os experimentos industriais, foram pré-estabelecidas condições sem alterações significativas nas variáveis operacionais do circuito, como por exemplo, densidade, pH, dosagem de reagentes e qualidade do minério.

4.2 Condições Experimentais para Variáveis Operacionais

Para elaborar o planejamento experimental dos testes industriais foram definidas as variáveis de processo e amplitude das mudanças dos *setpoints*, bem como o intervalo de tempo da coleta de dados e amostras de laboratório. Os testes servem para provocar reações do processo a estímulos ou degraus em *setpoints*, devidamente planejados. As informações das respostas do processo foram medidas e utilizadas conforme artigos desenvolvidos nesta pesquisa. O planejamento dos testes, validação e tratamento dos dados foi feito via arranjo CCD (Central Composite Design), com determinação de curvas, superfícies de resposta e regressões lineares utilizando software Minitab 22[®].

4.3 Análise de Granulometria, Química e Mineralogia

Análises das amostras de minério de ferro foram realizadas para os principais elementos e compostos: Fe, SiO_2 , P, Al_2O_3 , Mn, CaO e MgO, além do teor de PPC, determinado por

calcinação. Durante a preparação e análise das amostras provenientes de testes industriais na flotação, utilizaram-se os seguintes equipamentos:

- Análise de Granulometria: peneiras da série Tyler com abertura de malhas entre 1,000mm a 0,045mm, com 200mm de diâmetro e 70mm de altura; granulômetro a laser Cilas para microanálise da fração passante com malhas entre 0,037mm e 0,0032mm;
- Análise Química: espectrometria de fluorescência de raios X, utilizando o método de pastilha fundida;
- Mineralogia: análise mineralógica incluindo determinação do espectro de liberação do quartzo e dos óxidos de Fe em QEMSCAN.

4.4 Reagentes

Para os testes industriais de flotação na usina foram utilizados os reagentes:

- Coletor: amina (Flotigam 7100) preparada a 2% de concentração em massa;
- Depressor: amido (gritiz de milho) gelatinizado com solução de soda cáustica (NaOH) com concentração da solução a 2% e relação da massa depressor/soda de 5:1;
- Moduladores de pH: solução de NaOH para correção do pH da flotação, preparada a 5% de concentração em massa.

4.5 Propriedades de Bolhas na Fase Espuma

O sistema de visão de máquina utilizado para realizar medições de propriedades de superfície de bolhas na fase espuma foi o “Vbolhas”, desenvolvido internamente na mineradora do presente trabalho com uma aplicação no LabVIEW, ilustrado conforme Figura 4.42. O Vbolhas utiliza técnicas de processamento de imagem amplamente conhecidas para a caracterização de bolhas na superfície da espuma, que fornece medidas da distribuição do tamanho da bolha, formato equivalente da bolha, velocidade de espuma e estabilidade da bolha. Os dados de imagem da espuma são capturados em cada estágio utilizando câmeras de vídeo digitais, que incluem sistema de iluminação e são montadas para observar a espuma próximo da região de transbordo para *overflow*. As câmeras foram dispostas em posições equivalentes sobre cada célula para minimizar o efeito da variação na velocidade superficial e os efeitos do defletor e da parede no comportamento da superfície da espuma. Para a análise de imagem foram

utilizadas câmeras dispostas nas células de flotação objeto de estudo, conforme ilustrado na Figura 4.43.

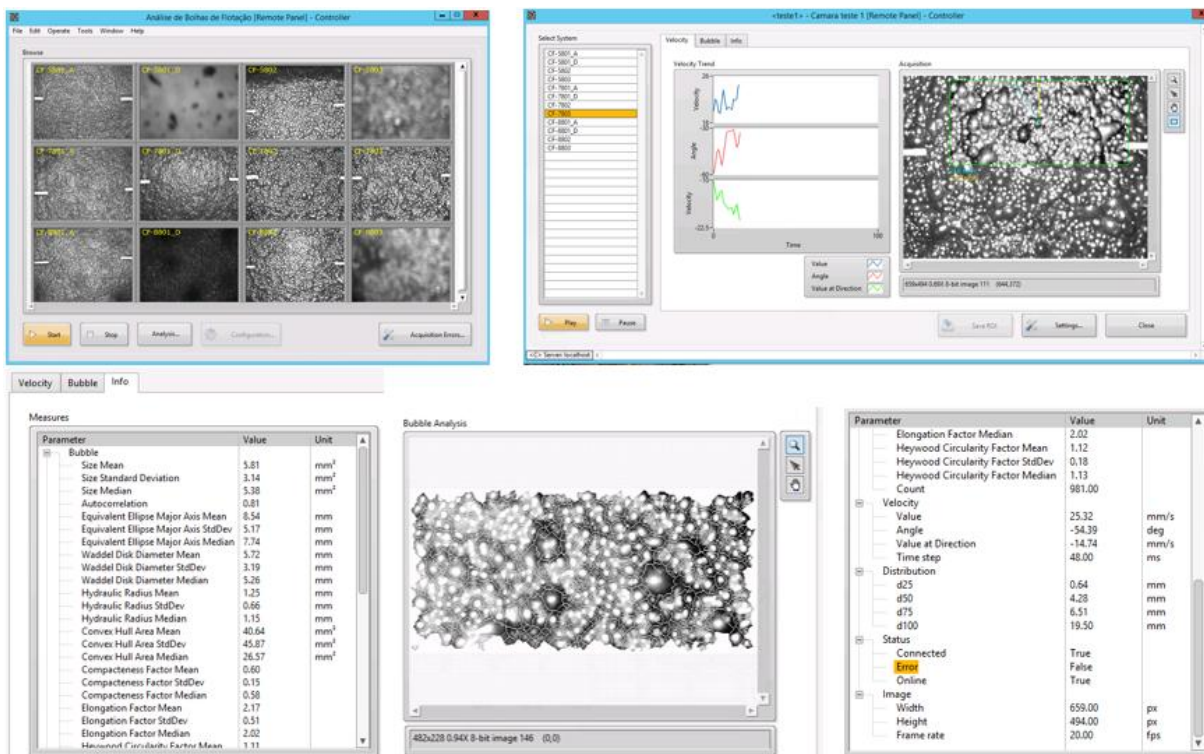


Figura 4.42 - Software para medições de propriedades de bolhas na superfície da espuma.
Fonte: Autor.



Figura 4.43 - Proteção e painel de câmera instalada sobre célula de flotação.
Fonte: Autor.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O resumo dos resultados obtidos e discutidos dos três artigos originados desta pesquisa e apresentados nos **Capítulos 10, 11 e 12**, estão dispostos a seguir.

Artigo A - Evaluation of Iron Ore Reverse Mechanical Rougher Flotation - Part I: Statistical Investigation of Air Flow Rate and Froth Depth Using RSM-CCD

As respostas do experimento utilizando o CCD identificaram regiões de vazão de ar e camada de espuma que favorecem as respostas de processo de %SiO₂ no concentrado, %Fe no rejeito, índice de seletividade, recuperação metalúrgica e recuperação de água no overflow. De forma geral, foi identificado o melhor desempenho para baixas vazões de ar, independentemente do nível, além de vazão alta e nível alto, que correspondem a baixa camada de espuma. O comportamento das curvas de recuperação de ar na célula de alimentação e descarga, que é um indicador de estabilidade da espuma e desempenho da flotação, também indicou que a maior recuperação de ar ocorreu para menor vazão de ar, associada a menor camada de espuma, corroborando com o CCD. Também foram identificadas correlações entre recuperação de ar na alimentação com %SiO₂ no concentrado no estágio rougher.

Artigo B - Evaluation of Iron Ore Reverse Mechanical Rougher Flotation - Part II: Comparison of Self-Aspirated and Forced Air Cells

Os resultados obtidos no comparativo desta pesquisa demonstram que células de flotação mecânica rougher com sistema de ar forçado apresentam desempenho superior em relação às autoaeradas, tanto nos indicadores de processo quanto nas propriedades das bolhas. Esta solução com ar forçado contribui para promover melhor distribuição do tamanho da bolha e suspensão de partículas com a injeção forçada de ar, propiciando o aumento da cinética da flotação e maior recuperação de partículas finas, diminuindo a recuperação de água na espuma e arraste de partículas finas de minerais ferrosos, além de reduzir o consumo de potência operacional.

Artigo C – Integration of Operating Conditions and Froth Properties in Iron Ore Flotation

O primeiro pilar de condições operacionais da planta possibilitou avaliar como as variáveis de processo podem afetar as características da espuma, indicando novas oportunidades para controle de processo. Já o pilar de monitoramento possibilita reduzir o tempo de atuação em desvio das variáveis ao adotar ferramentas como controle estatístico de processo, análise de experimento e estatística multivariada, visando identificar influências e auxiliar na tomada de decisão para reduzir a variabilidade do processo. Finalmente, no pilar de controle de processo, a seleção de estratégias de controle, modelagem de *soft sensors* e controle avançados de processos contribuem para controles de estabilidade, recuperação e qualidade.

6. CONCLUSÕES

O resumo da conclusão dos três artigos originados com esta pesquisa nos **Capítulos 10, 11 e 12**, estão dispostos a seguir.

Artigo A - Evaluation of Iron Ore Reverse Mechanical Rougher Flotation - Part I: Statistical Investigation of Air Flow Rate and Froth Depth Using RSM-CCD

Com base no planejamento de experimentos utilizando o arranjo CCD realizado no estágio rougher da flotação mecânica de minério de ferro utilizando máquinas com ar forçado, foi possível avaliar de forma sistemática os efeitos individuais e interações da vazão de ar e camada de espuma, resultando em modelos que propiciam otimização, considerando também propriedades de espuma. A investigação estatística mostrou que a interação entre taxa de ar e camada de espuma impacta diretamente a recuperação metalúrgica e a seletividade do processo, evidenciando a importância de abordagens experimentais estruturadas para melhorar a eficiência operacional e comportamento da curva de recuperação de ar para otimização.

Artigo B - Evaluation of Iron Ore Reverse Mechanical Rougher Flotation - Part II: Comparison of Self-Aspirated and Forced Air Cells

Os testes industriais realizados comparando células de flotação mecânica rougher reforçam o potencial da tecnologia de ar forçado como alternativa viável para modernização das células de flotação autoaeradas, oferecendo ganhos operacionais e econômicos significativos para maximizar a produção de pellet feed com qualidade para redução direta. O estudo de viabilidade econômica para a modernização de todo o parque de células de flotação mecânica de autoaerada para ar forçado para uma planta objeto de estudo foi altamente atrativo, acarretando um ganho relativo ao custo estimado do investimento necessário inferior a um ano, com uma taxa interna de retorno de 240,7%.

Artigo C – Integration of Operating Conditions and Froth Properties in Iron Ore Flotation

Melhorar o desempenho da flotação por meio da integração de técnicas já conhecidas é uma contribuição acadêmica relevante considerando os três pilares: condições operacionais da planta, monitoramento de desempenho e controle de processo. A análise crítica das variáveis operacionais e das propriedades da espuma permite identificar oportunidades de controle. O monitoramento contínuo, com apoio de ferramentas online e equipe capacitada, contribui para a estabilidade do processo, enquanto a aplicação de estatísticas multivariadas e sensores virtuais ampliam a capacidade de diagnóstico. Já adotar estratégias avançadas como MPC e redes neurais mostram-se promissoras para controle e otimização. Casos práticos em duas plantas de flotação de minério de ferro evidenciam ganhos potenciais, oferecendo base para melhoria contínua e novas pesquisas.

Os casos apresentados nos artigos fruto desta pesquisa indicam que a adoção de variáveis de processo e propriedades da espuma de flotação podem proporcionar um melhor desempenho operacional e gerar benefícios econômicos por meio de modernização, adoção de ferramentas e técnicas relevantes para o monitoramento, controle e otimização do processo.

7. RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

O cenário atual de competitividade na concentração de minério de ferro lida com diversos desafios, como por exemplo, reservas mais pobres, restrições de disposição em barragens de rejeito, necessidade de redução da variabilidade do produto, maximização da recuperação metalúrgica, redução de custo operacional e necessidade de minimização da emissão de CO₂. Dessa forma, esta pesquisa demonstrou relevância frente a estes desafios ao investigar as influências e promover a integração das condições operacionais e propriedades da superfície da camada de espuma no contexto de desempenho e controle na flotação de minério de ferro.

A análise estatística com testes industriais propicia identificar condições de operação em regiões ótimas que mitigam impactos na competitividade. Os resultados demonstraram que as células de ar forçado apresentaram desempenho superior, com maior seletividade, melhor distribuição de bolhas, menor consumo de energia e menor arraste de finos. Benefícios também foram identificados, como menor consumo de energia, redução da quantidade de componentes mecânicos, redução de consumo específico de reagentes, menores custos de manutenção e menor probabilidade de paradas não planejadas.

Apesar de ainda ser um desafio para diversas plantas utilizar propriedades de espuma associadas a controle, os resultados demonstram que há oportunidades de soluções e modernização de tecnologia para aumento do índice de seletividade, recuperação metalúrgica e aderência de qualidade do pellet feed. Dessa forma, implica em melhor aproveitamento da reserva, favorecendo a redução de massa para rejeito, estabilidade de processo, menor custo operacional e contribui para a menor emissão de CO₂ na siderurgia, visto que ao maximizar o split de pellet feed de redução direta, implica em reduzir a massa do pellet feed para a rota de alto forno.

8. SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

- Explorar um range maior de vazão de ar para avaliar o efeito industrial de %Fe no rejeito na flotação com ar forçado.
- Avaliar efeito nas propriedades de espuma com planejamento de experimento considerando explorar também a variação do coletor amina, depressor amido e pH.
- Utilizar câmera hiperespectral no estágio recleaner para explorar modelos de correlação de propriedades de imagem com %SiO₂ no concentrado da flotação.
- Utilizar redes neurais convolucionais para predição de qualidade baseado em análise de imagem.
- Explorar o efeito de demais propriedades de bolhas, como *solids loading*, *burst rate* e formato aproximado das bolhas, visando desenvolver controladores fuzzy e criar *soft sensor* para %Fe no rejeito e %SiO₂ no concentrado.
- Desenvolver um sistema coordenador que gera automaticamente setpoints de velocidade de espuma, manipulando vazão de ar e nível, para cada estágio da flotação em função da qualidade do ROM alimentado, propiciando uma otimização em tempo real (*Real Time Optimization - RTO*) com função objetivo considerando custo, recuperação e teor.
- Implantar um otimização em tempo real (RTO) para o controle do PAR (*peak air recovery*) em cada estágio da flotação, atuando no nível e camada de espuma.

9. REFERÊNCIAS

(citadas nos capítulos 1 a 3)

ACHAYE, I. Effect of particle properties on froth stability. Doctoral Thesis, University of Cape Town, Faculty of Engineering & the Built Environment, Department of Chemical Engineering, 2017.

AHMED, N.; JAMESON, G. Flotation kinetics. *Mineral Processing. Extractive Metall. Rev.* 5, 77-99, 1989.

AKTAS, Z.; CILLIERS, J. J.; BANFORD, A. W. Dynamic froth stability: Particle size, airflow rate and conditioning time effects. *International Journal of Mineral Processing*, v. 87, n. 1-2, p. 65-71, 2008.

ALDRICH, C.; MARAIS, C.; SHEAN, B.J. e CILLIERS, J.J. Online monitoring and control of froth flotation systems with machine vision: a review. *International Journal of Mineral Processing*, p.1-13, 2010.

ARAÚJO, A. C.; ARAMANTE, S. C.; SOUZA, C. C.; SILVA, R. R. R. Ore mineralogy and its relevance for selection of concentration methods in processing of Brazilian iron ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, v. 112, p. C54-C64, 2003.

ARAÚJO, A. C.; VIANA, R. P. M.; PERES, A. E. C. Reagents in iron ores flotation. *Minerals Engineering*, v. 18, p. 219-224, 2005.

ATA, S.; AHMED, N.; JAMESON, G. J. A study of bubble coalescence in flotation froths. *International Journal of Mineral Processing*, v. 72, n. 1-4, p. 255–266, 2003.

BALTAR, C. A. M. Flotação no tratamento de minérios. Editora Universitária UFPE. Recife-PE, Brasil, ed. 2, 2008.

BASCUR, O. A.; SOUDEK, A. Grinding and Flotation Optimization Using Operational Intelligence. *Mining, Metallurgy and Exploration*, v. 36, n. 1, p. 139-149, 2019.

BAUER, M.; CRAIG, I. K. Economic assessment of advanced process control - A survey and framework. *Journal of Process Control*, v. 18, n. 1, p. 2-18, 2008.

BERGH, L. G.; YIANATOS, J. B. The long way toward multivariate predictive control of flotation processes. *Journal of Process Control*, v. 21, n. 2, p. 226-234, 2011.

BHONDAYI, C. Measurements of particle loading on bubbles in froth flotation. p. 1–174, 2010.

BLANKE, M.; KINNAERT, M.; LUNZE, J.; STAROSWIECKI, M. and SCHRÖDER, J.

Diagnosis and Fault-Tolerant Control. Berlin: Springer-Verlag, 2006.

BRITO, T. G. Método da interseção normal à fronteira para otimização bi-objetivo do fresamento de topo do aço ABNT 1045. 121 p. Tese (Doutorado em Ciências em Engenharia de Produção) - Universidade Federal de Itajubá, Itajubá. 2015.

BROOKS, S.; BAUER, K. M. Sensor validation and reconstruction: Experiences with commercial technology. *Control Engineering Practice*, v. 77, n. April, p. 28–40, 2018.

CAMPOS, M. C. M. M.; GOMES, M. V. C.; PEREZ, J. M. G. T. *Advanced Control and Optimization in the Petroleum Industry*. (in Portuguese). 1ª ed. Interciência. Rio de Janeiro, Brasil, 510p, 2013.

CAPPUCCITTI, F.; NESSET, J.E. Frother and collector effects on flotation cell hydrodynamics and their implication on circuit performance, *Proceedings 42nd Annual Meeting Canadian Mineral Processors*, pp 39-54, 2010.

CASALI, A.; GONZALEZ, G.; AGUSTO, H.; VALLEBUONA, G. Dynamic simulator of a rougher flotation circuit for a copper sulphide ore. *Miner. Eng.* 15, 253–262, 2002.

CHEN, C. Development of measurement of froth characteristics. p. 1–50, 2012.

CHELGANI, S. C.; SHAHBAZI, B.; HADAVANDI, E. Support vector regression modeling of coal flotation based on variable importance measurements by mutual information method. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, v. 114, p. 102-108, 2018.

CRUZ, D. G. et al. Análise fatorial multivariada aplicada na caracterização de contaminantes de um depósito de minério de ferro.” *Tecnologia em Metalurgia Materiais e Mineração* 15(3): 248–53, 2018.

DAWSON, P.; KOORTS., R. Flotation control incorporating fuzzy logic and image analysis. *IFAC*, 2014.

DOUCET, J. S.; GOMEZ, C. O.; FINCH, J. A. A first step towards gas dispersion management: manipulation of gas distribution in flotation circuits. *Proceedings 38th Annual Canadian Mineral Processors Conference, Canada*. pp. 423-436, 2006.

DOWNS, J.J.; SKOGESTAD, S. An industrial and academic perspective on plant wide control, *Annual Reviews in Control* 35 (1), 99-110, 2011.

FALUTSU, M.; AND DOBBY, G. Froth performance in commercial sized flotation columns. *Minerals Engineering*, 5: 1207-1223, 1992.

FINCH, J.; CILLIERS, J. & YIANATOS, J. Column Flotation. In: M. Fuerstenau, G. Jameson & R. Yoon, eds. Froth flotation: A century of innovation. Colorado: Society for Mining, Metallurgy and Exploration, pp. 681-708, 2007.

GONZALEZ. Model Predictive Control of Froth Flotation Processes Aided, 2018.

GOODWIN, G.; SERON, M.; MAYNE, D. Optimization opportunities in mining, metal and mineral processing, Annual Reviews in Control 32, 17-32, 2008.

GOPALUNI, R. BHUSHAN et al. Modern machine learning tools for monitoring and control of industrial processes: A survey. IFAC - Papers Online, v. 53, n. 2, p. 218-229, 2020.

GORAIN, B.; FRANZIDIS, J.P.; MANLAPIG, E. Studies on impeller type, impeller speed and air flow rate in an industrial scale flotation cell - Part 1: Effect on bubble size distribution. Miner. Eng. 8, 615-635, 1995.

GORAIN, B.; FRANZIDIS, J.; MANLAPIG, E. Flotation Cell Design: Application of Fundamental Principles, Encyclopedia of Separation Science. Academic Press, pp. 1502-1512, 2000.

GRAU, R.A.; LASKOWSKI, J.S.; HEISKANEN, K. Effect of frothers on bubble size. International Journal of Mineral Processing, v. 76, n. 4, p. 225-233, 2005.

GROENEWALD, Wi. J.; V. A Process Performance Monitoring Methodology for Mineral Processing Plants. Extractive Metallurgical Engineering. April, 2014.

HADLER, K. & CILLIERS, J., 2009. The relationship between the peak in air recovery and flotation bank performance. Minerals Engineering, 22(5), pp. 451-455, 2009.

HADLER, K.; GREYLING, M.; PLINT, N. & CILLIERS, J. The effect of froth depth on air recovery and flotation performance. Minerals Engineering, 36(38), pp. 248-253, 2012.

HADLER, K.; SMITH, C. & CILLIERS, J. Recovery vs. mass pull: The link to air recovery. Minerals Engineering, Volume 23, pp. 994-1002, 2010.

HODOUIN, D. et al. State of the art and challenges in mineral processing control. Control Engineering Practice, v. 9, n. 9, p. 995-1005, 2001.

HARRIS, A.; VENKATESAN, L.; GREYLING, M. A practical approach to plant-scale flotation Optimization. The Journal of The Southern African Institute of Mining and Metallurgy. Vol 113, 2013. HATFIELD, D. The implications of froth structure and surface appearance for flotation performance, 2006.

HODOUIN, D. Methods for automatic control, observation, and optimization in mineral

processing plants. *Journal of Process Control*, v. 21, n. 2, p. 211-225, 2011.

HONGYU, K.; SANDANIELO, V. L. M.; JUNIOR, G. J. O. Análise de Componentes Principais: Resumo Teórico, Aplicação e Interpretação. *E&S Engineering and Science* 5(1): 83–90, 2016.

HORN, Zander Christo. Froth texture extraction with deep learning. March, 2018.

HU, Weimeng. Flotation Circuit Optimisation and Design. September, p. 1-150, 2014.

JORDAN, M.I.; MITCHELL, T.M.. Machine learning: trends, perspectives, and prospects. *Science* 349, 255–260, 2015.

JOVANOVIĆ, I.; MILJANOVIĆ, I. Contemporary advanced control techniques for flotation plants with mechanical flotation cells - A review. *Minerals Engineering*, v. 70, p. 228-249, 2015.

KECHT, C.; EGGER, A.; KRATSCH, W.; & ROGLINGER, M. Quantifying chatbots' ability to learn business processes. *Information Systems*, 113, Article 102176, 2023.

KOH, P.; HAO, F.; SMITH, L.; CHAU, T.; BRUCKARD, W. The effect of particle shape and hydrophobicity in flotation. *International Journal of Mineral Processing* 93, 128-134, 2009.

KUMAR, A. ; SHANKAR, A.; HOLLEBEEK, L. D.; BEHL, A. H.; LIM, W. M. Generative artificial intelligence (GenAI) revolution: A deep dive into GenAI adoption. *Journal of Business Research* 189, 115160, 2025.

LAPLANTE, A.; KAYA, M., SMITH, H. The effect of froth on flotation kinetics - a mass transfer approach. In: *Frothing in flotation*. Gordon and Breach, London, UK, pp. 147-168, 1989.

LASKOWSKI, J. S.; TLHONE, T.; WILLIAMS, P.; DING K., Fundamental properties of the polyoxypropylene alkyl ether flotation frothers, *Int. J. Miner. Process.*, 72, pp. 289-299, 2003.

LAURILA, H.; KARESUVUORI, J.; TIILI, O. Strategies for Instrumentation and Control of Flotation Circuits. In: *Mineral Processing Plant Design, Practice and Control Proceedings*, pp. 2174-2195, 2002.

LEJA, J. *Surface Chemistry of Froth Flotation*. New York: Plenum Press, 1982.

LELINSKI, D. Seminário Flotação FLSmidth, Belo Horizonte. 2024.

LIMA, N. P. Avaliação do processo de flotação para diferentes frações granulométricas. Tese Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2010.

LIMA, N. P.; VALADÃO, G. E. S.; PERES, A. E. C. Effect of amine and starch dosages on the reverse cationic flotation of an iron ore. *Minerals Engineering*, v. 45, p. 180-184, 2013.

LIMA, N. P.; PINTO, T. C. S.; TAVARES, A. C.; SWEET, J. The entrainment effect on the performance of iron ore reverse flotation. *Minerals Engineering*, v. 96-97, p. 53-58, 2016.

LIU, B. “Weak AI” is likely to never become “Strong AI”, so what is its greatest value for us? arXiv preprint arXiv:2103.15294, 2021.

MALDONADO, M.; SBARBARO, D., LIZAMA, E. Optimal control of a rougher flotation process based on dynamic programming, *Minerals Engineering* 20, 221-232, 2007.

MALDONADO, M.; ARAYA, R.; FINCH, J. Optimizing bank performance by recovery profiling, *Minerals Engineering* 24, 939-943, 2011.

MAPA, P. S. Rota de processo para o underflow da deslamagem de minérios de ferro do concentrador da Samarco Mineração S.A. Dissertação Mestrado em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2006.

MARAIS, C. Estimation of concentrate grade in platinum flotation based on froth image analysis. December, 2010.

MATHE, Z. T.; HARRIS, M. C.; & O’CONNOR, C. T. Review of methods to model the froth phase in non-steady state flotation systems. *Minerals Engineering*, 13, 127–140, 2000.

MATOS, V. E. Seletividade de reagentes na flotação reversa de minério de ferro. 2017. 116 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2017.

MA, X.; & HUO, Y. Are users willing to embrace ChatGPT? Exploring the factors on the acceptance of chatbots from the perspective of AIDUA framework. *Technology in Society*, 75, Article 102362, 2023.

MATOS, V. E. Propriedades de espuma no desempenho da flotação catiônica reversa de minério de ferro. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2022.

MCCARTHY, J.; MINSKY, M.L.; ROCHESTER, N.; SHANNON, C.E. A proposal for the Dartmouth Summer Research Project on artificial intelligence, August 31, 1955. *AI Mag.* 27, 12, 2006.

MCCOY, J. T.; AURET, L. Machine learning applications in minerals processing: A review. *Minerals Engineering*, v. 132, n. November 2018, p. 95–109, 2019.

MCKEE, D. J. Automatic flotation control – a review of 20 years of effort, *Minerals Engineering*, 7-11, 228-249, 1991.

MONTGOMERY, D. C. *Design and Analysis of Experiments*. 7th. ed. New York: John Wiley & Sons, 2009.

MORAR, S. H. The use of machine vision to describe and evaluate froth phase behaviour and performance in mineral flotation systems. PhD Thesis, University of Cape Town, p. 311, 2010.

MORAR, S.; BRADSHAW, D. & HARRIS, M. The use of the froth surface lamellae burst rate as a flotation froth stability measurement. *Minerals Engineering*, 36(38), pp. 152-159, 2012.

MURPHY, B., HEATH, J.L., *Selection of Mechanical Flotation Equipment*, 2013.

NAGARAJ, R. D.; FARINATO, R. S. Evolution of flotation chemistry and chemicals: A century of innovations and the lingering challenges. *Minerals Engineering* v. 96-97, p 2-14, 2016.

NAKHAEI, F.; IRANNAJAD, M., Reagents types in flotation of iron ore oxide minerals: A review. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy Review*, 39 (2). pp. 89–124. doi: 10.1080/08827508.2017.1391245, 2018.

NAKHAEI, F.; IRANNAJAD, M.; MOHAMMADNEJAD, S. Column flotation performance prediction: PCA, ANN and image analysis-based approaches. *Physicochemical Problems of Mineral Processing*, v. 55, n. 5, p. 1298-1310, 2019.

NEETHLING, S.J. Simple approximations for estimating froth recovery. *Int. J. Miner. Process.* 89 (1-4), 4452, 2008.

NEETHLING, S. J., CILLIERS, J. J. Solids motion in flowing froths. *Chem. Eng. Sci.* 57 (4), 607-615, 2002.

NELSON, M.G.; TRACZYK, F.P.; LELINSKI, D. *Design of Mechanical Flotation Machines. Mineral Processing Plant Design, Practice and Control* (eds: Mular, A. Halbe, D. and Barratt, D.). pp 1179- 1203, 2002.

NESSET, J.E.; GOMEZ C.O., FINCH J.A., HERNANDEZ-AGUILAR, J.R., DiFeo, A. The use of gas dispersion measurements to improve flotation performance, *Proceedings 37th Annual Meeting of the Canadian Mineral Processors (CIM)*, pp 401-421, 2005.

NESSET, J.E.; HERNANDEZ-AGUILAR, J.R.; ACUÑA, C.; GOMEZ, C.O.; FINCH, J.A. Some gas dispersion characteristics of mechanical flotation machines, *Minerals Engineering*, Vol19 (6-8), pp 807-815, 2006.

NILO JÚNIOR, L. P. Otimização de um processo de solda MIG/MAG para aplicação na indústria automobilística através da utilização da técnica do projeto e análise de experimentos. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Instituto de Engenharia de Produção e Gestão, Universidade Federal de Itajubá, Itajubá, 2003.

NUNES, T. C.; GOMES, R. M.; CALDAS, F. N.; ROCHA, E. R.; VIEIRA, E. G.; ALVES, M. P. C. Virtual Assistant using Generative Artificial Intelligence applied to Iron Ore Concentration, 24^o Mining Seminar. ABM, 2025.

PATEL, D.; SAHU, C. K.; & RAI, R. Security in modern manufacturing systems: Integrating blockchain in artificial intelligence-assisted manufacturing. *International Journal of Production Research*, 62(3), 1041–1071, 2024.

PERES, A. E. C. Informação pessoal, 2025.

PERES, A. E. C.; ARAÚJO, A. C. A flotação como operação unitária no tratamento de minérios. In: CHAVES, A. P. (Ed.) *Teoria e Prática do Tratamento de Minérios volume 4*, 2^a edição: *A Flotação no Brasil*. Signus Editora, São Paulo, p. 1-29, 2009.

PERES, A. E. C.; COELHO, E. M.; ARAÚJO, A. C. Flotação, espessamento, deslamagem e floculação seletiva. In: COELHO, E.M. *Tratamento de Minérios e Hidrometalurgia*; In *Memorian Prof. Paulo Abib Andery*. Recife: ITEP-CNPq, 1980.

PERES, A. E. C.; SALUM, M. J. G.; VALADÃO, G. E. S.; ARAÚJO, A. C. Métodos de concentração. In: VALADÃO, G. E. S; ARAÚJO, A. C. *Introdução ao tratamento de minérios*. Belo Horizonte: Editora UFMG, c.6, p. 105-139, 2012.

PEREZ G., R.; GALLEGOS A, P.; URIBE S, A. & NAVA A, F. Effect of collection zone height and operating variables on recovery of overload flotation columns. *Minerals Engineering* , Volume 15, pp. 325-331, 2002.

POPLI, K. Real-time Process Monitoring for Froth Flotation Processes using Image Processing and Dynamic Fundamental Models. p. 277, 2017.

PUTZ, E.; CIPRIANO, A. Hybrid model predictive control for flotation plants, *Minerals Engineering* 70 (2015) 26-35, 2015.

QUINTANILLA, P.; NEETHLING, S. J.; BRITO-PARADA, PABLO R. Modelling for froth flotation control: A review. *Minerals Engineering*, v. 162, n. April 2020, p. 106718, 2021.

RAO, B. V., Plant Trials of the MAXGen Flotation Mechanism in a Lead Flotation Circuit. *The Indian Institute of Metals – IIM*, 77 (12):4215-4220, 2023.

ROCHA, G. M. Avaliação de depressores na flotação de rejeito de minério de ferro, 2017. 91 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Minas), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2017.

RUSSELL, S. J.; & NORVIG, P. *Artificial intelligence: A modern approach* (3rd ed.). Pearson, 2015.

SALES, C. G. Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do underflow do espessador de lamas da usina de Brucutu. 2012. 136 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2012.

SÁNCHEZ-FERNÁNDEZ, A. et al. Fault detection based on time series modeling and multivariate statistical process control. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems*, v. 182, n. July, p. 57-69, 2018.

SCHWARZ, M. P., WIIT, P. J. *Treatise on Process Metallurgy* (Second Edition), Elsevier. Chapter 2.3.2 - Modeling of Mineral Froth Flotation, 521-533, 2024.

SCHULZE, H. J. *Physico-chemical elementary processes in flotation*. Elsevier, v. 348, 238 p., Amsterdam, 1984.

SEAMAN, D. R.; FRANZIDIS, J-P. AND MANLAPIG, E. V. Bubble load measurement in the pulp zone of industrial flotation machines - a new device for determining the froth recovery of attached particles. *Int J Miner Process.*, 74(1): pp 1-13, 2004.

SEARLE, J.R. Minds, brains, and programs. *Behav. Brain Sci.* 3, 417–424, 1980.

SEUNGWOO P. Modeling of bubble coursing in froth phase from first principals. PhD thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University. USA, 2015.

SHAHBAZI, B.; CHEHREH CHELGANI, S.; MATIN, S. S. Prediction of froth flotation responses based on various conditioning parameters by Random Forest method. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects*, v. 529, n. July, p. 936–941, 2017.

SHEAN, B. J.; CILLIERS, J. J. A review of froth flotation control. *International Journal of Mineral Processing*, v. 100, n. 3–4, p. 57-71, 2011.

SHEAN, B.; HADLER, K.; NEETHLING, S.; CILLIERS, J.J. A dynamic model for level prediction in aerated tanks. *Miner. Eng.* 125, 140-149, 2018.

SHEIKH, H., PRINS, C., SCHRIJVERS, E., . Artificial intelligence: Definition and background. In: Sheikh, H., Prins, C., Schrijvers, E. (Eds.), *Mission AI: The New System Technology*, pp. 15–41, 2023.

SHUMBA, T.C. Relationship between flotation operational factors and froth behaviour. May, 2014.

SMITH, C., NEETHLING, S., CILLIERS, J.J. Air-rate profile optimisation: from simulation to bank improvement. *Minerals Engineering* 21, 973–981, 2008.

SMITH, P.G. and WARREN, L.J. Entrainment of particles into flotation froths, in *Frothing in Flotation*, Gordon and Breach, New York, 123-145, 1989.

SILVA, R. R. R. Interação entre Surfataentes na Flotação de Minérios de Ferro. Tese de Doutorado. Belo Horizonte: Curso de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica e de Minas da Universidade Federal de Minas Gerais Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

SKOGESTAD, S. Control structure design for complete chemical plants, *Computers and Chemical Engineering*, 28 (1–2), 219–234, 2004.

STEYN, C.; SANDROCK, C. Causal model of an industrial platinum flotation circuit. *Control Engineering Practice*, v. 109, n. February, p. 104736, 2021.

SUN, B. et al. A comprehensive hybrid first principles/machine learning modeling framework for complex industrial processes. *Journal of Process Control*, v. 86, p. 30-43, 2020.

SUN, B. et al. An integrated multi-mode model of froth flotation cell based on fusion of flotation kinetics and froth image features. *Minerals Engineering*, v. 172, 2021.

THWAITES, P. Process Control in metallurgical plants-From an Xstrata1 perspective. *Annual Reviews in Control*, v. 31, n. 2, p. 221-239, 2007.

TITELMAN, P.D. Model Predictive Control Based on Machine Learning Techniques for Paste Tailing Production. December, p. 1-199, 2018.

TSHIBWABWA, E.M. Measurement and modelling of bubble size in flotation froths. n. August, 2018.

TURRER, H. D. G. Polímeros depressores na flotação de minério de ferro. 2007. 171 p. Tese (Doutorado em Engenharia Metalúrgica e de Minas), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2007.

UUSI-HALLILA, S. Faculty of Technology Utilizing Froth Phase Behaviour and Machine

Vision to Indicate Flotation. April, p. 101, 2014.

VENTURA-MEDINA, E.; BARBIAN, N. & CILLIERS, J. Froth stability and flotation performance. s.l., XXII International Mineral Processing Congress, 2003.

VENTURA-MEDINA, E. & CILLIERS, J. A model to describe flotation performance based on physics of foams and froth images analysis. *International Journal of Mineral Processing*, 67(1-4), pp. 79-99, 2002.

VERA, M. A.; FRANZIDIS, J. P.; MANLAPIG, E. V. Simultaneous determination of collection zone rate constant and froth zone recovery in a mechanical flotation environment. *Minerals Engineering* 12, 1163–1176, 1999.

VERA, M. A.; MATHE, Z. T.; FRANZIDIS, J. P.; HARRIS, M. C.; MANLAPIG, E. V.; & O'CONNOR, C. T. The modelling of froth zone recovery in batch and continuously operated laboratory flotation cells. *International Journal of Mineral Processing*, 64(2–3), 135-151. 2002.

WANG, H. et al. Regulation of bubble size in flotation: A review. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, v. 8, n. 5, 2020.

WANG, D.; LIU, Q. Hydrodynamics of froth flotation and its effects on fine and ultrafine mineral particle flotation: A literature review. *Minerals Engineering*, v. 173, n. August, p. 107-220, 2021.

WILLS, B. A.; NAPIER-MUNN, T. J. *Mineral Processing Technology; An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery*. 7th Edition, Brisbane: Elsevier Science & Technology Books, 444p, 2006.

WRIGHT, B.A. The Development of a Vision-Based Flotation Froth Analysis System. September, 1999.

YANG, F.; DUAN, P.; SHAH, S. L.; CHEN, T. Capturing connectivity and causality in complex industrial processes, Vol. 9783319053790. Springer, 2014.

YANG, F.; ZUO, K. Artificial intelligence for mineral exploration: A review and perspectives on future directions from data science, *Earth-Science Reviews* 258 104941, 2024.

YIANATOS, J.; MOYS, M.; CONTRERAS, F.; & VILLANUEVA, A. Froth recovery of industrial flotation cells. *Minerals Engineering*, 21(12-14), 817-825, 2008.

YOON, R.H. The role of hydrodynamic and surface forces in bubble-particle interaction. *Inter. J. Miner. Proces.*, 58: 128–143, 2000.

ZARIE, M.; JAHEDSARAVANI, A.; MASSINAEI, M. Flotation froth image classification using convolutional neural networks. *Minerals Engineering*, v. 155, n. January, 2020.

X. ZHENG, J.P. FRANZIDIS, N.W. JOHNSON, An evaluation of different models of water recovery in flotation, *Minerals Engineering*, Volume 19, Issue 9, 2006.

ZHU, H.; J. ZHU, L.A. VALDIVIESO, F. MIN, H. WANG, W. XU, M. LI, Effect of reagent blend on characteristics and dispersion of bubbles in a flotation column, *J. China Coal Soc.* 44 1586–1592, 2019.

10. ARTIGO A - Evaluation of Iron Ore Reverse Mechanical Rougher Flotation - Part I: Statistical Investigation of Air Flow Rate and Froth Depth Using RSM-CCD

*T. C. Nunes^{1,2}, N. P. Lima¹, R.F. Ferreira¹, T. A. M. Euzébio³, A. E. C. Peres²

1 Vale S.A., Mineral Processing Department, Nova Lima, Minas Gerais, Brazil

2 Federal University of Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil

3 Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto e Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Brazil

(*Corresponding author: tiago.caixeta@vale.com)

Submitted Manuscripted at MEI – Minerals Engineering.

Created: 25/Aug/2025

Submitted: 09/Sep/2025

ID: MINE-D-25-01691

Status: *Waiting for approval*

10.1 Abstract

The efficiency of the reverse cationic flotation of iron ore has as an adjustment lever the operating parameters of air flow rate and froth depth in the mechanical cell. In this study, nine industrial flotation tests were conducted using the Central Composite Design (CCD) arrangement to identify process response conditions and froth variables using machine vision. The following responses were investigated: %SiO₂ in the concentrate, %Fe in the tailings, selectivity index, metallurgical recovery, water recovery in the overflow, froth velocity and bubble size. The Response Surface Methodology (RSM) was applied to evaluate the statistical influence of these variables on flotation performance. Air recovery was also investigated, which corresponds to the fraction of air that leaves the pulp phase for the overflow. The tests were conducted under controlled conditions and the collected data were analyzed to apply mathematical modeling, ANOVA, analysis of the main effects of the parameters and analysis of the interaction effects between the parameters of air flow rate and froth depth in order to identify optimal conditions in flotation. The opportunity to explore other parameter ranges was also identified, such as reducing the air flow rate range adopted.

Keywords: Central composite design (CCD); flotation; froth image analysis; iron ore; response surface methodology (RSM); statistical

10.2 Introduction

Flotation is a concentration process applied to solid particles that makes use of differences in the surface characteristics of mineral species by treating heterogeneous mixtures of particles suspended in the pulp phase, into which a gas phase is introduced (Leja, 1982). Flotation performance depends on operating conditions, which include process variables that affect froth characteristics. These variables refer to those modified during routine operation, such as air flow rate, froth depth, density and specific consumption of reagents.

Any variation in these operating conditions can affect the chemical and physical characteristics at the pulp stage. These changes in the pulp phase, in turn, alter the structure and stability of the froth, which ultimately impacts metallurgical recovery. These mechanisms, internal to the flotation system, determine the amount and content of the material recovered in the concentrate, affecting the stability of the froth and resulting in visual changes on its surface (Morar, 2010). Experienced operators have the ability to observe the surface of the froth with the naked eye and propose adjustments. However, this subjective assessment is limited by personal experience (Yuan et al., 2024).

An alternative is to use online machine vision capabilities to measure froth characteristics. In the froth phase, machine vision is used to make online measurements of properties on the surface of the froth, such as bubble size, number of bubbles, froth velocity, and froth stability (Quintanilla et al., 2021). With recent advances in machine vision and technologies related to machine learning, the use of these features on the surface of the froth for monitoring has been widely used (Xie et al., 2025).

The stability of the froth phase is important to determine flotation performance (Farrokhpay, 2011). Of the techniques used to determine stability, it is air recovery that has shown the greatest potential, both for froth stability and as an indicator of flotation performance (Hadler and Cilliers, 2009) and (Hadler et al., 2012).

In terms of process control applied in flotation, the air flow rate and the froth layer are the most used manipulated variables to control the stability of the process to achieve the metallurgical recovery and target quality of the concentrate. The air flow rate affects the froth phase, while the froth velocity and the froth height above the cell edge are the two variables measured and used to adjust the air flow rate. Thus, the slurry level is adjusted to increase or decrease the mass recovery. However, it is challenging to define the operational limits for the air flow rate and froth depth of each flotation cell (Harris et al., 2013). In iron ore plants, air and level optimization in individual flotation cells is, in practice, accomplished by fixing the air and changing the level or vice versa. This methodology ignores the interaction effects between the air flow rate and the level.

One option to evaluate this interaction is to use statistical methods that enable the identification of significant models to reduce process variability, resulting in better performance (Montgomery, 2013). The Response Surface Methodology (RSM) is an experimental design method that aims to obtain optimal conditions with a relatively small number of experiments. Central Composite Design (CCD) is a factorial type of experimental design that allows the investigation of the main effects of variables and the determination of the interaction effects between variables. The results of the experiment allow 3D response surfaces and empirical mathematical models to be determined for each response variable (Venkatesan et al., 2014).

In this study, an RSM-CCD experiment was applied for air flow rate and froth depth in the mechanical flotation of forced air in the rougher stage of iron ore on an industrial scale to evaluate process responses and froth variables using machine vision: %SiO₂ in the concentrate, %Fe in the tailings, selectivity index, metallurgical recovery, water recovery in the overflow, froth speed and bubble size. In addition, peak air recovery was also evaluated, and a statistical analysis was performed with operational data.

10.3 Iron Ore Reverse Flotation Process

The most practiced concentration of iron ore for direct reduction pellet feed production in Brazil is reverse cationic flotation of quartz, recommended for gangue that has quartz released for a particle flow of less than 0.150 mm (Silva et al., 2021) Among the ore flotation machines adopted, the mechanical, tank cells and column stand out. In conventional mechanical flotation, it is common to use self-aerated cells, with forced air being an exception.

The object of study of this research is a rougher bank of the reverse mechanical flotation of iron ore with forced air cells. In this plant, conventional mechanical flotation cells are used in the circuit from coarse to fractions $-0.15+0.045\text{mm}$, exploiting the differences in the surface properties of the minerals, where the quartz particles (SiO_2) become hydrophobic, adhere to the bubbles and rise to form a layer in the froth phase, which is collected in the overflow due to the addition of the amine collector in alkaline conditions. The iron-bearing mineral, on the other hand, remains in the pulp phase, is directed to the concentrate flow and is sunken by the action of the starch depressant (Lima et al., 2016). The flow of the sink in the recleaner stage generates the product in the final concentrate, called pellet feed. This product aims to meet the upper specification limit of 1.10% SiO_2 for direct reduction pellet feed, which is considered a high value-added product. In general, a good selectivity index above 14 is considered, grouping the rougher, cleaner, and scavenger steps.

The coarse flotation circuit object of this research has 8 lines as indicated in the simplified flowchart in Figure 10.44. The 8 rougher stages have 4 cells, 7 banks with self-aerated machines and one with forced air.

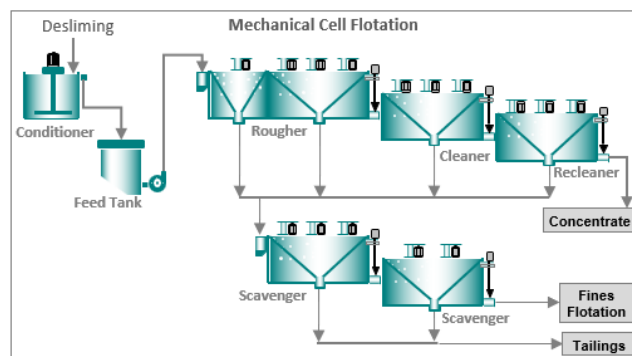


Figure 10.44 - Summary flowchart of iron ore reverse flotation.

10.4 Operational Conditions

Knowing the relationship between operating conditions and froth behavior is essential to develop control strategies with greater process stability, which results in better recovery and adherence to product quality (Quintanilla et al., 2021). Thus, the rougher stage with forced air provides a greater degree of freedom control when compared to the self-aerated one, since, in addition to controlling the level of the froth depth, it also makes it possible to control the air flow rate of each cell, which contributes to the stability and metallurgical performance.

For the rougher flotation with forced air, in addition to the standard control strategies for collector, depressor, pH, density and flow rate in the feed, each cell has control of the froth depth by manipulating 2 dart valves at the cell outlet (LCV), using level meters for the pulp interface (LIT_{FD}) and froth level above the edge (LIT_{FO}), together with meters for air flow rate control of each cell (FIT_n). In addition, there are two cameras installed, one in the feeding cell (AIT_F) and the other in the discharge (AIT_D), which make it possible to measure the properties on the surface of the bubbles using computer vision. The gauges and actuators of the rougher stage with forced air are illustrated in Figure 10.45.

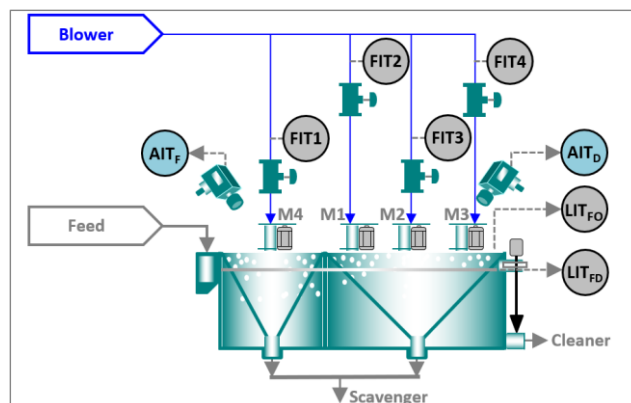


Figure 10.45 - Measurements and actuators of the forced air mechanical cell of the reverse flotation of iron ore.

10.4.1 Importance of Air Flow Rate and Froth Depth

Flotation can be divided into four sub-processes considering the behaviors of the pulp phase (collection zone) and the froth phase (cleaning zone), represented as shown in Figure 10.46. It

is verified that flotation occurs by two mechanisms: true flotation (attached to the bubble lamellae) and drag (recovered in the water retained at the boundaries of the bubble plateau).

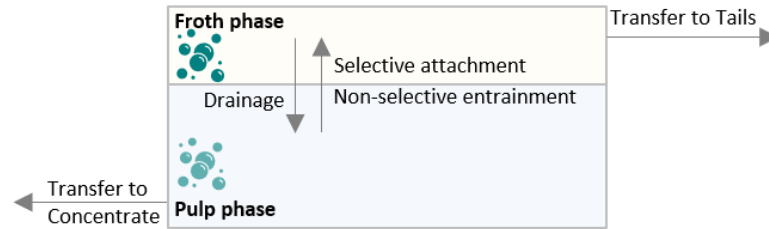


Figure 10.46 - Mass transfer methods in the quartz reverse cationic flotation process.
Fonte: Adapted from (Quintanilla et al., 2021).

Air is a very important variable in flotation control and operation because it affects both the pulp and the froth phase. Vera et al. (1999) investigated the effect of the air flow rate on the collection zone rate constant and froth zone recovery of a more raw copper ore (Harris et al., 2013) in a mechanical flotation cell for a number of different cell operating conditions. The relationship between the general rate constant and the froth depth is linear and negative, with the y-intercept representing the rate constant of the collection zone. The relationship is illustrated in Figure 10.47 according to the recovery of the froth zone (R_f) of Equation 1, where: k is the constant of the general flotation rate and k_c is the rate constant of the collection zone.

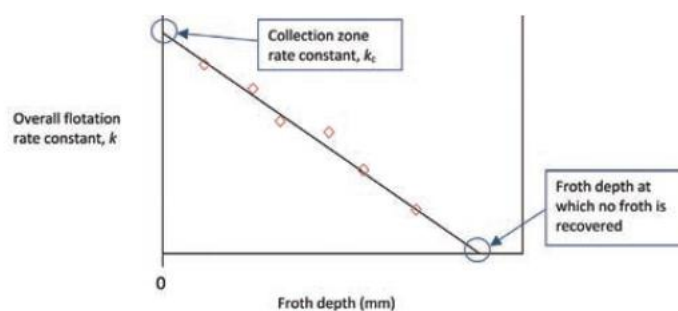



Figure 10.47 - Relationship between overall rate constant and froth depth.
Adapted from (Harris et al., 2013)

$$R_f = \frac{k}{k_c} \quad (1)$$

In this way, the froth and pulp phases can be decoupled. It has been shown for some minerals that with increasing air, k_c increases and R_f decreases. This implies improved pulp kinetics and deteriorated froth zone recovery. Therefore, there is a trade-off between the performance of the froth phase and the pulp phase.

The general constant of the 1st-order flotation rate k can be described as in (Gorain et al., 1998), according to Equation 1. Flotation performance is affected by changes in froth stability, which in turn is affected by variations in operating parameters, such as airflow and froth depth (Hadler et al., 2010) The effect of the air flow rate can be described by the flow of the surface area of the bubble, as per Equation 2, which is defined as the total surface area of the bubbles rising through the cell per unit cross-sectional area per unit time (Gorain et al., 1998).

$$k = P S_b R_f \quad (1) \quad (2)$$


$$S_b = \frac{6J_g}{d_{32}} \quad (3)$$

Where k is the constant of the overall flotation rate, P is the flotability of minerals, S_b is the flow of the bubble surface area, R_f is the froth recovery, J_g is the surface velocity of the gas or rate of air (cm/s), and d_{32} is the average diameter of the bubble (cm). Several studies of the air flow rate and froth depth in the stability and recovery of the overflow confirm the importance of the effect and interaction of these parameters in the control of flotation, as listed below.

- **Bubble surface area flow:** Gorain et al. (1995) showed that the flotation rate constant in an industrial flotation cell increases almost linearly with the bubble surface area flow;
- **Interaction between air in the pulp phase and the effect in the froth phase:** Increasing the froth depth results in decreased froth recovery. Similarly, increasing the air flow rate has been shown to increase the flotation rate in the pulp phase, but this is detrimental to the froth phase because it reduces froth recovery (Harris et al., 2013; Vera et al., 1999);
- **Interaction effect between air and froth depth:** Harris et al. (2013) observed that increasing the air flow rate increased froth velocity, but also decreased the froth height above the cell edge and thus, total froth depth;
- **Effect of froth stability on froth recovery:** Stable froths ensure high froth recoveries, while froths that show rapid bubble collapse and volume variation are responsible for lower froth recoveries. Tsatouhas et al. (2006) found that the recovery of the froth zone

significantly limited the overall recovery of the mineral cell. Thus, stable froths are desirable in flotation (Harris et al., 2013);

- **Effect of froth depth and air recovery:** According to (Pérez-Garibay et al., 2010) and (Hadler et al., 2012) the relationship between froth depth and air recovery measured in a laboratory-scale column, suggesting that air recovery decreased as froth depth increased;
- **Effect of air and froth depth on drag:** Zheng et al. (2006) showed that an increase in air flow rate increased drag due to the increase in the water reported to the concentrate. Similarly, it has been shown that increasing froth depth (defined as the distance between the pulp-froth interface and the flotation cell lip) decreased the drag, primarily as a result of longer froth retention time and more drainage of the hydrophilic particles. It has also been observed that air and froth depth interact strongly with each other and influence the drag by changing the froth residence time, froth structure, and froth properties. The overflow content is strongly dependent on the stability of the froth, since the recovery of the entrained gangue is directly proportional to the water recovered (Neethling and Cilliers, 2002);
- **Froth speed:** The efficiency of froth transport is directly proportional to its stability (Morar, 2010), which is a factor influenced by the size of the bubbles on the surface of the froth and the overflow speed. This velocity is influenced by the amount of air recovered by the overflow, or not lost by overflow on the surface of the froth, in relation to the amount of air fed into the cell;
- **Air recovery:** Hadler and Cilliers (2009) found that there is an optimal air flow rate that provides better content and recovery. This ideal corresponded to a spike in air recovery for a cell. Air recovery is the "fraction of air entering a cell that overflows into the cell as unburst bubbles" (Hadler and Cilliers, 2009).

10.4.2 Visual Properties on the Froth Surface

Machine vision system applications in flotation use image properties to associate with operating conditions for monitoring, analysis, prediction, and control actions to improve process performance. Understanding the relationship between operating conditions, froth behavior, and flotation performance is essential for the development of a control and optimization system

(Morar, 2010; Zarie et al., 2020) On the surface of the froth phase, some properties are measured, such as: the size of the bubble is related to the drainage of the froth phase and the residence time; the shape of the bubble is influenced by its size and froth depth; the speed of the froth is related to the rate of froth removal; and the stability of the froth is greatly influenced by the airflow (Horn, 2018)

According to (Venter et al., 2024) the velocity of bubbles on the cell surface is measured online and employed in control strategies as a controlled variable, to reach a set point specified by the plant operator, based on experience or dynamically calculated by an advanced process control (APC) system. To achieve the desired bubble speed, the air flow rate and froth depth can be manipulated, aiming to improve the recovery and/or content of the product depending on the defined strategy. Another alternative is to use speed to calculate peak air recovery and apply optimization algorithms for performance (Shean et al., 2017; Wepener et al., 2023, 2022).

Herein, the machine vision system used to measure the properties of bubbles on the surface of the froth phase is an application called "Vbolhas," using LabVIEW, as seen in Figure 10.48. Among the properties existing in the tool, for this article the froth velocity and bubble size were used, translated by the bubble perimeter.

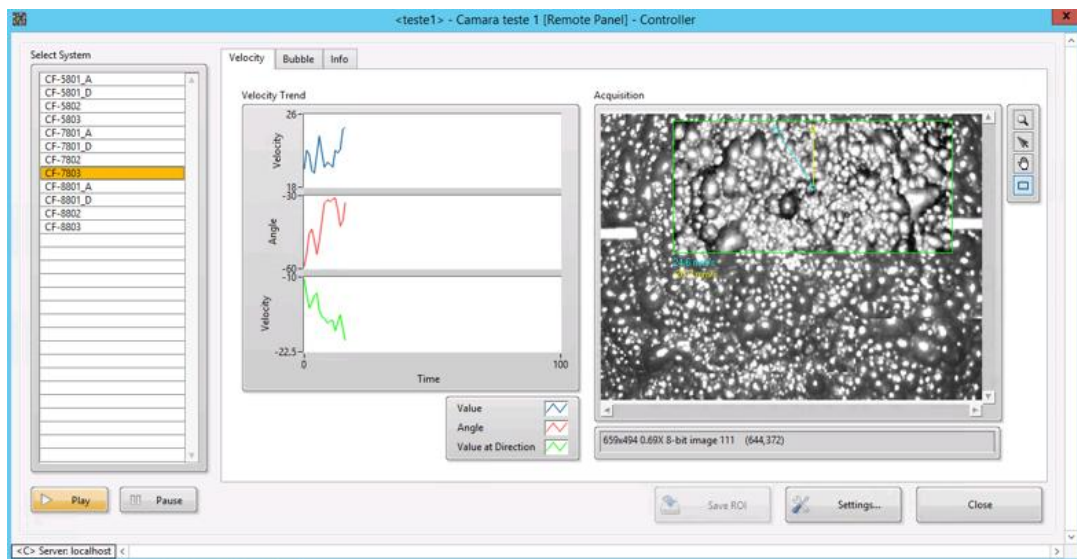


Figure 10.48 - "Vbolhas" software for image analysis of the froth surface.

10.4.3 Air Recovery

It has been shown that there is a clear link between froth stability and flotation performance in an industrial-scale flotation cell (Hadler et al., 2012) and (Oosthuizen, 2023; Phillpotts et al., 2021). The concept of air recovery was used to demonstrate that it varies with the air rate, and

there is an optimal air recovery or Peak Air Recovery (PAR), which correlates with optimal flotation performance (Hadler and Cilliers (2009)). This was done at a fixed level while varying the air flow rate. Several related studies demonstrate that performance improvements can be achieved by operating flotation cell banks at their PAR air flow rate (Hadler et al. (2006), Hadler and Cilliers (2009), Smith et al., 2010). Air recovery is the fraction of air fed to the cell (Q) recovered as froth from the overflow, calculated according to Equation 3.

$$\alpha = \frac{v_f h_f L}{Q_a} \quad (4)$$

Where: α is air recovery, v_f is the froth overflow velocity, h_f is the height above the froth cell edge, L is the length of the overflow edge and Q_a is the air inlet flow rate.

Although it is assumed that the froth overflows the entire length of the cell's discharge channel at the same speed and at the same height, it is not possible to confirm the homogeneity of the froth from one chamber per cell. The overall trend of air recovery should, however, remain relatively unchanged with this assumption, especially as it approaches steady-state operation. In this way, the measurement of α means that it is subject to very high uncertainty, since the noise uncertainties of all constituent measurements are combined (Venter et al., 2024).

Hadler et al. (2012) found that the peak in air recovery for a cell varied with the depth of the froth. Therefore, Hadler's results implied that there was an interaction effect between the air and froth level. As the depth of the froth increased, the air flow rate needed to increase to reach peak air recovery. This indicates that there are combinations of froth depth and air flow rates that result in optimal flotation performance, as shown in Figure 10.49.

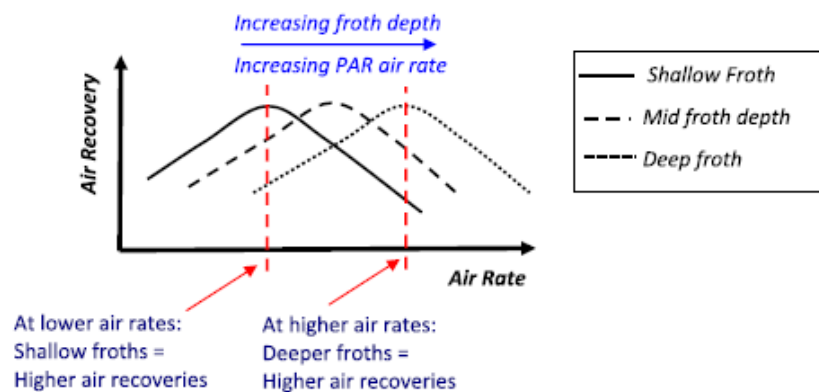


Figure 10.49 - Relationship between froth depth, air rate and air recovery. Adapted from (Hadler et al., 2012).

The concept of PAR and the subsequent performance improvement when operating at the PAR air rate were explained by describing the changes that occur in the bubble particle load, bubble stability, and froth mobility as the cell aeration is varied (Hadler et al., 2010). At low airflow rates, while the bubbles are adequately stabilized by the fixation of hydrophobic mineral particles, the mobility of the froth is low, so the bubbles often burst before overflowing the lip of the cell, resulting in low air recoveries, high concentrate contents, but low mineral recoveries. On the other hand, at high airflow rates, the froth flows rapidly, aided by increased water entrainment, but the bubbles are less charged with stabilizing hydrophobic particles. This produces poor air recovery, low concentrate content, but reasonable mineral recoveries. At air rates that produce PAR, a combination of bubble stability through sufficient particle attachment and froth mobility results in a high recovery of minerals for higher concentrate grades than at higher air rates.

In terms of process control utilizing PAR, according to (Wepener et al., 2022), extremum seeking control uses periodic disturbances in the aeration rate to direct the system through an unknown static map toward the peak in air recovery. Meanwhile, (Brooks et al., 2024) implemented a plant control system that has only one adjustable parameter to take the system to PAR. This system generates estimator coefficients using a matrix formulation of the multiple linear regression problem, using historical data or varying the surface velocity over a period.

10.5 Statistical Tools

Knowing the behavior and understanding the relationship between operating conditions, froth behavior, and flotation performance is important to assist in the development of controllers that promote greater process stability, better recovery performance, and product content (Quintanilla et al., 2021) and (Morar, 2010). Any disturbances in the process can be identified by resorting to statistical tools and targeted control actions to anticipate negotiations that result in economic benefits. Understanding the relationship of variables in a dataset is an initial alternative to define the next steps.

10.5.1 Response Surface Methodology

According to (Campos and Teixeira, 2010), the identification of systems aims to build mathematical models of dynamic processes based on experimental data in the plant, where the relationships between inputs and outputs of the process are of interest, and not the internal mechanisms. The practice of conducting experiments is employed to apply control actions based on the effect of the main process variables. According to Montgomery (2009), an experiment can be defined as a test or series of tests of purposeful changes made to the input variables of a process or system, aiming to observe and identify how the effect on the responses is affected by changes caused in these input variables. This prior knowledge also contributes to decision-making in flotation.

The Response Surface Methodology (MSR) in modeling and optimization processes uses quadratic model arrays, applying hypothesis testing, ANOVA, and regression to generate the models and the calculation of gradients, Lagrangians, and Hessian of functions created to locate the stationary points (Pattanaik and Rayasam, 2018). An advantage of MSR is that it requires fewer experiments, which means lower cost and requires less time. To determine a critical point of a response variable (y), the polynomial function must contain quadratic terms as per Equation 4:

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i < j} \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (5)$$

Where: Y is the answer of interest, β_0 is a constant, β_i is the linear coefficients, β_{ii} is the quadratic coefficients, β_{ij} is the interaction coefficients, and ϵ , the experimental error.

The most widely used class of second-order model fitting for modeling response surface functions is Central Composite Design (CCD). A CCD design consists of a matrix formed with three distinct groups of experimental elements: a complete (2k) or fractional (2k-p) factorial for the required fraction of the experiment, a set of center points, and a group of extreme levels called axial points. If the distance between the center of the design and the factor point (+1, -1) is approximately 1 (in modulus), the distance from the center to the axial point is greater than unity. This distance gives the experimental design the property of rotatability, commonly represented by α . Rotatability is characterized by the ability of response surface designs to have an identical variance to the predicted response of all points in a circle of radius α . The total number of CCD experiments is calculated as per Equation 5.

$$N = 2^k + 2k + n_c \quad (6)$$

Where: N is the total number of experiments, k is the number of factors or input variables, $2k$ is the number of factorial points, 2^k is the number of axial points and n_c is the number of central points.

After the construction of the model, the ANOVA procedure verified its significance. This significance test examines the mean variance of responses, which is important for assessing whether the model is statistically significant. ANOVA also checks which terms from the model are meaningful and which can be removed. The model generated in ANOVA is evaluated according to the P value of the factors, which defines the margin of the level of significance within a statistical hypothesis test, representing the probability of occurrence of a specific event. If the P-value of a factor is < 0.05 , it is considered a significant factor.

The fit of the model is represented by the coefficient of determination (R^2), which represents the percentage of variation in the response explained by the constructed model. Combined with this coefficient is the adjusted R^2 ($R^2(\text{adj.})$), which considers the statement that R^2 tends to overestimate the real amount of variation accounted for in the population.

10.6 Materials and Methods

The statistical analysis of the air flow rate and froth depth of this industrial-scale research was carried out in the rougher bank of the reverse mechanical flotation of iron ore, from the Iron Quadrangle region in Brazil, which predominantly explores itabirite ore with Fe content between 41% and 45%. In this plant, conventional mechanical flotation cells are used in the coarse circuit for fractions $-0.15+0.045\text{mm}$. The rougher bench defined for the experiment consists of 4 mechanical cells with forced air, which allows air flow rate control for each cell, control of the height of the froth depth of the bench, presents a height meter of the froth depth above the edge and uses machine vision on the surface of the froth in the feeding and unloading benches.

The research object consists of samples from 9 tests on iron ore flotation obtained in the rougher with forced air. For the characterization of the rougher feed, chemical analysis was performed using X-ray fluorescence spectrometry. In the mineralogical analysis, reflected light optical microscopy was used to quantify the iron and gangue minerals, in addition to analyzing the degree of release between the iron and quartz minerals.

During the tests, imaging properties of the cameras in the feed and discharge cells, and process data were collected for statistical analysis and air recovery. For the analysis of the CCD experiment, the Minitab 22[®] software was used to determine the main effects and interactions of the process parameters for optimization.

10.6.1 Experimental Procedure

The test plan aims to obtain data from the flotation process to manipulate the aeration and pulp, as well as the froth interface level to evaluate their relationships with process responses and machine vision properties. To prepare the planning of the industrial experiment, the process variables and the range of set point changes were established, considering the rougher residence time to define the time interval for the collection of process data from the PIMS (Plant Information Management System) and the samples for laboratory analysis. During the tests, the conditions of feed flow, pH modulators, silica amine collector and iron starch mineral depressant were those practiced in the plant's operating routine.

The CCD experiment was adopted by defining an experimental matrix with the air flow rate and the froth depth adjustment points as inputs, as shown in Table 10.7, which considers the axial and central points in the project. A sample of the feed flow was made for characterization, coming from the same stack and adjustment of the previous circuits, in addition to the concentrate and tailings samples for each test. For all flows, chemical analysis, volume and mass analysis of the wet and dry base sample were performed. It is important to note that the measurement of the froth depth in the plant (cm) is indicated inversely by the interface level meter (% L (Level)). Thus, the interface level measurement ranges from 0 to 100%L, where 0%L represents 35cm of froth depth to the edge and 100%L indicates 0 cm of froth.

Table 10.7 - Example of experimental matrix of the CCD design to be carried out in the plant

Test Number	Parameters	
	X_{air} - Air flow rate (Nm ³ /min)	X_{frd} - Froth depth (%)
1	6,0	40
2	8,0	40
3	6,0	60
4	8,0	60
5	5,6	50
6	8,4	50
7	7,0	35,8
8	7,0	64,1
9	7,0	50

As output, 9 responses were evaluated in the Minitab 22® software, resulting from the analysis and properties of froth images on the surface, listed according to groups of process variables and froth images in Table 10.8.

Table 10.8 - Example of experimental matrix of the CCD design to be carried out in the plant

Response Group	Response	Description	unit
Process	SiO_{2_CO}	Concentrate grade	%
	Fe_{TA}	Tailing grade	%
	$S.I.$	Gaudin selectivity index	-
	R_{met}	Fe recovery	%
	R_{mw_TA}	Water recovery in tailings	%
Froth Image	CF_{F_vel}	Froth velocity in feed cell	mm/s
	CF_{D_vel}	Froth velocity in discharge cell	mm/s
	CF_{F_bs}	Bubble perimeter in feed cell	mm
	CF_{D_bs}	Bubble perimeter in discharge cell	mm

10.6.2 Results and Discussion

The results of the flotation tests were organized according to experimental design in order to demonstrate the applicability of the RSM used in this research. Thus, a characterization of the sample, mathematical modeling, ANOVA, analysis of the main effects of the parameters and analysis of the interaction effects between the parameters were carried out to evaluate conditions of the parameters of air flow rate and froth depth. Finally, an analysis of the recovery and air was carried out to identify optimal regions.

10.6.3 Sample Characterization

In the laboratory result for chemical analysis of the sample of the new feed of the object of study, low levels of contaminants Al_2O_3 , LOI (Loss on Ignition), P, and Mn, as shown in Table 10.9.

Table 10.9. Distribution of the main chemical elements of the global samples that form the flotation feed

Fe (%)	SiO_2 (%)	P (%)	Al_2O_3 (%)	Mn (%)	TiO_2 (%)	CaO (%)	MgO (%)	LOI (Loss on Ignition, %)
31.09	54.12	0.015	0.24	0.048	0.048	0.014	0.010	0.57

In light microscopy for general mineralogical quantification, a predominant composition of free hematite and quartz was verified, with a total release degree of 98.91%. The main minerals in the rougher feed samples are illustrated in the photomicrographs, as shown in Figure 10.50. Quartz has variations in morphology and is identified under a light microscope with a dark gray hue, with identifiable edges, and is generally compact, predominantly free of associations.

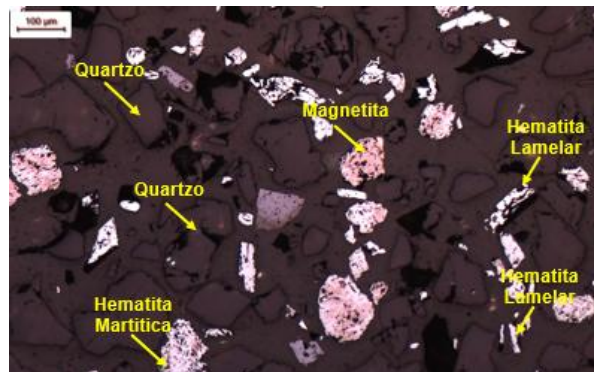


Figure 10.50 - Photomicrographs with main minerals found in the sample.

10.6.4 Modeling the Responses

The responses of the experimental matrix applied to the process and image variables are shown as shown in Table 10.10. A low range of variation is noted for the chemical analysis of interest, being from 1.40 to 2.41 for $\% \text{SiO}_2$ in the concentrate and for $\% \text{Fe}$ in the tailings between 17.53 and 20.28. Considering that the upper limit specified in the concentrate recleaner is 1.10% SiO_2 in the concentrate, the assembly results are excellent in terms of quality only for the rougher step. Among the experiments, the best result was the first one, with S.I. of 13.40%, iron recovery of 57.33%, despite the loss of fine $\% \text{Fe}$ in the overflow, with 40.09%.

Table 10.10 - Responses of industrial flotation rougher tests

Run Order	Coded Parameters		Current Parameters		Process Responses					Froth Image Responses			
	x_{air}	x_{frd}	Air	Froth	%SiO ₂ _CO	%Fe_TA	S.I.	%R _{met}	%R _{mw_TA}	CF _{F_vel}	CF _{D_vel}	CF _{F_bs}	CF _{D_bs}
	1	-1	-1	6	40	1.51	18.05	13.40	57.33	40.09	169.83	37.11	3.14
2	1	-1	8	40	2.41	18.14	10.57	57.11	34.72	172.51	101.93	3.24	3.29
3	-1	1	6	60	1.40	18.85	13.57	54.61	39.21	173.07	121.77	3.19	3.32
4	1	1	8	60	1.66	17.53	13.04	58.96	32.77	189.36	147.37	3.27	3.33
5	- α	0	5,6	50	1.49	18.53	13.32	55.70	41.31	165.65	99.23	3.10	3.39
6	α	0	8,4	50	2.02	19.39	11.06	53.02	31.26	182.37	116.30	3.25	3.40
7	0	- α	7	35,8	1.70	18.80	12.40	54.79	37.11	171.79	74.15	3.20	3.24
8	0	α	7	64,1	1.61	20.28	12.03	49.52	38.35	192.47	137.93	3.28	3.37
9	0	0	7	50	2.38	20.15	9.87	50.13	38.14	172.76	110.18	3.20	3.39

(1) - The value of $\alpha = 1.68$.

The adjustment of the models for ANOVA considers a confidence interval of 95%. Table 10.11 summarizes the significant terms for the 9 responses studied, where significant terms are those with a p-value lower than 0.05, represented by the symbol α , while the non-significant terms are identified by x .

For the process responses, %SiO₂_CO and %R_{mw_TA} presented 2 and 1 significant terms, respectively. On the other hand, %Fe_TA, S.I. and %R_{met} did not present significant terms. However, the coefficient of determination (R²) for S.I. was high, which indicates values close to p-value, while the R² for %Fe and %R_{met} was about 48%. In the responses of froth image variables, the feeding cell camera presented significant terms for velocity (CF_{F_vel}) and bubble size (CF_{F_bs}), while the discharge cell camera, only for velocity (CF_{D_vel}). Even so, R2 above 75% is observed, which proves that variations in air and/or froth depth influence, as already found in literature.

Table 10.11 - Identification of influential factors in each test by analysis of variance (ANOVA).

Term	Process Responses					Froth Variable Responses			
	%SiO ₂ _CO	%Fe_TA	S.I.	%R _{met}	%R _{mw_TA}	CF _{F_vel}	CF _{D_vel}	CF _{F_bs}	CF _{D_bs}
Constant	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
x_{air}	✓	x	x	x	✓	✓	x	✓	x
x_{frd}	x	x	x	x	x	✓	✓	✓	x
x_{air}^2	x	x	x	x	x	x	x	x	x
x_{frd}^2	✓	x	x	x	x	x	x	✓	x
$x_{air} * x_{frd}$	x	x	x	x	x	x	x	x	x
R ² Sq	92.14%	47.93%	88.88%	49.76%	96.17%	97.03%	91.08%	98.93%	76.35%
R ² Sq(adj)	79.05%	0.00%	70.34%	0.00%	89.77%	92.08%	76.22%	97.15%	36.93%

✓, p-value < 0.05; x, p-value ≥ 0.05.

In general, the answers were satisfactory, despite the lack of significance and coefficient of determination of some terms. Equations 6 to 14 present the regressions of the complete quadratic models for the responses in non-coded units.

$$\%SiO_{2_CO} = -27,91 + 5,27x_{air} + 0,452x_{frd} - 0,302x_{air}^2 - 0,00353x_{frd}^2 - 0,01600x_{air} * x_{frd} \quad (6)$$

$$\%Fe_{TA} = -50,90 + 13,97x_{air} + 0,857x_{frd} - 0,872x_{air}^2 - 0,00582x_{frd}^2 - 0,0353 x_{air} * x_{frd} \quad (7)$$

$$S.I. = 128,6 - 21,44x_{air} - 1,657x_{frd} + 1,268x_{air}^2 + 0,01281x_{frd}^2 + 0,0574 x_{air} * x_{frd} \quad (8)$$

$$\%R_{met} = 293 - 48,4x_{air} - 2,85x_{frd} + 3,05x_{air}^2 + 0,0195x_{frd}^2 + 0,114 x_{air} * x_{frd} \quad (9)$$

$$\%R_{mw_TA} = -4,2 + 12,17x_{air} + 0,461x_{frd} - 1,005x_{air}^2 - 0,00285x_{frd}^2 - 0,0271 x_{air} * x_{frd} \quad (10)$$

$$\%CF_{F_vel} = 337 - 13,8x_{air} - 5,98x_{frd} + 0,15x_{air}^2 + 0,0422x_{frd}^2 + 0,340 x_{air} * x_{frd} \quad (11)$$

$$\%CF_{D_vel} = -672 + 97x_{air} + 12,9 x_{frd} - 2,42x_{air}^2 - 0,0329x_{frd}^2 - 0,981x_{air} * x_{frd} \quad (12)$$

$$\%CF_{F_bs} = 2,679 + 0,2199x_{air} - 0,01943 x_{frd} - 0,01111x_{air}^2 + 0,000238x_{frd}^2 - 0,0000285x_{air} * x_{frd} \quad (13)$$

$$\%CF_{D_bs} = 0,55 + 0,241x_{air} + 0,0734x_{frd} - 0,0100x_{air}^2 - 0,000570x_{frd}^2 - 0,00172x_{air} * x_{frd} \quad (14)$$

10.6.5 Analysis of the main effects of the parameters

While the other process variables are kept constant, the effects on the responses of the air and level parameters are evidenced. The isolated effect between each parameter and the intended answer can present a linear relationship (it has only a significant principal term) or a parabola-shaped curve (quadratic term is significant). The main effect of each parameter on each response is illustrated in Figure 10.51.

The main effect of the process responses for SiO_{2_CO} , Fe_{TA} , $I.S.$ e R_{met} showed a quadratic relationship, with the first 2 having a maximum point and the other 2, a minimum point. As the objective is to minimize $\%SiO_2$ in the concentrate and $\%Fe$ in the tailings, as well as to maximize the recovery and selectivity index, it was verified that these conditions are generally favored by a high or low air flow rate and froth depth. For $\%R_{mw_TA}$, the drag of fine $\%Fe$ in the water recovered for overflow decreases with higher air flow rate, approaching a negative linear relationship, being little relevant for the level factor.

For the response group of the froth image variables in the feeding and discharging cells, in general, there was a positive linear relationship for bubble velocity and size, both for air flow rate and for the smallest froth depth (higher level of froth pulp interface).

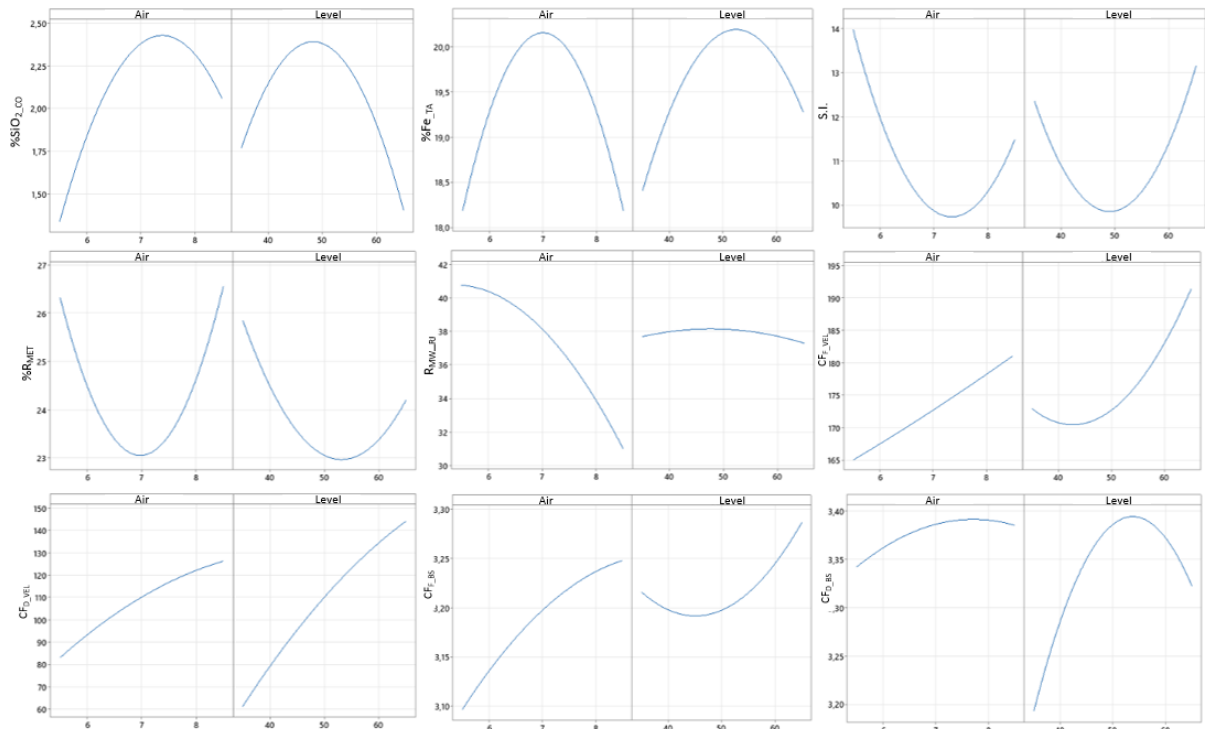


Figure 10.51 - Main effects of variation air flow rate and froth depth for process responses and froth variables.

10.6.6 Analysis of parameter interaction effects

The obtained results revealed that some interactions between the parameters acted as significant factors. Contour and surface response graphs of the interaction of the effects of the air flow rate and froth depth parameters for process responses and froth image are illustrated in Figure 10.52.

Quadratic relationships were also identified when analyzing the graphs of the effects of the interactions of the SiO_2_{CO} , Fe_{TA} , $I.S.$ e R_{met} parameters, the first 2 with a maximum point and the other 2 with a minimum point in the region for air between 7.0 and 7.5 Nm^3/min and a level between 47 and 52%. In general, the best performance is verified for low air flow rates, regardless of the level, as well as high flow and high level, which corresponds to a low froth depth. For $\%R_{mw_{TA}}$, the drag of fine $\%Fe$ in the reclaimed water for overflow decreases for greater airflow, regardless of the level.

For the response group of the froth image variables in the feeding and discharge cells, in general, there was a small curvature for the response velocities and bubble size, with a predominance of a maximum point for greater air flow rate and higher level, i.e., thinner froth depth.

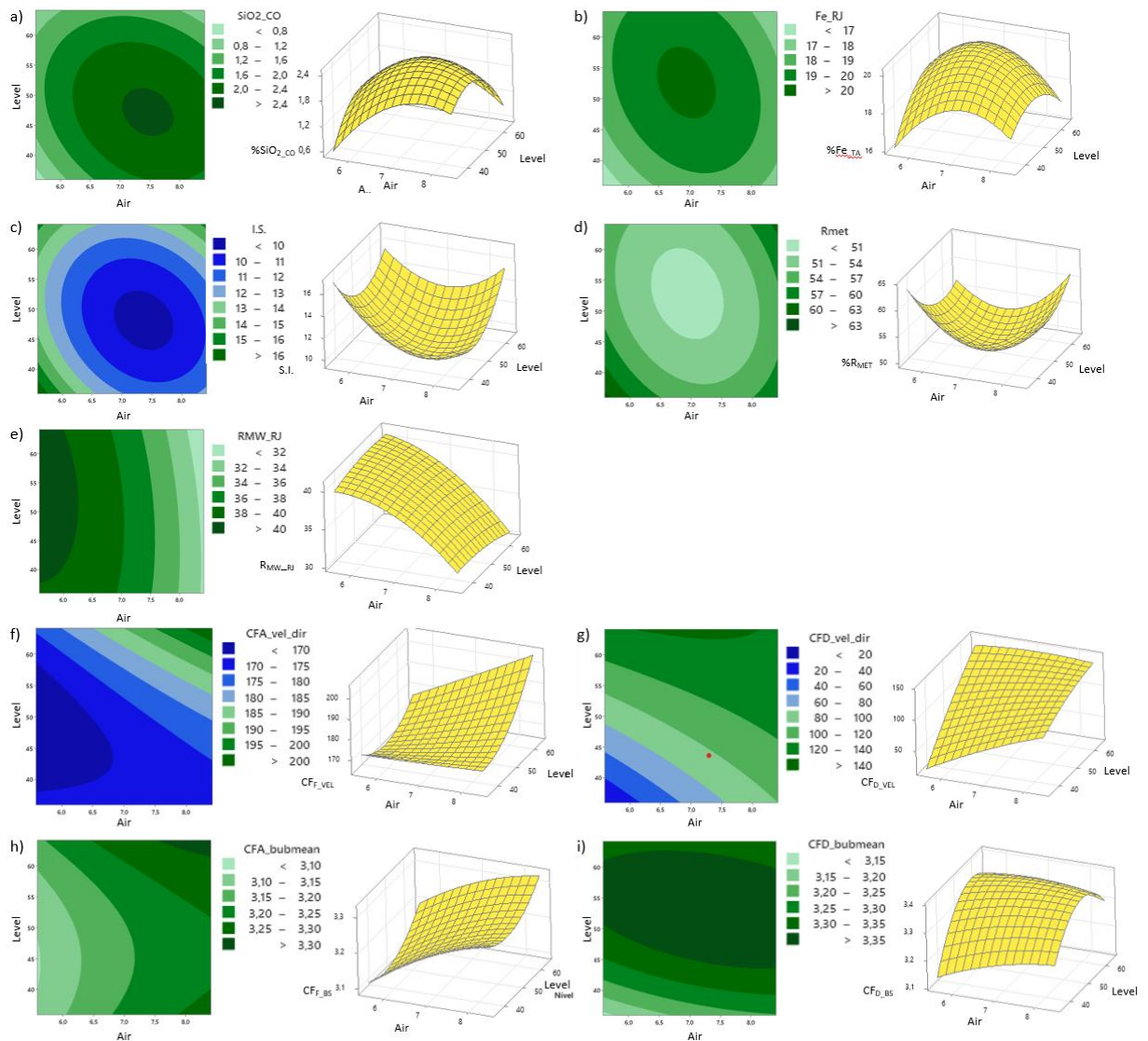


Figure 10.52 - Contour and response surface graphs of variation air flow rate and froth depth for process responses and froth image.

10.6.7 Effect on Peak Air Recovery

The appearance of the surface bubbles in the 4 cells of the rougher bench is illustrated as shown in Figure 10.53. Visually, it is verified that there is an increase in the size of the bubbles, comparing from the feeding cell to the discharge.

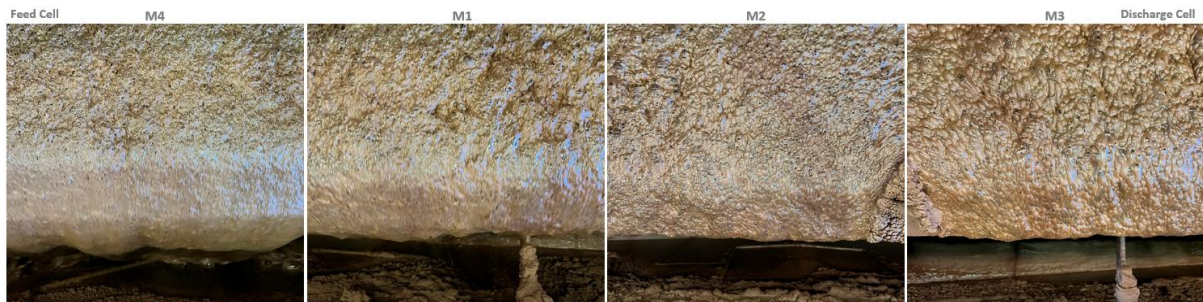


Figure 10.53 - Appearance of bubbles on the surface of the 4 cells of the rougher bench during industrial testing.

During the period of the 9 industrial tests, a univariate correlation matrix was applied to the data set collected according to Figure 10.54. A positive correlation of 54% of air recovery in the feed (α_F) with %SiO₂_CO, 50% with CF_F_bs and 36% with CF_F_vel. It is important to note that the higher the α_F , the lower the recovery of fine iron in the %R_{mw_TA} overflow. On the other hand, the recovery of discharge air (α_D) obtained a higher correlation with its respective velocity and bubble size.

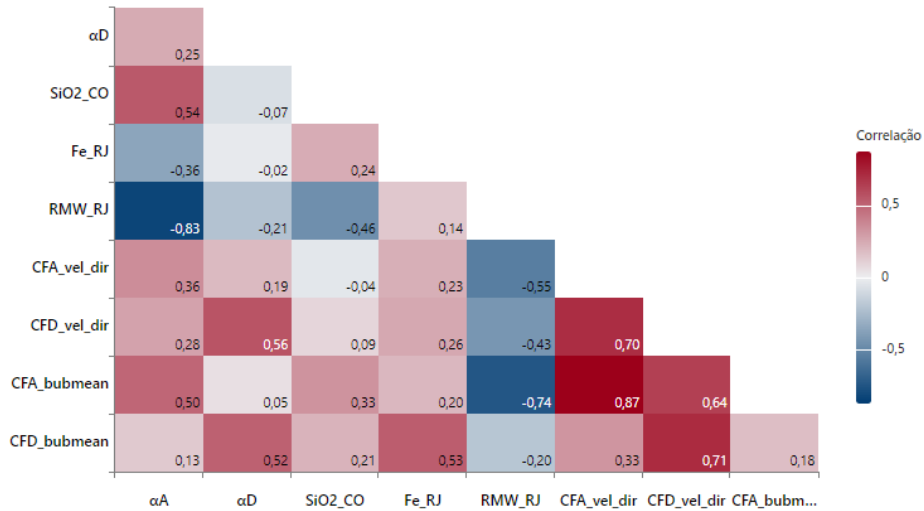


Figure 10.54 - Univariate correlation matrix of inputs and responses.

The behavior of air recovery during the 9 tests for the power supply indicates that in general, the recovery was higher for conditions of lower air flow rate, as shown in Figure 10.55 and Figure 10.56, which consider the same time window during the entire period of the industrial test. For the discharge cell, recovery tends to be higher for regions with a smaller froth depth.

Combining the two air recoveries throughout the period, it is considered higher air recovery for lower air flow rate and lower froth depth. This evaluation indicates that there is an opportunity to minimize the air flow rate range, aiming at greater stability for air recovery, and consequently operate close to the region of optimal recovery point and content.

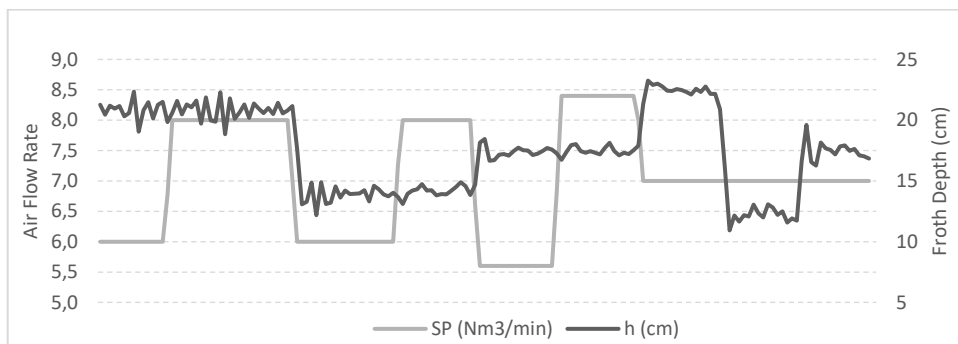


Figure 10.55 - Air flow rate and froth depth during 9 tests.

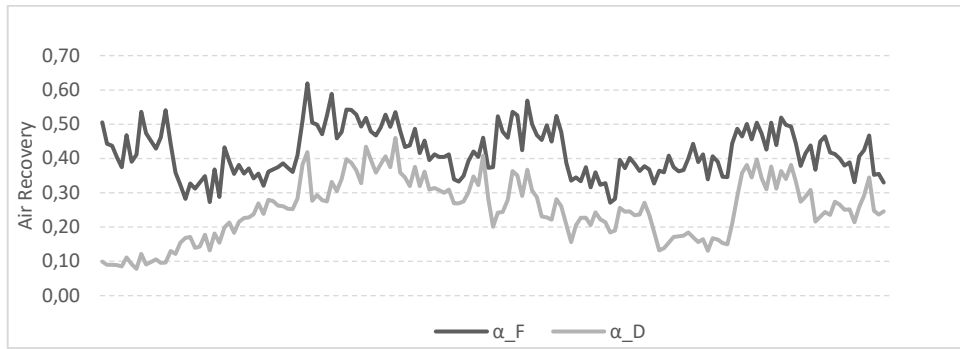


Figure 10.56 - Behavior of air recovery during 9 tests.

10.7 Conclusions

Based on this industrial study with the 9 tests performed, it is possible to conclude that the mechanical flotation of iron ore, using machines with forced air, can be improved through the optimization of the air flow rate and froth depth, unlike traditional applications with self-aerated machines, where there is no option to control the air flow rate. The application of MSR and CCD allowed the systematic evaluation of the individual effects and interactions of these parameters, resulting in mathematical models capable of predicting operating conditions.

Air flow rate and froth layer regions were identified that favor the process responses of $\%SiO_2$ in the concentrate, $\%Fe$ in the tailings, selectivity index, metallurgical recovery and water recovery in the overflow. In general, the best performance was identified for low air flow rates, regardless of the level, in addition to high flow and high levels, which corresponds to a low froth depth. This result generates an opportunity to explore air flow rates lower than the minimum adopted in this research, which is an important contribution of this research to the plant and mapped for further industrial tests and future work.

The behavior of the air recovery curves in the feed and discharge cell, which is an indicator of froth stability and flotation performance, also indicated that the highest air recovery occurred for lower air flow rate, associated with a thinner froth depth, corroborating the CCD. Some correlations were also raised during the test, indicating a 54% correlation between air recovery in the feed (α_F) and $\%SiO_2$ in the concentrate, which is the main indicator for the product specification limit in iron ore.

This industrial experiment adopted in flotation shows that it is possible to explore techniques already known, which is a relevant academic contribution. The statistical investigation showed that the interaction between air flow rate and froth depth directly impacts metallurgical recovery and process selectivity, evidencing the importance of structured experimental approaches to control and improve operational efficiency. With the results obtained, the way is opened for new investigations that may include other factors, such as quartz collector dosage, residence time, applying an optimizer algorithm to maximize the PAR online, aiming to maximize benefits in iron ore flotation.

10.8 Acknowledgments

The authors would like to thank Vale S.A., UFMG (Federal University of Minas Gerais), CAPEX-PROEX, FAPEMIG and CNPq (Brazilian Technological and Scientific Development Council) for their support in the development of this research. This study was financed in part by CAPES (Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel - Brazil) - Finance Code 001.

10.9 References

- ACHAYE, I. Effect of particle properties on froth stability. Doctoral Thesis, University of Cape Town, Faculty of Engineering & the Built Environment, Department of Chemical Engineering, 2017.
- ALDRICH, C.; MARAIS, C.; SHEAN, B.J. e CILLIERS, J.J. Online monitoring and control of froth flotation systems with machine vision: a review. *International Journal of Mineral Processing*, p.1-13, 2010.
- Araújo, A. C., Aramante, S. C., Souza, C. C., Silva, R. R. R. Ore mineralogy and its relevance for selection of concentration methods in processing of Brazilian iron ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, v. 112, p. C54-C64, 2003.
- Montgomery, D.C., 2013. *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA.
- Bradshaw, D., O'Connor, C. Measurement of the sub-process of bubble leading in flotation. *Minerals Engineering* 9, 443–448, 1996.
- Brooks, K.S., Ramodike, K., Higginson, A., 2024. Controlling a Flotation Cell at the Peak Air Recovery Point. *IFAC-PapersOnLine* 58, 13–17. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2024.09.283>
- Hadler, K., Cilliers, J.J., 2009. The relationship between the peak in air recovery and flotation bank performance. *Miner. Eng.* 22, 451–455. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.12.004>

- Hadler, K., Greyling, M., Plint, N., Cilliers, J.J., 2012. The effect of froth depth on air recovery and flotation performance. *Miner. Eng.* 36–38, 248–253.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.04.003>
- Hadler, K., Smith, C.D., Cilliers, J.J., 2010. Recovery vs. mass pull: The link to air recovery, in: *Minerals Engineering*. pp. 994–1002. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.04.007>
- Harris, A., Venkatesan, L., Greyling, M., 2013. A practical approach to plant-scale flotation optimization. *J. South. African Inst. Min. Metall.* 113, 263–272.
- Horn, Z.C., 2018. Froth texture extraction with deep learning.
- Morar, S., 2010. The use of machine vision to describe and evaluate froth phase behaviour and performance in mineral flotation systems.
- Neethling, S.J., Cilliers, J.J., 2002. The entrainment of gangue into a flotation froth. *Int. J. Miner. Process.* 64, 123–134. [https://doi.org/10.1016/S0301-7516\(01\)00067-9](https://doi.org/10.1016/S0301-7516(01)00067-9)
- Pattanaik, A., Rayasam, V., 2018. Analysis of reverse cationic iron ore fines flotation using RSM-D-optimal design – An approach towards sustainability. *Adv. Powder Technol.* 29, 3404–3414.
<https://doi.org/10.1016/j.apt.2018.09.021>
- Pérez-Garibay, R., Estrada-Ruiz, R.H., Gallegos-Acevedo, P.M., 2010. Relationship between the bubble surface flux that overflows and the mass flow rate of solids in the concentrate of flotation processes. *Miner. Eng.* 23, 541–548. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2009.12.008>
- Quintanilla, P., Neethling, S.J., Brito-Parada, P.R., 2021. Modelling for froth flotation control: A review. *Miner. Eng.* 162, 106718. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106718>
- Shean, B., Hadler, K., Cilliers, J.J., 2017. A flotation control system to optimise performance using peak air recovery. *Chem. Eng. Res. Des.* 117, 57–65.
<https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.10.021>
- Silva, K., Filippov, L.O., Piçarra, A., Filippova, I. V., Lima, N., Skliar, A., Faustino, L., Filho, L.L., 2021. New perspectives in iron ore flotation: Use of collector reagents without depressants in reverse cationic flotation of quartz. *Miner. Eng.* 170, 107004.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107004>
- Venkatesan, L., Harris, A., Greyling, M., 2014. Optimisation of air rate and froth depth in flotation using a CCRD factorial design - PGM case study. *Miner. Eng.*
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.07.012>
- Venter, J.L., le Roux, J.D., Craig, I.K., 2024. State and parameter estimation of a dynamic froth flotation model using industrial data. *Miner. Eng.* 219, 109059.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2024.109059>
- Wepener, D.A., le Roux, J.D., Craig, I.K., 2023. Extremum seeking control to optimize mineral recovery of a flotation circuit using peak air recovery. *J. Process Control* 129, 103033.
<https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2023.103033>
- Wepener, D.A., Le Roux, J.D., Craig, I.K., 2022. Extremum Seeking Control of a Flotation Circuit using Peak Air Recovery. *IFAC-PapersOnLine* 55, 61–66. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.244>

Xie, Y., Wang, J., Xiao, L., 2025. Concentrate grade prediction of industrial zinc flotation process based on Cross-Temporal Feature Fusion Transformer. *J. Process Control* 148, 103390.
<https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2025.103390>

Yuan, C., Xie, Y., Xie, S., Wang, J., 2024. Pruned tree-structured temporal convolutional networks for quality variable prediction of industrial process. *J. Process Control* 143, 103312.
<https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2024.103312>

Zarie, M., Jahedsaravani, A., Massinaei, M., 2020. Flotation froth image classification using convolutional neural networks. *Miner. Eng.* 155, 106443.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106443>

11. ARTIGO B - Evaluation of Iron Ore Reverse Mechanical Rougher Flotation - Part II: Comparison of Self-Aspirated and Forced Air Cells

*T. C. Nunes^{1,2}, N. N. Paula¹, N. P. Lima¹, T. A. M. Euzébio³, A. E. C. Peres²

1 Vale S.A., Mineral Processing Department, Nova Lima, Minas Gerais, Brazil

2 Federal University of Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil

3 Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto e Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Brazil

(*Corresponding author: tiago.caixeta@vale.com)

Submitted Manuscripted at MEI – Minerals Engineering.

Created: 30/Aug/2025

Submitted: 09/Sep/2025

ID: MINE-D-25-01693

Status: *Waiting for approval*

11.1 Abstract

The performance of reverse flotation of iron ore in mechanical cells is strongly influenced by hydrodynamics, which reflects on the stability of operating conditions, concentrate quality and metallurgical recovery. One of the factors that affects hydrodynamics is the air flow rate in the cell, since it contributes to the selectivity of the separation of quartz particles and iron oxides. Mechanical cells with forced air make it possible to automatically control the air flow, however, in self-aerated flotation machines, this is not possible. Another factor is the maintenance of the flotation machines. Even though maintenance costs are part of the operational routine, old technologies may require significant expenses with retrofitting or modernization of the applied technology. In this research, industrial tests in conventional mechanical flotation were conducted in the rougher stage in order to compare self-aerated cells and forced air to evaluate process indicators and bubble properties using machine vision. For the process, the following were investigated: %SiO₂ in the concentrate, %Fe in the tailings, metallurgical recovery, selectivity index, water recovery in the froth by overflow and power consumed. For bubbles, indicators related to size, velocity and autocorrelation were recorded. This research enabled a comparison of the results for the types of cell mechanisms, indicating the potential of forced air in relation to self-aerated air, generating a subsidy for an economic feasibility study for the modernization of the technology applied in the plant, aiming to maximize the financial return, in addition to reducing costs.

Keywords: Iron ore; flotation; force air cells; machine vision; self-aspirated cells

11.2 Introduction

Flotation is a concentration process for solid particles that uses differences in the surface characteristics of minerals in heterogeneous mixtures of particles suspended in the pulp, with the introduction of a gaseous phase (Leja, 1982). This process involves hydrophobic particles adhering to air bubbles, being transported to the froth layer, while hydrophilic particles remain in the pulp. Thus, the froth serves as a carrier of the hydrophobic particles in flotation, and their performance is important for the separation of hydrophobic and hydrophilic mineral particles (Zhao and Zhang, 2025).

Flotation performance is associated with operating conditions, which include process variables that influence froth characteristics. These variables refer to those modified during routine operation, such as the air flow rate, pH, froth layer height, density and specific reagent consumption. This set of flotation variables influence hydrodynamics, responsible for the interaction between bubbles and particles, important in flotation cells with mechanical agitation. Hydrodynamics is a broad term used to describe the flow of fluids, driven by the action of the impellor and governed by the constructive characteristics of the cell components (Souza Pinto et al., 2018).

Changes in the operating conditions of the flotation process can significantly modify the chemical and physical properties of the pulp. These modifications directly influence the formation, structure, and stability of the froth, impacting the efficiency of the metallurgical recovery. The internal dynamics of the flotation from the interaction between particles and reactants to the behavior of the froth, influences the quality and recovery. Visual changes in the froth surface can reflect these variations and serve as important operational indicators using machine vision (Morar, 2010).

An important variable of hydrodynamics is residence time, which is defined with the selection of flotation equipment. Residence time is usually determined from the interpretation of kinetic curves obtained in laboratory tests or on a pilot scale. While the required residence time is certainly an important factor in determining the size and quantity of cells required, other factors should also be considered for a more refined approach (Murphy and Heath, 2013).

In recent years, flotation cells incorporated in the industry have had a significant increase in size, with the advantage of lower specific energy consumption, more efficient control systems, simpler layouts and fewer cells required to obtain the same residence time in a flotation circuit (Vallejos et al., 2020). However, a cost-effective alternative for operating plants is to evaluate options for retrofitting or modernization of the existing park, avoiding high capex costs and meeting operating conditions to improve metallurgical performance.

The design differences between the various cells, marketed by different manufacturers, are actually differences in the impeller/stator mechanisms and air intake systems, whether self-aerated or forced-air cells (Gorain et al., 2000). The innovation of technology in flotation machines has led to significant advances in aeration systems. Unlike traditional mechanical cells, where rotor-stator assemblies are used to break bubbles with atmospheric air, the injection of pressurized air through perforated plates or diffusers has been applied with satisfactory results by several suppliers. Thus, a lever to optimize this influence is to promote adjustments in the air flow rate of the cell, since it is important in the selectivity of the separation of quartz particles and iron oxides. However, there are self-aerated flotation machines that do not allow this adjustment.

In this context, the main objective of this research is to evaluate industrial tests in conventional mechanical flotation conducted in the rougher stage to perform a comparison of self-aerated cells and forced air in reverse flotation of iron ore, considering process indicators and image properties of the bubbles on the cell surface. In this sense, three configurations of mechanisms were carried out in the bank to evaluate the investigated responses, the first was with forced air cells and modern technology; in the second, the old mechanism was maintained, but with a forced air injection with manual control in the line that originally had the suction from the atmosphere to the rotor; and the third, with old self-aerated cells. This comparison of the cells enabled an economic feasibility study in a flotation circuit of coarse iron ore to evaluate scenarios for modernization of the applied technology, aiming to maximize financial return and reduce costs. A theoretical basis, experimental procedure, results and discussion are presented below.

11.3 Background

Flotation is a process of mineral separation based on differences in the physicochemical properties of mineral surfaces, allowing the selective obtaining of certain minerals through selective adhesion to air bubbles (Wills and Napier-Munn, 2006). The separation efficiency depends on the recovery of mineral species by both actual and drag flotation (Wang et al., 2015), where both chemical variables and hydrodynamic conditions within the flotation cell affect recovery and selectivity (Safari et al., 2020). Flotation machines are designed in a variety of configurations to maximize the recovery of minerals of interest. Among the options, mechanical flotation cells are the most used, even in the face of growing competition from several alternative technologies, they continue to be responsible for the largest share of world flotation (Souza Pinto et al., 2018).

In the mechanical flotation cell, bubble formation occurs in the impeller-stator zone. It is a two-stage process, as shown schematically in Figure 11.57. After air is introduced into the rotor-stator zone, either by an external blower (forced air) or by suction (self-aerated), air cavities are formed in the low-pressure region located at the trailing edge of the rotating impeller blades. Subsequently bubbles are generated by the detachment of vortices from the tails of the cavities under the shear action (Gorain et al., 2000; Schubert and Bischofberger, 1998). The generated bubbles move along the flow profile and are distributed throughout the cell (Wang and Liu, 2021).

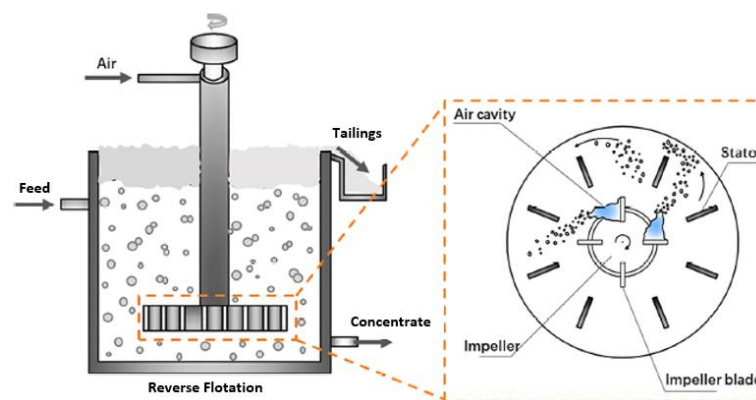


Figure 11.57 - Schematic diagrams of the bubble formation mechanism in a reverse mechanical flotation cell. Adapted from (Wang and Liu, 2021).

After the formation of bubbles, they rupture, which refers to the process in which a bubble of a certain size is deformed and broken into smaller bubbles (Wang et al., 2020b). Bubble rupture is important because it influences the size distribution of the bubbles, bubble-particle aggregation, and froth phase stability. The mechanisms of bubble rupture in turbulent conditions depend on four main aspects: turbulent flotation and collision, viscous shear stress, shear process, and interfacial instability. A more detailed explanation of these mechanisms can be found in more comprehensive research (Chu et al., 2019; Liao and Lucas, 2009) (Wang and Liu, 2021) Next, the reverse flotation of iron ore, object of this study, is described, where the comparison of self-aerated cells and forced air were applied.

11.3.1 Importance of Air Flow Rate and Froth Depth

Reverse cationic flotation of quartz is the most used route in Brazil for the concentration of iron ore destined to produce *pellet feed* for direct reduction. This technique is applied when the gangue has quartz released in particle fractions of less than 0.15 mm (Silva et al., 2021).

To develop the object of study of this research, rougher benches of the iron ore flotation circuit of a plant located in Minas Gerais, Brazil, were defined. This plant has conventional mechanical flotation cells in the circuit from coarse to fractions $-0.15+0.045\text{mm}$, with Fe content in feed with about 43% to produce pellet feed. Flotation exploits the differences in the surface properties of minerals, where quartz (SiO_2) particles become hydrophobic, adhere to bubbles, and rise to form a layer in the froth phase, which is collected in the overflow chutes due to the addition of the amine collector under alkaline conditions. Due to the action of the starch depressant, the hydrophilic iron-bearing minerals remain in the pulp phase and are directed to the sinking flow in the recleaner stage, generating pellet feed as a product (Lima et al., 2016) Flotation performance is measured by metallurgical recovery and meeting the upper specification limit of 1.10% SiO_2 in the concentrate for the direct reduction pellet feed product. One way to evaluate this performance is by the selectivity index, where values above 14 are expected when adding the rougher, cleaner, and recleaner steps. The presence of fine particles of iron oxides in the concentrate represents a challenge in reverse flotation (Vieira and Peres, 2007).

The plant's mechanical cell circuit had its startup in 2006, it is distributed in 4 lines and consists of 120 mechanical cells, 116 of which are self-aerated cells and 4 cells with forced air in operation in a rougher bank since 2024. Of the cells, 72 of 1000 ft³ for rougher and scavenger, and 48 of 500 ft³ for cleaner and recleaner. A simplified flowchart illustrating the circuit is illustrated in Figure 11.58.

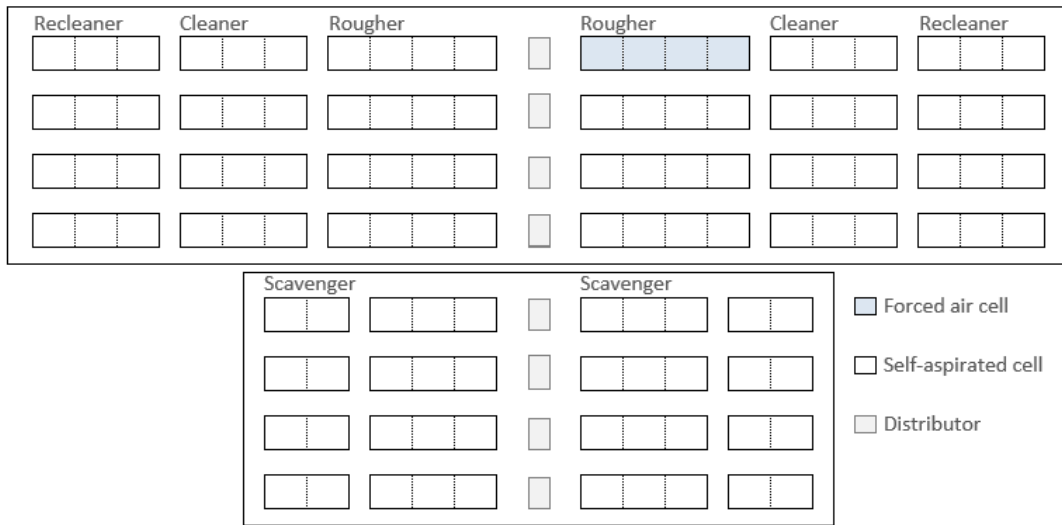


Figure 11.58 - Summary flowchart of iron ore reverse flotation.

Despite the history regarding the achievement of goals in the plant object of this research, there are still gaps to increase the physical availability of cells to maximize the production of direct reduction pellet feed, increase metallurgical recovery and minimize the consumption of amine collector, which is the most expensive input of the concentration. Regarding availability, the greater participation of minerals in the ultrafine fraction of the run of mine (ROM) contributes significantly to the increase in current in the flotation reactors, which leads to corrective shutdowns that penalize the quality and volume produced.

The mineral processing industry has increasingly demanded high standards for fine minerals, such as pellet feed, where there are critical challenges for the development of "green iron" related to lower CO₂ emissions in direct reduction routes for steelmaking, compared to blast furnace (Liu et al., 2023a) (Chen et al., 2025).

11.3.2 Froth Stability and Process Efficiency

Research on the three-phase flotation system shows that the gas phase directly interferes with turbulence, altering characteristics, such as the average velocity of the fluid and the dissipation of kinetic energy (Darabi et al., 2017; Newell and Grano, 2007). Suspended solids made up of fine particles tend to reduce this turbulence, influencing the behavior of the fluid (Schubert, 2008). Thus, according to (Wang and Liu, 2021) understanding the hydrodynamics of flotation requires a comprehensive approach, considering several aspects, such as mechanical factors, slurry characteristics, gas dispersion, chemical composition of the solution, and flotation cell design, which includes the geometry of the tank and configuration of the impeller/stator assembly.

It is well known that the ratio of particle size to bubble size plays a critical role in determining the flotation efficiency of the subprocesses of collision, fixation, and detachment of particles and bubbles. Coarse particle recovery by flotation is generally low due to a combination of high particle-bubble release rates in the pulp zone and low froth recoveries (Farrokhpay and Fornasiero, 2017; Hassanzadeh and Karakaş, 2017). Previous fundamental analyses indicate that reducing the bubble size in a flotation system provides an effective approach to increase the probability of collision and reduces the probability of detachment, which are the limiting factors for fine and coarse particle flotation systems, respectively. (Wang et al., 2024) However, non-selective recovery of fine particles by entrainment can be high, depending on the extent of water recovery to the froth (Neethling and Cilliers, 2009); (Lima et al., 2016); (Safari et al., 2020).

Froth life is governed by three mechanisms: froth drainage, air bubbles coarsening through air transfer between air bubbles, and air bubble coalescence, where smaller air bubbles merge into larger bubbles due to the breakdown of the interface (Cantat et al., 2013a; Wang et al., 2016; Amani et al., 2021). The drainage of the froth affects the moisture content of the froth, influences froth life (Roth et al., 2013) and is impacted by the size of the air bubbles, which is determined by the thickening of the air bubbles (Pitois, 2012). The growth of bubbles, on the other hand, does not directly influence the shelf life of the froth. However, it indirectly impacts the stability of the froth through its effect on froth drainage. In addition, the coalescence of air

bubbles leads to the formation of larger air bubbles (Zhao and Zhang, 2025) Therefore, froth drainage and air bubble coalescence are key factors that affect froth stability.

In flotation, unstable froths can result in desorption of hydrophobic particles, decreasing recovery rates. On the other hand, excessively stable froths can decrease the selectivity of flotation due to the carryover of hydrophilic particles. Thus, frothing capacity and stability are essential attributes for practical froth applications (Coelho et al., 2011). Frothing capacity refers to the ability to generate froth, while froth stability is essentially its lifespan. Froth stability is the most important performance of froths, defined as the ability of air bubbles in froths to resist coalescence and breakage (Triffett and Cilliers, 2004). Moderately stable froths assist in the selective separation of the target minerals from the ore, which is important to ensure high recovery rates and achieve the desired concentrate content (Neethling and Brito-Parada, 2018; Jera and Bhondayi, 2021). However, achieving this froth stability requires careful selection and dosing of flotation reagents, consideration of mineral particle properties, and control of air flow rates. These conditions must be optimized to maintain proper froth stability, thus allowing for efficient separation of minerals and high recovery rates (Zhao and Zhang, 2025).

As an example of studies between froth stability and process performance in the flotation of copper sulfide ores, the results indicated that the more stable the froth, the greater the number of gangue particles were entrained, leading to higher recovery rates but lower concentrate contents (Jahedsaravani et al., 2014). According to (Ostadrakhimi et al., 2022), the effects of the air flow rate and froth depth on ore flotation showed that as the air flow rate increased, the rate of coalescence of air bubbles also increased. In addition, when the froth depth increased from 5 cm to 30 cm, the concentrate content increased by an average of 2 units due to the detachment of particles and the drainage of the liquid. However, the recovery rate of flotation concentrate decreased with increasing froth depth (Zhao and Zhang, 2025).

Therefore, stability is directly related to the purpose of this article, which aims to compare conditions of different flotation engine assemblies with different mechanical cell technologies. One option to assist in monitoring froth stability is to use computer vision-based systems for flotation, which enable direct or indirect estimation of the bubble rupture rate, which is a key quantitative indicator of froth stability.

11.3.3 Self-aspirated and Forced air Mechanical Flotation Cells

Mechanical flotation cells are the most widely used in the mineral industry, having a tank that stores the feed slurry, which is stirred by a mechanism composed of rotor and stator driven to disperse the air in the slurry (Wills et al., 2016). In the cell, collisions between air bubbles and hydrophobic particles promote the separation of hydrophobic particles from non-hydrophobic particles. In flotation, the selectivity of specific minerals to float on the upper surface depends on the operating conditions, the dosage of reactants, and is related to the profile of the mechanism that produces suitable bubbles and the hydrodynamic flow patterns within the cell (Rao, 2023).

As the impeller rotates, the air injected into the pulp is broken down into small bubbles. Cavitation also occurs during the process, in which the liquid flow breaks at the edge of the impeller blade and a cavity forms in the low-pressure region. This cavity is then dispersed into bubbles by a shearing action (Schubert et al., 1998); (Sun et al., 2020)(Wang et al., 2024). A further reduction in the size of the bubbles occurs due to the stationary stator blades. The mechanism not only agitates the pulp to suspend the particles, but also produces air bubbles and disperses them in the pulp, continuously shearing the incoming air.

To be efficient, a mechanical cell needs the generation of three distinct hydrodynamic zones. The region near the impeller encompasses the turbulent region required for the suspension of solids, dispersion of gas in bubbles, and bubble-particle interaction for the collection of minerals on the surface of the bubbles. Above the turbulent region is the quiescent zone, where bubble-particle aggregates rise in a relatively less turbulent region. This region also helps to reduce the number of gangue minerals that may have been mechanically entrained or trapped between bubbles for the valorization of valuable minerals. The region above the quiescent zone is the froth zone, which serves as an additional cleaning step and improves the quality of the concentrated product.

The bubbles produced have a size distribution dependent on the mechanism's ability to shear the volume of incoming air, and typically the bubble sizes are well below the 3 mm threshold, with greater emphasis on producing bubbles below 1 mm. The bubble size distribution (BSD) depends on several factors, such as the profiles of the impeller and stator assembly, the

tangential velocity of the impeller tip, the ratio of the impeller size to the flotation tank size, the air flow rate, and the concentration of the froth in the pulp.

To improve the performance of flotation cells, new flotation mechanisms from manufacturers demonstrate that in terms of increased grade and recovery of the floatable mineral and reduced energy consumption, grade recovery has an inverse relationship for a given ore (Rao, 2023).

11.3.4 General Comparison between Self-aspirated and Forced air Mechanical Flotation Cells

Mechanical or conventional flotation cells are classified from the point of view of air supply into two broad categories according to the method of generating rotor-stator bubbles in the cell: self-aerated and forced air. In the self-aerated cell, air is introduced into the pulp using the vacuum created by the rotor, whereas in the forced-air cell, air is generated externally to the cell by a low-pressure blower and pumped through the shaft of the flotation cell to the rotor (Murphy and Heath, 2013) There are several differences between these two types of cells:

- **Location of the rotor:** in the self-aerated machine the rotor is usually located near the top of the tank, while in the forced air machine it is located at the bottom, which implies the efficiency of pumping and the circulation of the slurry in the tank. In self-aerated cells, additional wear components are required in the pulp, such as the suction tube and false bottom, these components are necessary to facilitate flow in the cell, ensuring that the particles reach the collection zone where the particle bubbles attach ((Murphy and Heath, 2013) Forced air flotation tanks have the rotor located at the bottom of the tank, which means that particles entering the tank are immediately attracted to the active mixing and collection zone, maximizing the chance of collision between particles and bubbles, bubble fixation and particle recovery. The only other component of the internal mechanism required is the stator, which is composed of a stationary group of baffles located around the outside of the rotor, which assists in directing the flow of rotor slurry;
- **Operational differences:** In a power failure scenario, it is usually easier to re-establish the operation of a forced-air tank cell. This is partly due to the location of the rotor at the bottom of the tank, where particles can detach from the suspension, and partly to the ability to operate the forced-air rotor without the presence of air. These two design

features allow the operator to maximize the power transferred to any material in the rotor region, thus providing the operator with the best chance of resuspending any settled solids (Murphy and Heath, 2013) On the other hand, in the self-aerated machine as rotor located near the top, standing above any sedimented particles, it makes it difficult to resuspend the sedimented material;

- **Stability in the top layer of froth:** the forced air flotation machine typically has a stable and consistent froth flow over the edge at the top of the machine. This is because the rotor is located at the bottom of the tank and the distance from the rotor to the froth zone minimizes turbulence in the upper region, which contributes to a stable froth zone. As discussed earlier, in the self-aerated flotation machine the rotor located near the top of the cell promotes greater turbulence in the upper region of the cell. In addition, froth phase turbulence is often observed in a self-aerated cell, especially as the rotor wears out, resulting in decreased performance (Murphy and Heath, 2013)
- **Power consumed:** even including the power consumed by the air blower, literature indicates that forced air flotation machines, including the blower, typically have lower energy consumption than their equivalent self-aerated machines (Nelson et al., 2002);
- **Air dispersion:** Optimal air dispersion is one of the basic requirements for good metallurgical performance. Plants operating with forced-air cells have often noticed that the best results are obtained by using individual and variable air feed rates in each cell. In self-aerated flotation mechanisms. The air supply is limited by reducing energy consumption and mixing, or by reducing air dispersion, making the froth surface unstable and causing the froth to collapse;
- **Component wear:** A forced air flotation machine has fewer wear components exposed to the slurry compared to a self-aerated flotation machine (Murphy and Heath, 2013) As an example, the components of the self-aerated cell such as false bottom, draft tube, adjustment collar, rotor, stator and stabilizing skirt are replaced in the cell with forced air by rotor and stator, with proper air flow control;
- **Process Control:** several researchers have reported improvements in the performance of the conventional flotation circuit through the control and optimization of air flows in each cell in the flotation banks (Doucet et al. 2006; (Hadler et al., 2010) and (Murphy and Heath, 2013) There is a region of ideal air rate that provides better content and

recovery called peak air recovery (PAR). Air recovery is the fraction of air entering a cell that overflows into the cell as unburst bubbles (Hadler and Cilliers, 2009) According to (Hadler et al., 2012), it was found that the peak in air recovery for a cell varied with the depth of the froth, indicating that there is an interaction effect between the air and froth level, which has a degree of freedom for control only in forced air cells. As the depth of the froth increased, the air rate needed to increase to reach peak air recovery. This indicates that there are combinations of froth depth and air rates that result in performance. Older plants have self-aerated flotation machines. However, most modern plants have machines capable of controlling the flow and addition of air in the cell, including integrated control systems according to the results of chemical analysis of the flows in the flotation. These integrated controls can also include froth level measurements and computer vision for image analysis for monitoring, for example, bubble size, bubble surface velocity and bubble burst rate, which will be used to better optimize cell performance by applying advanced control techniques for stability control and recovery. There are limitations in self-aerating cells, as they typically only have froth layer level control meshes per cell bank. In tank cells, each tank can have its own mechanism, automatic air control and level control, which provides a greater degree of freedom in control;

Thus, when compared to self-aerated cells, forced air promotes greater air dispersion in the region below the rotor and stator improving cell hydrodynamics. Faster kinetics due to smaller bubbles, result in more efficient recovery of finer particles. Better agitation promotes greater particle-bubble interaction and improves the average settling rate. This reduces operational maintenance costs reduces reagents use, and reduces energy consumption, avoiding downtime due to overload and wear. These benefits can result in gains in recovery, operating yield, energy savings and direct reduction pellet feed split adherence in iron ore flotation. Figure 11.59 illustrates the surface of the image in the self-aerated instability, while a more homogeneous layer is perceived with forced air in the iron ore plant object of this study.



Figure 11.59 - Image of the behavior of the froth surface in the self-aerated and forced-air cell.

11.3.5 Machine Vision in Flotation on the Froth Surface

Several applications of machine vision-based systems make it possible to measure the image properties of bubbles using cameras installed on the surface of the flotation cell. These systems offer a non-invasive method that analyzes the characteristics of the froth in the flotation slurry for real-time monitoring of the process and make it possible to improve flotation control efficiency (Wen et al., 2021; Massinaei et al., 2022).

By processing and analyzing the acquired images using image processing algorithms, features, such as air bubble rupture, changes in froth layer thickness, and air bubble size distribution can be extracted. Among these, the rupture of air bubbles is directly related to the stability of the froth (Nakhaei et al., 2018). More information can also be obtained with machine vision, such as the size of the bubble, which is related to the drainage of the froth phase and the residence time; the shape of the bubble, which is influenced by its size and height of the froth; the speed of the froth, which is related to the rate of froth removal; and the stability of the froth, greatly influenced by the air flow rate (Horn, 2018). In this research, a computer vision system developed internally in the plant object of this research with the LabVIEW software was used. An autocorrelation property was developed in this application as a stability criterion, comparing the difference between consecutive and segmented images in defined regions of interest in order to indirectly identify a bubble rupture rate. Some properties of the bubbles in this iron ore application are illustrated as shown in Figure 11.60.

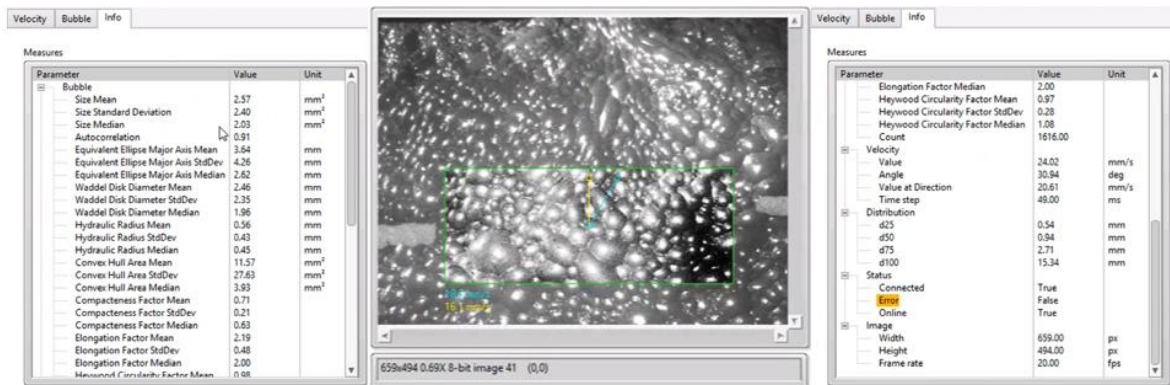


Figure 11.60 - Bubble and froth properties in the Vbolhas Application.

11.3.6 Economic Evaluation of Improvements in the Flotation Circuit

The economic evaluation of improvements in the flotation circuit can be calculated beyond the existing condition, considering the useful life of equipment with retrofitting scenarios replacing with the same equipment in the costing or modernization of the existing technology with investment, whose financial benefit can be calculated as a function of the Return on Investment (ROI). When calculating ROI, it is important to study the long-term effects on investments, as the benefit of capital expenditures can outweigh the existing margin with high operating costs and unproductivity. When evaluating an investment for a flotation plant, the emphasis is often on minimizing capital expenditures. For long-term savings, life cycle cost analysis shows that the importance of investment cost is almost negligible (Rinne and Peltola, 2008).

Like any other mechanical equipment, flotation machines require routine maintenance to remain operating at optimal performance. The operating costs of a flotation machine depend on the efficiency of the equipment, where a key mechanical aspect is the proper condition of the critical wear components. The absence of parts or delay in maintenance, e.g. rotor or stator makes the cell surface corrugated and causes the froth to collapse. Another important factor is the replacement of non-standard components that may have a shorter useful life and, in some cases, reduce metallurgical efficiency. Even if small metallurgical losses occur due to malfunctioning equipment, the savings in maintenance quickly turn into expenses.

From a process point of view, it is important to evaluate the complexity, operational challenges, outdated technologies of the cells, meters and actuators, capacity and performance of the circuit as a function of changes in the run of mine (ROM), especially in the fine fraction, which requires

an increase in flotation kinetics. This thinning of the ROM can make existing cell drives undersized for the plant's new processing requirements, leading to corrective overload stops.

Modern technologies can offer solutions to optimize flotation processes, both in terms of efficiency, metallurgical recovery and adherence to the specified quality. Legacy mechanical flotation machines have traditionally been limited by their relatively narrow range of aeration rate, fixed mechanism dimensions, and speed. The new flotation machine designs allow for much greater adaptability with control of the air flow rate in each cell. Another important point is the proper maintenance of critical components, which if ignored, can generate significant losses. Some manufacturers recommend the installation of mixed flotation equipment, for example, a flotation bank with forced air and self-aerated flotation cells (McNamara, 2007). This arrangement may present benefits from a metallurgical point of view. However, this should be considered to compare it to the higher maintenance cost that will occur with the presence of different types of flotation equipment in the same flotation bank (Rinne and Peltola, 2008).

This article aims to compare the financial gain of a project based on industrial tests for conventional mechanical flotation conducted in the rougher stage, in order to compare self-aerated cells and forced air to evaluate process indicators. The costs and gains for comparison were calculated considering dimensionless values in relation to the total cost. This feasibility study is part of the project life cycle model widely adopted by companies, in which the first step is the feasibility study.

11.4 Experimental

The original configuration of the conventional mechanical flotation circuit of the plant under study is composed of 120 self-aerated WEMCO cells of 1000 ft³ in the rougher and scavenger stages and 500 ft³ in the cleaner and recleaner stages. Despite being effective, it presents operational and maintenance challenges due to its complexity and outdated technology. In 2024, 4 cells of a rougher bench with a forced air mechanism that was modernized went into operation. After a period in operation, a planning of industrial tests in conventional mechanical flotation in the rougher stage was proposed, aiming to compare self-aerated cells and forced air to evaluate process indicators and machine vision properties. These tests were applied in the

rougher bank of the quartz reverse cationic flotation circuit of an iron ore plant located in Minas Gerais, Brazil. Figure 11.61 illustrates the feed (1), tailings (2) and concentrate (3) streams, which were collected for laboratory analysis, cameras were used for image analysis of the bubbles in the feed and discharge cell. Currents were also collected from the four engines for analysis.

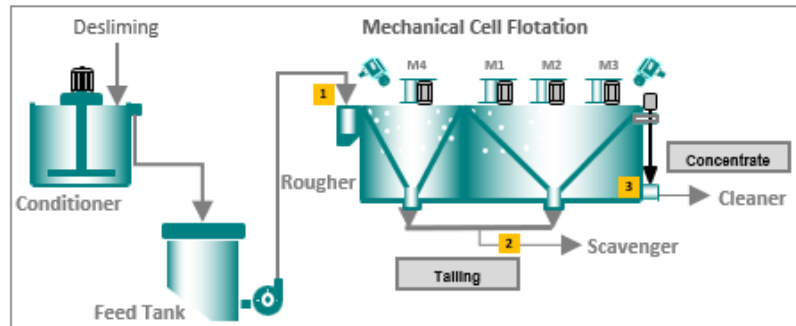


Figure 11.61 - Summary flowchart of iron ore reverse flotation.

The test was designed to enable a performance comparison of three rougher cells to compare different scenarios, as indicated in Table 11.12. In addition to comparing the change in technology between rougher 1 (forced air and modern technology) and rougher 3 (self-aerated and old technology), a test was also carried out on rougher 2, where the old mechanism was maintained, but with a forced air injection with manual control in the line that originally sucks air from the atmosphere to the rotor. It is important to consider that cells with old technology have components in good operating condition. During the tests, laboratory data, process data, and surface froth imaging properties were collected for analysis, as listed in Table 11.13.

Table 11.12 - Comparative tests on self-aspirated and forced air rougher mechanical cells

Test	Cells volume(ft ³)	Cells type	Flotation mechanism	Air control by cell			
				M1	M2	M3	M4
Rougher 1	1000	Forced air	Modernized	A	A	A	A
Rougher 2	1000	Forced air	Old technology	M	M	M	M
Rougher 3	1000	Self-aerated	Old technology	-	-	-	-

(Mode of Air Control: A-Automatic; M-Manual; NA: Not applicable)

Table 11.13 - Answers to the comparison of rougher tests with self-aerated cells and forced air

Response	Response	Description	unit
Process	SiO_{2_CO}	Concentrate grade	%
	Fe_{TA}	Tailing grade	%
	$S.I.$	Gaudin selectivity index	-
	R_{met}	Fe recovery	%
	R_{mw_TA}	Water recovery in tailings (overflow)	%
	YA_n	Cell motor current (n: number of motor)	%A
Froth Image	CF_{F_vel}	Froth velocity in feed cell	mm/s
	CF_{D_vel}	Froth velocity in discharge cell	mm/s
	CF_{F_bs}	Bubble perimeter in feed cell	mm
	CF_{D_bs}	Bubble perimeter in discharge cell	mm
	CF_{F_acor}	Bubble autocorrelation in feed cell	%
	CF_{D_acor}	Bubble autocorrelation in discharge feed cell	%

In terms of instrumentation and actuators for the three tests, a comparison is presented as shown in Figure 11.62. For the analysis of the image properties using cameras, the LabVIEW application developed internally was adopted, illustrated by the camera location in the cell and application window as shown in Figure 11.63. During the tests, photos were also captured considering a superior view of the edge of the 4 cells of rougher 1 and 3, in order to visually compare.

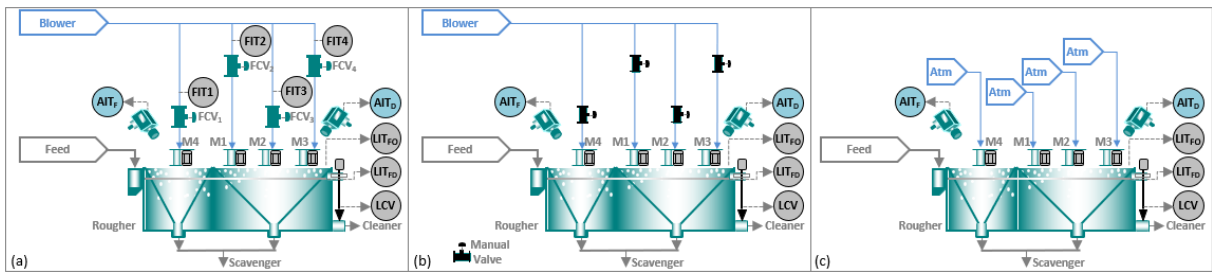


Figure 11.62 - Cell types and instrumentation for rougher comparative testing (a) Forced air modernized; (b) Forced air with old technology; (c) Self-aerated with old technology.

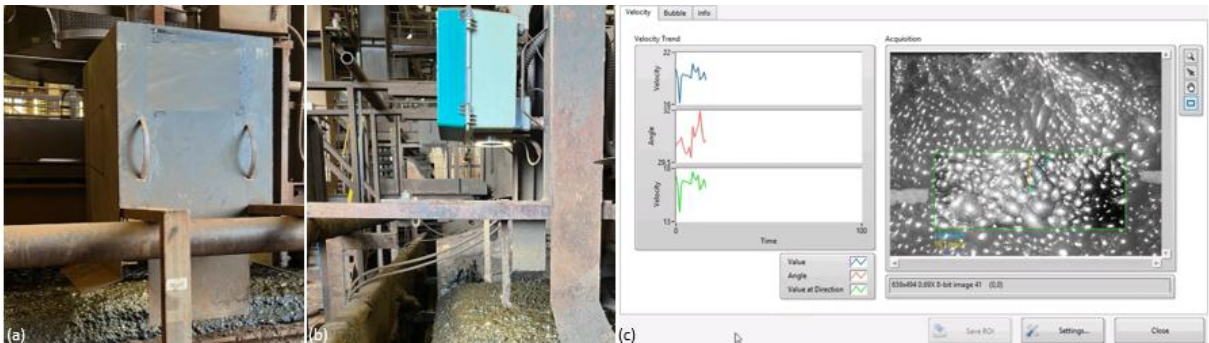


Figure 11.63 - Device with machine vision in the cell and application window with bubble properties. (a) Panel protection; (b) Camera; (c) Machine vision interface software window.

The analysis of the results for the comparison of the cells generated a subsidy for an economic feasibility study and evaluation of scenarios for the modernization of the applied technology,

aiming to maximize the financial return. This study is important, because the depletion of ROM and greater participation of clay minerals has generated greater overload in the reactors with the old flotation mechanism, already aged and outdated.

As the PFRD production split of the plant's object of research has been decreasing in recent years. This study aims to economically evaluate the modernization of all reactors, replacing the current self-aerated models with a new forced air technology. At the test site, flotation performance is measured by metallurgical recovery and meeting the upper specification limit of 1.10% SiO₂ in the concentrate for the direct reduction pellet feed product. To evaluate the substitution feasibility scenario, the following indicators were also considered:

- Increased metallurgical recovery of the plant;
- Increase of direct reduction pellet feed split;
- Reduction of amine collector consumption;
- Reduced maintenance cost.

11.5 Results and Discussion

The results of the three tests on the rougher were organized according to an experiment with two purposes. First, to evaluate the proposed comparative indicators for the trade from flotation mechanisms using self-aerated cells and forced air. The second, to use the previous results to propose an economic feasibility scenario for the modernization of the applied technology, detailing the investment, gains and main costs necessary in a relative monetary unit, aiming to maximize the financial return of the plant.

Before starting the test period, standard conditions of the air flow rate and froth layer level in the cells were adopted. Figure 11.64 show photos considering a superior view of the edge in the central part were captured in the 4 cells of rougher 1 (forced air) and rougher 3 (self-aerated). It is possible to visually identify two different aspects of the bubbles with these images, in rougher 1 with forced air, there is a greater growth of the bubbles from the inlet cell to the discharge in the overflow compared to the self-aerated rougher 3.



Figure 11.64 - Appearance of bubbles in the overflow on the rougher bench of mechanical flotation.

11.5.1 Tradeoff between Self-aspirated and Forced air Cells

During the testing period, the mean value of the responses of the three image properties analyzed in each feed and discharge cell using computer vision were collected as shown in Table 11.14, except for the feed of rougher 2, in which the camera was unavailable during the test.

Table 11.14 - Variables result using video analysis in rougher feeding and discharging

Test	Bubble perimeter		Velocity direction		Bubble autocorrelation	
	CF_{F_bs}	CF_{D_bs}	CF_{F_vel}	CF_{D_vel}	CF_{F_acor}	CF_{D_acor}
Rougher 1	3,05	3,60	159	176	0,926	0,949
Rougher 2	-	3,13	-	128	-	0,842
Rougher 3	3,03	2,85	62	82	0,947	0,950

(F-Feed; D-Discharge; "-":Camera on rougher 2 feeding not available)

For the perimeter, also related to the size of the bubble, it is noted that there is an increase in rougher 1 from the feed to discharge, while in rougher 3 the size in the feed was similar to the discharge, although a little smaller. In relation to rougher 2 with manual air; there is an intermediate value in the discharge, when compared to rougher 1 and 3. For the bubble velocity on the surface, in the forced-air cells of roughers 1 and 2, the velocities are much higher when compared to the self-aerated rougher 3. An increase in feed speed is also observed in relation to the discharge in roughers 1 and 3.

On the other hand, the autocorrelation, related to the bubble burst rate, in general, there are similar values both in the feeding and in the discharge of roughers 1 and 3, ranging from 0.93 to 0.95. As the test was for a fixed standard flow condition in rougher 1, it indicates that there is an opportunity to optimize the air flow rate in the feed. On the other hand, in rougher 2 with manual air, a low autocorrelation value of 0.842 was verified, indicating that the air flow rate of the manual air supplied was high, which penalizes the stability of the bubble, and consequently %SiO₂ in the concentrate. The other answers referring to sampled and calculated process data are available as shown in Figure 11.65.

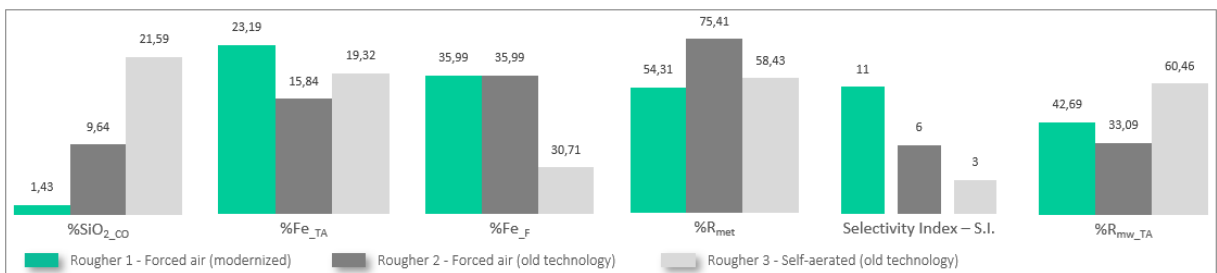


Figure 11.65 - Cell types and instrumentation for rougher comparative testing (a) Forced air modernized; (b) Forced air with old technology; (c) Self-aerated with old technology.

It is noted that 1.43% of %SiO₂ in the concentrate of rougher 1 was already close to the specification limit in the final product cleaner of 1.10%. It is an expressive result in the forced air performance of rougher 1, compared to rougher 2 with an intermediate value of 9.64%, and a 21.59% high in rougher 3. For the %Fe in the tailings in rougher 1, a value of 23.19% concentrated and a lower recovery of 54.31% was obtained. For rougher 3, a 19.32% Fe tailings and 58.43% recovery were obtained, values slightly better than in rougher 1. For manual rougher 2, the low value of %Fe in the tailings of 15.84% stands out, associated with a high recovery of 75.41%. These results indicate that there is a possibility of optimizing adjustments in rougher 1, making it possible to increase the %SiO₂ and reduce the %Fe at this stage.

Another way to compare the result of the tailings and concentrate, also considering the effect of feeding, was using the Gaudin selectivity index of each rougher, the higher the better, being that roughers 1 and 2 were with a feeding %Fe of 35.99%, while a poorer 3 rougher was with 30.71% of Fe. The high selectivity index value of 11 for rougher 1 stands out, and the expected value of the rougher, cleaner and recleaner set is about 14. This value is much higher than that of 3 for self-aerated rougher 2 and 6 for manual forced air in rougher 2.

For the variable of water recovery in the froth, the high value of 60.46% for self-aerated rougher 3 stands out. The higher this value, the greater the recovery of fine iron particles by being entrained into the tailings stream. For rougher 1 and 2 with forced air, the values were significantly lower.

Due to the results obtained of %SiO₂ in the concentrate, it is noted that there is a great opportunity to modernize the technology using forced air in the flotation circuit, also applying it to the other cells. Since adherence to the split below 1.10% increases the margin of the product with a higher volume of direct reduction pellet feed, this is an alternative for better detailing. In addition, to reduce the iron in the tailings and increase the recovery in the rougher, it is possible to optimize the air flow rate of the banks and carry out studies to reduce the residence time and maximize the flow. An important benefit of forced air is that it reduces the consumption of reagents due to the high selectivity demonstrated in the rougher. A significant amine reduction is expected in the reverse flotation of iron ore.

Another important factor observed is the behavior of the current of the motors of each cell. It was found that the current of rougher 1 is about 35% lower than that of rougher 2 and 19% lower than that of rougher 3, as shown in Table 11.15. These results reinforce the fact that the replacement of self-aerated reactors by forced air reduces energy consumption, avoiding recurrent problems of downtime due to high current with the old technology, which cause problems of quality and mass produced, since with the impoverishment of the ROM and increase of fine particles there is a tendency to increase the current. As available power values are already close to the installed design capacity, when maintaining the old technology, it may be necessary in the short term to carry out a significant repowering of the circuit, which would require the replacement of complete sets with new electrical cables and upgrade of the substation, implying high investment costs and considerable unavailable time for execution.

Table 11.15 - Current behavior for rougher cells during the testing

Test	Current (%A)					%Relative Rougher 1
	M1	M2	M3	M4	AVG	
Rougher 1	66	65	60	64	64	-
Rougher 2	83	89	88	83	86	135%
Rougher 3	73	74	81	76	76	119%

Thus, industrial tests reveal that modernization with forced air technology is an alternative investment option to replace existing self-aerated cell reactors. This solution contributes to promote better bubble size distribution and particle suspension, leading to better stability and hydrodynamics, together with better fluidity of the medium with the forced injection of air into the system, increasing the kinetics of flotation and providing greater recovery of the fine particles, and better selectivity of separation of quartz from iron oxides and metallurgical recovery. In addition, it also eliminates the need for future electrical repowering, with lower operational power consumption, and consequently, greater energy efficiency.

A reduction in maintenance costs can also be projected due to the reduction of critical items during operation. While mechanisms of the old flotation cells with self-aerated cells are composed of several mechanical components, such as a false bottom, draft tube, adjustment collar, rotor, stator and stabilizing skirt. From this set, with the forced air technology there is a need for a rotor and stator, in addition to a set of a flow meter and air control valves. Fewer components signifies reduced maintenance costs and less likelihood of unplanned downtime.

11.5.2 Evaluation of Scenario for Replacing Self-Aspirated Cells with Forced Air Cells

Previously, converting self-aerated flotation machines to use forced air required the complete replacement of all mechanical components. However, there are supplier options that make it possible to keep part of the existing components located on top of the machine. The potential results were demonstrated in the comparative industrial application of the three configurations in the rougher stage in the plant under study.

The promising result justified an evaluation of the scenario of replacing all self-aerated reactors with the new forced air technology. It was defined to perform the comparison only of the configuration of rougher 1 and 3. This conversion makes it possible to reduce costs, minimize downtime during the process, lower operating power consumption, as well as resulting in better metallurgical performance and lower reagent consumption.

As a premise during the evaluation, due to the complexity of implementing the replacement of the mechanisms in a plant with a continuous operating regime, 3 years of execution were

considered. In addition, for the purpose of financial comparison, a monetary unit was adopted relative to the total estimated financial benefit of exchanging the set of 116 self-aerated cells for forced air. Thus, the value of the relative gains and investment for the acquisition, installation and commissioning of the cells and blower line were entered as a percentage of the total expected relative gain of 100%.

Based on the industrial tests performed, history and benefits as a function of the mass balance, conservative gains were adopted in this research, as shown in Table 11.16.

Table 11.16 - Gains from modernizing forced air technology

		Types of gain	%
Relative gain		Maintenance cost relative reduction	20,1%
		Amine consumption reduction (%)	20%
		Direct reduction pellet feed split gain (%)	5%
		Mettalurgical recovery gain (%)	1%

The average relative cost of suppliers per stage and blower are indicated in Table 11.17. The necessary investment and respective relative gains were distributed in the 3 years foreseen as shown in Table 11.18.

Table 11.17 - Distribution of the average relative cost of investment associated with equipment

		Cell volume (ft ³)	Bench number	Cells number	Cost
Relative cost	Rougher	1.000	7	28	7,5%
	Cleaner	500	8	24	3,9%
	Recleaner	500	8	24	3,9%
	Scavenger	1.000	8	40	10,8%
	Blower	-			1,3%

Table 11.18 - Summary of cost and relative gain with forced air

	Air control by cell			
	Year 1	Year 2	Year 3	Total
Relative investment costs	16,0%	7,5%	3,9%	27,4%
Relative gain	69,8%	14,3%	15,9%	100,0%

This feasibility study based on industrial testing indicates that there is a huge potential for gains from forced air substitution, as the relative gain of year 1 alone of 69.8% already exceeds the predicted investment of 27.4% relative to the total investment in 3 years. Considering a 10-year cash flow plus cost and margin calculations of the plant, an Internal Rate of Return (IRR) of

240.7% was calculated, which makes the capital investment very attractive, both from the point of view of recovery and quality benefits, as well as the reduction of operating costs.

11.6 Conclusions

The results obtained in the comparison of this research demonstrate that mechanical rougher flotation cells with a forced air system have superior performance in relation to self-aerated ones, both in process indicators and in bubble properties. The greater capacity to control the air flow rate contributed to maximize the selectivity index in cells with forced air, with a value of 11, compared to a value of 3 obtained in a self-aerated cell. Although the metallurgical recovery with forced air is a little lower, it was found that there are opportunities to apply advanced control techniques to reduce the consumption of the amine collector, which can generate cost reduction, and consequently, increase recovery.

This solution with forced air contributes to promote better distribution of the bubble size and suspension of particles with the forced injection of air, providing an increase in the kinetics of flotation and greater recovery of fine particles, reducing the recovery of water in the froth and consequent entrainment of iron fines. Another benefit is to reduce operational power consumption, avoiding the need for future investment in installed power, in addition to minimizing overload downtime events. It is also important to note that the lower number of mechanical components with the forced air mechanism means reduced maintenance costs and less probability of unplanned downtime.

The behavior of the froth variables analyzed using machine vision also confirms the result of the process indicators. Although the technology is already known, it is a future alternative to be explored along with the optimization of optimal points for air flow rate control and slurry interface level to maximize performance.

The industrial tests carried out reinforce the potential of forced air technology as a viable alternative for modernization of flotation cells, offering significant operational and economic

gains to maximize the production of direct reduction pellet feed. It was identified in the scenario for the reverse flotation of iron ore object of this research that in terms of gains relative to the estimated cost of the required investment is less than one year, with an attractive internal rate of return of 240.7%.

11.7 Acknowledgments

The authors would like to thank Vale S.A., UFMG (Federal University of Minas Gerais), CAPEX-PROEX, FAPEMIG and CNPq (Brazilian Technological and Scientific Development Council) for their support in the development of this research. This study was financed in part by CAPES (Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel - Brazil) - Finance Code 001.

11.8 References

- Amani, P., Karakashev, S.I., Grozev, N.A., Simeonova, S.S., Firouzi, M., 2021. Effect of selected monovalent salts on surfactant stabilized foams. *Adv. Colloid Interface Sci.* 295, 102–490.
- Araújo, A. C., Aramante, S. C., Souza, C. C., Silva, R. R. R. Ore mineralogy and its relevance for selection of concentration methods in processing of Brazilian iron ores. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy*, v. 112, p. C54-C64, 2003.
- Cantat, I., Cohen-Addad, S., Elias, F., Graner, F., Saint-Jalmes, A., 2013a. *Foams: Structure and Dynamics*. CPI Group (UK) Ltd., Croydon.
- Coelho, E., Rocha, S.M., Coimbra, M.A., 2011a. Foamability and foam stability of molecular reconstituted model sparkling wines. *J. Agric. Food Chem.* 59 (16), 8770–8778.
- Chu, P., Finch, J., Bournival, G., Ata, S., Hamlett, C., Pugh, R.J., 2019. A review of bubble break-up. *Adv. Colloid Interface Sci.* 270, 108–122.
- Darabi, H., Koleini, S.J., Deglon, D., Rezai, B., Abdollahy, M., 2017. Particle image velocimetry study of the turbulence characteristics in an aerated flotation cell. *Ind. Eng. Chem. Res.* 56, 13919–13928.
- DELKOR's MAXGen-equipped BQR flotation cells gain traction in mineral processing space, *International Mining*, 31 May 2022, <https://im-mining.com/2022/05/31/delkors-maxgen-equipped-bqr-flotation-cells-gain-traction-in-mineral-processing-space>.
- Doucet, J.S. Gomez, C.O. and Finch, J.A. (2006). "A first step towards gas dispersion management: manipulation of gas distribution in flotation circuits." *Proceedings 38th Annual Canadian*

- Mineral Processors Conference, Canada. pp. 423-436.
- Farrokhpay, S., Fornasiero, D., 2017. Flotation of coarse composite particles: Effect of mineral liberation and phase distribution. *Adv. Powder Technol.* 28, 1849–1854.
- Gorain, B., Franzidis, J., Manlapig, E., 2000. Flotation Cell Design: Application of Fundamental Principles, *Encyclopedia of Separation Science*. Academic Press, pp. 1502–1512.
- Hadler, K. Smith, C. and Cilliers, J. (2010). “Flotation performance improvement by air recovery optimization of roughers and scavengers.” *Proceedings XXV International Mineral Processing Congress*. pp. 1917-1924
- Hassanzadeh, A., Karakaş, F., 2017. Recovery improvement of coarse particles by stage addition of reagents in industrial copper flotation circuit. *J. Dispersion Sci. Technol.* 38 (2), 309–316.
- Jahedsaravani, A., Marhaban, M.H.H., Massinaei, M., 2014. Prediction of the metallurgical performances of a batch flotation system by image analysis and neural networks. *Miner. Eng.* 69, 137–145.
- Jera, T.M., Bhondayi, C., 2021. A review of flotation physical froth flow modifiers. *Minerals* 11 (8), 864.
- LEJA, J. *Surface Chemistry of Froth Flotation*. New York: Plenum Press, 1982.
- Liao, Y., Lucas, D., 2009. A literature review of theoretical models for drop and bubble breakup in turbulent dispersions. *Chem. Eng. Sci.* 64, 3389–3406.
- Liu, Y., Wang, X., Zhang, Z., Deng, F., 2023a. Deep learning in image segmentation for mineral production: a review. *Comput. Geosci.* 180.
- MacNamara, L. (2007). “Cell selection.” *Mining Magazine*. pp. 32-34.
- Massinaei, M., Jahedsaravani, A., Mohseni, H., 2022. Recognition of process conditions of a coal column flotation circuit using computer vision and machine learning. *Int. J. Coal Prep. Util.* 42 (7), 2204–2218.
- Montgomery, D.C., 2013. *Design and Analysis of Experiments*, 8th ed. John Wiley & Sons, Inc., New Jersey, USA.
- Nakhaei, F., Irannajad, M., Mohammadnejad, S., 2018. Evaluation of column flotation froth behavior by image analysis: effects of operational factors in desulfurization of iron ore concentrate. *Energy Sources Part A* 40 (19), 2286–2306.
- Neethling, S.J., Brito-Parada, P.R., 2018. Predicting flotation behaviour - the interaction between froth stability and performance. *Miner. Eng.* 120, 60–65.
- Nelson, M.G. Traczyk, F.P. and Lelinski, D. (2002). “Design of Mechanical Flotation Machines.” *Mineral Processing Plant Design, Practice and Control* (eds: Mular, A. Halbe, D. and Barratt, D.). pp 1179- 1203
- Newell, R., Grano, S., 2006. Hydrodynamics and scale up in Rushton turbine flotation cells: Part 2. Flotation scale-up for laboratory and pilot cells. *Int. J. Miner. Process.* 81, 65–78.
- Ostadrhimi, M., Farrokhpay, S., Pirmoradi, S., Noparast, M., 2022. Effect of air flow rate and froth depth on the flotation performance: an industrial case study in a 10 m³ cell. *Physicochem.*

- Probl. Miner. Process. 58 (5).
- Pitois, O., 2012. Foam ripening. *Foam Eng.* 59–73.
- Rao, B. V., 2023. Plant Trials of the MAXGen Flotation Mechanism in a Lead Flotation Circuit. *The Indian Institute of Metals – IIM*, 77 (12):4215-4220. <http://doi.org/10.1007/s12666-023-02913-5>
- Roth, A.E., Jones, C.D., Durian, D.J., 2013. Bubble statistics and coarsening dynamics for quasi-two-dimensional foams with increasing liquid content. *Phys. Rev. E* 87, 42304.
- Schubert, H., 2008. On the optimization of hydrodynamics in fine particle flotation. *Miner. Eng.* 21, 930–936.
- Schubert, H., Bischofberger, C., 1998. On the microprocesses air dispersion and particle- bubble attachment in flotation machines as well as consequences for the scale-up of macroprocesses. *Int. J. Miner. Process.* 52, 245–259.
- Triffett B., Cilliers, J. 2004. Measuring froth stability. WO/2004080600.
- Wang, H., Yang, W., Yan, X., Wang, L., Wang, Y., Zhang, H., 2020b. Regulation of Bubble Size in Flotation: A Review. *J. Environ. Chem. Eng.* 104070.
- Wang, J., Nguyen, A.V., Farrokhpay, S., 2016. A critical review of the growth, drainage and collapse of foams. *Adv. Colloid Interface Sci.* 228, 55–70.
- Wen, Z., Zhou, C., Pan, J., Nie, T., Zhou, C., Lu, Z., 2021. Deep learning-based ash content prediction of coal flotation concentrate using convolutional neural network. *Miner. Eng.* 174, 107251.
- Wills, B. A. and Napier-Munn, T. J. (2006). *Wills' Mineral Processing Technology: An introduction to the practical aspects of ore treatment and mineral recovery (7th ed.)*: Elsevier Ltd.
- Chen, X., Liu, D., Yu, L., Shao, P., An, M., Wen, S., 2025. Recent advances in flotation froth image analysis via deep learning. *Eng. Appl. Artif. Intell.* 147, 110283. <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2025.110283>
- Gorain, B.K., Franzidis, J.P., Manlapig, E.V., 2000. FLOTATION | Flotation Cell Design: Application of Fundamental Principles. *Encycl. Sep. Sci.* 1502–1512. <https://doi.org/10.1016/b0-12-226770-2/05781-1>
- Hadler, K., Cilliers, J.J., 2009. The relationship between the peak in air recovery and flotation bank performance. *Miner. Eng.* 22, 451–455. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.12.004>
- Hadler, K., Greyling, M., Plint, N., Cilliers, J.J., 2012. The effect of froth depth on air recovery and flotation performance. *Miner. Eng.* 36–38, 248–253. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2012.04.003>
- Hadler, K., Smith, C.D., Cilliers, J.J., 2010. Recovery vs. mass pull: The link to air recovery, in: *Minerals Engineering*. pp. 994–1002. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2010.04.007>
- Horn, Z.C., 2018. Froth texture extraction with deep learning.
- Lima, N.P., de Souza Pinto, T.C., Tavares, A.C., Sweet, J., 2016. The entrainment effect on the performance of iron ore reverse flotation. *Miner. Eng.* 96–97, 53–58. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.05.018>

- Morar, S., 2010. The use of machine vision to describe and evaluate froth phase behaviour and performance in mineral flotation systems.
- Murphy, B., Heath, J.L., 2013. Selection of Mechanical Flotation Equipment.
- Neethling, S.J., Cilliers, J.J., 2009. The entrainment factor in froth flotation: Model for particle size and other operating parameter effects. *Int. J. Miner. Process.* 93, 141–148.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2009.07.004>
- Rinne, A., Peltola, A., 2008. On lifetime costs of flotation operations. *Miner. Eng.* 21, 846–850.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.04.018>
- Safari, M., Hoseinian, F.S., Deglon, D., Leal Filho, L.S., Souza Pinto, T.C., 2020. Investigation of the reverse flotation of iron ore in three different flotation cells: Mechanical, oscillating grid and pneumatic. *Miner. Eng.* 150, 106283. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106283>
- Silva, K., Filippov, L.O., Piçarra, A., Filippova, I. V., Lima, N., Skliar, A., Faustino, L., Filho, L.L., 2021. New perspectives in iron ore flotation: Use of collector reagents without depressants in reverse cationic flotation of quartz. *Miner. Eng.* 170, 107004.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107004>
- Souza Pinto, T.C., Braga, A.S., Leal Filho, L.S., Deglon, D.A., 2018. Analysis of key mixing parameters in industrial Wemco mechanical flotation cells. *Miner. Eng.* 123, 167–172.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.03.046>
- Sun, B., Yang, C., Wang, Y., Gui, W., Craig, I., Olivier, L., 2020. A comprehensive hybrid first principles/machine learning modeling framework for complex industrial processes. *J. Process Control* 86, 30–43. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2019.11.012>
- Vallejos, P., Yianatos, J., Grau, R., Yañez, A., 2020. Evaluation of flotation circuits design using a novel approach. *Miner. Eng.* 158, 106591. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106591>
- Vieira, A.M., Peres, A.E.C., 2007. The effect of amine type, pH, and size range in the flotation of quartz. *Miner. Eng.* 20, 1008–1013. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2007.03.013>
- Wang, D., Liu, Q., 2021. Hydrodynamics of froth flotation and its effects on fine and ultrafine mineral particle flotation: A literature review. *Miner. Eng.* 173, 107220.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107220>
- Wang, J., Wang, L., Cheng, H., Runge, K., 2024. A comprehensive review on aeration methods used in flotation machines: Classification, mechanisms and technical perspectives. *J. Clean. Prod.* 435, 140335. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.140335>
- Wang, L., Peng, Y., Runge, K., Bradshaw, D., 2015. A review of entrainment: Mechanisms, contributing factors and modelling in flotation. *Miner. Eng.* 70, 77–91.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.003>
- Zhao, L., Zhang, Q., 2025. A significant review of froth stability in mineral flotation. *Chem. Eng. Sci.* 302, 120738. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2024.120738>

12. ARTIGO C - Integration of Operating Conditions and Froth Properties in Iron Ore Flotation

*T. C. Nunes^{1,2}, N. P. Lima¹, T. A. M. Euzébio³, A. E. C. Peres²

¹ Vale S.A., Mineral Processing Department, Nova Lima, Minas Gerais, Brazil

² Federal University of Minas Gerais - UFMG, Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil

³ Programa de Pós-Graduação em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração, Universidade Federal de Ouro Preto e Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto, Brazil

(*Corresponding author: tiago.caixeta@vale.com)

Submitted Manuscripted at REM - International Engineering Journal.

Created: 05/Aug/2025

Submitted: 11/Sep/2025

ID: REMI-2025-0079

Status: *Waiting for approval*

12.1 Abstract

The performance of quartz reverse cationic flotation in iron ore concentration for pellet feed production varies depending to operating conditions, including process variables that affect froth characteristics. Process variables refer to those modified during routine operation, while froth characteristics are those measured online using image analysis. The relationship between these conditions influences froth stability, concentrate grade and metallurgical recovery, which is an alternative to be explored, as it can contribute to better decision-making when controlling processes and is crucial to the financial benefit. Therefore, this study aims to apply a method to integrate information from already known techniques, considering operational variables and image properties based on best practices in flotation, considering three pillars: plant operating conditions, performance monitoring, and process control. The structure of this method comprises an analysis of process variables, considering statistical analysis, monitoring and tests to evaluate effects on controls. This information establishes a connection with the regulatory control layer, modeling, advanced control and process optimization. Some applications are illustrated with practical cases of iron ore flotation.

Keywords: Flotation; froth image analysis; iron ore; monitoring; process control

12.2 Introduction

Flotation is a concentration process applied to solid particles that makes use of differences in the surface characteristics of mineral species, treating heterogeneous mixtures of particles suspended in an aqueous phase, referred to as pulp, into which a gaseous phase is introduced. Thus, this three-phase process occurs in two zones: pulp and froth (Leja, 1982). Flotation performance depends on operating conditions, which include process variables that affect froth characteristics. Process variables refer to those modified during routine operation, such as air flow rate, froth height, density, among others. The characteristics of the froth come from online image analysis measurements using machine vision resources. Any variation in these operating conditions can affect the chemical and physical characteristics in the pulp phase. These changes in the pulp phase, in turn, alter the structure and stability of the froth, which ultimately impacts concentrate grade and metallurgical recovery.

The variations are caused by many variables of different types (Uusi-hallila, 2014). In addition to the high number of variables, the impossibility of measuring some of them and the complex and non-linear interrelationships of others all complicate control efforts, and it is thus challenging to obtain the desired results (Shean and Cilliers, 2011). To assist in the understanding of the flotation controls, process variables can be grouped in terms of process control into manipulated variables, disturbances, controlled variables and internal flotation state. The internal state is comprised of variables from the pulp and froth phase, such as coalescence rate, solids percentage, intermediate product levels, froth properties, transfer of mineral particles from the pulp to the froth and the transfer of mineral particles from the froth to the pulp (Hodouin, 2011; Jovanović and Miljanović, 2015).

These mechanisms internal to the flotation system determine the quantity and content of material recovered in the concentrate, affecting the stability of the froth and resulting in visual changes to its surface (Morar, 2010). In the froth phase, machine vision is used to make online measurements of properties on the froth surface, such as bubble size, number of bubbles, froth speed and froth stability (Quintanilla et al., 2021). In the pulp phase, portable or online meters are used mainly to measure bubble size, superficial gas velocity and bubble surface area flux (Horn et al., 2022). Since the competitive setting of the mineral industry requires that processes

take place under optimal conditions, the inclusion of more variables with image analysis is crucial in order to monitor process performance, as it allows for the detection, identification and reestablishment of operational parameters at the desired conditions, through initiatives such as control and optimization.

In this study, a practical method will be used considering both variables in the flotation process and image analysis properties, with the goal of improving flotation performance. This method contemplates information from already known techniques, based on good practices applied to process control and optimization quartz reverse cationic flotation in the concentration of iron ore, in accordance with three pillars: plant operating conditions, performance monitoring and process control applied to flotation.

12.3 Process Description

The process of concentrating iron ore to produce direct reduction pellet feed most practiced in the Iron Quadrangle region in Brazil is the quartz reverse cationic flotation, recommended for gangue that presents the quartz liberated to a flow of particles lower than 0.150 mm (Silva et al., 2021). This study works with information from two plants, one that uses tank cell flotation and the other using mechanical cell flotation, exploring the differences in the surface properties of minerals, where quartz particles (SiO_2) become hydrophobic, adhere to bubbles and rise to the surface to form a layer in the froth phase, which is collected in the overflow due to the addition of the amine collector under alkaline conditions, while the iron-bearing mineral remains in the pulp phase and is directed to the sink flow by injection of the starch depressant consisting of the concentrate (Lima et al., 2016). In the recleaner stage, the bottom flow generates the final concentrate industrially known as pellet feed.

The plants investigated in this study have a wide variety of measuring instruments and actuators available in the circuit. The reliability of the assets available to control the flotation process of these plants has been improved with maintenance programs, as the basis for successful control is the quality of the information. However, the use of online content analyzers is not yet consolidated, which requires making inferences in some cases with virtual sensors applying modeling techniques (Bergh and Yianatos, 2011). In general, the availability of assets favors

the application of more elaborate control strategies, which allows for a lower level of variability in the process. To assist in the elaboration and implementation of control strategies, the main variables that influence the flotation outcomes are manipulated. Industrial and laboratory tests are carried out to evaluate the effect for use in the control system, including design of experiments (DOE), industrial step tests, and statistical analysis.

Regarding the plants studied in this paper, tank cell flotation (Plant 1) allows for controlled froth layer level and air flow, whereas mechanical flotation (Plant 2) allows for froth layer level control. In these plants, flotation performance is measured by evaluating metallurgical recovery and compliance with the specification limit of the direct reduction pellet feed product, with an upper limit of 1.10% SiO₂ in the final concentrate after filtration, considered to be a product with high added value. A simplified flowchart of the plant circuit is illustrated as shown in Figure 12.66.

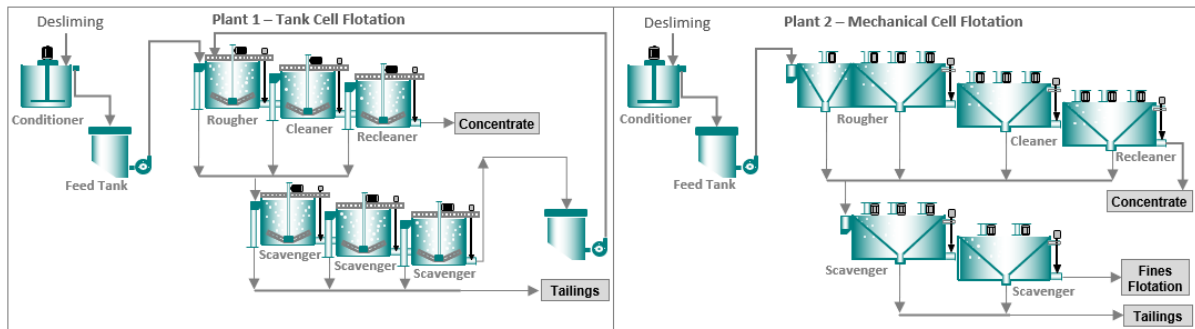


Figure 12.66 - Summary flowchart of iron ore flotation plants in the Iron Quadrangle region.

12.4 Methodology for Practical Applications in Flotation Control

Advances in the control and optimization of the flotation process are of great relevance, as they provide an increase in recovery and result in great economic benefits. However, even after successful implementation, unknown disturbances in the process can have a negative influence, hence the need for constant performance monitoring for sustainability and continuous improvement. Therefore, this paper proposes a methodology for integrating existing techniques based on three pillars of flotation management: plant operating conditions, performance monitoring, and process control. A diagram for integrating the techniques that comprise these pillars is presented in Figure 12.67 and detailed below.

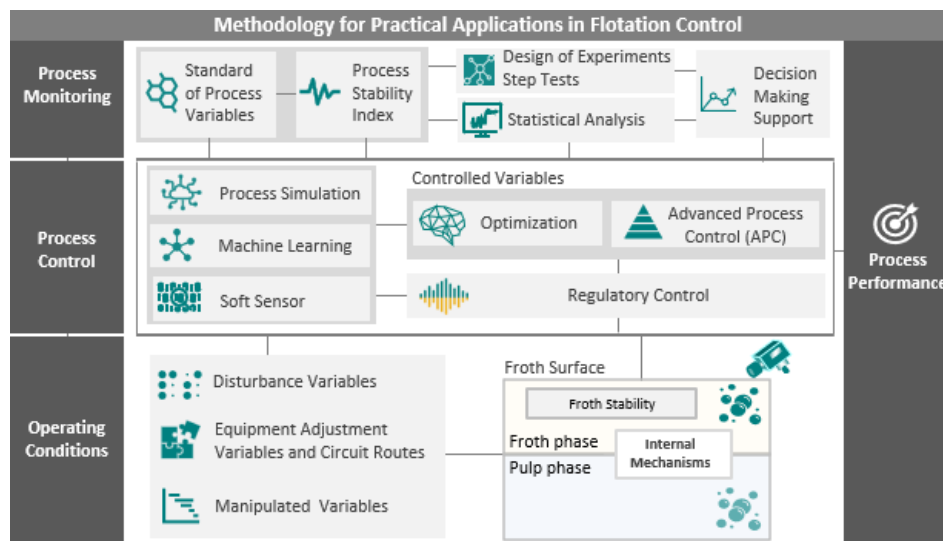


Figure 12.67 - Diagram of the methodology for the practical application of known techniques for flotation analysis, control, and monitoring

Font: Adapted from Morar (2010), Quintanilla et al. (2021), Shao et al. (2019).

12.4.1 Plant Operating Conditions

Knowing the operating conditions is essential in order to help develop controllers that promote greater process stability, better recovery performance, and higher product quality (Quintanilla et al., 2021). Monitoring process disturbances that generate deviations from these operating conditions, such as changes in particle size, grade, or instrumentation problems, allows for early control actions to maintain stability. A checklist of existing variables is a way to structure monitoring initiatives, identify asset gaps, and promote actions for variables that affect flotation control. Understanding the relationship between operating conditions, froth behavior and flotation performance is essential in the development of a control and optimization system (Morar, 2010).

Operational Conditions of Iron Ore Flotation

The variables that constitute operational conditions are classified as:

- **Manipulated variables:** variables that can be modified to change the internal states through a systemic control action, such as: air flow, specific reagent dosage, density, volumetric flow and pulp level in the cell (Quintanilla et al., 2021). It is important to know the role that these variables play and the way they affect the pulp and froth phases to achieve the target variables, since some of them can also be controlled variables (Hodouin, 2011);

- **Equipment adjustment variables or circuit flow routes:** variables related to flotation circuit configurations, stage options and process routes, as well as some operational adjustments of the physical and mechanical components of the flotation equipment. It is desirable to have efficient individual steps prior to flotation, such as comminution, classification, and desliming (Jovanović and Miljanović, 2015);
- **Disturbance variables:** variables that cannot be modified or controlled and, in some cases, can be measured or estimated. These variables are mostly related to disturbances in feed conditions and characteristics, such as feed rate, percentage of solids, particle size, liberated particle, and mineralogical composition (Bergh and Yianatos, 2011).
- **Internal variables:** the dynamic behavior of solid particles in flotation takes into account different functionalities in the pulp and froth phases. In order to better understand these dynamics, the flotation cell is divided into two sections: pulp volume and froth volume, which are subdivided into liquid and gas phases with associated mineral particles (Sun et al., 2021). Several models that represent the flotation process have been proposed in order to reduce mathematical complexity due to hydrodynamic behavior and the large number of variables, with some assumptions usually being adopted to facilitate modeling (Jovanović and Miljanović, 2015; Quintanilla et al., 2021). To summarize, the transfer of material between pulp and foam regions in quartz reverse cationic flotation occurs as shown in Figure 12.68.

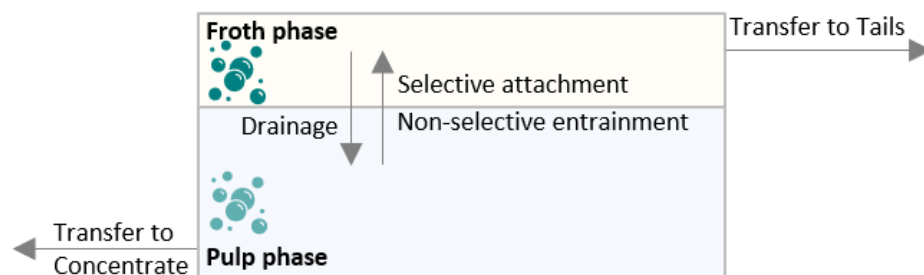


Figure 12.68 - Mass transfer methods in the quartz reverse cationic flotation process.

Font: Adapted from Hu (2014).

- **Controlled variables:** Objective control variables that influence flotation performance. Controlled variables include: pulp level, froth depth, concentrate and tailings content setpoints, flow rate and pH. The selection of controlled variables is more complex when compared to manipulated variables, since controlled variables can be categorized according to two functions. The first function is selected to address instability, responsible for

detecting disturbances and stabilizing processes according to operational limits. The second function must be selected based on optimal technical and economic criteria, using setpoints to optimize profitability (Gonzalez, 2018; Quintanilla et al., 2021);

- **Machine Vision Variables:** certain effects of process variables and control opportunities in flotation can be identified by evaluating bubble properties in the pulp and froth phases. These are properties of bubbles in both the pulp and froth phases, using cameras for measurements and sophisticated algorithms to present the desired information, such as: bubble size, number of bubbles, bubble distribution, froth velocity, solids loading, superficial gas velocity, bubble burst rate, froth stability, among others (Jahedsaravani et al., 2017);
- **Objective variables:** these variables are the key flotation performance indicators, such as metallurgical recovery, mass pull, percentage of SiO₂ in the concentrate and percentage of Fe in the tailings (Eney de Matos et al., 2022).

Froth Visual Properties Variable

The development of machine vision systems for flotation is meant to connect software resources in order to extract and understand the behavior of image properties. Some characteristics of bubble images associated with operational conditions allow for greater detail in analyses, inferences and actions in plant controllers to maintain the desired process performance (Zarie et al., 2020). Since the froth phase is the product of the cell's flotation overflow, properties of its appearance can be used to infer some process conditions, such as: the size of the bubble is related to the drainage of the froth phase and residence time; the shape of the bubble is influenced by its size and froth height; froth velocity is directly related to the froth removal rate; and froth stability is greatly influenced by the pulp flow rate in the cell (Horn, 2018).

In this paper, the machine vision system used to measure the properties of bubbles on the surface of the froth phase is an application called “Vbolhas”, which was developed internally at Vale S.A., using *LabVIEW*, as seen in Figure 12.69. The tool uses known image processing techniques to characterize bubbles on the froth surface. Many bubble properties were developed in the application and grouped according to the following criteria: bubble quantity, bubble distribution, froth velocity, equivalent bubble shape, and froth stability. The autocorrelation property was developed as a stability criterion, comparing the difference between consecutive

and segmented images in defined regions of interest, in order to identify a burst rate, which, when higher, tends to promote the return of material adhered to the bubble to the pulp phase.

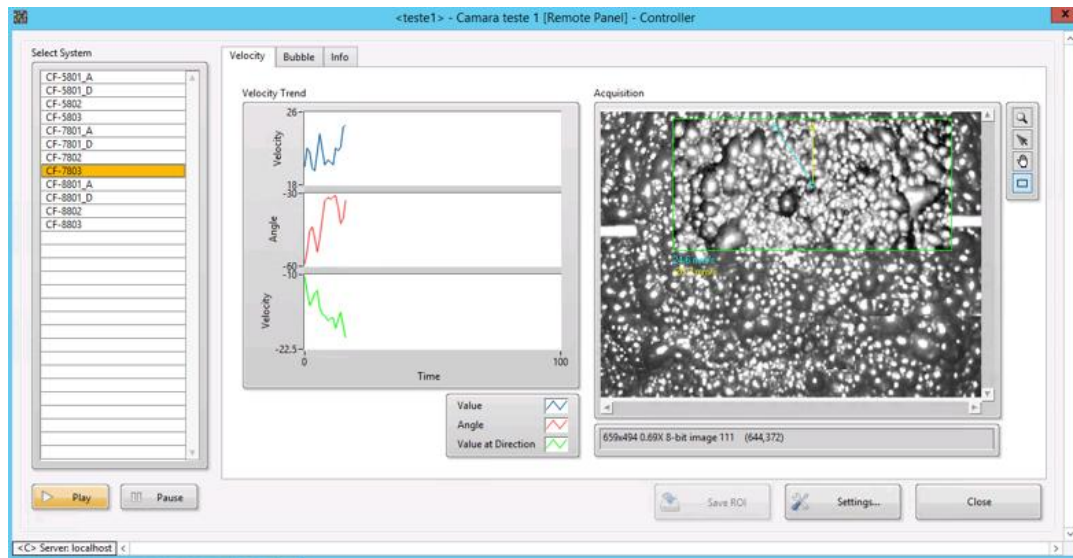


Figure 12.69 - “Vbolhas” software for image analysis of the froth surface.

For applications in Plants 1 and 2, it is important to understand two operational factors that influence froth structure and its effect on metallurgical performance: froth height and air flow rate, as these factors affect froth structure and its effect on metallurgical performance. In these plants, increasing froth height favors increased drainage and can reduce the %SiO₂ in the floated froth, while optimizing air flow rate provides froth stability and reduces the entrainment of fines %Fe particles in the overflow.

12.4.2 Flotation Performance Monitoring

The mineral processing industry has developed data-based models, improvements to existing models, and statistical data analysis techniques related to monitoring process performance, however, their applications are isolated and are not part of a unified methodology. Monitoring this performance not only allows for the identification of failure conditions in the process, but it also indicates opportunities for improvement.

During a flotation operation, the control room operator continuously evaluates the plant's operating conditions and then decides which process variables should be adjusted (and by how much), so as to maximize results along the trajectory, which comprises a sequence of operational adjustment decisions (Wang et al., 2022).

Due to the complexity of this set of variables that influence flotation performance, even when applying process control and optimization tools, structured monitoring is needed in order to identify deviations and provide feedback to the control systems. Therefore, this process should include tools providing a more efficient operational adjustment of flotation, starting with the measurement of recommended requirements of variables for process control, in addition to considering image properties, step tests of process variables, design of experiment, stability analysis, statistical analysis, among others, which also assist in decision making and can be integrated with process controllers.

Stability Index and Standard Variables for Flotation Process Control

In order to enable flotation monitoring, it is necessary to measure and monitor operating conditions. In this sense, from the process control perspective, the first step is to define a **Standard for Process Control Variables**, the purpose of which is to establish a list of variables as a control requirement based on the standards of control strategies and monitoring of effects, whether controlled or observed, in flotation. In principle, process control variables can be classified according to the requirement. The list of standard variables illustrating a practical case of iron ore flotation plants are arranged as shown in Table 12.19.

- Recommended requirement: a process variable recommended as a basic requirement for the unit stage process control standard. Example: flow rate and feed density, cell level, pH and froth velocity;
- Desired requirement: a desired process variable, or non-basic requirement, for the process control standard of the unit stage. Example: online content and particle size analyzer in feed.

Table 12.19 - Process standard variables for flotation

#	Group Variable	Recommended	Desired
1	Feed	Tank level, Pulp flow, Pulp density, %+0.15 mm (Lab), %-0.045 mm (Lab), %-0.010 mm (Lab), %Fe (Lab), %SiO ₂ (Lab), %MgO (Lab), Circulating Load (Tank level, Pulp flow, Pulp density, %Fe (Lab))	%+0.15mm SiO ₂ (Lab), %Mn (Lab), %Al ₂ O ₃ (Lab), %P (Lab), %CaO (Lab)
2	Circuit	pH, Collector - Specific dosage, Depressant - Specific dosage, Froth depth or pulp interface, Air flow rate	Collector - Specific dosage Staged, Depressant - Specific dosage Staged, Froth height above lip
3	Tailings / Concentrate	Tailings (%Fe (Lab), %SiO ₂ (Lab)) Concentrate (%Fe (Lab), %SiO ₂ (Lab))	
4	Online Analyser	Particle Size (Feed)	Slurry Stream composition (Feed, Tailings, Concentrate, Circulate Loading)
5	Froth Phase	Autocorrelation (Stability), Froth Velocity, Bubble (mean)	Colour, Bubble (count, Stddev, Distribution), Bubble Shape Mean (CompactnessFactor, ConvexHullArea, ElongationFactor, EquivalentEllipseMajorAxis, HeywoodCircularityFactor, HydraulicRadius, WaddelDiskDiameter)
6	Pulp phase		Bubble surface area flux (Sb), Superficial gas velocity (Jg), Bubble size, Bubble Distribution

Note: Lab = Laboratory analysis.

Once the standard is defined, it can be compared to the existing scenario of a plant for evaluation purposes. The standard of variables for flotation process control can be measured according to Equation 1, where: PS = process standard, i = process variable, n = nth process variable, x = existing process variable, y = necessary process variable.

$$\%PS = \frac{\sum_{i=0}^n x(i)}{\sum_{i=0}^n y(i)} \quad (1)$$

The use of tools for continuous monitoring of the performance of existing process standard variables can result in actions to establish variability limits and greater process efficiency. According to Sánchez-Fernández et al. (2018), Statistical Process Control (SPC) is used to detect any abnormal behavior of variables during monitoring. This tool allows for the online detection of abnormalities in the process, using graphical tools such as statistical control charts, with recorded limits that must not be exceeded under normal operating conditions. Since this is a tool available in the Plant Information Management System (PIMS) in the plants covered by this paper, it allows for the structuring of this monitoring effort.

The specification limits of the control chart for process variables of the plants are defined according to engineering requirements and operational procedures. During the monitoring

effort, if limits are frequently breached, there are actions that can be adopted to reestablish normal conditions (Yang et al., 2022). Therefore, in order to measure this normal condition, the **Process Stability Index** was used, the purpose of which is to monitor the stability index of the process variables as a function of the percentage of time in which the process variables operate within the desired specification limits, as seen in Figure 12.70.

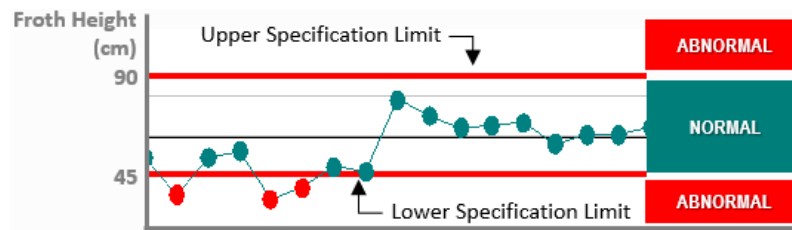


Figure 12.70 - Control chart for process variable stability index for froth height.

The stability index of variables for process control during flotation can be measured according to Equation 2, where: %SI = process stability index, i = process variable, n = nth process variable, h_N = hours in normal conditions, within the established specification limits, h_O = hours in operating condition for evaluation, i.e. operating circuit.

$$\%SI = \frac{\sum_{i=0}^n h_{N(i)}}{\sum_{i=0}^n h_{O(i)}} \quad (2)$$

Measuring the stability index allows us to reduce flotation variability and contribute to the circuit's stability and recovery controllers. The instrumentation gaps identified in the standard, in turn, lead to opportunities for improvements that impact process control and can be addressed in a plan to adapt the plant's instrumentation.

Due to the high number of variables, it is important to structure teams and further develop monitoring tools, for instance, using treemaps for visual identification in control rooms and/or integrated control centers. When identifying an abnormal condition, flows with pre-established roles and responsibilities may be employed to normalize the deviation, which can have different causes, such as feed characteristics, faulty meters, problems with control loop tuning, inadequate setpoints, sticking valves, among others. Table 12.20 illustrates the performance of the stability index and standard process for the two flotation plants discussed in this work,

evaluating only the operational variables, i.e. excluding variables from the pulp and froth phase group.

Table 12.20 - Stability Index and Standard Process values for iron ore flotation plants

#	Group Variable	Type of Requirement	Plant 1 - Tank Cell			Plant 2 - Mechanical Cell		
			Necessary items	Existing items	% Process Standard	Necessary items	Existing items	% Process Standard
1	Feed	Recommended	27	27	100%	24	24	100%
		Desired	12	12	100%	8	8	100%
2	Circuit	Recommended	79	52	66%	62	54	87%
		Desired	6	0	0%	46	44	96%
3	Tailings / Concentrate	Recommended	9	9	100%	6	6	100%
		Desired	6	6	100%	4	4	100%
4	Online Analyzer	Recommended	3	3	100%	2	1	50%
		Desired	12	0	0%	16	0	0%
%Stability Index			77.7%			82.1%		

By comparing the variables of the recommended requirements for the two plants, one may notice that Plant 1 has a greater gap in the process standard variables (%PS) for the circuit group compared to Plant 2. This difference results from the absence of air flow meters in a large part of the circuit. One may also note the low score for online analyzers in both plants for the desired requirements. The stability index (%SI), in turn, is nearly 80% in both plants, indicating that there are opportunities to list actions to maintain process variables within the specified limit range and to contribute to minimizing process variability.

Design of Experiment and Evaluation of Step Test for System Identification in Flotation Control

The purpose of system identification is to build mathematical models of dynamic processes based on experimental data observed in the plant, where the relationships between process inputs and outputs are of interest, and not the internal mechanisms (Campos and Teixeira, 2010). For easier understanding and in order to provide control actions based on the effect of some important process variables, it is common practice to carry out experiments, both on a laboratory and an industrial scale. According to Montgomery (2009), an experiment can be defined as a test or series of tests of purposeful changes made to the input variables of a process or system, with the purpose of observing and identifying how the responses of said system are

affected by changes caused to these variables. This prior knowledge also contributes to decision-making based on the monitoring of flotation performance.

In order to model a virtual sensor and define the structure of advanced controls in flotation, one should evaluate the behavior of the process by carrying out a step test plan and design of experiments, both on the bench and industrially. These tests aim to understand the gains provided by changes in process variables in terms of recovery, quality and effect on other variables studied, such as image properties. While the purpose of the step tests is to change just one process parameter, at least two variables can be altered simultaneously in the design of experiment.

In this paper, the purpose of the industrial **Step Test** is to obtain data from the flotation process to evaluate the effect and correlations of bubble properties, and their relationships with tailing and concentrate quality analysis by manipulating air flow rate and froth height. The results generate information that will be used for soft sensor modeling and advanced control to be developed to manipulate air flow rate and froth height setpoints. Tests must consider planned changes in steps at certain setpoints and actuator levels during flotation. These step tests should last longer, around the rougher residence time. When carrying out the tests, it is important to consider whether the circuit is stable and whether any changes were made to other process parameters that could compromise the analysis, such as changes in setpoints in the feed rate, density, specific dosage of the depressor and collector.

Design of Experiments (DOE) consists of techniques used to plan experiments capable of generating appropriate data for a statistical analysis, resulting in valid conclusions, with the purpose of building prediction models for the responses of interest, at each different combination of levels of the factors (Montgomery, 2009). When planning a DOE using factor levels with current data from a process, the results of the response variables are expected to be reliable and representative in a practical sense, making it suitable for process optimization. To prepare the industrial experiment planning, the process variables and range of setpoint changes will be defined, as well as the time interval for collecting data and laboratory samples. The information from these process relationships will be measured and used in models and for decision making purposes in the process control. Figure 12.71 represents the cycle of this steady

state step test, in which the duration of each test varies depending on the residence time. Three types of tests are recommended to evaluate dynamic behavior and its effects on flotation.

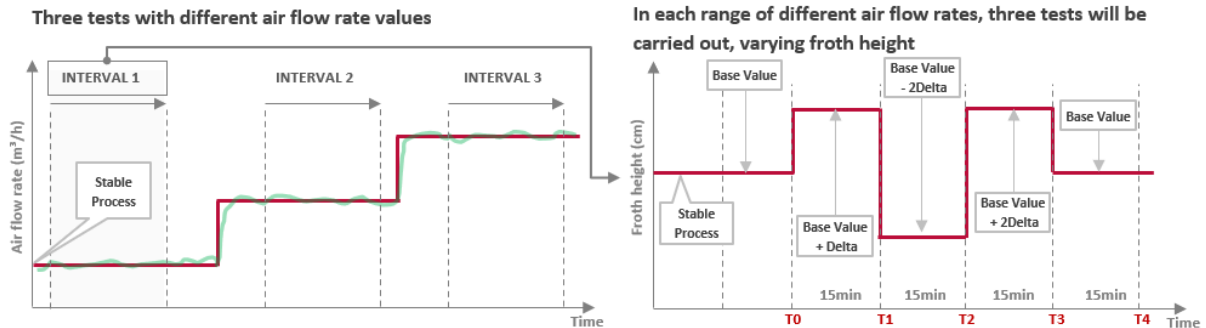


Figure 12.71 - Steady-state step test cycles for sample collection and/or analysis.

Test 1: Froth property response test (air flow rate and froth height) with the purpose of evaluating the dynamics of the stage's froth height and air flow rate on froth properties (velocity and size).

Test 2: Correlation test between velocity/size of bubbles and quality analysis (tailings and concentrate) with the purpose of evaluating the composition of the flotation froth with changes in air flow rate and froth height setpoints. The tests will have planned step changes in the air flow rate and froth height setpoints of the flotation cells. The steps will be synchronized with sampling of floated material, tailings and feed for chemical analysis, particle size, volume and mass of the sample. The tests should be repeated to assess reproducibility and to minimize the effects of any disturbances.

Test 3: Design of Experiment Test adopting a Central Composite Design (CCD), defining an experimental matrix with the froth height and air flow rate setpoints of the flotation cells as inputs, and the mass pull as the output, along with an investigation of the effect on the velocity and size of bubbles. The steps will also be synchronized with the sampling of floated material, tailings and feed for chemical analysis, particle size, volume and analysis of the mass of the wet and dry base sample. This test is initially recommended in the rougher stage, considering mass pull and minimizing %Fe in the scavenger, and in the recleaner stage, in order to meet quality requirements to keep %SiO₂ below the specified upper limit. An example of CCD is illustrated in Table 12.21, which considers axial and central points in the design.

Table 12.21 - Example of experimental matrix of the CCD design to be carried out in the plant

Test Number	Parameters	
	Froth height (mm)	Air flow rate (m ³ /h)
1	60.0	550
2	75.0	550
3	60.0	650
4	75.0	650
5	56.9	600
6	78.1	600
7	67.5	529
8	67.5	670
9	67.5	600

Multivariate Statistical Analysis

The historical storage of operational data makes it possible to carry out analyses for process modeling and monitoring, using some multivariate statistical analysis techniques (Sánchez-Fernández et al., 2018). These techniques extract information about how various process variables behave in relation to each other while simultaneously compressing the data, reducing their dimensionality in order to retain essential information. Therefore, statistical techniques can be applied to these data to reveal the influence of the main process variables, which is a challenge due to the high number of available variables that can impact flotation (Cruz et al., 2018).

Among some of the multivariate analysis methods available for this purpose, factor analysis (FA) is often used due to its ability to directly obtain the number of the common component in a complex sample (Wang et al., 2023). This technique is applied to better understand the process, which seeks to, through groupings of correlated variables, reduce sets of multivariate data in some factors that are appropriate to represent these explored variables (Ouchchen et al., 2022). Factors are meant to summarize information from correlated variables into a set of smaller dimensions with only a slight loss of information. The technique consists of checking the correlation between variables, analyzing the suitability of the data and sample (KMO Test (Kaiser-Meyer-Olkin) and MSA (Measure of Sampling Adequacy), applying the information extraction method (maximum likelihood, main components or main factors), selecting factors that summarize the variability of the database (Kaiser, Scree-plot) obtaining factor loading tables, carrying out orthogonal rotations to support data visualization, commonality analysis, interpretation of the solution and estimation of scores and groups of constructs and variables

(Hair et al., 2010). The flowchart in Figure 12.72 illustrates the methodology applied for multivariate statistical analysis.



Figure 12.72 - Flowchart for evaluating and applying multivariate statistical analysis.

A practical case of factor analysis was applied to a flotation line of Plant 1 considering a database comprising 1,101 samples representing the hourly mean in each. This database was reduced to 965 samples by adopting the Mahalanobis Distance technique to exclude outliers. The study considered 36 variables attributed to the operating conditions of the feed, circulating load, rougher, cleaner, recleaner stages, image properties, reagents, as well as chemical and particle size analyses. The *RStudio* software was used to carry out the factor analysis. As a result, factor loads were obtained representing the relationship of each variable with their respective factors, as shown in Table 12.22, which is a method that minimizes the number of variables, adopting a cut-off of 0.25.

Table 12.22 - Estimated factor loads for each factor

Variables	Factors										
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
SiO ₂ .CO	0,29				0,28				0,41		
Fe.CirculatingLoad					-0,77						
+0.15.mm.feed			-0,59								-0,43
-0,045.mm.feed					-0,29						0,52
Fe.feed			0,91								
SiO ₂ .feed			-0,91								
MgO.feed			-0,49				0,37				
pH.CF01								-0,66		0,28	
Density.feed							-0,77				
Amine	-0,32	0,30									-0,63
Starch		-0,30	0,26					-0,50		0,38	
FrothHeight.Rgh.I_CF01		-0,79									-0,28
FrothHeight.Rgh.II_CF02		-0,91									
FrothHeight.Cln.I_CF07		-0,63						-0,52			
FrothHeight.Cln.II_CF08		-0,71									0,26
FrothHeight.Rcln_CF13		-0,78									0,34
AirFlow.Rgh.I_CF01						0,30				-0,76	
AirFlow.Rgh.II_CF02			-0,28	0,75							
AirFlow.Cln.I_CF07				0,70				-0,40			
AirFlow.Cln.II_CF08				0,25		-0,72				0,31	
AirFlow.Rcln_CF13				-0,76				-0,34			
CF01_velocity	-0,39	0,29				0,66					
CF02_velocity					-0,60						
CF07_velocity								-0,82			
CF08_velocity					0,45	-0,62		-0,31			

CF13_velocity		0,29	0,29		0,52	-0,32		
CF01_bubble_mean	-0,51			-0,35			0,50	0,29
CF02_bubble_mean	-0,84							
CF07_bubble_mean	-0,79						0,28	
CF08_bubble_mean	-0,84							
CF13_bubble_mean	-0,72							0,26
CF01_autocorrelation	0,59			-0,34	-0,34			
CF02_autocorrelation	0,80							
CF07_autocorrelation	0,59							-0,51
CF08_autocorrelation					0,42			-0,64
CF13_autocorrelation								-0,84

In this result, the SiO₂ grade in the concentrate was observed in factors 1, 5 and 9, indicating that its variability is influenced in the factor 1 by amine, bubble velocity (CF1), bubble size (CF1/2/7/8/13) and autocorrelation (CF1/2/7). In factor 5 there is the influence of %Fe circulating load, %-0,045mm feed, bubble velocity (CF2/8/13) and autocorrelation CF1. For factor 9, it is verified with autocorrelation (CF7/8/13). It is important to highlight that high loads were obtained for circulating load, bubble size and autocorrelation.

In the Boxplot of Figure 12.73-a Figure 12.73-b, the variability of the distribution of the variables autocorrelation and bubble size, respectively, is verified using the same database as the factor analysis. The data set was divided according to the %SiO₂ response in the concentrate into three clusters: Low (%SiO₂<1.10), Moderate (1.10 <= %SiO₂<=1.75) and High (%SiO₂> 1.75). For both, the greater the distribution, the lower the percentage of %SiO₂ in the concentrate, favoring the specification of the product.

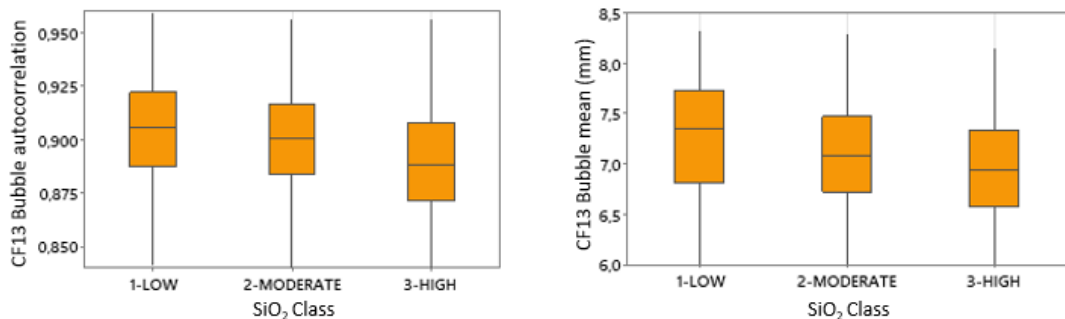


Figure 12.73 - (a) Boxplot Bubble Autocorrelation (b) Boxplot Bubble Mean.

12.4.3 Process Control Applied to Flotation

In general, the term Process Control is used for systems in an industrial plant meant to maintain certain process variables within their desired operational limits, with the closed-loop or feedback control system being more often applied, which uses a controller that continuously compares the error of the desired value (setpoint - SP) with the measured value (Process variable – PV), manipulating the output (manipulated variable - MV) to eliminate the error by offsetting external disturbances (manipulated variables – MV) and any non-linearities of the system. The closed-loop controller most often used in the industry is the Proportional-Integral-Derivative (PID), configured in Programmable Logic Controllers (Campos et al., 2013; Skogestad, 2023).

The control applied to mineral processing cannot be carried out without a minimum quantity of information on process variables, disturbances and final product quality (Hodouin et al., 2001). Therefore, for the better performance of the flotation process control pillar, it is essential to understand, measure and monitor the plant's operating conditions.

The proposed process control structure based on the architecture of Shao, et. al (2019), as seen in Figure 12.74, connects known techniques that influence the Advanced Process Control and Optimization system (APC-O), supported by regulatory control, in addition to machine learning and simulation. In this paper, knowledge on the mineral process and process control techniques, originating from practical experience, benchmarking and literature references, are fundamental to conceive typical control strategy standards.

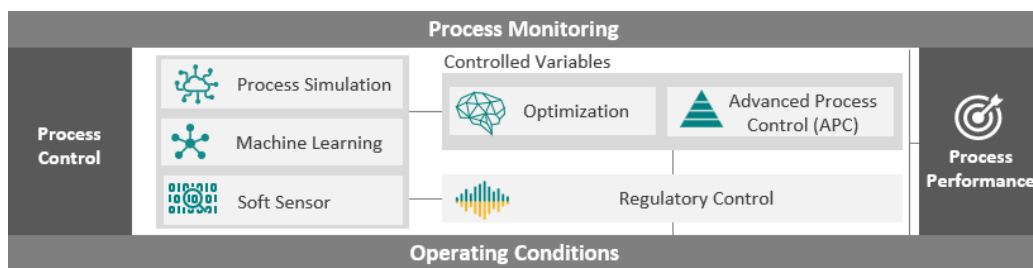


Figure 12.74 - Process control applied to Flotation. (Adapted from Shao et. al (2019)).

Typical Regulatory Control Standards

Regulatory control occurs in a closed loop and is characterized by presenting a fixed desired operating point (setpoint) adjusted by the operator. However, these controls can also be coupled

in more complex strategies, referred to as Advanced Regulatory Control (ARC), such as, for example, cascade, ratio, override and feedforward controls, among others (Campos et al, 2013; Skogestad, 2023). During the development of any control system and process optimization project, the following factors must be considered: control objectives, control hierarchy, control structure and optimal selection of controlled variables (Gonzalez, 2018; Skogestad, 2004).

In flotation, most controllers have a stability function, while others act in quality control and recovery, in general, manipulating the specific reagent dosage. In practice, regulatory control strategies do not consider the use of image properties in their structure. Figure 12.75 below illustrates some typical regulatory control structures applied to the iron ore flotation subject of this study, representing some strategies in the feed tank and in the rougher and cleaner stages, as described below (Skogestad, 2023).

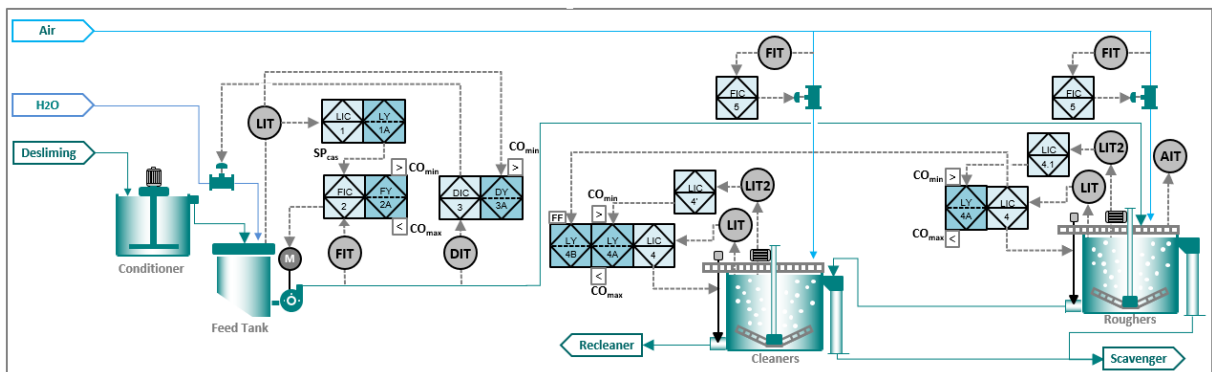


Figure 12.75 - Typical control structure in flotation with circulating load feeding the rougher stage.

- LIC1: Tank level control loop (%) acting as master loop in the level/flow cascade control strategy. This control is responsible for defining the flow demand in the pulp pump;
- FIC2: Volumetric flow control loop (m^3/h) acting on the velocity of the pulp pump. It is configured as a slave loop of the cascading structure with the level;
- DIC3: Density control loop (t/m^3) acting on the water addition control valve. An override strategy is also configured for low level conditions;
- LIC4: pulp level control loop (%) acting on the control valve at the tank cell outlet. (4.1) Froth level control loop (%) in override (4A) with pulp level control, aiming to avoid a bypass condition (lack of froth height above the lip). (4B) A feedforward strategy can be adopted, compensating in advance for variations in the pulp level of the previous cell, which aims to reduce disturbances in level control;

- FIC5: Volumetric air flow control loop (m^3/h) acting on the aeration control valve.

In flotation, control strategies may vary depending on circuit configuration, available instrumentation and process control knowledge. The greater the adherence to the standard of process control variables (%PS), the greater the probability of developing more elaborate strategies. Likewise, the higher the stability index (%SI), the greater the possibility of reducing process variability, which provides better results.

Modeling for Soft Sensor Applied to Process Control

Modeling for flotation control purposes is a difficult task, since most models developed have physical parameters that cannot be adequately measured or even estimated online. Furthermore, the complexity of flotation is due to its stochastic behavior as well as the lack of reliable instrumentation and analyzers. This makes it difficult to develop simple models for control purposes that can be calibrated both industrially (Casali et al., 2002; Maldonado et al., 2007; Putz and Cipriano, 2015) and on a laboratory scale (Shean et al., 2018, 2017).

Machine learning for soft sensors

According to Faceli et al., (2021), in order to carry out the modeling of a certain process, it is necessary to analyze and understand the variables that will be associated with its objective. A type of modeling applied to the reverse cationic flotation of iron ore is the use of soft sensors to infer contents for the purpose of process control and real-time optimization, such as %SiO₂ in the concentrate stream and %Fe in the tailings. The types of dynamic models available for such flotation modeling can be classified as phenomenological, empirical, and hybrid (Quintanilla et al., 2021). To develop empirical models, one possible option is to use Machine Learning (ML) resources, defined as the development and application of mathematical and statistical models based on the use of data, rather than domain knowledge. An ML model typically has a non-parametric structure, as the number of model parameters is not defined based on domain knowledge (McCoy and Auret, 2019).

Among the available ML techniques, the Artificial Neural Network (ANN) is widely used, being a non-linear computing technique consisting of a large number of interconnected processing units referred to neurons, which simulate the learning of the human brain, being the type most often used with direct multilayer feed. This type of NN builds a global function approximation and, even though its response has been shown to be better than conventional

methods, there is still a need for additional improvements in its performance or generalization capacity (Nakhaei et al., 2019). Knowledge is represented and stored by the weights of connections between neurons, which, if properly trained, can make good predictions (Popli, 2017).

In general, many practical applications for soft sensors in flotation circuits use only operational variables as inputs to the ANN (Ai et al., 2021). During the development of these predictions, extensive databases are consulted in an attempt to understand the behavior and select appropriate data processing techniques to interpret the results obtained, resorting to mass balance studies, data characterization and statistical techniques. As an example, for plant 2, a hybrid model was used, where the empirical part comprises historical data, test data sets (step tests and design of experiment), operational conditions and mass balance studies, combined with phenomenological models (Manoel et al. 2015).

Another alternative with few application cases is to use ANN in soft sensor modeling for %SiO₂ in concentrate, combining process variables with image properties. Thus, an ANN case was developed on an exploratory basis in Plant 1 using *Python*. In this ANN, the same database as the Factor Analysis was used, adopting the 10 most influential variables as criteria for selecting the inputs of the neural network according to Multivariate Statistical Analysis. The ANN input variables were: Feed (+0.15mmfeed, SiO₂.feed), Circuit (Amine), Froth phase (Bubble (Mean (CF7/8/13), Froth velocity (CF8/13), Bubble_Autocorrelation (CF13) and Bubble_ElongationFactorMean)). As a result, the %SiO₂_soft sensor response was obtained, compared to the laboratory %SiO₂ as shown in Figure 12.76, with a mean square error (MSE) of 0.512.

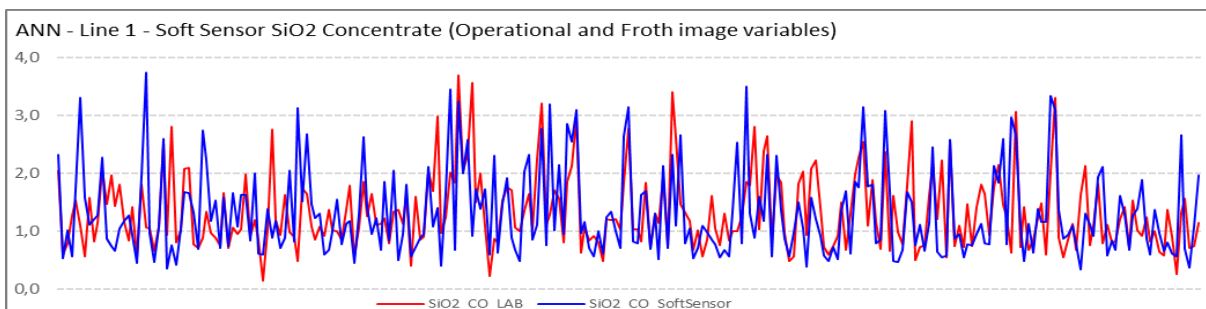


Figure 12.76 - Concentrate %SiO₂ soft sensor using operational variables and image properties as input in the ANN.

Advanced Process Control and Optimization

In flotation, while the pulp phase is represented by kinetics, the froth phase is dominated by processes such as burst rate and bubble coalescence, which are not fully represented by kinetic models (Quintanilla et al., 2021). Likewise, there is also a challenge of developing appropriate models for the froth phase that can be used as part of advanced control strategies. Although image analysis techniques have plenty of advantages, the measurement of some characteristics in the froth phase has not yet been implemented (Fu and Aldrich, 2019). Therefore, the use of dynamic flotation models that are reliable and suitable for control purposes also represents a gap. One option is the implementation of specialist systems, which have human experience as a reference, the main idea of this type of controller being to make appropriate decisions and control the process by imitating the thinking of experts (Jovanović and Miljanović, 2015).

An alternative to improve flotation performance is the implementation of Advanced Process Control and Optimization systems with the purpose of maximizing grade and recovery (Shean and Cilliers, 2011). These controllers must be usable in a closed-loop solution, using a limited number of observations, and be robust enough to minimize the effect of online disturbances (Aldrich et al., 2010).

Advanced Process Control (APC) solutions in flotation usually encompass two types of controllers, **Stability Controller** and **Quality and Recovery Controller**. These solutions aim to reduce variability and identify optimal operating points in the circuit, without violating process restrictions. Advanced controls can consider operational variables, image analysis properties and process monitoring in their structure, as represented in Figure 12.77. This information can be used in the development, operation, diagnosis or maintenance of applications, with the purpose of generating setpoints for the regulatory control layer. Controllers based on image analysis on the froth surface can monitor variables such as number of bubbles, bubble size, bubble shape, density, froth velocity on the surface and stability (Fu and Aldrich, 2019). These variables can indicate changes in froth appearance, detect abnormal conditions and be used in controllers (Aldrich et al., 2010; Quintanilla et al., 2021).

Although APC application techniques based on systems with fuzzy logic and model predictive control (MPC) have been predominant, several researchers are focusing on machine learning techniques in a complementary manner (Gopaluni et al., 2020).

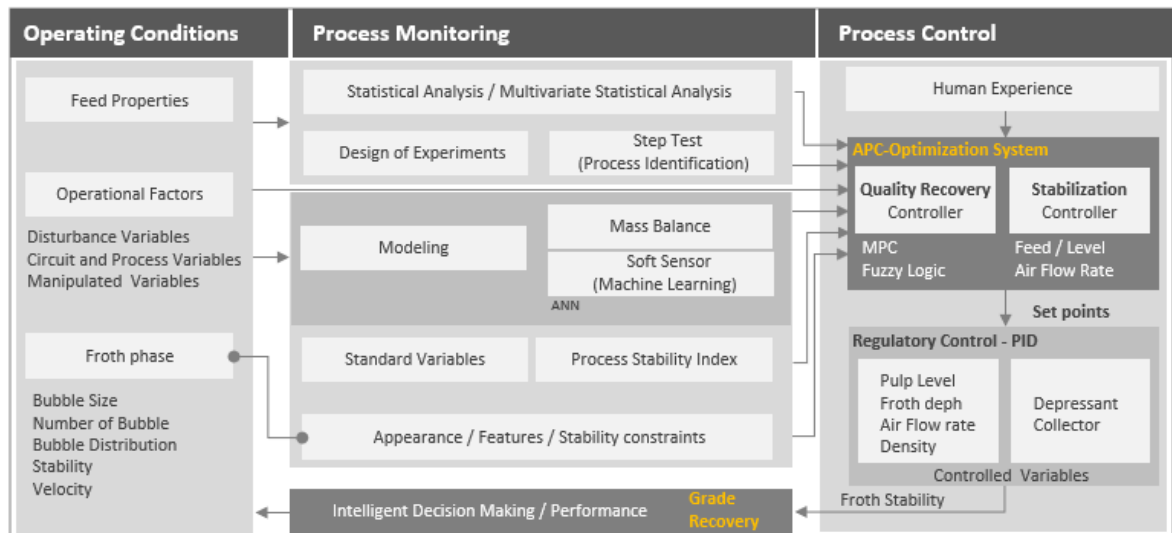


Figure 12.77 - Advanced Process Control and Optimization in Flotation.

Controls using **Fuzzy Logic** (FL) seek to evaluate a system based on knowledge acquired through human experience and for the elaboration of rules. The controller structure comprises three stages: fuzzification, where pertinence functions compatible with each input variable measured in the plant are defined; fuzzy logic inference, to construct the rules that generate the controller's action in the fuzzy domain; and finally, defuzzification, which converts the fuzzy output into values for control. FL applications aim to improve the robustness of expert control systems in dealing with uncertainties and errors (Costa et al., 2018; Nunes and Soares, 2021). It is also possible to use fuzzy logic in the development of flotation control using empirical data and froth images, making it possible to evaluate the system's behavior depending on discrete operational conditions (Jahedsaravani et al., 2016).

To deal with the complex dynamics of the flotation process, **Model Predictive Control** (MPC) can be used. This controller is ideal for implementation in multivariable processes, such as froth flotation, where several process constraints must be taken into account (Bergh and Yianatos, 2011; Brooks et al., 2019). The MPC controller includes control objectives, adjustment parameters, variables and restrictions in its logical structure. Figure 12.78 illustrates the structure of this type of controller with inputs, outputs, control and mechanism (Shao et al.,

2019). The most important part of MPC strategies is the development of the models themselves, which must describe non-linear processes, such as flotation, with a certain level of precision. This modeling is a difficult task, since the behavior of variables is affected by the complex dynamics caused by the interaction between phenomena in both pulp and froth phases (Neethling and Brito-Parada, 2018).

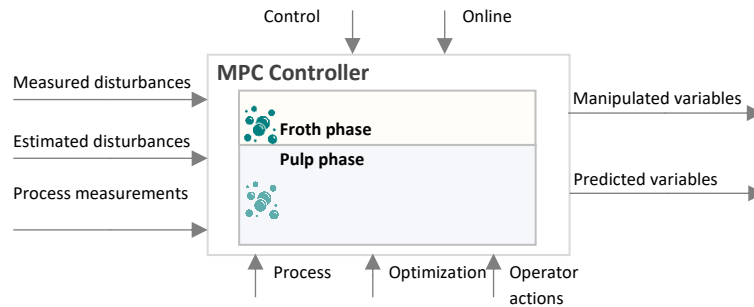


Figure 12.78 - Structure of the MPC controller. (Adapted from Shao et al. (2019)).

In Plant 2, discussed in this paper, an MPC for Quality Control and Recovery (QCR) was implemented, in which appropriate non-linear modeling and virtual sensors were used to make the MPC effective and robust for a wide range of conditions using the Pavilion software by Rockwell Automation (Morales et al., 2015). Pavilion has a set of tools available based on neural networks, in which non-linear control is obtained by superimposing these neural network models to identify the gains in the QCR model matrix. This allows the controller to continuously calculate reagent dosage setpoints that reconcile product quality and recovery objectives in the response to disturbances in feed content and particle size, and variations in the froth height. This application can adapt to several process regimes and favors high usage in the enabled mode, generating value and little maintenance. In Figure 12.79, the action of the QCR is observed manipulating the specific dosage of the amine to control the %SiO₂ in the concentrate, using the upper limit of 1.10% as a reference.

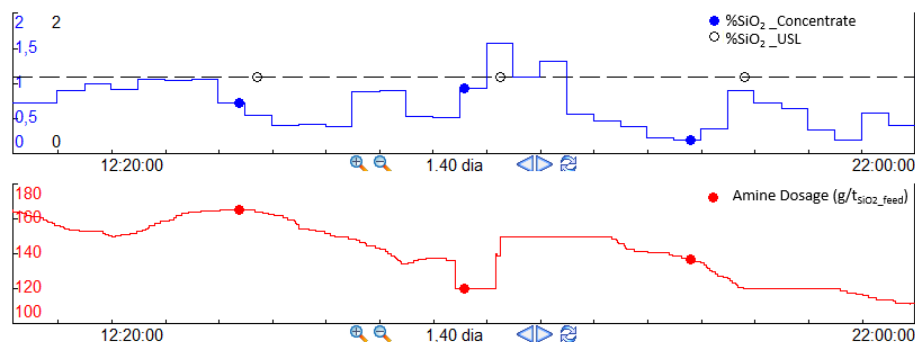


Figure 12.79 - Specific dosage of amine and %SiO₂ in the concentrate in Quality Control and Recovery in Plant 2.

12.5 Conclusions

Though there have been significant advancements in recent years involving machine vision, monitoring and control capabilities to improve flotation performance, established techniques do not yet fully satisfy the process control aspects. To that end, this paper proposed the development of a methodology for integrating information from already known techniques to improve flotation performance, considering three pillars: operational conditions in the plant, performance monitoring and process control. This method allows us to better explore the resources for process control that already exist in the plants, in addition to identifying gaps that can lead to an initiative roadmap based on references. Some of these methods have been illustrated with practical cases of both plants in which iron ore flotation is carried out.

The first pillar is to evaluate the operational conditions of the plant by measuring and understanding the role of variables in terms of process control, allowing for a critical analysis of the set of operational staff with knowledge of the mineral process and of process control. Since process variables can affect froth characteristics, image properties were also taken into consideration, as they create new control opportunities.

The monitoring pillar, in turn, must be applied both to operational conditions and to process control. The first step is to check the variables to then adapt to the requirements of the process standard, in an attempt to structure initiatives for flotation control. It was found that, compared to Plant 2, Plant 1 presents a larger gap in the standard for the circuit group due to the absence of a large portion of the air flow meters. As for the existing variables, they allow for a monitoring of the process stability index. Both plants scored at around 80% in this index, which indicates that there are opportunities to list improvement actions. Other important monitoring techniques are related to industrial experiments and multivariate statistical analysis, which attempt to generate information for control purposes based on the effect on performance and the grouping of some important and correlated process variables. In the case of the use of factor analysis in Plant 1, it was found that the variability of %SiO₂ is caused by both process variables and froth properties. It is essential to use online tools with a dedicated and trained staff, as they provide support to anticipate decision-making based on effective process monitoring.

Finally, in the process control pillar, the selection of strategies using best practices based on typical advanced regulatory control leads to greater interaction of control loops to reduce variability. Though they are very efficient, these PID-based controllers are not adequate to control flotation quality and recovery. Furthermore, machine learning and simulation techniques can be explored since they generate more information for advanced process control and optimization (APC-O) systems. On an exploratory basis, a case of a soft sensor using a neural network at Plant 1 using factor analysis variables is shown to be promising by considering process variables and image properties as inputs. These APC-O systems have the purpose of adopting stability controllers and quality and recovery controllers. For the latter, fuzzy logic-based controllers and MPC are often used. For Plant 2, a case was illustrated in which the amine dosage was manipulated assertively using MPC.

In general, the methodology applied to this paper for practical applications of flotation control shows that it is possible to explore already known techniques, with this being a relevant academic contribution. The cases in this paper indicate that adopting process variables and flotation froth properties can provide a better operational performance and result in economic benefits by structuring and applying relevant tools and techniques to process monitoring, control and optimization. In order for the applications to be successful, the operating staff must have competence and resources for deployment, sustainability, and continuous improvement. Despite the limitations to this research due to the general scope, there are still alternatives for improvements and additional research, considering the many existing approaches.

12.6 Acknowledgments

The authors would like to thank Vale S.A., UFMG (Federal University of Minas Gerais), CAPEX-PROEX, FAPEMIG and CNPq (Brazilian Technological and Scientific Development Council) for their support in the development of this research. This study was financed in part by CAPES (Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel - Brazil) - Finance Code 001.

12.7 References

- Ai, M., Xie, Y., Tang, Z., Zhang, J., Gui, W., 2021. Deep learning feature-based setpoint generation and optimal control for flotation processes. *Inf. Sci. (Ny)*. 578, 644–658.
<https://doi.org/10.1016/j.ins.2021.07.060>
- Aldrich, C., Marais, C., Shean, B.J., Cilliers, J.J., 2010. Online monitoring and control of froth flotation systems with machine vision: A review. *Int. J. Miner. Process.* 96, 1–13.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2010.04.005>
- Bergh, L.G., Yianatos, J.B., 2011. The long way toward multivariate predictive control of flotation processes. *J. Process Control* 21, 226–234. <https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2010.11.001>
- Brooks, K., Westcott, M., Bauer, M., 2019. A Combined MPC for Milling and Flotation - A Simulation Study. *IFAC-PapersOnLine* 52, 24–29. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.09.158>
- Campos, M. C. M. M., Gomes, M. V. C. , Perez, J. M. G. T., 2013. *Advanced Control and Optimization in the Petroleum Industry*. (in Portuguese). 1ª ed. Interciência. Rio de Janeiro, Brasil, 510p.
- Campos, M. C. M. M., Teixeira, H. C. G., 2010. *Typical Controls for Industrial Equipment and Processes*. (in Portuguese). 2th Edition, Edgard Blücher. São Paulo, Brasil, 396p.
- Casali, A., Gonzalez, G., Agosto, H., Vallebuona, G., 2002. Dynamic simulator of a rougher flotation circuit for a copper sulphide ore. *Miner. Eng.* 15, 253–262.
- Costa, C. P., Caldas, F. N., Couto, P. H. M., Nunes, T. C., 2018. Fuzzy Expert System for Amine Dosage in the Iron Ore Beneficiation Process. (in Portuguese). 19º Simpósio de Mineração - ABM, 2018, São Paulo, Brasil.
- Cruz, D. G., Nogueira, F. C. , Rossi, D. Q., Pereira, T. M., Ferreira, R. F., 2018. Multivariate factor analysis applied to characterize contaminants in an iron ore deposit. (in Portuguese). *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração*, São Paulo, v. 15, n. 3, p. 1-6.
- Eney de Matos, V., Nogueira, S. da C.S., Silva, G., Kowalczyk, P.B., Peres, A.E.C., 2022. Differences in Etheramines Froth Properties and the Effects on Iron Ore Flotation. Part II: Three-Phase Systems. *Miner. Process. Extr. Metall. Rev.* 43, 243–250.
<https://doi.org/10.1080/08827508.2021.1888725>
- Faceli, K., Lorena, A. C., Gama, J., Almeida, T. A., Carvalho, A. C. P. L. F., 2022. *Artificial Intelligence: a machine learning approach*. (in Portuguese). 2ª. ed. - Rio de Janeiro: LTC, 304p.
- Fu, Y., Aldrich, C., 2019. Flotation froth image recognition with convolutional neural networks. *Miner. Eng.* 132, 183–190. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.12.011>
- Gonzalez, O. F. F., 2018. *Model Predictive Control of Froth Flotation Processes Aided by a dynamic simulator*. Ph.D. thesis, Universidad de Chile.
- Gopaluni, R.B., Tulsyan, A., Chachuat, B., Huang, B., Lee, J.M., Amjad, F., Damarla, S.K., Woo Kim, J., Lawrence, N.P., 2020. Modern machine learning tools for monitoring and control of industrial processes: A survey. *IFAC-PapersOnLine* 53, 218–229.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2020.12.126>

- Hair, J., Black, W., Babin, B., Anderson, R., 2010. *Multivariate data analysis*. New Jersey: Prentice Hall.
- Hodouin, D., 2011. Methods for automatic control, observation, and optimization in mineral processing plants. *J. Process Control* 21, 211–225.
<https://doi.org/10.1016/j.jprocont.2010.10.016>
- Hodouin, D., Jämsä-Jounela, S.L., Carvalho, M.T., Bergh, L., 2001. State of the art and challenges in mineral processing control. *Control Eng. Pract.* 9, 995–1005. [https://doi.org/10.1016/S0967-0661\(01\)00088-0](https://doi.org/10.1016/S0967-0661(01)00088-0)
- Horn, Z.C., 2018. Froth texture extraction with deep learning. Master thesis, Stellenbosch University
- Horn, Z.C., Haasbroek, A.L., Nienaber, E.C., Auret, L., Brooks, K.S., 2022. Comparison of online and offline pulp sensor metrics in an industrial setting. *IFAC-PapersOnLine*.
<https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.249>
- Hu, W., 2014. Flotation Circuit Optimisation and Design 1–150. Ph.D. thesis, Imperial College London.
- Jahedsaravani, A., Marhaban, M.H., Massinaei, M., Saripan, M.I., Noor, S.B.M., 2016. Froth-based modeling and control of a batch flotation process. *Int. J. Miner. Process.* 146, 90–96.
<https://doi.org/10.1016/j.minpro.2015.12.002>
- Jahedsaravani, A., Massinaei, M., Marhaban, M.H., 2017. Development of a machine vision system for real-time monitoring and control of batch flotation process. *Int. J. Miner. Process.* 167, 16–26. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2017.07.011>
- Jovanović, I., Miljanović, I., 2015. Contemporary advanced control techniques for flotation plants with mechanical flotation cells - A review. *Miner. Eng.* 70, 228–249.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.09.022>
- Leja, J. 1982. *Surface Chemistry of Froth Flotation*. New York: Plenum Press
- Lima, N.P., de Souza Pinto, T.C., Tavares, A.C., Sweet, J., 2016. The entrainment effect on the performance of iron ore reverse flotation. *Miner. Eng.* 96–97, 53–58.
<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2016.05.018>
- Maldonado, M., Desbiens, A., Del Villar, R., Quispe, R., 2007. Towards the optimization of flotation columns using predictive control. *IFAC Proc. Vol. (IFAC-PapersOnline)* 12, 75–80.
<https://doi.org/10.3182/20070821-3-CA-2919.00011>.
- McCoy, J.T., Auret, L., 2019. Machine learning applications in minerals processing: A review. *Miner. Eng.* 132, 95–109. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.12.004>
- Montgomery, D. C., 2009. *Design and Analysis of Experiments*. 7th. ed. New York: John Wiley & Sons.
- Morales, M., Nunes, T. C., Costa, C. P., Quintero, C., 2015. Optimal control of iron ore flotation with soft sensors for grade and recovery. *Procemin - 11^o Internacional Mineral Processing Conference*. Santiago, Chile. 2015.
- Morar, S., 2010. The use of machine vision to describe and evaluate froth phase behaviour and performance in mineral flotation systems. Ph.D. thesis, University of Cape Town
- Nakhaei, F., Irannajad, M., Mohammadnejad, S., 2019. Column flotation performance prediction: PCA, ANN and image analysis-based approaches. *Physicochem. Probl. Miner. Process.* 55, 1298–

1310. <https://doi.org/10.5277/ppmp19054>
- Neethling, S.J., Brito-Parada, P.R., 2018. Predicting flotation behaviour – The interaction between froth stability and performance. *Miner. Eng.* 120, 60–65. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.02.002>
- Nunes F. A. Q. P., Soares G. L., 2021. Fuzzy system to increase efficiency in plant flotation process in a mining plant. *Journal of Multidisciplinary Engineering Science and Technology (JMEST)*. Vol. 8 Issue 7, 14358-14366.
- Ouchchen, M., Boutaleb, S., Abia, E.H., El Azzab, D., Miftah, A., Dadi, B., Echogdali, F.Z., Mamouch, Y., Pradhan, B., Santosh, M., Abioui, M., 2022. Exploration targeting of copper deposits using staged factor analysis, geochemical mineralization prospectivity index, and fractal model (Western Anti-Atlas, Morocco). *Ore Geol. Rev.* 143, 104762. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104762>
- Popli, K., 2017. Real-time Process Monitoring for Froth Flotation Processes using Image Processing and Dynamic Fundamental Models 277. Ph.D. thesis, University of Alberta
- Putz, E., Cipriano, A., 2015. Hybrid model predictive control for flotation plants. *Miner.Eng.* 70, 26–35. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.08.013>.
- Quintanilla, P., Neethling, S.J., Brito-Parada, P.R., 2021. Modelling for froth flotation control: A review. *Miner. Eng.* 162, 106718. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106718>
- Sánchez-Fernández, A., Baldán, F.J., Sainz-Palmero, G.I., Benítez, J.M., Fuente, M.J., 2018. Fault detection based on time series modeling and multivariate statistical process control. *Chemom. Intell. Lab. Syst.* 182, 57–69. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2018.08.003>
- Shao, G., Latif, H., Martin-Villalba, C., Denno, P., 2019. Standards-based integration of advanced process control and optimization. *J. Ind. Inf. Integr.* 13, 1–12. <https://doi.org/10.1016/j.jii.2018.10.001>
- Shean, B., Hadler, K., Cilliers, J.J., 2017. A flotation control system to optimise performance using peak air recovery. *Chem. Eng. Res. Des.* 117, 57–65. <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2016.10.021>
- Shean, B., Hadler, K., Neethling, S., Cilliers, J.J., 2018. A dynamic model for level prediction in aerated tanks. *Miner. Eng.* 125, 140–149. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.05.030>
- Shean, B.J., Cilliers, J.J., 2011. A review of froth flotation control. *Int. J. Miner. Process.* 100, 57–71. <https://doi.org/10.1016/j.minpro.2011.05.002>
- Silva, K., Filippov, L.O., Piçarra, A., Filippova, I. V., Lima, N., Skliar, A., Faustino, L., Filho, L.L., 2021. New perspectives in iron ore flotation: Use of collector reagents without depressants in reverse cationic flotation of quartz. *Miner. Eng.* 170, 107004. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107004>
- Skogestad, S., 2023. Advanced control using decomposition and simple elements. *Annu. Rev. Control* 56, 100903. <https://doi.org/10.1016/j.arcontrol.2023.100903>
- Skogestad, S., 2004. Control structure design for complete chemical plants. *Comput. Chem. Eng.* 28, 219–234. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2003.08.002>

- Sun, B., Yang, W., He, M., Wang, X., 2021. An integrated multi-mode model of froth flotation cell based on fusion of flotation kinetics and froth image features. *Miner. Eng.* 172, 107169. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2021.107169>
- Uusi-hallila, S., 2014. Faculty of Technology Utilizing Froth Phase Behaviour and Machine Vision To Indicate Flotation 101.
- Wang, X., Jia, S., Deng, R., Xing, Q., Tian, Z., 2023. Factor analysis method for fluorescence excitation emission matrix. *Chem. Phys. Lett.* 811, 140237. <https://doi.org/10.1016/j.cplett.2022.140237>
- Wang, X., Zhou, J., Song, T., Liu, D., Wang, Q., 2022. FlotGAIL: An operational adjustment framework for flotation circuits using generative adversarial imitation learning. *Miner. Eng.* 183, 107598. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2022.107598>
- Yang, Y., Huang, Q., Li, P., 2022. Online prediction and correction control of static voltage stability index based on Broad Learning System. *Expert Syst. Appl.* 199, 117184. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2022.117184>
- Zarie, M., Jahedsaravani, A., Massinaei, M., 2020. Flotation froth image classification using convolutional neural networks. *Miner. Eng.* 155, 106443. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106443>

13. ANEXOS

Neste capítulo, estão alguns certificados de pesquisas publicadas em conferências nacionais, internacionais e revista relacionadas à esta tese:

- *Flotation '23 (South Africa) - “Performance Monitoring and Control of Iron Ore Flotation Integrating Operational Variables and Froth Image Analysis Properties”*;
- *ABM 2023 (Brasil) - “Predictability to Maximize Adhesion of Pellet Feed Split in Iron Ore Flotation”*;
- *Procemin 2024 (Chile) - “Iron Ore Flotation Monitoring Integrating Operational Variables and Froth Image Analysis”*;
- *ABM 2025 (Brasil) - “Virtual Assistant using Generative AI applied to Iron Ore Concentration”*;
- *Flotation '25 (South Africa) - “Virtual Assistant using Generative AI applied to Iron Ore Concentration”*;
- *Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração (TMMM), 2025 (Brasil) – “Virtual Assistant using Generative AI applied to Iron Ore Concentration” (Em revisão).*

CERTIFICATE

OF

CONTINUING PROFESSIONAL DEVELOPMENT

The CPD Certification Service
certifies that

Tiago Caixeta Nunes presented "*Performance Monitoring and
Control of Iron Ore Flotation Integrating Operational Variables
and Froth Image Analysis Properties*"

the above named has participated
in the following CPD activity

Flotation '23

Cape Town, South Africa, November 6-9, 2023

CPD Provider Organisation

MEI, UK

An initiative to increase standards of CPD
provision to professionals in relevant market
sectors

Date of CPD Activity: 6-9 November 2023

No. CPD Hours / Points: 32

CPD
CERTIFIED
The CPD Certification
Service

The Coach House, Ealing Green, London W5 5ER
Email: info@cpduk.co.uk Web: www.cpduk.co.uk
Tel: 020 8840 4383 Fax: 020 8579 3991



CERTIFICADO

A Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração - ABM certifica que

TIAGO CAIXETA NUNES

apresentou o trabalho PREVISIBILIDADE PARA MAXIMIZAR A ADERÊNCIA DO SPLIT DE PELLET FEED NA FLOTAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO durante o 23º Simpósio de Mineração evento parte da **ABM WEEK 8ª edição**, realizada entre os dias 03 e 05 de Setembro de 2024, em São Paulo, SP - Brasil.

São Paulo (SP), setembro de 2024.

Código do Certificado: 172426AFEB13A958970371 - Verifique autenticidade em: e-certificado.com



Procemin·GEOMET 2024

20th International Conference on Mineral Processing and Geometallurgy

Certificado de Asistencia

Este certificado es emitido para:

TIAGO CAIXETA NUNES

GH607359

Asistencia 100%

7 - 9 de agosto 2024 .Santiago, Chile

Duración: 36 Horas

Carlos A. Barahona

Director Académico

GECAMIN
Conferencias para la Minería

Nombre: Gestión de Capacitación en Minería

Contacto: facturacion@gecamin.com

Teléfono: +56 2 652 1500



CERTIFICADO

A Associação Brasileira de Metalurgia, Materiais e Mineração - ABM certifica que

TIAGO CAIXETA NUNES

apresentou o trabalho ASSISTENTE VIRTUAL UTILIZANDO IA GENERATIVA APLICADA à CONCENTRAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO durante o 24º Seminário de Mineração evento parte da **ABM WEEK 9ª edição**, realizada entre os dias 09 e 11 de Setembro de 2025, em São Paulo, SP - Brasil.

São Paulo (SP), setembro de 2025.



Código do Certificado: 208498AE03519408970371 - Verifique autenticidade em: e-certificado.com

CERTIFICATE

OF

CONTINUING PROFESSIONAL DEVELOPMENT

The CPD Certification Service
certifies that

Tiago Caixeta Nunes presented *"Virtual Assistant using
Generative AI applied to Iron Ore Concentration"*

the above named has participated
in the following CPD activity

Flotation '25

Cape Town, South Africa, November 17-20, 2025

CPD Provider Organisation

MEI, UK

An initiative to increase standards of CPD
provision to professionals in relevant market
sectors

Date of CPD Activity: **17-20 November**

No. CPD Hours / Points: **32**

CPD
CERTIFIED
The CPD Certification
Service

The Coach House, Ealing Green, London W5 5ER
Email: info@cpduk.co.uk Web: www.cpduk.co.uk
Tel: 020 8840 4383 Fax: 020 8579 3991

Código do Artigo: **TM3337**

Responsável: Tiago Nunes

Área: TM - Tecnologia Mineral

Assistente Virtual utilizando IA Generativa aplicada à Concentração de Minério de Ferro

^{2,3}*Tiago Caixeta Nunes;

⁴Rodrigo Martins Gomes;

³Felipe Novaes Caldas;

⁴Ednei Rodrigues Rocha;

⁵Eric Guimarães Vieira;

¹Marcelo Pereira de Castro Alves;

¹Deloitte (Engineering, AI & Data), 30112-010 Belo Horizonte - MG, Brazil

²Federal University of Minas Gerais (Metallurgical, Materials and Mining Engineering), 31270-901 Belo Horizonte - MG, Brazil

³VALE SA (Mineral Processing Department), 34006-049 Nova Lima - MG, Brazil

⁴VALE SA (Technology Department), 34006-049 Nova Lima - MG, Brazil

⁵VALE SA (Operations Department), 35935-000 São Gonçalo do Rio Abaixo - MG, Brazil

Resumo: O emprego da Inteligência Artificial (IA) no mercado competitivo da mineração tem despertado interesse crescente nos últimos anos, à medida que essas tecnologias assumem um papel importante na interpretação de dados, modernização dos processos produtivos e utilização eficiente das reservas minerais. Dentre as diversas vertentes da IA, a Inteligência Artificial Generativa (Gen-AI) se destaca como uma das mais promissoras e disruptivas. Este trabalho visa apresentar uma aplicação de assistente virtual baseado em Gen-AI, capaz de fornecer respostas a perguntas de usuários utilizando linguagem natural sobre os aspectos operacionais, baseado em diversas fontes de dados para auxiliar na tomada de decisão que influencia no desempenho da concentração de minério de ferro. O assistente considera uma infraestrutura de segurança da informação, utiliza modelos de linguagem (LLMs) e técnica de Retrieval-Augmented Generation (RAG) para acessar bancos de dados da usina e documentos, enquanto um fluxo com vários agentes centralizam informações de aplicações com dados de produção, dados históricos e documentação técnica.

Palavras-chave: Concentração; Inteligência artificial generativa; Minério de ferro

TECNOLOGIA em Metalurgia, Materiais e Mineração



ISSN 2176-1523 (Online)

Associação Brasileira de
Metalurgia, Materiais e Mineração

Tiago Caixeta Nunes (tiago.caixeta@vale.com) [Alterar Dados](#)

Painel do Autor

Iniciar nova submissão

Alterar meu cadastro

Alterar minha senha

Sair (Logout)

Para esclarecer dúvidas ou obter suporte técnico sobre o sistema, acesse nosso [FAQ](#)

Para esclarecer dúvidas ou suporte técnico sobre o sistema, acesse nosso [FAQ](#)

Tecnologia em Metalurgia, Materiais e Mineração

Na tabela *Submissões Pendentes* você pode continuar cada submissão do ponto em que parou ou cancelar seu envio. Para acompanhar seu trabalho veja a coluna *Situação* em *Submissões Completas*. Veja maiores informações sobre trabalhos onde você é co-autor em *Submissões Co-Autoradas*.

[★ Iniciar nova submissão >>](#)

Bem-Vindo Tiago Nunes

Você acessou nosso sistema 6 vezes

Seu último acesso foi em: 24/10/2025

Seu IP: 155.190.29.5

Por favor utilize a função [Alterar meu cadastro](#) e atualize seu cadastro incluindo endereço para correspondência e Palavras-chave relacionadas a você

Submissões Pendentes (ignoradas até estarem completas)

Código	Título trabalho	Criada em	Ações
nenhuma submissão em andamento			

Submissões Completas (aguardando processo de avaliação)

Código	Título trabalho	Enviada em	Situação
TM3337	Assistente Virtual utilizando IA Generativa aplicada à Concentração de Minério de Ferro	24/10/2025	Submetido

Submissões Co-Autoradas (trabalhos co-autorados por você*)

Código	Título trabalho	Criada por	Situação
nenhuma submissão co-autorada			

*nós utilizamos os e-mails dos co-autores informados pelo autor que fez a submissão para determinar se você é co-autor dos trabalhos. Caso você não seja co-autor de algum trabalho por favor comunique nossa equipe de suporte por e-mail.