**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**
**Escola de Engenharia**
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas**

Gustavo Geraldo Rezende Nogueira

# IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DO CONTROLE AVANÇADO EM UM PROCESSO DE FLOTAÇÃO COM O AUXÍLIO DE INSTRUMENTOS DE VISÃO ARTIFICIAL EM TEMPO REAL

Belo Horizonte
2022

Gustavo Geraldo Rezende Nogueira

# IMPLANTAÇÃO E AVALIAÇÃO DO CONTROLE AVANÇADO EM UM PROCESSO DE FLOTAÇÃO COM O AUXÍLIO DE INSTRUMENTOS DE VISÃO ARTIFICIAL EM TEMPO REAL

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

Área de concentração: Tecnologia Mineral

Orientador: Professor Roberto Galéry

Belo Horizonte
2022

Nogueira, Gustavo Geraldo Rezende.
N778i Implantação e avaliação do controle avançado em um processo de flotação com o auxílio de instrumentos de visão artificial em tempo real [recurso eletrônico] / Gustavo Geraldo Rezende Nogueira. – 2022.
1 recurso online (96 f. : il., color.) : pdf.

Orientador: Roberto Galéry.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia de minas – Teses. 2. Tecnologia mineral – Teses. 3. Flotação – Teses. 4. Visão artificial – Teses. 5. Fuzzy systems – Teses. 6. Análise de imagem – Teses. I. Galéry, Roberto. II. Universidade Federal de Minas Gerais. Escola de Engenharia. III. Título.

CDU: 622(043)

Ficha catalográfica elaborada pelo bibliotecário Marcio A. A. Gomes CRB/6 2812
Biblioteca Prof. Mário Werneck, Escola de Engenharia da UFMG

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS**
**ESCOLA DE ENGENHARIA**
**Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas**

A dissertação intitulada **"Implantação e Avaliação do Controle Avançado em um Processo de Flotação com o Auxílio de Instrumentos de Visão Artificial em Tempo Real"**, área de concentração: Tecnologia Mineral, apresentada pelo candidato **Gustavo Geraldo Rezende Nogueira**, para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas, foi aprovada pela comissão examinadora constituída pelos seguintes membros:

gov.br Documento assinado digitalmente
ROBERTO GALERY
Data: 14/06/2023 17:14:14-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Roberto Galéry
Orientador (UFMG)

gov.br Documento assinado digitalmente
GEORGE EDUARDO SALES VALADAO
Data: 13/06/2023 19:33:51-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. George Eduardo Sales Valadão
(UFMG)

gov.br Documento assinado digitalmente
LUIZ CLAUDIO MONTEIRO MONTENEGRO
Data: 14/06/2023 16:46:04-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Dr. Luiz Cláudio Monteiro Montenegro
(UFMG)

gov.br Documento assinado digitalmente
EDUARDO HENRIQUE MARTINS NUNES
Data: 18/05/2025 11:01:50-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

_____

Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas/UFMG

Belo Horizonte, 20 de junho de 2022

À Ana Carolina, pelo amor e incentivo e aos meus pais pelo afeto e constante apoio que me motivaram a buscar essa conquista.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus pelo dom da vida e pelas oportunidades e pessoas que sempre colocou em meu caminho, permitindo que meus objetivos fossem perseguidos.

Ao meu orientador, Roberto Galéry, pelos ensinamentos, apoio e compreensão durante toda a execução desse trabalho.

À CEMI, pela oportunidade de desenvolver esse trabalho e pelo período de grande aprendizagem profissional. Em especial a Marco Aurélio, Maíra Diniz e Rafael Fonseca pela realização desse projeto.

À RHI Magnesita, por me incentivar e suportar na continuação da elaboração desse trabalho. Agradeço em especial ao Cassandro Matos e ao Bruno Serra pela compreensão e ensinamentos; e ao Matheus Naves e ao Paschoal Bonadia pelo incentivo e pelo despertar do interesse por uma maior qualificação profissional.

Aos meus pais, por, desde o início de minha vida, me incentivarem e buscarem meios para que fosse possível estudar em boas instituições de ensino. Eles sempre me ensinaram que seria através da educação que eu conquistaria as realizações na vida.

À Ana Carolina, pelo amor, companheirismo e dedicação. Desde o início, quando o mestrado ainda era um projeto, ela me incentivou e suportou minhas decisões.

Às minhas irmãs, Gabriela e Maria Clara, pelo bom convívio e união que temos, tornando a vida mais leve para buscar os sonhos e comemorar juntos.

A todos professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas e do Departamento de Engenharia de Minas da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais que, com ensinamentos e orientações, me ajudaram nessa conquista.

À Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG) pela oportunidade de engrandecimento científico e profissional.

Enfim, a todos os amigos, familiares e colegas de trabalho por sempre acreditarem em mim e me incentivarem a buscar novos desafios.

## RESUMO

O desempenho da flotação depende da interação de diversos fatores físicos e químicos. Portanto, os circuitos de flotação estão sujeitos a diferentes tipos de distúrbios no processo, alguns dos quais são causados por alterações nas características minerais e outros por variações nas condições de operação. Além disso, erros de medição e equipamentos danificados adicionam mais dificuldades. Portanto, a demanda por sistemas de controle simples e confiáveis é essencial. Por isso, o controle da flotação baseado nas características da espuma, utilizando uma combinação de técnicas de visão artificial e controle inteligente com lógica *fuzzy* foi utilizado nesse trabalho, que teve como objetivos realizar a implantação e a avaliação do Controle Avançado de Processos em um circuito de flotação contendo uma etapa *rougher*, uma etapa *cleaner* e uma etapa *scavenger*. Além disso, outro objetivo do trabalho foi apresentar a correlação entre os dados de teor de concentrado gerados por análise de imagem em tempo real e os dados de análise de laboratório. A metodologia utilizada nesse trabalho envolveu a instalação de câmeras e luminárias sobre as colunas, a amostragem e calibração dos softwares de análise de imagem, a implantação do Controle Avançado de Processo e avaliação do impacto desse sistema nos parâmetros de teor e recuperação. De modo geral, a metodologia consistiu em utilizar as informações fornecidas em tempo real pelos softwares de análise de imagem para otimizar o processo de flotação, manipulando as variáveis operacionais a fim de se buscar uma maior estabilidade e maior desempenho do circuito em termos de recuperação. A realização desse trabalho atendeu os objetivos propostos. A avaliação do sistema de controle avançado de processos mostrou que, mesmo com a alimentação da flotação possuindo características semelhantes para os dois cenários avaliados, o desempenho da concentração foi melhor com o sistema ativado, com maior recuperação e menor teor do mineral no rejeito. O teor do concentrado médio de 53,8% praticamente não foi alterado, mantendo o produto na mesma especificação de qualidade. Por outro lado, o teor médio do rejeito caiu 8,9%. A recuperação mássica sofreu um aumento médio de 3,9% enquanto a recuperação metalúrgica foi, em média, 2,5% maior com o Controle Avançado de Processos atuando no circuito. Isso corrobora que sistemas de análise de imagem em tempo real associados a sistemas de controle avançado trazem melhor desempenho metalúrgico para os processos de concentração mineral por flotação de colunas. Os resultados do sistema de previsão de teor por análise de imagem em tempo real mostraram correlação moderada, $R^2 = 0,45$, com os dados de análise em laboratório.



Palavras-chave: controle avançado de processos; flotação; análise de imagem; recuperação.

**ABSTRACT**

Flotation performance depends on the interaction of many physical and chemical factors. Therefore, flotation circuits are subjected to diverse types of process disturbances, some of which are caused by changes in mineral characteristics and others by variations in operating conditions. Besides, measurement errors and damaged equipment add further difficulties. Thus, the demand for simple and reliable control systems is essential. Therefore, flotation control based on froth characteristics, using a combination of artificial vision and intelligent control with fuzzy logic techniques were used in this work, which aimed to implement and evaluate the Advanced Process Control in a flotation circuit, containing a rougher stage, a cleaner stage, and a scavenger stage. Also, another objective of the work was to present the correlation between the data of concentrate grade generated by real-time image analysis and the data of laboratory analysis. The methodology used in this work involved the installation of cameras and lights on the columns, the sampling and calibration of the image analysis software, the implementation of Advanced Process Control, and the impact evaluation of this system on the grade and recovery parameters. In general, the methodology consisted of using the information provided in real-time by the image analysis software to optimize the flotation process, manipulating the operational variables to seek greater stability and greater performance of the circuit in terms of recovery. The accomplishment of this work met the proposed objectives. The evaluation of the advanced process control system showed that, even with the flotation feed having similar characteristics for the two scenarios evaluated, the concentration performance was better with the activated system, with greater recovery and less mineral grade in the tailings. The average concentrate grade of 53.8% was virtually unchanged, keeping the product in the same quality specification. On the other hand, the average tailings grade fell 8.9%. Mass recovery increased by an average of 3.9%, while the metallurgical recovery was, on average, 2.5% higher with Advanced Process Control operating in the circuit. This corroborates that real-time image analysis systems associated with advanced control systems bring better metallurgical performance to column flotation concentration processes. The results of the grade prediction system by real-time image analysis showed a moderate correlation, $R^2 = 0.45$, with the data from the laboratory.

Keywords: advanced process control; flotation; image analysis; recovery.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 3.1: Principais operações de uma planta de processamento mineral (Fonte: Adaptado de SBARBARO e VILLAR, 2010)..... 19
Figura 3.2: Contato Trifásico do sólido, líquido e ar (GUPTA e YAN, 2016) ..... 22
Figura 3.3: Células mecânicas: primeiros modelos, à esquerda e modelo cilíndrico de 650m³, à direita (WILLS e FINCH, 2016) ..... 25
Figura 3.4: Gráfico da tendência pela utilização de células maiores (WILLS e FINCH, 2016) ..... 26
Figura 3.5: Diagrama de uma célula Wemco Fagergren (WILLS e FINCH, 2016) ..... 27
Figura 3.6: Mecanismo rotor da Dorr-Oliver (WILLS e FINCH, 2016)..... 27
Figura 3.7: Células modernas de 600m³ utilizando os mecanismos: (a) auto aerado da Wemco e (b) ar forçado da Dorr-Oliver (WILLS e FINCH, 2016)..... 28
Figura 3.8: TankCell da Outotec com 500m³ (WILLS e FINCH, 2016) ..... 29
Figura 3.9: Esquema de uma coluna de flotação (WILLS e FINCH, 2016) ..... 30
Figura 3.10: Sistemas de água de lavagem: (a) tubos de irrigação (b) bandeja de gotejamento (WILLS e FINCH, 2016) ..... 31
Figura 3.11: Aerador *SlamJet* (WILLS e FINCH, 2016) ..... 32
Figura 3.12: Aerador *Microcel* (WILLS e FINCH, 2016) ..... 32
Figura 3.13: Aerador *CavTube* (WILLS e FINCH, 2016) ..... 33
Figura 3.14: Funções de um sistema de automação (SBARBARO e VILLAR, 2010)..... 36
Figura 3.15: Hierarquia de Controle (VILAR, DESBIENS, MALDONADO e BOUCHARD, 2010)..... 38
Figura 3.16: Bloco diagrama de um Sistema de inferência fuzzy (WILLS e FINCH, 2016) ..41
Figura 3.17: Objetivos do controle da flotação (WILLS e FINCH, 2016)..... 43
Figura 3.18: Funções do controle em um processo ..... 44
Figura 3.19: Imagens de flotação com teores crescentes de zinco (DUCHENSNE, 2010) ..... 47
Figura 4.1: Câmera e luminária utilizadas para a coleta de imagens ..... 52
Figura 4.2: Exemplos de caixas escuras para câmeras ..... 53
Figura 4.3: Estrutura de rede utilizada..... 54
Figura 4.4: Interface típica do OptVision Froth ..... 55
Figura 4.5: Calibração OptVision Froth ..... 56
Figura 4.6: Interface típica do OptVision Grade ..... 57
Figura 4.7: Amostras para análise química ..... 58
Figura 4.8: Banco de imagens para calibração ..... 58
Figura 4.9: Arquitetura do OptProcess em uma planta industrial ..... 60
Figura 4.10: Estrutura modular do OptProcess ..... 61
Figura 4.11: Painel de regras do sistema especialista..... 62
Figura 4.12: Painel de interpretação das regras *fuzzy*..... 63
Figura 4.13: Visualização de gráficos em tempo real do processo ..... 64
Figura 4.14: Painel típico de um controle de flotação..... 64
Figura 5.1: Teor do concentrado e velocidade de espuma variando no tempo ..... 67

Figura 5.2: Recuperação do circuito e velocidade de espuma variando no tempo ..... 68
Figura 5.3: Correlação entre velocidade de espuma e teor do concentrado ..... 68
Figura 5.4: Correlação entre velocidade de espuma e recuperação ..... 68
Figura 5.5: Correlação entre camada de espuma e teor do concentrado ..... 69
Figura 5.6: Correlação entre camada de espuma e recuperação ..... 70
Figura 5.7: Correlação entre vazão de ar e teor do concentrado ..... 71
Figura 5.8: Correlação entre vazão de ar e recuperação ..... 71
Figura 5.9: Correlação entre água de lavagem e teor do concentrado ..... 72
Figura 5.10: Correlação entre água de lavagem e recuperação ..... 72
Figura 5.11: Correlação entre dosagem de coletor e teor do concentrado ..... 73
Figura 5.12: Correlação entre dosagem de coletor e recuperação ..... 73
Figura 5.13: Carta de controle da recuperação mássica do circuito ..... 74
Figura 5.14: Carta de controle do teor do concentrado ..... 75
Figura 5.15: Carta de controle do teor de rejeito ..... 76
Figura 5.16: Determinação gráfica da recuperação metalúrgica ..... 77
Figura 5.17: Curvas de recuperação-teor ..... 78
Figura 5.18: Resumo da recuperação-teor para o período avaliado ..... 79
Figura 5.19: Correlação OptVision Grade e FRX laboratório ..... 80
Figura 5.20: Teor do concentrado no tempo pelo laboratório e pelo OptVision Grade ..... 81

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Dados da alimentação do circuito.....66

## LISTA DE EQUAÇÕES

**Equação 3.1** ..... 34
**Equação 3.2** ..... 34
**Equação 3.3** ..... 42
**Equação 3.4** ..... 42

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A = massa da alimentação

a = teor da alimentação

$A_b$ = superfície de uma bolha

$A_c$ = seção transversal de uma coluna

C = massa do concentrado

c = teor do concentrado

CAP = Controle Avançado de Processos

CO = Saída do Controlador *(Controller Output)*

CV = Valor de Controle (*Control Value*)

$D_b$ = diâmetro de uma bolha

DCS = Sistemas de Controle Distribuído *(Distributed Control System)*

e = teor do rejeito

FRX = Fluorescência de Raios-X

IHM = Interface Homem-Máquina

IP66 = Índice de Proteção 66, um produto que é à prova de poeira e jatos de água potentes

$J_b$ = taxa superficial de bias

$J_g$ = velocidade superficial do gás

LED = diodo emissor de luz (*light-emitting diode*)

MPC = controle preditivo por modelo *(Model Predictive Control)*

$n_b$ = unidade de tempo

OLE = Vinculação e Incorporação de Objetos *(Object Linking and Embedding)*

OPC = Protocolo OLE para controle de processos *(OLE for Process Control)*

PC = Computador Pessoal *(Personal Computer)*

PIMS = Sistema de Gestão de Informações da Planta *(Plant Information Management System)*

PLC = Controladores Lógicos Programáveis *(Programmable Logic Controller)*

PV = Valor de Processo *(Process Value)*

R = Recuperação

$R^2$ = Coeficiente de determinação

ROI = Região de Interesse *(Region of Interest)*

$S_b$ = fluxo de área superficial de bolhas

SP = Valor Objetivo *(Setpoint)*

TCP = Protocolo de controle de transmissão *(Transmission Control Protocol)*

$\theta$ = ângulo de contato

$\varepsilon_g$ = *Hold-up* de gás

$\gamma_{sa}$ = tensão interfacial sólido-ar

$\gamma_{sl}$ = tensão interfacial sólido-líquido

$\gamma_{la}$ = tensão interfacial líquido-ar

**SUMÁRIO**


**1 INTRODUÇÃO ..... 16**

**2 OBJETIVOS ..... 18**

**3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA ..... 19**

3.1 FLOTAÇÃO ..... 19

*3.1.1 Princípios da Flotação ..... 20*

*3.1.2 Reagentes de Flotação ..... 22*

*3.1.3 Máquinas de Flotação ..... 23*

3.1.3.1 Células de Flotação Mecânica ..... 24

3.1.3.2 Colunas de Flotação ..... 29

*3.1.4 Requerimentos para a Flotação ..... 35*

3.2 CONTROLE AVANÇADO DE PROCESSOS E LÓGICA *FUZZY* APLICADOS À FLOTAÇÃO ..... 36

3.3 SISTEMAS DE VISÃO ARTIFICIAL APLICADOS À FLOTAÇÃO ..... 44

**4 METODOLOGIA ..... 52**

4.1 INSTALAÇÃO DE CÂMERAS E LUMINÁRIAS ..... 52

4.2 AMOSTRAGEM E CALIBRAÇÃO DOS *SOFTWARES* DE ANÁLISE DE IMAGEM ..... 54

*4.2.1 OptVision Froth ..... 54*

*4.2.2 OptVision Grade ..... 56*

4.2.2.1 Calibração OptVision Grade ..... 57

4.3 IMPLANTAÇÃO DO CONTROLE AVANÇADO DE PROCESSOS ..... 58

*4.3.1 OptProcess ..... 59*

4.3.1.1 Comunicação ..... 61

4.3.1.2 Sistema Especialista e Lógica *Fuzzy* ..... 62

4.3.1.3 Ferramentas Estatísticas ..... 63

4.3.1.4 Painéis Sinópticos ..... 64

4.4 AVALIAÇÃO DO SISTEMA ..... 65

**5 RESULTADOS ..... 66**

5.1 ALIMENTAÇÃO DA FLOTAÇÃO ..... 66

5.2 PARÂMETROS OPERACIONAIS ..... 66

*5.2.1 Velocidade de Espuma ..... 67*

*5.2.2 Camada de Espuma ..... 69*

*5.2.3 Vazão de Ar* ..... *70*
*5.2.4 Água de lavagem* ..... *71*
*5.2.5 Dosagem de coletor* ..... *73*
5.3 RECUPERAÇÃO MÁSSICA ..... 74
5.4 TEOR DO CONCENTRADO ..... 75
5.5 TEOR DO REJEITO ..... 75
5.6 RECUPERAÇÃO METALÚRGICA ..... 76
5.7 CURVAS DE RECUPERAÇÃO-TEOR ..... 77
5.8 CORRELAÇÃO OPTVISION GRADE ..... 79
**6 CONCLUSÕES ..... 82**
**7 RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS ..... 83**
**8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS ..... 84**
**REFERÊNCIAS ..... 85**

# 1 INTRODUÇÃO

A flotação é um processo vital na concentração mineral. Ela se beneficia da hidrofobicidade dos minerais liberados e faz com que diferentes minerais sejam separados dentro da polpa em que se encontram. Em um processo de flotação, bolhas de ar são geradas e utilizadas como um meio para seletivamente coletar as partículas hidrofóbicas dispersas na polpa. Então, os agregados de bolhas e de partículas hidrofóbicas se direcionam para cima e entram na fase de espuma pela ação do empuxo. É amplamente aceito o fato que a estrutura da espuma que se desenvolve na superfície da fase de espuma é um indicador significante do teor concentrado e recuperação da flotação. Essa relação é bastante utilizada em um nível operacional do processo. Por exemplo, na indústria, as dosagens de reagentes são normalmente modificadas por operadores experientes baseados nas suas observações sobre a superfície da espuma (ZHANG, TANG, AI e GUI, 2018).

A flotação é um processo físico-químico para a separação seletiva de materiais hidrofóbicos de hidrofílicos. Para JAHEDSARAVANI, MASSINAEI e MARHABAN (2017), as características visuais da superfície da espuma são diretamente relacionadas ao estado do processo. Em controles baseados em sistemas de visão, as características da espuma são extraídas de imagens da superfície dessa espuma e as variáveis de processo são manipuladas para atingir os níveis de desempenhos desejados.

Desde o século passado, a separação de partículas por flotação como um método físico-químico tem sido uma das técnicas mais amplamente utilizada no processamento mineral. A flotação é utilizada para separar partículas minerais de interesse finamente moídas da sua ganga associada baseando-se nas diferenças em suas propriedades superficiais. Condições otimizadas, químicas e hidrodinâmicas, dentro de uma célula ou coluna de flotação levam a uma separação seletiva dos materiais de interesse. Portanto, a eficiência da flotação depende da interação de diversos fatores, tradicionalmente envolvendo química, dispersão de ar, propriedade das partículas, parâmetros hidrodinâmicos (como tamanho da bolha, velocidade superficial das bolhas e *hold-up* de ar) (SHAHBAZI, CHELGANI e MATIN, 2017).

De acordo com SHEAN, HADLER, NEETHLING e CILLIERS (2018), na flotação, a fase de espuma determina o desempenho de separação dos minerais de interesse da ganga. O controle do nível de polpa é crítico, uma vez que, além de determinar o tempo de residência do material, ele determina a altura da camada de espuma sobrejacente, uma importante variável operacional.

Existe uma relação clara entre a altura da camada de espuma e o desempenho da flotação, em que, em geral, camadas de espuma maiores resultam em teores de concentrado mais altos, porém com menores recuperações. Máquinas de flotação tradicionalmente utilizam controle proporcional-integral (PI) para garantir que o nível permaneça nos pontos de ajuste desejados. Isso é conseguido através da manipulação da válvula de saída que controla a vazão de polpa do material afundado.

Em uma célula de flotação, as partículas finas condicionadas com alguns reagentes, como coletores e espumantes, são colocadas em contato com bolhas de ar e as partículas hidrofóbicas se aderem às bolhas de ar, subindo para a camada de espuma para serem recuperadas, enquanto as partículas hidrofílicas permanecem no fundo da célula. Os circuitos de flotação são submetidos a diversos tipos de distúrbio de processo, alguns desses são causados por mudanças nas características minerais e outros, por variações nas condições de operação. Além disso, erros de medição e equipamentos estragados adicionam outras dificuldades. A demanda por sistemas de controle simples e confiáveis com o entendimento rápido do mecanismo de funcionamento pelos operadores da planta é, portanto, essencial (HOSSEIN, HAJI AMIN, MASSINAEI e MEHRSHAD, 2015).

Para SHEAN, HADLER e CILLIER (2017), apesar de a flotação ser um processo de separação amplamente aplicado e bem estabelecido, o desempenho de separação depende de numerosas variáveis, incluindo o teor da alimentação, distribuição granulométrica, mineralogia da ganga e do minério, porcentagem de sólidos da polpa, tipo e dosagem de reagentes, taxa de ar e altura da camada de espuma. A variação de qualquer um desses aspectos resulta em mudanças nas condições químicas e nos subprocessos físicos na polpa, o que, consequentemente, afeta a estrutura e estabilidade da espuma e, portanto, o teor de concentrado e recuperação. A natureza complexa da operação de flotação significa que o controle de equipamentos industriais de flotação continua sendo um desafio significante, mas os benefícios potenciais de melhoria do desempenho metalúrgico são substanciais. Em geral o controle da flotação ocorre em diversos níveis, de controle regulatório para manter variáveis primárias, como nível de polpa, por exemplo, até sistemas de controle avançado para maximizar o desempenho do circuito, que é o tema desse trabalho.

# 2 OBJETIVOS

Este trabalho será pautado em três grandes objetivos, a serem detalhados a seguir.

O primeiro objetivo é realizar a implantação do Controle Avançado de Processos em um circuito de flotação contendo três etapas, sendo uma etapa *rougher*, uma etapa *cleaner* e uma etapa *scavenger*. Essa implantação será auxiliada pelos dados do software de visão artificial, fornecendo informações em tempo real sobre parâmetros da espuma de flotação.

Após realizar a implantação desse controle, tem-se o segundo objetivo do presente trabalho, que consiste em realizar a avaliação do controle avançado, mostrando seus benefícios, como maior estabilidade do processo e ganho nos parâmetros metalúrgicos, como recuperação e teor.

E, finalmente, o terceiro objetivo deste trabalho consistirá na apresentação da correlação entre os dados de teor de concentrado gerados por análise de imagem a partir de um algoritmo com redes neurais e os dados de análise de laboratório por fluorescência de raios-X.

# 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma revisão da literatura, contendo aspectos sobre controle avançado de processos, lógica *fuzzy* e os sistemas de visão artificial. Também é apresentada uma breve revisão referente ao processo e equipamentos de flotação, o leitor já habituado ao tema é encorajado a começar sua leitura no capítulo 3.2 desse texto.

## 3.1 Flotação

Minerais de interesse econômico estão, normalmente, presos em um corpo de minério e são extraídos por diferentes métodos de lavra. As rochas são, em sua maioria, materiais quebradiços e heterogêneos. Essa heterogeneidade provém da composição mineralógica, do tamanho, forma e resistência dos grãos, da porosidade, entre outros fatores. Como consequência, as matérias primas extraídas de uma mina apresentam alta variabilidade, o que impõe desafios contínuos para os engenheiros que trabalham com processamento mineral. Dessa forma, para extrair os minerais de interesse de um minério, uma combinação de operações de separação é requerida, conforme ilustrado na Figura 3.1. (SBARBARO e VILLAR, 2010).

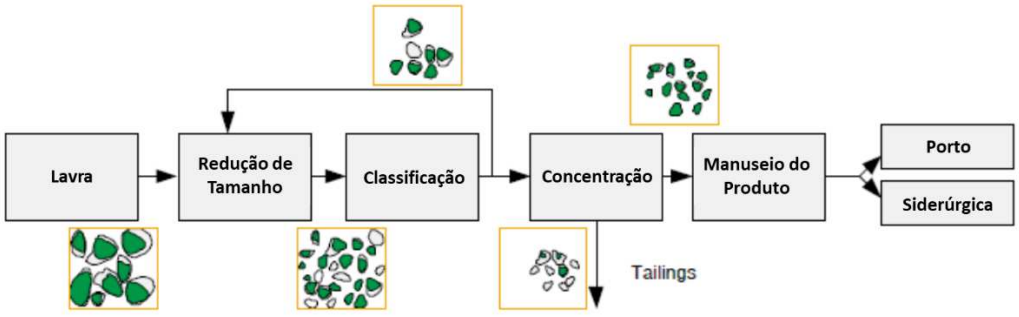



**Figura 3.1: Principais operações de uma planta de processamento mineral (Fonte: Adaptado de SBARBARO e VILLAR, 2010)**

Na etapa de concentração mineral, o minério é enriquecido, ou seja, é separado da maioria das espécies contaminantes (conhecidas como ganga), mantendo tanto quanto possível do mineral de interesse. Dentre os métodos de concentração, se destacam a separação gravimétrica, separação magnética e a flotação (SBARBARO e VILLAR, 2010). A flotação é, sem dúvidas,

a técnica de separação mineral mais importante e versátil, e seu uso e aplicação estão continuamente se expandido para tratar maiores volumes e suprir novas áreas. A flotação permitiu a lavra de depósitos minerais de baixo teor e mineralogia complexa, que sem essa técnica seriam considerados sem viabilidade econômica. Nas práticas iniciais, os rejeitos das plantas concentração gravimétrica possuíam teores mais altos que muitos minérios tratados atualmente em plantas de flotação. Inicialmente desenvolvida para tratar minerais sulfetados de cobre, chumbo e zinco, a flotação se expandiu para incluir sulfetos de níquel, e portadores de platina e ouro, e óxidos como hematita e cassiterita, assim como minerais não metálicos, como fluorita, talco, fosfatos, potássio e carvão (WILLS e FINCH, 2016).

Em 2005 a flotação completou seu centésimo aniversário desde a primeira aplicação comercial em Broken Hill em 1905. Desde então, a flotação evoluiu para se tornar a principal operação de processamento mineral. A flotação é um processo de separação que encontrou destaque devido à necessidade de tratar minérios complexos ou de baixo teor em que o tamanho de liberação é muito pequeno para separação gravimétrica eficiente ou a diferença de densidades entre os minerais é muito baixa (GUPTA e YAN, 2016).

### 3.1.1 Princípios da Flotação

A flotação é o processo de separação que explora as diferenças naturais ou induzidas das propriedades de superfície dos minerais, em que a superfície é prontamente molhada por água, ou seja, hidrofílica, ou repele a água, ou seja, hidrofóbica. Se hidrofóbica, a partícula do mineral pode se aderir a bolhas de ar e ser flotada. O sistema é complexo, envolvendo três fases (sólidos, água e ar) e a interação de variáveis químicas e físicas. As variáveis químicas se destinam a controlar a transição entre o estado hidrofílico e hidrofóbico. As variáveis físicas incluem aquelas resultantes de propriedades do minério, como distribuição granulométrica e liberação e fatores relacionados ao equipamento, como vazão de ar e tamanho de bolha. A mistura de física e química resulta, muitas vezes, na flotação sendo descrita como um processo físico-químico. Na flotação, uma bolha de ar é capaz de se fixar a uma partícula e elevá-la (flotá-la) à superfície da polpa. Isso significa que a densidade do agregado bolha-partícula é menor que a densidade da polpa do entorno (WILLS e FINCH, 2016).

De acordo com WILLS e FINCH (2016), o processo do material ser recuperado por flotação de uma polpa envolve três mecanismos:

- Fixação seletiva do material às bolhas de ar (ou flotação verdadeira);
- Arraste na água que passa pela espuma;
- Aprisionamento físico entre as partículas na espuma aderidas às bolhas de ar.

A fixação dos minerais às bolhas de ar é o mecanismo mais importante e representa a maioria das partículas que são flotadas. Embora a flotação verdadeira seja o mecanismo dominante, para a recuperação de mineral de interesse, a eficiência de separação entre o mineral de interesse e a ganga também é dependente do grau de arraste e de aprisionamento das partículas. Diferentemente da flotação verdadeira, que é seletiva às propriedades de superfície dos minerais, tanto a ganga quanto os minerais de interesse podem ser recuperados na espuma por arraste e aprisionamento. A drenagem desses minerais ocorre na fase de espuma e o controle da estabilidade dessa fase é importante para se conseguir uma separação adequada. Devido a isso, na prática industrial, um único estágio de flotação é raro. Geralmente, diversos estágios de flotação são necessários para se atingir uma qualidade aceitável do produto final (WILLS e FINCH, 2016).

A flotação se baseia na superfície de um mineral sendo hidrofóbica enquanto a superfície dos outros minerais presentes é hidrofílica. Quando as três fases, sólido, líquido e gás, estão em contato, um equilíbrio é estabelecido entre as tensões interfaciais sólido-ar ($\gamma_{sa}$), sólido-líquido ($\gamma_{sl}$) e líquido-ar ($\gamma_{la}$), como pode ser visto na Figura 3.2. O ângulo entre a tangente da curva no ponto de contato das três fases é definido como o ângulo de contato ($\theta$) e é medido como o ângulo através do fluido de maior densidade. Na flotação, ele será a fase líquida. (GUPTA e YAN, 2016).

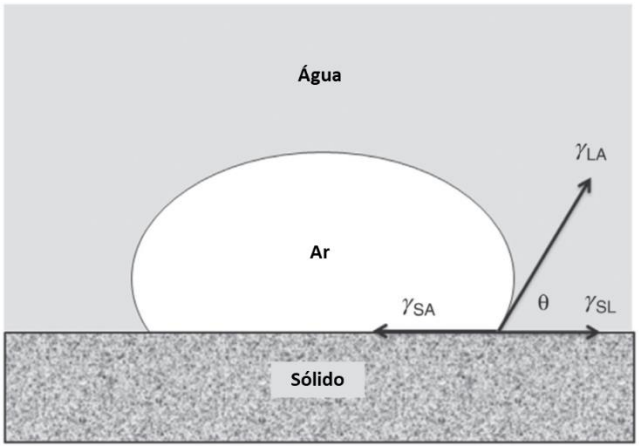



**Figura 3.2: Contato Trifásico do sólido, líquido e ar (GUPTA e YAN, 2016)**

O ângulo de contato é uma medida de quão bem uma bolha de ar se espalha sobre uma superfície sólida. Um baixo ângulo de contato (normalmente menor que 90°) indica uma superfície hidrofílica, enquanto um ângulo maior que 90° indica uma superfície hidrofóbica. Entretanto, na flotação, uma partícula com ângulo de contato menor que 90° ainda é capaz de se fixar a uma bolha de ar e ser flotada, o que indica que essa divisão em 90° é conceitual. A característica hidrofóbica ocorre naturalmente em um pequeno número de minerais comuns, como grafita, enxofre, talco, molibdênio e carvão mineral. Para sólidos que são naturalmente hidrofílicos, o ângulo de contato pode ser modificado pela alteração da energia livre de uma ou mais fases ou pela adição de algum componente que se adsorve ao mineral hidrofílico e altera sua superfície. O termo adsorção se refere à existência de uma concentração mais alta de qualquer componente na superfície do sólido em relação ao seu conteúdo na polpa. Para que a flotação obtenha sucesso é necessário que a adsorção seja seletiva. Isso significa que o os minerais de interesse e de ganga devem adquirir características diferentes, hidrofóbicos ou hidrofílicos, após a adsorção (GUPTA e YAN, 2016).

### 3.1.2 Reagentes de Flotação

De acordo com GUPTA e YAN (2016), os reagentes químicos utilizados na flotação podem ser divididos em três classes:

- Coletores: reagentes orgânicos que transformam a superfície em hidrofóbica, fazendo com que o mineral seja coletado para a espuma da flotação;

- Espumantes: reagentes orgânicos que reduzem a tensão superficial da água para estabilizar as bolhas em uma camada de espuma no topo da máquina de flotação.
- Modificadores: reagentes orgânicos ou inorgânicos utilizados para modificar as condições da polpa, melhorando a diferença da superfície química entre os minerais de interesse e de ganga.

### 3.1.3 Máquinas de Flotação

Embora diferentes equipamentos sejam fabricados atualmente e muitos tenham sido desenvolvidos e descartados no passado, é justo afirmar que dois grupos distintos se destacaram: células mecânicas e colunas de flotação. O tipo de equipamento é de suma importância no projeto de uma planta de flotação e é frequentemente o tópico que causa maior debate. As máquinas de flotação ou utilizam ar arrastado pela adição turbulenta de polpa ou, mais comumente, o ar é soprado ou induzido para a célula. Em cada caso, o ar deve ser disperso por obstáculos ou alguma forma de base permeável (WILLS e FINCH, 2016).

Os equipamentos utilizados na flotação devem prover uma interface de ar para que as partículas hidrofóbicas se fixem. Essa interface se dá na forma de bolhas de ar introduzidas em um tanque de polpa com agitação para fornecer um ambiente de máximo contato entre as partículas e as bolhas. O equipamento de flotação pode ser dividido em diversas categorias de acordo com o método de introdução de ar na célula. Essas categorias são: mecânica, pneumática, vácuo, eletroflotação e flotação por ar dissolvido. Os dois primeiros tipos de equipamentos são os mais amplamente utilizados na indústria. A flotação a vácuo e por ar dissolvido se baseia na precipitação de ar dissolvido na água nas partículas hidrofóbicas. A eletroflotação se baseia na eletrólise da água em bolhas finas de hidrogênio e oxigênio (GUPTA e YAN, 2016).

A maioria das máquinas de flotação em uso são células mecânicas. A escolha de qual tipo de célula utilizar é governada tanto pelo desempenho metalúrgico quanto por gosto pessoal (GUPTA e YAN, 2016). A inovação mais significante que ocorreu para as células de flotação desde 1950 foi o desenvolvimento de células cada vez maiores. Cita-se também a introdução de células cilíndricas, que se popularizaram nos anos 1990 (NELSON, 2014).

Em determinadas aplicações, principalmente na flotação de partículas finas e etapas *cleaner*, as colunas podem substituir efetivamente as células mecânicas, geralmente economizando espaço

e reduzindo o consumo de energia. Entretanto, algumas dificuldades ainda são encontradas, como o entupimento de aeradores e a correta manutenção da densidade de polpas em circuitos complexos (NELSON, 2014).

#### 3.1.3.1 Células de Flotação Mecânica

As máquinas de flotação mecânica são as mais amplamente utilizadas, sendo caracterizadas por um rotor acionado mecanicamente que agita a polpa e dispersa o ar em bolhas. As máquinas podem ser auto aeradas, com a aspiração criada pela rotação do rotor, ou possuírem ar forçado em que o ar é introduzido por um soprador externo. Os mecanismos do rotor tipicamente compreendem um rotor propriamente dito e um estator (ou difusor). À medida que o rotor gira, uma cavidade de ar é formada na região de baixa pressão atrás das pás do rotor onde as bolhas são formadas por uma ação de cisalhamento. O estator não apresenta um maior impacto no tamanho da bolha, mas sim na sua dispersão na célula. Os fabricantes de equipamentos recomendam velocidades do rotor que permitam à máquina manter as partículas em suspensão e dispersem as bolhas por toda a célula (WILLS e FINCH, 2016).

Esse tipo de equipamento consiste em uma região de turbulência produzida por um rotor, fornecendo a agitação necessária para manter as partículas em suspensão, dispersar as bolhas de ar e promover o contato partícula-bolha. Adicionalmente, a célula deve conter uma zona quiescente em que as bolhas mineralizadas podem subir para a superfície sem perder as partículas devido à turbulência. A remoção da espuma da célula pode ser tanto por overflow natural quanto pelo auxílio de raspadores mecânicos (GUPTA e YAN, 2016).

Segundo WILLS e FINCH (2016) a tendência mais proeminente nos últimos anos, particularmente na flotação de minérios de metais básicos, tem sido a mudança para células de maior capacidade, com a redução correspondente em custos de capital, manutenção e operação, principalmente onde o controle automático é incorporado. Nos anos 1960, as células possuíam $6m^3$ ou menos de volume, conforme visto na Figura 3.3. Nos anos 1970 e 1980, os equipamentos cresceram em tamanho e tipicamente variavam de 9 a 30m³ com células maiores sendo cada vez mais adotadas. Os fabricantes que se destacavam eram Denver Equipment, Galigher, Wenco, Outokumpu Oy e Sala. Relativamente pequenas células cilíndricas (células tipo tanque de até 60m³) foram introduzidas nos anos 1970, mas apenas se popularizaram durante os anos

1990 e 2000 quando fabricantes desenvolveram projetos de maior capacidade. As maiores células instaladas são de 500m³. Células de até 650m³ estão sendo testadas, como pode ser visto na Figura 3.3.

**Figura 3.3: Células mecânicas: primeiros modelos, à esquerda e modelo cilíndrico de 650m³, à direita (WILLS e FINCH, 2016)**

A tendência é claramente para tamanhos de células cada vez maiores, como por ser visto na Figura 3.4. Células maiores permitem um menor número de células, mas significa que uma instrumentação mais acurada é necessária, por exemplo, para um controle de nível efetivo.

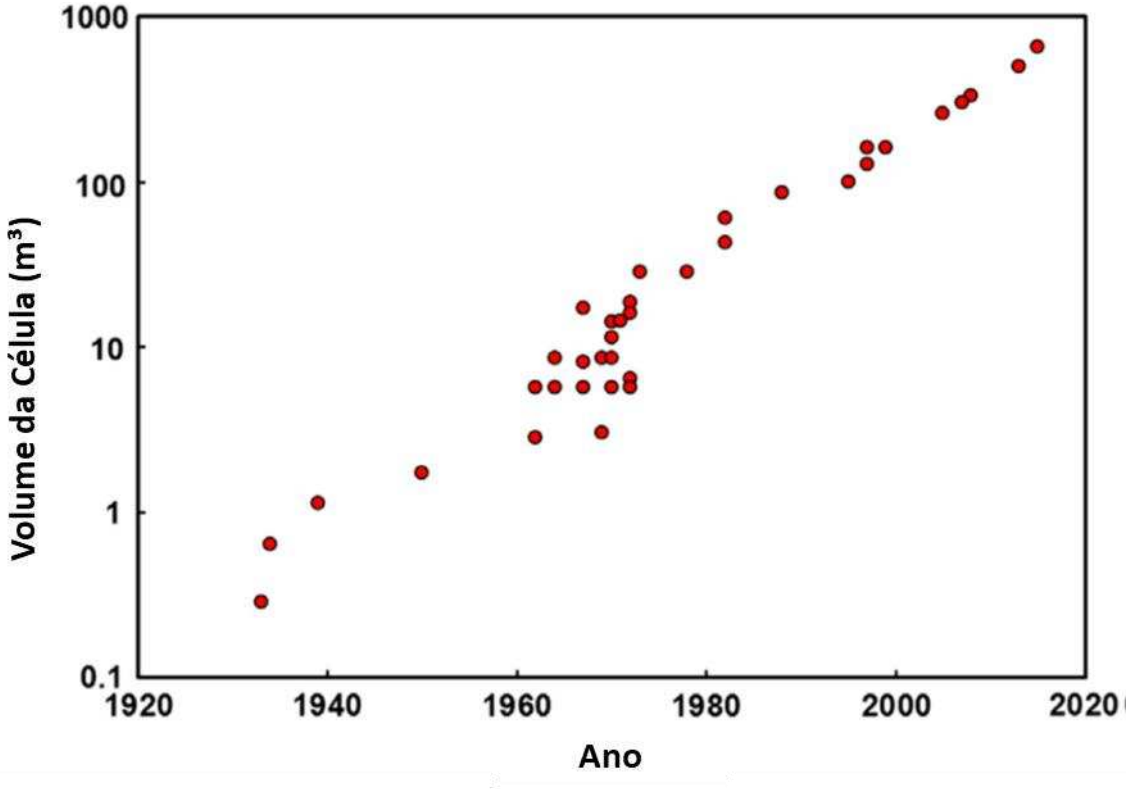



**Figura 3.4: Gráfico da tendência pela utilização de células maiores (WILLS e FINCH, 2016)**

As características construtivas das células em 1920 podem ser resumidas pelas máquinas da Fagergren que eram auto aeradas e empregavam um sistema rotor horizontal. Esse projeto evoluiu para um agitador vertical com tubo de sucção e fundo falso para recirculação de polpa nos anos 1930 e a Western Machinery Co. (WEMCO) começou a vender as máquinas que ganharam popularidade durante os anos 1950 com o nome WEMCO Fagergren, como visto na Figura 3.5. O projeto da célula WEMCO continua sendo o mecanismo de auto aeração mais amplamente utilizado. Os projetos modernos compreendem bancos de células tanque individuais. A alimentação em polpa entra na base da célula vindo de um tanque de alimentação ou da célula anterior. A polpa passando por cada célula é deslocada para cima em direção ao rotor pela sucção criada pela rotação. A sucção também direciona ar para baixo do tubo vertical. O ar é completamente misturado com a polpa e pequenas bolhas são formadas pelo dispersor por desviar repentinamente o movimento circular da polpa. A vazão de ar na célula é controlada pela velocidade do rotor, densidade da polpa e nível da polpa (WILLS e FINCH, 2016).

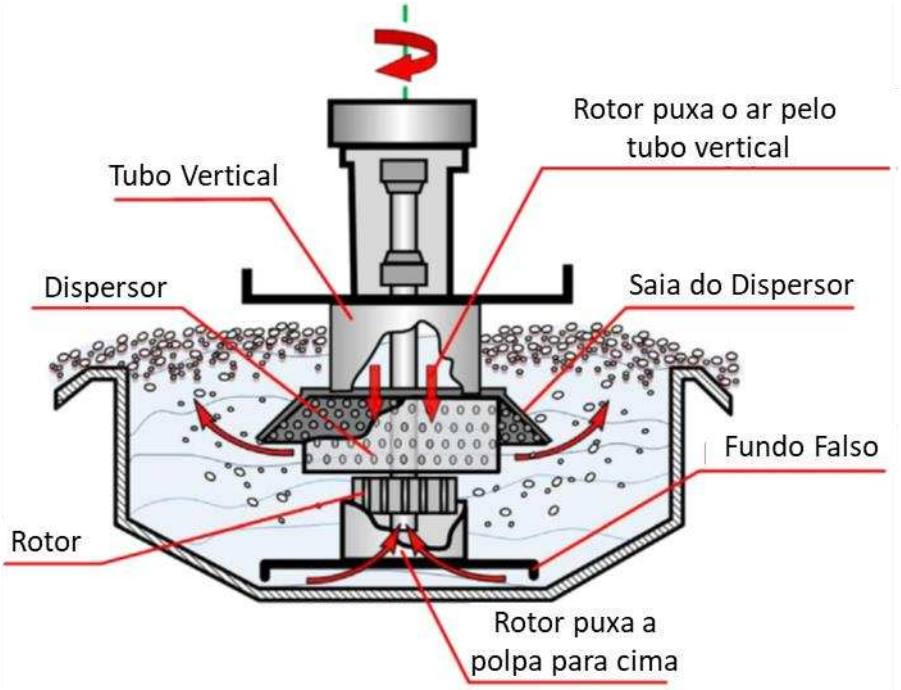



**Figura 3.5: Diagrama de uma célula Wemco Fagergren (WILLS e FINCH, 2016)**

A empresa *Dorr-Oliver* projetou uma célula de flotação no início dos anos 1980 como resposta a demanda de células maiores (40m³). O desenho do tipo bomba do rotor retirou a necessidade de extensivos defletores no tanque. A montagem do rotor-estator apresenta um rotor curvilíneo com seis pás e de formato parabólico, como visto na Figura 3.6. O ar flui pelo tubo vertical que envolve o eixo do rotor e entra em uma câmera de gás através de uma abertura no prato superior do rotor. Atualmente as células com essa concepção são fornecidas em opções retangulares, com fundo em forma de U ou cilíndricas (WILLS e FINCH, 2016).

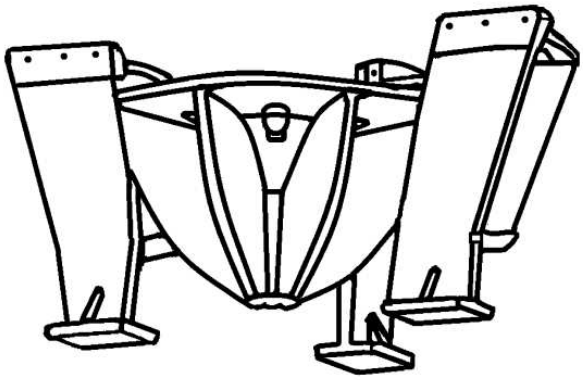


**Figura 3.6: Mecanismo rotor da Dorr-Oliver (WILLS e FINCH, 2016)**

A Figura 3.7 mostra projetos modernos de células tanque da empresa FLSmidth contendo defletores, calhas radiais e (a) o mecanismo WEMCO de ar aspirado e (b) o Mecanismo Dorr-Oliver de ar forçado.

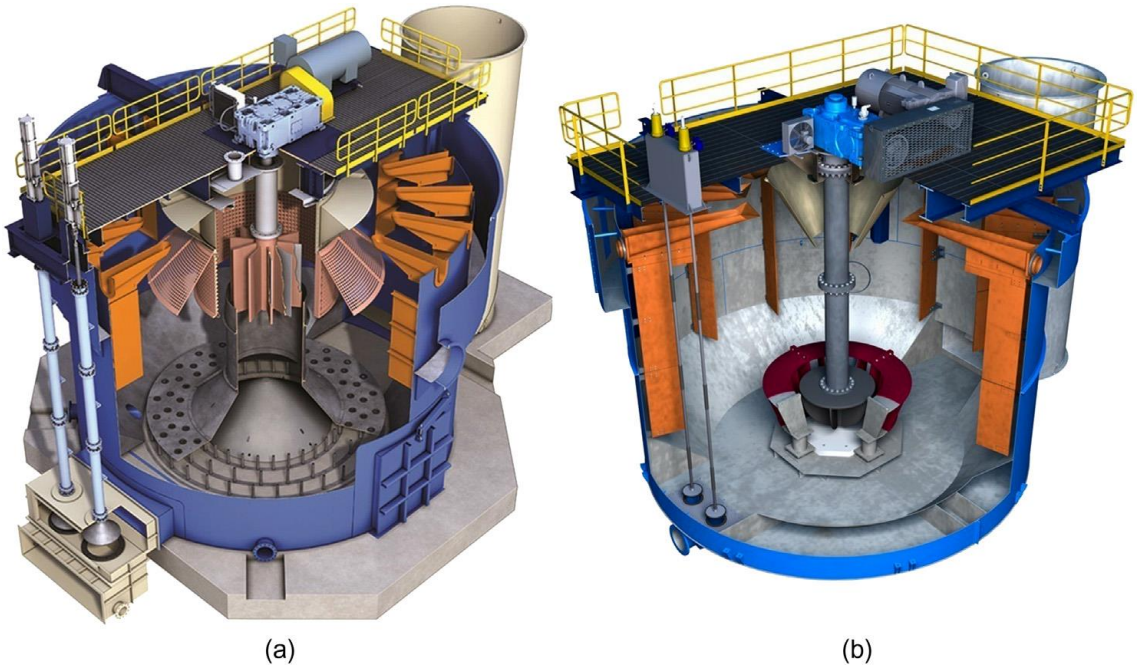



**Figura 3.7: Células modernas de 600m³ utilizando os mecanismos: (a) auto aerado da Wemco e (b) ar forçado da Dorr-Oliver (WILLS e FINCH, 2016)**

A Outotec (anteriormente Outokumpu Oy) desenvolveu nos anos 1970 a célula OK. Essa célula se desenvolveu durante os anos e inclui diversas geometrias de rotor-estator, mas o conceito geral continua o mesmo. A empresa migrou para células cilíndricas nos anos 1980, o que eventualmente permitiu a primeira instalação de TankCells no início dos anos 1990. A Figura 3.8 mostra uma TankCell de 500m³ com 10m de diâmetro (WILLS e FINCH, 2016).

**Figura 3.8: TankCell da Outotec com 500m³ (WILLS e FINCH, 2016)**

Um processo de flotação contínuo não pode acontecer em uma única célula devido a perdas por curto-circuito de polpa entre a alimentação e a saída de polpa. Portanto, é comum o uso de 4 a 12 células em série, o que também aumenta o tempo de residência das partículas nas células, dando uma chance para as partículas de baixa cinética se conduzirem para a camada de espuma (GUPTA e YAN, 2016).

### 3.1.3.2 Colunas de Flotação

Os anos de 1980 e 1990 viram o aumento do uso de colunas de flotação na indústria mineral. As principais vantagens de uma coluna de flotação incluem melhor desempenho de separação, particularmente de materiais finos, baixo custo de capital e operacional, menor demanda de área para instalação e adaptabilidade para o controle automático. A capacidade de manter camadas de espuma profundas, aliada ao uso de água de lavagem, fazem com que as colunas sejam atrativas como etapa final *cleaner* onde a produção de altos teores de concentrado é requerida (WILLS e FINCH, 2016).

Uma coluna consiste em duas zonas distintas: a zona de coleta (também referida como zona de recuperação ou zona de polpa) e a zona de espuma (referida, também, como zona de limpeza).

Partículas flotáveis colidem e se fixam às bolhas e são transportadas para a zona de espuma. O material não-flotável é removido na base da coluna. Partículas indesejáveis que são arrastadas pela água para a espuma ou que estão fracamente aderidas às bolhas são lavadas de volta para a zona de coleta, então reduzindo a contaminação do material flotado (WILLS e FINCH, 2016). Um desenho esquemático e uma coluna industrial são mostrados na Figura 3.9.

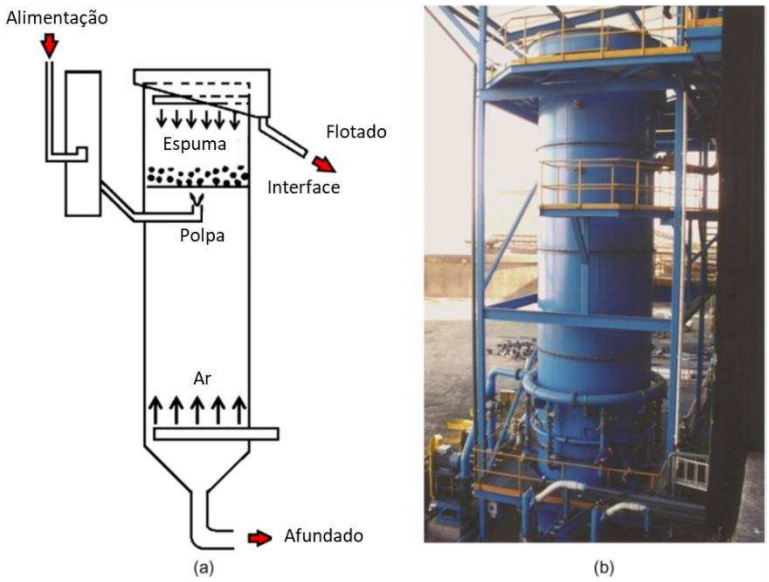



**Figura 3.9: Esquema de uma coluna de flotação (WILLS e FINCH, 2016)**

As colunas de flotação são fabricadas com alturas que variam de 1 a 13m, com diâmetros de até 3,5m. Elas podem possuir perfil quadrado ou circular, sendo que colunas cilíndricas são mais populares. Instrumentação e algum grau de controle automático são uma necessidade para a operação de uma coluna (WILLS e FINCH, 2016).

Nesse tipo de células, o ar é injetado através de um bico para produzir o contato entre as partículas e o ar. O jato de ar não é usado apenas para promover aeração, mas também para suspender as partículas e prover sua circulação. Isso significa que uma quantidade excessiva de ar deve ser utilizada e como resultado, esse tipo de célula não é tão utilizado em plantas industriais como as células mecânicas. Em uma coluna de flotação, o ar é introduzido na base da coluna e a alimentação é introduzida próximo ao topo da coluna em um fluxo contracorrente. Em uma coluna de flotação, a agitação não é suficiente para manter partículas grandes em suspensão, não sendo ideal, portanto, para esse tipo de partículas. As colunas de flotação, inicialmente desenvolvidas na década de 1960 como células de limpeza, se tornaram comuns

em todas as etapas de circuitos de plantas novas, apresentando diâmetros de até 5m (GUPTA e YAN, 2016).

As colunas de flotação modernas foram desenvolvidas no Canadá no início dos anos 1960 e foram inicialmente utilizadas na etapa *cleaner* para produzir concentrados de molibdênio. Desde então, muitos dos produtores de cobre-molibdênio instalaram colunas em seus processos e seu uso se expandiram para etapas *rougher*, *cleaner* e *scavenger* de uma variedade de tipos de minério, em diversas partes do mundo. O final dos anos 1980 e início dos anos 1990 viram um foco na pesquisa sobre colunas de flotação, com congressos internacionais e diversos artigos científicos sobre o assunto (WILLS e FINCH, 2016).

Sistemas de água de lavagem podem ser montado sobre ou dentro da zona de espuma. A montagem externa é preferida uma vez que sistemas imersos estão propensos a entupimentos e não apresentam a possibilidade de inspeção visual, embora algumas empresas de mineração prefiram o sistema imerso na espuma (WILLS e FINCH, 2016). A Figura 3.10 mostra dois tipos de sistemas de água de lavagem: tubos de irrigação e montagem com bandeja de gotejamento.

**Figura 3.10: Sistemas de água de lavagem: (a) tubos de irrigação (b) bandeja de gotejamento (WILLS e FINCH, 2016)**

As bolhas são introduzidas nas colunas através de aeradores. Inicialmente, todos os aeradores eram dispositivos internos, com injeção de ar na coluna através de meio poroso, usualmente borracha perfurada ou tecido filtrante. Esses dispositivos sofriam desgaste e entupimento por partículas. Atualmente, aeradores a jato e dispositivos de geração externa de bolhas são predominantes na indústria. Ambos os sistemas permitem sua troca e manutenção *online*, já que podem ser isolados por válvulas individualmente. Alguns sistemas permitem a adição de água ou polpa ao aerador, que mostraram melhorar a produção de bolhas finas. Nos últimos anos, os aeradores mais utilizados incluem *SlamJets*, *SparJets*, *Microcel* e *CavTube* (WILLS e FINCH, 2016).

Aeradores a jato forçam ar a alta pressão (30 a 100psi) em um tubo com um orifício de tipicamente 1mm de diâmetro. Testes de laboratório sugerem que existem dois mecanismos de produção de bolhas nesses dispositivos: cisalhamento ao longo da superfície do dispositivo como resposta a dosagem de espumante e quebra por turbulência no final do dispositivo que produz bolhas maiores e não tem relação com o espumante. Um exemplo de um aerador a jato interno é o *SlamJet*, mostrado na Figura 3.11, que é um tubo de injeção de gás equipado com um mecanismo de controle e fechamento da vazão de ar. O *SparJet* é um desenvolvimento mais recente contendo um bico com proteção ao desgaste e válvula agulha, o que reduz a probabilidade de entupimento (WILLS e FINCH, 2016).

**Figura 3.11: Aerador *SlamJet* (WILLS e FINCH, 2016)**

O sistema externo *Microcel*, visto na Figura 3.12, bombeia polpa retirada da coluna para um misturador estático em linha onde a polpa mistura-se e cisalha-se com o ar injetado em uma dispersão de bolhas que é retornada para a coluna (WILLS e FINCH, 2016).

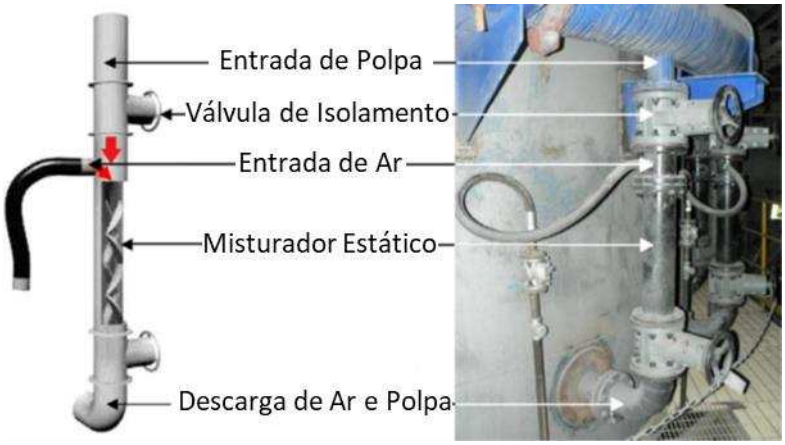



**Figura 3.12: Aerador *Microcel* (WILLS e FINCH, 2016)**

No sistema de tubo de cavitação (*CavTube*), uma mistura polpa/gás é alimentada ao tubo em que uma queda de pressão é estabelecida devido a geometria interna dele, resultando em uma cavitação hidrodinâmica para produzir partículas finas. Esse processo resulta em nucleação e crescimento de bolhas na superfície das partículas, aumentando a colisão bolha partícula como o mecanismo de coleta. A adição de espumante no sistema auxilia no processo de geração de bolhas finas. Esse sistema também é um tipo de areação externa que requer recirculação de polpa a partir de um distribuidor, como pode ser visto na Figura 3.13 (WILLS e FINCH, 2016).

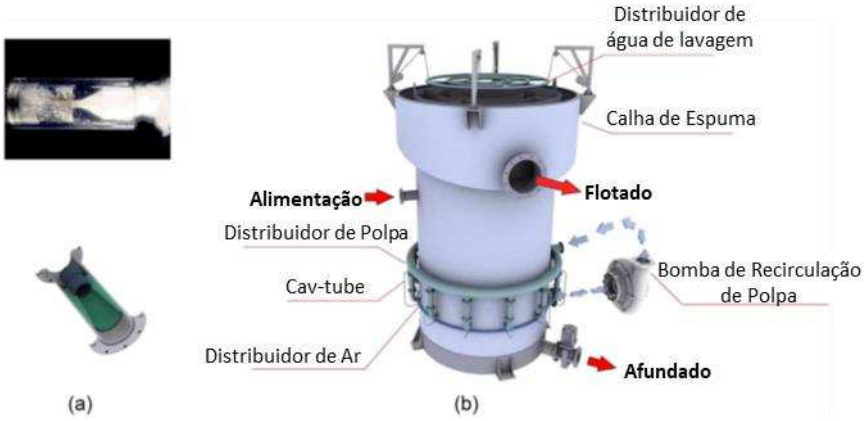



**Figura 3.13: Aerador *CavTube* (WILLS e FINCH, 2016)**

A operação de uma coluna de flotação é caracterizada por variáveis específicas, como altura da camada de espuma, taxa de *bias*, vazão de ar, *hold-up* de ar, tamanho de bolha e fluxo de área superficial de bolhas. As últimas três variáveis são conhecidas como propriedades de dispersão de gás e estão estritamente ligadas ao desempenho metalúrgico da flotação (VILAR, DESBIENS, MALDONADO e BOUCHARD, 2010).

**Altura da camada de espuma**: como o nome indica, essa variável corresponde a distância entre o topo da coluna (*overflow*) e a posição de interface entre polpa e espuma. Ela determina a posição relativa das zonas de coleta e de limpeza, e consequentemente, o tempo médio de residência na zona de coleta da coluna. Dessa forma, deve ser monitorada e controlada atentamente para uma operação estável (VILAR, DESBIENS, MALDONADO e BOUCHARD, 2010).

**Taxa de *Bias***: provavelmente uma das maiores características de uma coluna de flotação seja a adição de um fino jato de água, chamado de água de lavagem, na superfície do equipamento. Além de estabilizar a espuma e facilitar a remoção dos agregados de bolhas-partículas, esse fluxo lava o material hidrofílico que foi arrastado para a zona de espuma. Essa lavagem só pode

acontecer se um balanço de água apropriado é garantido na zona de coleta de modo que parte dessa água de lavagem atinja a parte mais baixa da zona de espuma. Esse fluxo líquido de água para baixo é chamado de taxa de bias. Ele é comumente expresso como taxa superficial de bias ($J_b$ – cm/s), ou seja, a vazão de bias (cm³/s) dividida área da seção transversal da coluna (cm²). A taxa de bias é considerada positiva se a água se move para baixo e negativa, do contrário. Quando essa última ocorre, o flotado apresenta mais partículas hidrofílicas arrastadas e o teor diminui. Enquanto alguns autores sugerem que uma pequena, mas positiva, taxa de bias garante uma função de limpeza adequada, outros estabeleceram que pequenos valores não contribuem para a redução do arraste de partículas. Por outro lado, altas taxas de bias (acima de 0,4cm/s) são deletérias uma vez que elas aumentam a mistura da espuma e consequentemente, o retorno de partículas coletadas para a polpa. Infelizmente, todas essas observações são, em sua maioria, qualitativas já que a medida da taxa de bias, especialmente em sistemas trifásicos, não é confiável (VILAR, DESBIENS, MALDONADO e BOUCHARD, 2010).

***Hold-up* de gás**: essa variável representa a fração volumétrica na zona considerada (de espuma ou de coleta). Ela é estimada através da Equação 3.1. Seu valor depende fortemente da vazão de ar, concentração de espumante, taxa de bias e concentração de sólidos (VILAR, DESBIENS, MALDONADO e BOUCHARD, 2010).

$$\varepsilon_g(\%) = 100 \cdot \frac{Volume\ de\ bolhas}{Volume\ total} \qquad \text{(Equação 3.1)}$$

**Tamanho de bolha e fluxo de área superficial de bolhas**: o tamanho de bolha é definido como o diâmetro da bolha esférica equivalente. A coleta de partículas minerais por bolhas depende fortemente na quantidade de superfície de bolha disponível que passa pela coluna. Portanto, tanto sua área superficial quanto sua velocidade ascendente são importantes. Consequentemente, uma maneira mais adequada de monitorar a influência do gás no processo de flotação é através do fluxo de área superficial de bolhas ($S_b$), definido como a área superficial das bolhas em uma seção da coluna por unidade de tempo. Essa variável é definida pela Equação 3.2 (VILAR, DESBIENS, MALDONADO e BOUCHARD, 2010).

$$S_b = \frac{n_b A_b}{A_c} = \frac{6 J_g}{D_b} \qquad \text{(Equação 3.2)}$$

Em que $n_b$ é a unidade de tempo, $A_b$ a superfície de uma bolha de diâmetro $D_b$, $A_c$ é a seção transversal da coluna, $J_g$ é a velocidade superficial do gás (vazão volumétrica do gás dividida pela seção transversal da coluna).

### 3.1.4 Requerimentos para a Flotação

Segundo GUPTA e YAN (2016), independentemente do tipo da célula de flotação utilizada, para que a flotação ocorra, um equipamento necessita de dois requerimentos principais:

- Suspensão
- Aeração

Na suspensão, é essencial que o rotor ou jato de ar do equipamento seja capas de manter os sólidos em suspensão. Se o grau de agitação é inadequado, então sólidos, especialmente de maior tamanho irão se sedimentar, prejudicando o contato bolha-partícula. Uma aeração efetiva requer que as bolhas sejam finamente disseminadas e que a vazão de ar seja suficientemente grande não apenas para promover o contato suficiente das bolhas com as partículas, mas também para que uma camada espuma de altura aceitável seja estável, aliada com a correta dosagem de espumante (GUPTA e YAN, 2016).

Uma dificuldade encontrada na flotação é que seu desempenho é fortemente relacionado ao tamanho das partículas a serem flotadas, e que as alimentações das flotações contêm uma ampla variação de tamanho de partículas. De acordo com GUPTA e YAN (2016), os efeitos da velocidade do rotor e o tamanho de bolha sobre as partículas pode ser resumido da seguinte forma:

- Se a velocidade do rotor é muito baixa, as partículas não são mantidas em suspensão e quantidades significantes sedimentam na célula;
- Se a velocidade do rotor é muito alta, a turbulência na célula é suficiente para romper as ligações entre a bolhas e as partículas, diminuindo a recuperação;
- Se o tamanho da bolha é muito pequeno, as bolhas não possuem empuxo suficiente para carrear as partículas para a superfície;

- Se o tamanho da bolha é muito grande, menos bolhas serão geradas para uma vazão de ar constante, possuindo menos superfície para as partículas se aderindo, fazendo com que a recuperação caia.

Isso mostra os limites para as condições ótimas de velocidade do rotor e tamanho de bolhas para a flotação. Se a distribuição granulométrica é ampla, então as condições ótimas para a flotação de partículas grossas podem ser consideravelmente diferentes das condições ótimas de recuperação de partículas finas (GUPTA e YAN, 2016).

## 3.2 Controle Avançado de Processos e Lógica *Fuzzy* Aplicados à Flotação

A função principal de um Sistema de automação é fornecer informação no tempo e tomar ações rápidas para garantir uma operação segura e estável apesar de distúrbios externos e internos que afetam o processo. Para atingir esses objetivos, o sistema de automação requer a realização de um conjunto de funções, que podem ser divididas em duas categorias: funções básicas e funções avançadas. As funções básicas são funções fundamentais para qualquer sistema de automação para o controle e monitoramento do processo. As funções avançadas, que requerem a implantação das anteriores, são orientadas a analisar a informação e ao processo de tomada de decisão de alto nível, compreendendo ferramentas de análise de processo, otimização e detecção de falhas (SBARBARO e VILLAR, 2010). A relação entre essas funções é mostrada na Figura 3.14.

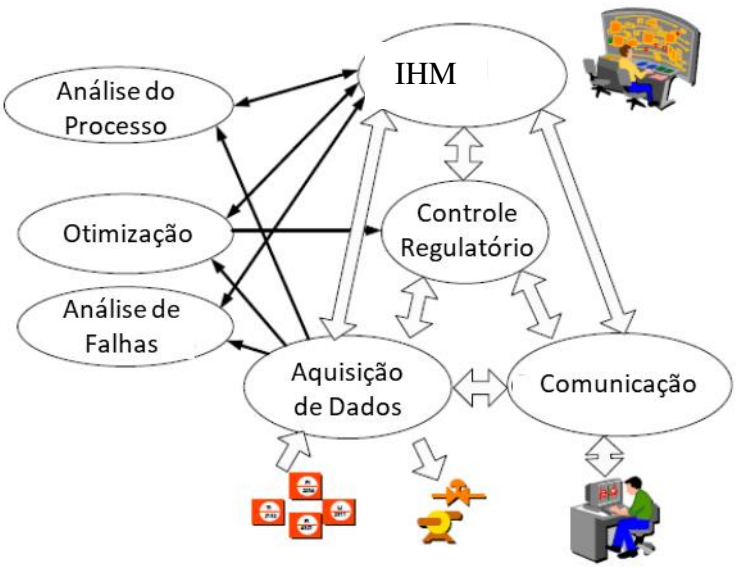



**Figura 3.14: Funções de um sistema de automação (SBARBARO e VILLAR, 2010)**

Para entender completamente as operações unitárias da flotação é importante desenvolver modelos abrangentes para avaliação das variáveis e suas várias interações. Um modelo apropriado seria capaz de predizer o potencial de recuperação do processo a partir de certos valores de entrada conhecidos. Adicionalmente, o modelamento da flotação traz diversos benefícios, com o controle e melhoria do processo de flotação dentro de uma situação industrial sendo o principal deles. A flotação é um processo de concentração com diversas fases, que envolve muitos micros processos complexos. A complicação dos mecanismos e a interdependência dos processos tipicamente fazem com que o desenvolvimento de modelos preditivos seja dificultado (SHAHBAZI, CHELGANI e MATIN, 2017).

Plantas de processamento mineral contêm operações integradas que envolvem diversos processos. Os benefícios oferecidos pela implantação dessas funções avançadas só podem ser atingidos se as especificações funcionais do sistema de automação são claramente definidas. Os benefícios de um sistema de automação podem ser classificados em tangíveis e intangíveis, sendo que os tangíveis podem ser facilmente avaliados em questões econômicas. Embora seja difícil definir valor monetário para benefícios intangíveis, eles são valiosos e reais. Uma avaliação do impacto em plantas de processamento mineral deve considerar aumento de produção, melhoria de estabilidade de processos, melhor utilização de matérias-primas, manutenção reduzida, segurança mais alta e maior conhecimento do processo (SBARBARO e VILLAR, 2010).

Apesar de existirem dispositivos sofisticados em plantas de processamento mineral (instrumentação e aquisição de dados), a grande quantidade de dados geralmente se acumula em seus históricos e são apenas parcialmente utilizados. Sua utilização para controle automático no beneficiamento mineral ainda é limitada, especialmente quando comparada a outras plantas industriais, como indústrias química e petroquímica. No contexto da globalização, com crescente competição internacional, a mineração está constantemente buscando reduzir os custos de produção enquanto aumentam a qualidade do produto e as taxas de produção. Uma forma de atingir esses objetivos é através da utilização de equipamentos melhores, o que implica em altos investimentos de capital. O mesmo também pode ser conseguido pelo processamento *online* de dados utilizando sensores e instrumentos de processos. O processamento online de dados consiste em automática e continuamente manipular os atuadores da planta, como válvulas e inversores de frequência. Conforme mostrado na Figura 3.15, o processamento online de

dados é composto de quatro camadas hierárquicas: instrumentação e controle regulatório; observação do processo; controle do processo; e otimização em tempo real (VILAR, DESBIENS, MALDONADO e BOUCHARD, 2010).

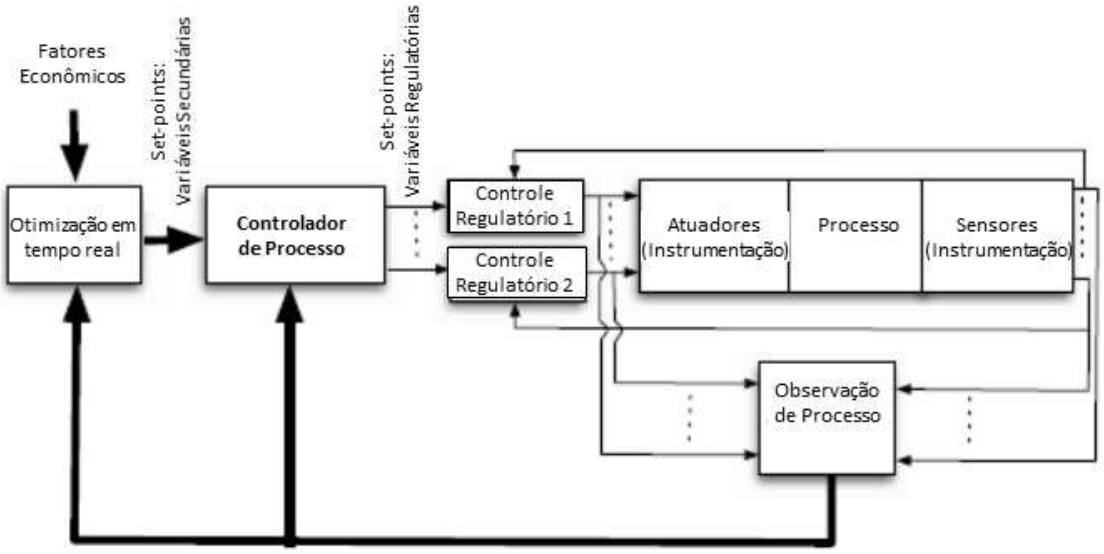



**Figura 3.15: Hierarquia de Controle (VILAR, DESBIENS, MALDONADO e BOUCHARD, 2010)**

O controle automático de células industriais de flotação representa um desafio significante devido ao número de variáveis, a sensibilidade das células de flotação à variação dessas variáveis e a complexidade de predizer o desempenho da flotação e de desenvolver uma estratégia para otimização (SHEAN, HADLER e CILLIER, 2017). Desenvolvimentos no controle de processo, particularmente em relação ao controle preditivo e inteligência artificial, continuam a evoluir. Além disso, novos sistemas de controle e otimização da flotação buscam otimizar a vazão de ar utilizando sistemas de visão para medir a resposta da flotação. Um modelo preditivo que pode determinar de maneira rápida e robusta os efeitos de mudanças na vazão de ar permitirá uma previsão dinâmica do nível mais acurada e precisa e consequentemente, estabilidade e desempenho melhorados dos bancos de flotação (SHEAN, HADLER, NEETHLING e CILLIERS, 2018).

Sistemas especialistas derivam de pesquisas em inteligência artificial e são programas que simulam o raciocínio humano na tomada de decisões. Essencialmente, eles são sistemas computacionais que atingem altos níveis de desempenho em tarefas que humanos requereriam anos de treinamento e experiência. Operadores humanos geralmente agem com regras gerais para aproximações, conhecidas como heurísticas. Como o conhecimento é expresso com algum

grau de incerteza. Ambiguidade e até contradição, a lógica *fuzzy* forma uma parte integral dos sistemas especialistas (WILLS e FINCH, 2016).

O desempenho da flotação é refletido na estrutura da superfície da espuma. Um sistema de controle efetivo é difícil de se alcançar devido à natureza não linear e dinâmico do processo. Os objetivos primários do controle de circuitos de flotação incluem melhorias nos parâmetros de desempenho, recuperação e teor de concentrado. Medidas online e estimativas dessas variáveis usualmente requerem instrumentos sofisticados que são caros para comprar e manter. Além disso, geralmente, a totalidade do concentrado dos circuitos de flotação vai para esses analisadores online e o comportamento do processo das unidades individuais não pode ser detectado (JAHEDSARAVANI et al., 2016).

Por essas razões, o modelamento e controle de modelos baseados na espuma, utilizando uma combinação de técnicas de visão artificial e controle inteligente (como lógica *fuzzy*) tem sido considerados como estratégias de controle alternativas e suplementares. A visão artificial é uma técnica não intrusiva, confiável e eficaz em termos de custo para o monitoramento e controle dos sistemas de flotação. O objetivo principal de um sistema de visão artificial é capturar automaticamente e medir as características visuais da espuma sobre diferentes condições de processo. As características extraídas da espuma podem então ser utilizadas como valores de entrada para um sistema de controle por feedback que manipula variáveis de processo escolhidas, como vazão de ar, altura da camada de espuma e dosagem de reagentes com o objetivo de manter o desempenho da flotação em um ponto ótimo. Sistemas especialistas e de lógica *fuzzy* são amplamente utilizados para controlar circuitos complexos de moagem e flotação. Os controladores *fuzzy* são baseados em regras simples e qualitativas de controle, não modelos matemáticos precisos. Sistemas de controles baseados em lógicas *fuzzy* podem, também, estender a capacidade do controle, mesmo em condições operacionais em que técnicas lineares de controle falham. (JAHEDSARAVANI et al., 2016)

O controle avançado tem se demonstrado através da aplicação de controle preditivo por modelo (MPC) e sistemas especialistas. O MPC oferece o potencial de um controle avançado de alta qualidade da flotação, entretanto ele depende de modelos dinâmicos para levar em consideração a relação entre os parâmetros de operação e as respostas medidas. O modelamento de sistemas de flotação, entretanto, permanece como um amplo campo de estudos. Por isso, muita pesquisa tem focado em sistemas especialista e de controle *fuzzy* para a flotação em escala laboratorial e industrial, embora sistemas híbridos de MPC tenham sido sugeridos. O desenvolvimento e

avanço da tecnologia de visão artificial, em particular, permitiu que sistemas de controle baseados em lógica *fuzzy* se tornassem mais amplamente adotados (SHEAN, HADLER e CILLIER, 2017).

O controle avançado de processos foi inicialmente implanto no processamento mineral no final dos anos 1980. Sistemas especialista permanecem o alicerce do controle e geralmente inclui inteligência artificial, lógica *fuzzy* e redes neurais. Usualmente, sistemas especialista e lógica *fuzzy* fornecem as leis de controle na forma de uma coleção de regras, enquanto redes neurais são usualmente utilizadas para construir modelos de processo que podem ser usados nas leis de controle. Nos últimos anos, as principais mudanças vieram da parte de sensores, em que pesquisas em sistemas de visão e acústicos levaram ao desenvolvimento de sensores que melhoraram o desempenho de sistemas de controle avançado (HERBST e FLINTOFF, 2012).

De acordo com CIPRIANO (2010), uma análise da informação disponível sobre controle avançado no processamento mineral revela que apesar da grande variedade de técnicas e metodologias existentes para o controle de processo, apenas algumas tornaram-se produtos comerciais. Essas técnicas podem ser divididas em duas categorias:

- Controle inteligente, incluindo sistemas especialistas e lógica fuzzy;
- Controle por modelos preditivos (MPC), utilizando modelos lineares ou não-lineares originados de modelos fenomenológicos ou empíricos ajustados para os dados operacionais.

Na engenharia, o conhecimento é formulado em termos de modelos matemáticos baseados nas leis da física e da química. Esses modelos são utilizados para analisar quantitativamente o comportamento do processo. Se os modelos são dinâmicos, eles podem ser empregados para desenvolver algoritmos de controle automático. Apesar de metodologias baseadas em modelo possuírem uma base sólida, em muitas plantas de processamento mineral baseiam-se, com sucesso, em decisões considerando suas experiências ou de outros colegas e supervisores. Esse conhecimento empírico pode ser formulado como regras de decisão do tipo “se” antecedente, “então” gere a consequência. Em aplicações de controle automático, o antecedente geralmente inclui comparações entre as variáveis medidas e os valores de referência. A consequência

implica em definir valores para as variáveis manipulados e enviá-los para os atuadores (CIPRIANO, 2010).

Uma das alternativas frequentemente adotadas para melhorar a robustez de um sistema de controle especialista para tratar incertezas e erros é a lógica *fuzzy*. Nessa abordagem, uma função de pertinência é definida para cada variável linguística (CIPRIANO, 2010).

O desenvolvimento de um controlador *fuzzy* requer conhecimento empírico e mental e é relacionado a regras linguísticas de *if-then*. Devido à falta de um modelo matemático dinâmico, ajustes nos parâmetros de controle são realizados através da avaliação do desempenho do sistema de controle sob diferentes condições. A fuzificação envolve a definição de um número de regras linguísticas conectando as variáveis de entrada e de saída, assim como os modelos matemáticos das funções de pertinência. O número de termos determina a caracterização linguística das variáveis. O número de variáveis controladas determina o número de termos em uma base de regras *fuzzy* e, então, o tempo de processamento (JAHEDSARAVANI et al., 2016).

A teoria de lógica *fuzzy* envolve o desenvolvimento de afirmações condicionais ordenadas, que fornecem uma descrição da estratégia de controle. A Figura 3.16 ilustra um sistema especialista baseado em inferência *fuzzy*. Ele consiste em três estágios: fuzificação, inferência baseada em regra *fuzzy* e defuzificação. Funções de pertinência possuem usualmente a forma triangular, trapezoidal e Gaussiana. Então, qualquer medida pode ser avaliada para determinar seu grau de pertinência a cada configuração *fuzzy* (WILLS e FINCH, 2016).

**Figura 3.16: Bloco diagrama de um Sistema de inferência fuzzy (WILLS e FINCH, 2016)**

Os graus de pertinência obtidos no estágio de fuzificação são usados para calcular as saídas do controlador. A regra base consiste em interações de conhecimento qualitativo entre variáveis

manipuladas e controladas. Os termos de controle são definidos como regras linguísticas. Os resultados indicaram que as características da espuma, particularmente o tamanho médio de bolha e a velocidade de espuma são altamente relacionados às variáveis de processo. O pH da polpa, a vazão de ar e a dosagem do espumante são as variáveis manipuladas de maior de maior significância. Os resultados demonstram que esse tipo de controle é capaz de lidar com os distúrbios do processo e acompanhar sinais de referência (JAHEDSARAVANI et al., 2016).

Para a avaliação de sistemas de flotação, de acordo com WILLS e FINCH (2016), os dois principais parâmetros medidos são o teor e a recuperação. O teor se refere ao conteúdo de um mineral ou metal dentro de um fluxo e a recuperação é o percentual do total de material de interesse contido em um fluxo que é direcionado para o concentrado e pode ser descrita conforme a Equação 3.3.

$$R = \frac{Cc}{Aa}\ x\ 100\% \qquad \text{(Equação 3.3)}$$

Em que *R* é a recuperação, *C* é a massa de concentrado, *A* é a massa de alimentação, *c* é o teor do mineral no concentrado e *a* é o teor desse mesmo mineral na alimentação. A Equação 3.4 mostra que, utilizando-se o princípio do balanço de massas, a Equação 3.3 pode ser reescrita em função apenas dos teores do mineral nos fluxos do circuito.

$$R = \frac{(a-e)c}{(c-e)a}\ x\ 100\% \qquad \text{(Equação 3.4)}$$

Em que *R* é a recuperação, *a* é o teor do mineral na alimentação, *e* é o teor desse mesmo mineral no rejeito e *c*, seu teor no concentrado.

Segundo WILLS e FINCH (2016), a implantação de estratégias de controle de alto nível, envolvendo teores e recuperação, no estágio de projeto de uma planta é desafiador, em parte porque as variáveis de controle mais significativas não são identificadas até que a experiência operacional da planta tenha sido atingia e, também, em parte porque padrões de controle de processo ainda não estão bem definidos. O objetivo de estratégias de controle de alto nível pode ser classificados em:

- Melhorar a eficiência metalúrgica, ou seja, produzir a melhor curva de recuperação-teor possível;
- Estabilizar o processo no teor de concentrado ótimo.

O desempenho da concentração mineral é ditado pela curva de recuperação-teor, que estabelece um compromisso entre a quantidade (recuperação) e a qualidade (teor) do concentrado produzido (VILAR, DESBIENS, MALDONADO e BOUCHARD, 2010). O controle do circuito no ponto de operação ótimo produzirá o melhor retorno econômico baseado na produção mesmo com distúrbios entrando no circuito, como mostrado na Figura 3.17.

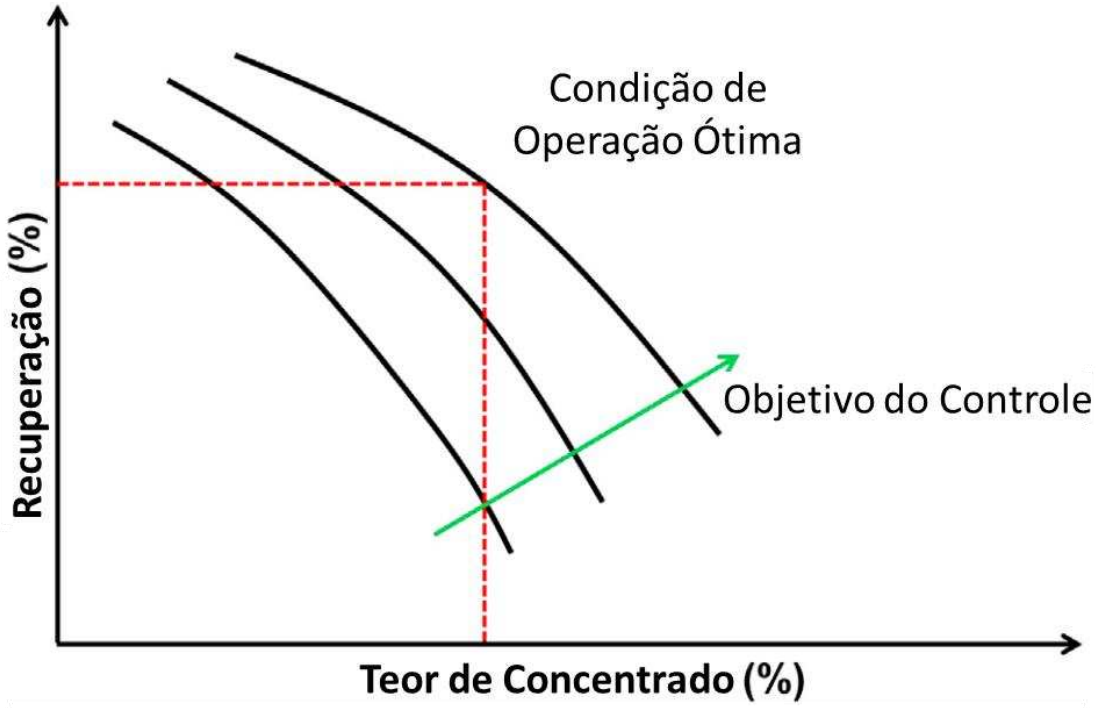



**Figura 3.17: Objetivos do controle da flotação (WILLS e FINCH, 2016)**

A função principal do controle da flotação é compensar as variações em mineralogia e flotabilidade. Variáveis manipuladas manual ou automaticamente que afetam o controle incluem vazões de massa, adição de reagentes, adição de ar, níveis de polpa, pH e cargas circulantes dentro do circuito. As melhores práticas envolvem o estabelecimento de objetivos básicos de controle, como a estabilização de níveis de tanques e vazões de ar e de reagentes. Controles estabilizantes mais avançados podem ser implantados como controle das dosagens de reagentes baseados em teores e massas entrando no circuito. Finalmente, o controle otimizante verdadeiro pode ser desenvolvido, como por exemplo, máxima recuperação em um determinado teor de concentrado (WILLS e FINCH, 2016). Em qualquer caso, controle avançado de alto nível não é factível até que uma operação estável seja inicialmente atingida, como mostra a Figura 3.18.

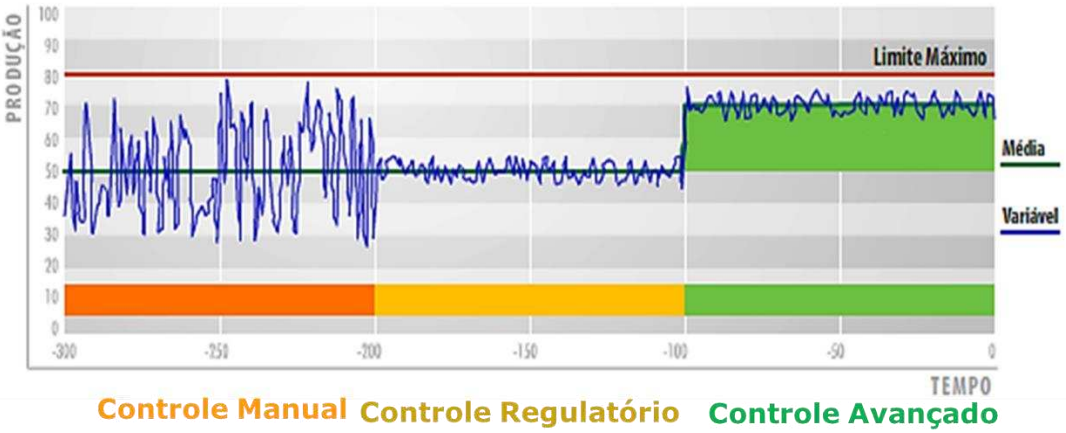



**Figura 3.18: Funções do controle em um processo**

A implantação de um controle avançado de processos pode superar as expectativas originais e o período de retorno financeiro tende a ser muito menor que no caso de grandes investimentos de capital, como questão de semanas a poucos meses. Isso pode ser explicado pelo fato que muitos computadores, controladores, sistemas de controle distribuído, controladores lógicos programáveis e sensores já fazem parte das plantas de processamento mineral, entretanto, apenas as funções mais simples são utilizadas, principalmente pela falta de recursos humanos (VILAR, DESBIENS, MALDONADO e BOUCHARD, 2010).

## 3.3 Sistemas de Visão Artificial Aplicados à Flotação

Os últimos anos viram um aumento significativo de disponibilidade de sensores industriais para o processamento mineral, alguns dos quais incorporam tecnologias altamente sofisticadas. Operadores de flotação frequentemente monitoram visualmente a superfície da espuma e fazem ajustes baseados na interpretação de sua aparência. Eles categorizam as espumas em um número de tipos distintos e desenvolvem estratégias de operação apropriadas para cada uma delas. Essa é a base para a proposta de utilizar o processamento de imagens para obter a caracterização da superfície da espuma. Sensores de processamento de imagem fornecem medidas quantitativas e oferecem a opção de tomar decisões automáticas, baseadas exclusivamente nos mesmos. Essas medidas podem ser classificadas como dinâmicas ou estáticas, as últimas correspondendo a tamanho e número de bolhas e as anteriores compreendendo velocidade e estabilidade de espuma (CIPRIANO, 2010).

Visão artificial tem sido utilizada com sucesso por muitos anos na indústria da manufatura para inspeção e montagem automáticos, mas teve sucesso limitado na indústria de processo uma vez que a natureza intrínseca da informação a ser extraída das imagens coletadas em cada campo de aplicação são fundamentalmente diferentes. Em circuitos de flotação, variações na textura e cor da espuma são relacionadas ao desempenho de separação, mas é difícil dizer qual seria a espuma perfeita. Além disso, uma combinação de alguns métodos é geralmente necessária para extrair a informação desejada das imagens, como cor e características texturais, e correlacioná-las às principais variáveis do processo (DUCHENSNE, 2010).

Existem dois desafios no controle do comportamento da espuma através de sistemas de análise de imagem: o primeiro é a representação do comportamento da superfície da espuma. A mobilidade e estabilidade da espuma estão diretamente relacionadas com a viscosidade dela. Existe uma diferença significativa na mobilidade da espuma na presença ou ausência de partículas minerais. Uma vez que as partículas sólidas podem afetar a viscosidade da espuma, é difícil descrever o comportamento da espuma utilizando uma equação de Laplace como em sistema de espuma com duas fases (sem a presença de partículas sólidas). O tamanho da bolha e a velocidade de escoamento da espuma são os requerimentos principais para a descrição do comportamento da espuma (ZHANG, TANG, AI e GUI, 2018).

O segundo desafio é que o comportamento ótimo da espuma (set-point ótimo) é desconhecido a cada ciclo de controle. Existem duas causas para esse fenômeno. Primeira, apesar de o objetivo final desse controle seja atingir o teor de concentrado e recuperação desejados, o comportamento da bolha não corresponde ao teor de concentrado em uma relação completamente direta, existem diferentes comportamentos de bolhas que resultam no mesmo teor de concentrado. A segunda causa é que devido a condições de trabalho diferentes na flotação, os custos de controlar o comportamento da espuma para diferentes estados são também diferentes. Até então, pouca pesquisa tem sido feita para encontrar o comportamento ótimo da superfície da espuma para a troca de reagentes (ZHANG, TANG, AI e GUI, 2018).

Na rotina de uma planta de mineral, operadores dos circuitos de flotação utilizam as características visuais da espuma para a tomarem decisões sobre o estado do processo. O trabalho de SILVA (2012), mostrou, através da análise de imagens, que existe uma relação entre as propriedades visuais da espuma de flotação e o desempenho operacional das colunas de flotação.

A visão artificial quantifica os atributos de imagem da espuma, como tamanho de bolha, velocidade de espuma, cor e estabilidade de bolha que são frequentemente utilizados para o controle manual da flotação por operadores experientes. Todas essas características têm sido utilizadas como a base para o sistema de controle nos últimos anos, com os controladores necessitando de uma sintonia para estabelecer uma amplitude aceitável do valor desejado (SHEAN, HADLER e CILLIER, 2017).

A análise de imagem tem se estabelecido como um bom meio de inferior, em tempo real, o desempenho da flotação. Além de correlacionar a aparência da espuma com o comportamento do sistema de flotação, o comportamento dinâmico da espuma também é um importante denominador do desempenho da flotação e, idealmente, essa informação também deveria ser levada em consideração (FU e ALDRICH, 2016).

Os teores minerais, em sua maioria, ainda são medidos periodicamente em laboratórios, o que não se torna útil em aplicações de controle em tempo real. Apesar de que a medição online com analisadores de raios-X possa ser utilizada, eles são equipamentos caros e geralmente apresentam acurácia limitada e longos períodos de amostragem. Em contraste, sistemas de visão artificial oferecem uma alternativa interessante para medição online de teor em sistemas de flotação, uma vez que são relativamente baratos e podem fornecer estimativas rápidas do teor do material. Por exemplo, diversos estudos indicaram que o teor de concentrado de um sistema de flotação pode ser inferido a partir de características espectrais e texturais extraídas de imagens das espumas (FU e ALDRICH, 2016).

O teor é tradicionalmente medido utilizando técnicas analíticas de laboratório, entretanto, nos últimos anos, analisadores *online* de fluxo foram desenvolvidos e introduzidos em plantas para medir a concentração de diversos minerais presentes no fluxo. A maioria deles são baseados em fluorescência de raios-x, como o analisador de elementos Courier™ da Outotec. Esses analisadores são caros e utilizados para vários fluxos, resultando em tempos entre amostras da ordem de dez minutos para um determinado fluxo. Para controle de processos, houve um incentivo em reduzir o tempo de amostragem para melhor capturar a dinâmica do processo e o impacto de distúrbios rápidos. Além disso, busca-se meios de monitorar todos os fluxos dos circuitos de flotação a um baixo custo. Sensores de visão artificial foram intensamente pesquisados durante os anos 1990 e 2000, essencialmente como uma solução para inferir o teor do concentrado através da utilização de imagens (DUCHENSNE, 2010).

Segundo DUCHENSNE (2010), o teor do concentrado se correlaciona com a cor e características texturais da espuma, como pode ser visto na Figura 3.19, que mostra quatro diferentes imagens correspondendo a teores de zinco de 44, 49, 52 e 54%. Os minerais de esfalerita na superfície da espuma possuem uma cor amarronzada. Note que à medida que o teor de zinco sobe, mais áreas marrons aparecem na superfície da espuma. Um modelo de calibração entre as características da espuma e o teor de concentrado pode ser desenvolvida para uma estimativa do teor *online*.

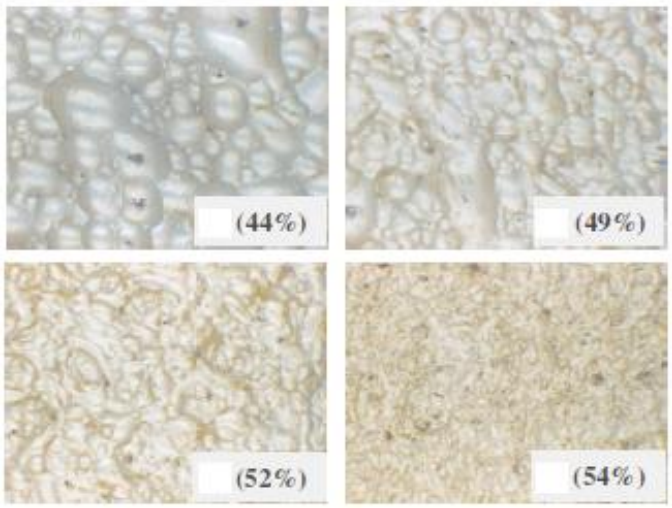



**Figura 3.19: Imagens de flotação com teores crescentes de zinco (DUCHENSNE, 2010)**

Isso serve também para mostrar a base e as limitações dessa abordagem. Um mineral não pode ser detectado por análise de imagem se mudanças em sua concentração não introduzem uma distinção nas características da superfície da espuma. Não se espera que uma solução simples e barata como essa substitua análise de laboratório para controle de qualidade de produtos. Entretanto, os resultados obtidos podem ser utilizados para reagir mais rapidamente aos distúrbios verificados no processo. Variações em condições de iluminação geram impacto nas estimativas de teor. Adicionalmente, a escolha do tipo da fonte de luz também é muito importante. Luzes apresentando um espectro de emissão plano e estável durante seu tempo de vida útil contribuem para a robustez dos modelos (DUCHENSNE, 2010).

A tecnologia de visão artificial agora oferece meios viáveis de monitoramento e controle de sistemas de flotação. A relação entre as condições do processo e o tamanho das bolhas superficiais bem como o desempenho do processo de flotação de um minério de cobre sulfetado são discutidos e modelados por redes neurais. Os experimentos de flotação são conduzidos em

uma variedade de condições de processo (vazão de ar, % de sólidos, dosagem de coletor e espumante, pH) e tamanho médio das bolhas, com os parâmetros metalúrgicos sendo determinados para cada teste. Os resultados mostram que existe uma forte correlação entre as condições de processo e o tamanho médio das bolhas, o que é de vital importância para os objetivos de controle. Apesar de os parâmetros metalúrgicos poder serem estimados apenas pelo tamanho médio das bolhas, outras características da espuma (velocidade de transbordo, cor e estabilidade) necessitam ser medidas para se alcançar predições mais acuradas do desempenho do processo (HOSSEIN, HAJI AMIN, MASSINAEI e MEHRSHAD, 2015).

Nesses estudos, elementos que caracterizavam a aparência da espuma foram utilizados para inferir o desempenho do sistema de flotação. Entretanto, o comportamento dinâmico da espuma também fornece informação importante sobre o desempenho do processo. Tradicionalmente, a velocidade da espuma e sua estabilidade têm sido medidas explicitamente pela comparação de imagens da flotação ao longo do tempo. Isso apresenta-se como uma abordagem difícil, uma vez que não é fácil acompanhar as regiões locais da espuma. Como resultado, poucos estudos consideraram os efeitos da estabilidade e da velocidade da espuma na estimativa online do teor de espumas (FU e ALDRICH, 2016).

Os operadores de campo e os pesquisadores sabem bem que o desempenho do processo de flotação é refletido na estrutura da fase de espuma. Isso é baseado no pressuposto que os processos ocorrendo na polpa deixam sua assinatura na superfície da espuma. A tecnologia de visão artificial apresenta uma abordagem não-intrusiva e confiável para o monitoramento e controle dos circuitos de flotação (HOSSEIN, HAJI AMIN, MASSINAEI e MEHRSHAD, 2015).

Embora essa questão tenha sido percebida há um bom tempo, a maioria dos sistemas de visão configura a condição ótima da superfície da espuma baseado na experiência do operador. O método de agregação correlaciona o comportamento ótimo da superfície da espuma ao teor da alimentação. Nesse método, o teor de alimentação é classificado em diferentes aglomerados *off-line* e o comportamento ótimo da espuma para cada aglomerado é definido manualmente com antecedência. Considerando que a experiência abundante dos operadores está escondida no histórico dos eventos de controle da flotação, a relação entre o comportamento da bolha e o tempo de modificação da dosagem de reagente, bem como o comportamento da espuma que corresponde ao teor de concentrado desejado pode ser retirado a partir desses dados históricos utilizando o método de *fuzzy* a priori (ZHANG, TANG, AI e GUI, 2018).

No estudo de JAHEDSARAVANI, MASSINAEI e MARHABAN (2017), uma célula de flotação de laboratório equipada com uma câmera sobre a superfície da espuma foi operada em diferentes condições de processo. O desempenho metalúrgico e as características da espuma foram medidos para cada teste. Os dados de vídeo e metalúrgicos foram comparados para diferentes experimentos.

Nesse estudo, é proposto um sistema de controle em tempo real incluindo um sistema de análise de imagem da espuma da flotação, um sistema de predição para estimativa dos parâmetros de desempenho, e finalmente, um controlador *fuzzy* baseado em modelo. Os resultados indicam que as variáveis do processo afetam os parâmetros metalúrgicos na seguinte ordem de intensidade: pH, vazão de ar, dosagem de espumante, % de sólidos, e dosagem do coletor (JAHEDSARAVANI, MASSINAEI e MARHABAN, 2017).

O sistema de controle proposto requer um modelo para a espuma da flotação, usando uma rede neural de 3 camadas. Adicionalmente, a relação entre os dados de imagem e os parâmetros metalúrgicos também foi modelada usando uma rede neural de 3 camadas. Na verdade, as saídas do primeiro modelo são entradas para o segundo e os dois modelos trabalham em série. Para o controle *fuzzy*, cinco funções de pertinência foram escolhidas para as variáveis manipuladas e controladas. Funções de pertinência triangulares foram usadas devido a sua simplicidade e inelegibilidade. A base das regras IF-THEN são os componentes mais críticos de um controlador *fuzzy*, devendo ser cuidadosamente escritas, de uma maneira efetiva e simples. A fim de se avaliar o desempenho do controlador *fuzzy* em lidar com distúrbios do processo, três etapas de simulação foram realizadas no ambiente de simulação Simulink do Matlab (JAHEDSARAVANI, MASSINAEI e MARHABAN, 2017).

Os resultados de simulação mostraram que o sistema proposto é capaz de estimar acuradamente os parâmetros de desempenho do a partir das variáveis de processo em diferentes condições. Os resultados promissores indicam que o sistema pode se tornar em um desenvolvimento de um sistema de controle on-line baseado em um monitoramento em tempo real do desempenho da flotação (JAHEDSARAVANI, MASSINAEI e MARHABAN, 2017).

Na flotação, existem diversos trabalhos que utilizaram técnicas de mineração de dados. Por exemplo, para modelar o desempenho metalúrgico de uma usina de concentração de cobre em função das variáveis de processo, várias abordagens de mineração de dados foram introduzidas. Para realização do controle, a relação causal entre reagentes e o comportamento das bolhas foi modelada por uma rede neural. Baseado no modelo de inferência causal, uma estratégia de

controle por modelo preditivo (MPC da sigla em inglês) foi introduzida para dedução das dosagens ótimas de reagentes (ZHANG, TANG, AI e GUI, 2018).

Sabe-se que o tamanho da bolha na superfície da espuma é altamente relacionado às condições operacionais e desempenho do processo. HOSSEIN, HAJI AMIN, MASSINAEI e MEHRSHAD (2015) aproveitaram a relação entre as condições operacionais e o tamanho da bolha assim como os parâmetros metalúrgicos é de grande importância para o propósito de controle. Seguindo uma análise de variância (ANOVA) sobre os efeitos das variáveis da flotação, elas afetam o tamanho das bolhas na seguinte sequência: vazão de ar, % de sólidos da polpa, dosagem de espumante, pH da polpa, dosagem de coletor.

Geralmente, o comportamento da superfície da espuma pode ser descrito pela textura da imagem, pela velocidade de transbordo da espuma, pela cor da espuma e tamanho das bolhas através de segmentação de imagem. Desses, os mais importantes são a velocidade da espuma e tamanho de bolha. Para determinação do tamanho da bolha, o pré-requisito é determinar o ponto de luz no topo de cada bolha, sendo utilizado como um marcador. A etapa *rougher* de flotação afeta diretamente o desempenho da etapa *cleaner* que vem na sequência. Da perspectiva de um controle ótimo, é crucial que a etapa *rougher* seja controlada em um estado ótimo, de modo que o teor de concentrado correspondente seja estável e alcance o valor desejado. Uma vez que a flotação emprega bolhas de ar para seletivamente coletar certas partículas na polpa, o teor e a recuperação dos minerais de interesse no concentrado são significativamente afetados pelo comportamento da espuma. Portanto, o controle da etapa *rougher* para uma condição otimizada pode ser realizado pelo controle preciso do comportamento da superfície da espuma (ZHANG, TANG, AI e GUI, 2018).

A velocidade da espuma é a variável principal de interesse dos operadores atualmente. Utilizando controle de ar e de nível de camada de espuma, estratégias de controle avançado buscam manter a velocidade da espuma em determinado valor para cada banco na célula, levando-se em consideração que a cinética usualmente significa fluxos mais rápidos no início do banco. Em termos de valor adicionado, em uma boa estratégia de controle, esses sensores avançados tendem a gerar melhorias de recuperação da ordem de 1,5% ou mais para um mesmo teor de concentrado (HERBST e FLINTOFF, 2012).

A velocidade da espuma tem o objetivo de capturar o comportamento dinâmico da espuma. Ela pode ser quantificada através do rastreamento do movimento da espuma em dois quadros (frames) consecutivos. Em geral, a distância do movimento de dois quadros consecutivos é

medida como a velocidade da espuma, a partir de uma taxa de quadros por segundos conhecida. Na flotação de bauxita, Liu et al argumentaram que a velocidade da espuma poderia ser caracterizada como a velocidade de campo que inclui todos os movimentos individuais de cada bolha. Eles afirmam que cada bolha individual na espuma tem sua própria velocidade e direção de movimento. Na verdade, na flotação de zinco, a câmera de vídeo deve ser localizada em um local em que o bloco de flotação é relativamente estável. De acordo com a experiência de operadores, a velocidade da espuma na direção da descarga afeta diretamente o desempenho da flotação. A velocidade da espuma em outras direções é causada principalmente pela coalescência de bolhas e estouros (ZHANG, TANG, AI e GUI, 2018).

Na maioria das plantas minerais, o desempenho da flotação é monitorado pelo olho nu de operadores e a dosagem de reagentes são modificadas baseadas em suas interpretações do comportamento da espuma. Nesse processo, o comportamento da espuma não é usado apenas como um indicador da condição de trabalho da espuma, mas também como um objetivo de controle porque o objetivo principal de um circuito de flotação é atingir a recuperação e o teor de concentrado desejados. Entretanto, o teor de concentrado ou recuperação na maioria das plantas de flotação não podem ser medidos em tempo real. Então, esses indicadores metalúrgicos não são diretamente controlados, mas indiretamente através da aparência da espuma. Para atingir o controle do comportamento da superfície da espuma, a aparência ideal da espuma utilizada como ponto de ajuste ótimo precisa ser determina anteriormente. Existem dois requisitos para a geração do ponto de ajuste: seu teor de concentrado correspondente deve ser o valor desejado e, uma vez que os custos para controlar o comportamento da espuma são diferentes para diferentes cenários, o ponto de ajuste deve ser adaptativo para a condição de trabalho do momento (ZHANG, TANG, AI e GUI, 2018).

Relações entre as propriedades visuais e as variáveis de processo refletem características metalúrgicas importantes e respondem a mudanças em variáveis manipuladas. Estimativas do desempenho metalúrgico a partir do comportamento da espuma têm um papel central na detecção do desempenho do processo e controle por *feedback* dele. Dessa forma, pesquisadores acadêmicos e da indústria têm se dedicado a controles da flotação baseados em sistemas de visão computacional (ZHANG, TANG, AI e GUI, 2018).

# 4 METODOLOGIA

A metodologia utilizada nesse trabalho envolveu 4 etapas:

- Instalação de câmeras e luminárias sobre as colunas;
- Amostragem e calibração dos softwares de análise de imagem;
- Implantação do Controle Avançado de Processo;
- Avaliação do impacto nos parâmetros de teor e recuperação.

De modo geral, a metodologia consistiu em utilizar as informações fornecidas em tempo real pelos softwares de análise de imagem para otimizar o processo de flotação, manipulando as variáveis operacionais a fim de se buscar uma maior estabilidade e maior desempenho do circuito em termos de recuperação.

## 4.1 Instalação de câmeras e luminárias

Foram utilizadas câmeras de alta resolução, com proteção IP66, com a possibilidade de conectar várias câmeras em apenas um computador. Para iluminação do ponto de medição, são utilizadas luminárias LED de alta potência, conforme visto na Figura 4.1. A utilização da luminária, além de garantir uma boa iluminação da área analisada, minimiza as variações de iluminação observadas durante o dia ou noite, produzindo imagens com características constantes.

**Figura 4.1: Câmera e luminária utilizadas para a coleta de imagens**

Para proteger da luz do sol, de sujeiras, impactos e chuva, foram utilizadas caixas escuras para acondicionar as câmeras. Elas foram produzidas em aço inox e instaladas sobre as células de

flotação próximo à borda dessas células para capturar o transbordo da espuma para as calhas de coleta, conforme Figura 4.2.

**Figura 4.2: Exemplos de caixas escuras para câmeras**

A estrutura de rede utilizada para transmitir as imagens e, posteriormente, as características analisadas das mesmas é mostrada na Figura 4.3. Devido à distância entre a planta industrial e a sala de controle, faz-se necessário o uso de fibra ótica para que as imagens possam ser transmitidas sem perdas. Foi utilizado, ainda, um computador para processar as imagens nos softwares OptVision Froth e OptVision Grade, de propriedade da empresa brasileira CEMI, que serão descritos na sequência.

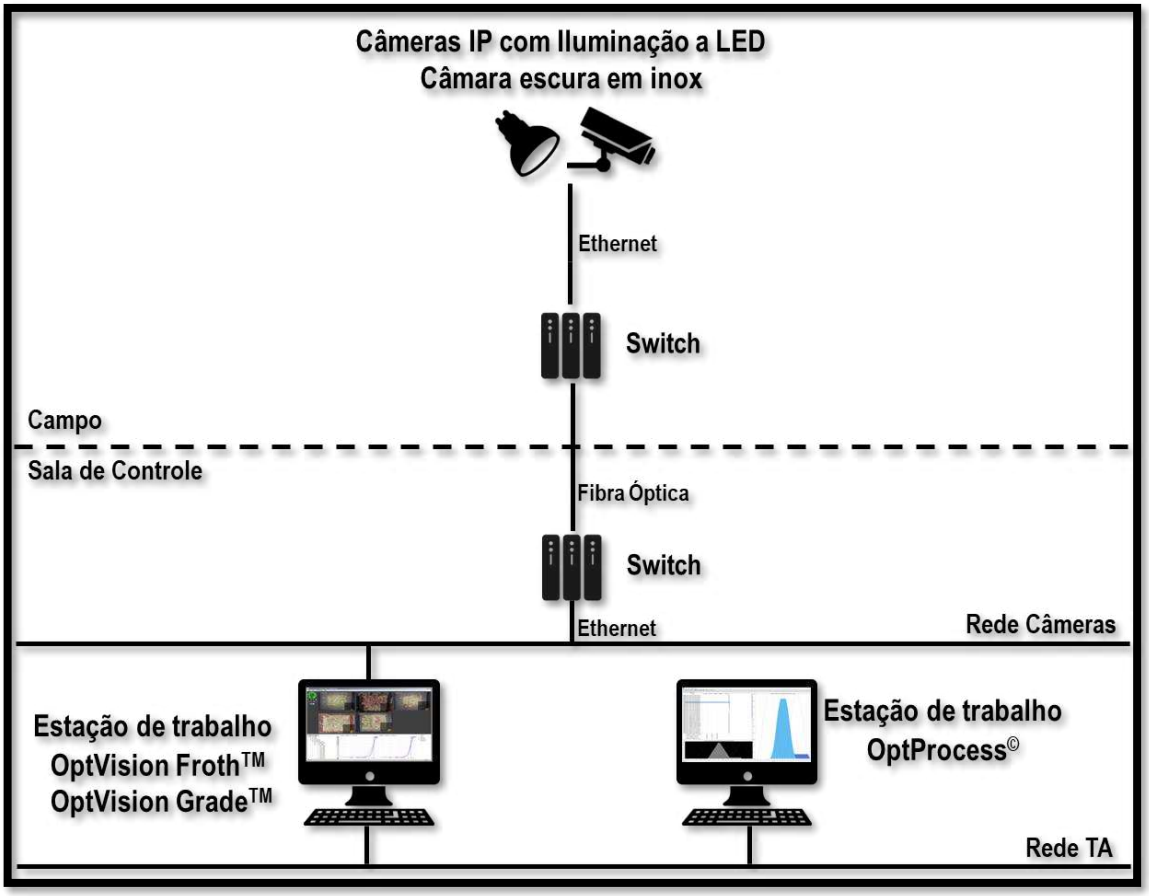



**Figura 4.3: Estrutura de rede utilizada**

## 4.2 Amostragem e calibração dos *softwares* de análise de imagem

Os softwares de análise de imagem utilizados no presente trabalho fazem parte do pacote OptVision da CEMI, uma empresa de tecnologia e serviços de consultoria na área de processos minerais com sede em Nova Lima, Minas Gerais. O sistema OptVision utiliza modernas técnicas de análise de imagem para fornecer informações importantes ao controle de processos. Nesse trabalho foram utilizadas as instâncias OptVision Froth para medir velocidade de transbordo de espuma e tamanho médio de bolhas e OptVision Grade para medir o teor dos elementos principais contidos na espuma flotada.

### 4.2.1 OptVision Froth

O OptVision Froth é uma tecnologia altamente inovadora, desenvolvida para medição on-line contínua de propriedades da espuma em processos de flotação, especialmente a velocidade de transbordo e o tamanho médio de bolhas, como visto na Figura 4.4. O software OptVision Froth pode comunicar-se com sistemas supervisórios, sistemas especialistas, PIMS, dentre outros, utilizando o protocolo OPC.

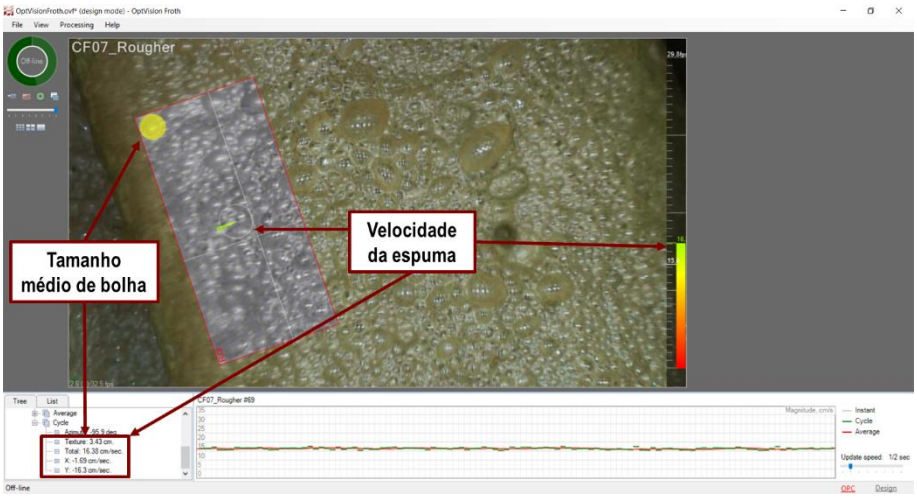



**Figura 4.4: Interface típica do OptVision Froth**

Os algoritmos do OptVision Froth são codificados com uma tecnologia para programação que permite a realização de cálculos com velocidade sem precedentes. Como exemplo, é possível com um computador PC processar entre 20 e 30 imagens por segundo, de várias câmeras simultaneamente, realizando medições de velocidade da espuma. No software OptVision Froth, a velocidade das bolhas é medida utilizando o algoritmo piramidal iterativo Lucas-Kanade, possibilitando o rastreamento de imagens de forma confiável, rápida e eficiente. A seleção dos pontos a serem rastreados baseia-se na análise dos autovalores mínimos da matriz gradiente dos pixels da imagem.

A calibração do software consiste em colocar um objeto de tamanho conhecido sobre a superfície da espuma e entrar com esse dado nas configurações do software, conforme visto na Figura 4.5. Essa calibração deve ser feita apenas quando a posição da câmera instalada sofrer alguma alteração. O OptVision Froth permite realizar ajustes e rotações na zona de medição, conhecida como região de interesse (ROI). Além disso, imagens informativas podem ser arquivadas automaticamente, com data e horário.

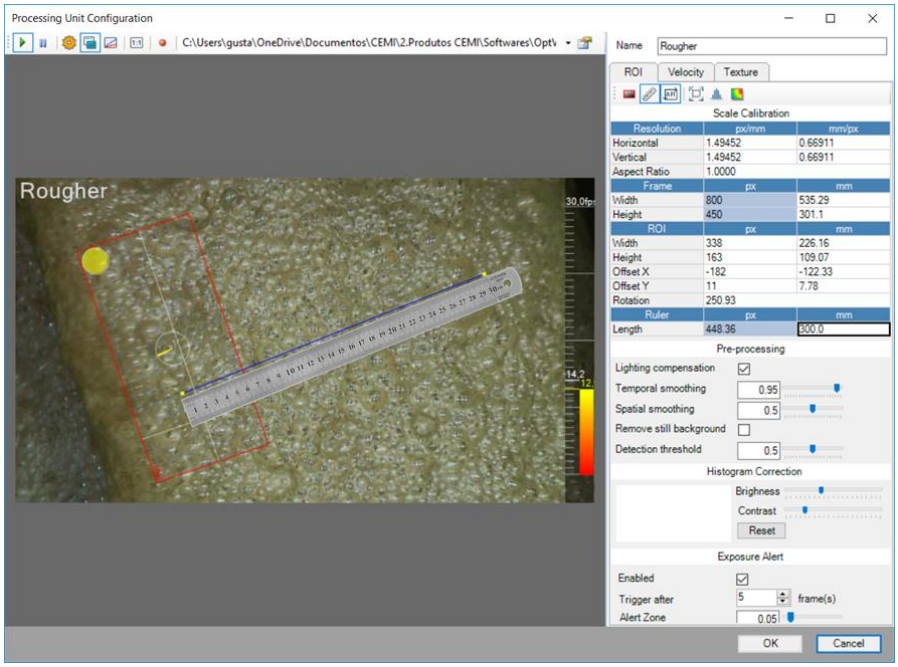



**Figura 4.5: Calibração OptVision Froth**

### 4.2.2 OptVision Grade

O OptVision Grade é uma tecnologia desenvolvida para medição de teores a partir do espectro de cores e características texturais da imagem analisada. Essa solução representa um marco na análise de teor em tempo real com analisadores não radioativos, de fácil calibração e manutenção. A motivação para desenvolver o OptVision Grade nasceu da observação que, no processo de flotação, os operadores controlavam a qualidade do material flotado de acordo com a cor da espuma nas células. Eles eram capazes de classificar visualmente os tipos de espuma em diferentes categorias, cada uma delas associadas a um determinado teor dos elementos constituintes. A Figura 4.6 mostra a interface do software em uma aplicação em que dois elementos são analisados (colunas à direita da imagem).

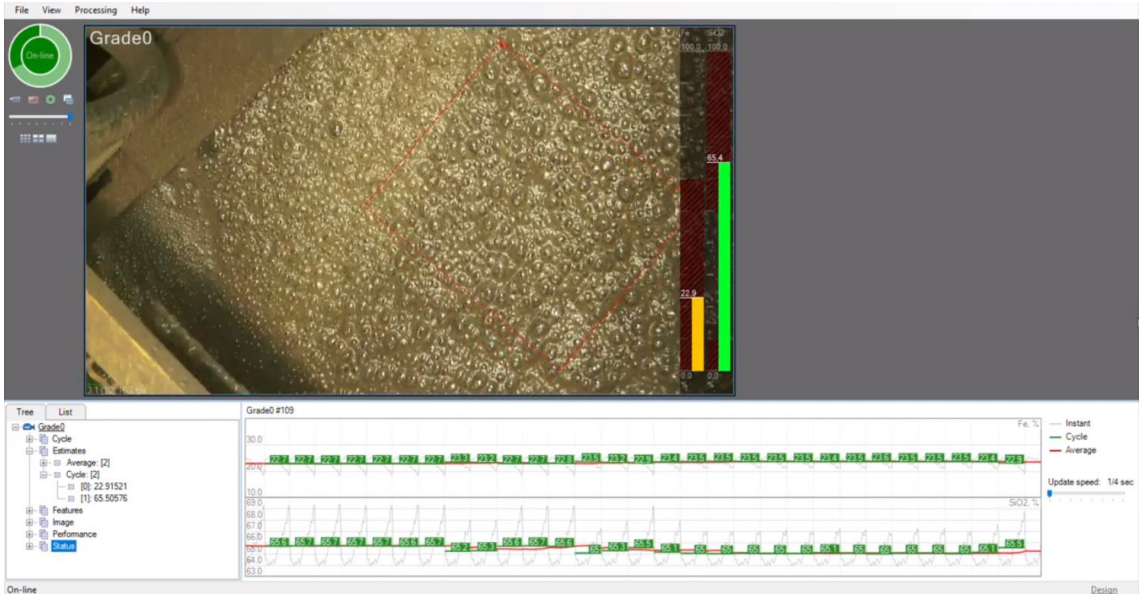



**Figura 4.6: Interface típica do OptVision Grade**

O software utiliza as características da imagem gerada pelo faixa do espectro eletromagnético capturado por uma câmera industrial de alta resolução para estimar o teor do material analisado. É uma aplicação robusta que garante a confiabilidade dos resultados e traz grandes avanços para o controle de processos em tempo real em vista aos tradicionais métodos analíticos de laboratório e até mesmo aos métodos radioativos de medição em campo.

A solução foi inicialmente desenvolvida para medição dos dois principais constituintes de um minério. Entretanto, isso não é um limitante, podendo ser utilizado até doze elementos na calibração. Os teores podem ser estimados em intervalos entre amostras tão baixos quanto 10 segundos, o que a torna uma ferramenta de grande valia para o controle online do processo, apresentando um rápido retorno sobre alterações no processo.

#### 4.2.2.1 Calibração OptVision Grade

O OptVision Grade é calibrado através do treinamento de uma rede neural a partir da correlação de imagens capturadas em intervalos pré-estabelecidos no software com teores conhecidos das amostras. Dessa forma, é necessário a realização de amostragem do material flotado para gerar o arquivo de calibração do software.

Foram coletadas 120 amostras do concentrado final ao longo de duas semanas de operação da flotação, cobrindo diversas condições operacionais. O conjunto de amostras coletadas para posterior preparação e análise química por raios-x no laboratório é mostrado na Figura 4.7.

**Figura 4.7: Amostras para análise química**

A partir dos resultados de análise química e da data e hora da coleta das amostras, é possível correlacioná-las com o banco de imagens gerado pelo software, buscando-se as imagens correspondente à hora de cada amostragem. A Figura 4.8 ilustra o banco de imagens gerado.

**Figura 4.8: Banco de imagens para calibração**

## 4.3 Implantação do Controle Avançado de Processos

Os sistemas de Controle Avançado de Processos (CAP) atuam um nível acima e trocam informações com o controle convencional (regulatório). A implantação de um sistema como

esse se justifica por fatores financeiros, mas, também, pela estabilidade proporcionada aos processos e à qualidade da produção. Os sistemas de visão, descritos anteriormente, suportam o trabalho de controle da flotação, medindo, continuamente, propriedades da espuma que permitem rápidas tomadas de decisão e, consequentemente, um controle mais efetivo.

Para a implantação do CAP, foram avaliados a disponibilidade de instrumentação, os sensores para detecção de falhas, as práticas operacionais adotadas e os limites críticos para a operação segura do circuito. As restrições, variáveis manipuladas e controladas e, finalmente, a estratégia de controle foram especificadas, como resultado de uma combinação do conhecimento teórico e prático dos engenheiros de processo e operadores da mineradora onde o sistema foi instalado, com o conhecimento e experiência do autor e dos demais engenheiros da CEMI em processos minerais e controle avançado. Foi utilizado o software OptProcess para realizar esse controle.

### 4.3.1 OptProcess

O OptProcess é um pacote universal de software para soluções em controle avançado. O sistema permite a criação de aplicações de controle avançado para, virtualmente, qualquer tipo de processo. O sistema foi desenvolvido para atender as necessidades da indústria de processos, visando aprimorar o desempenho de produção. Sua estrutura atende às demandas dos processos industriais, permitindo um controle avançado robusto e equilibrado.

Em um processo, o sistema de controle avançado (CAP), em princípio, suplementa os Sistemas de Controle Distribuído (DCS) convencionais ou os Controladores Lógicos Programáveis (PLC), como ilustrado na Figura 4.9. O sistema é capaz de interpretar automaticamente as informações provenientes do banco de dados do PLC ou do DCS, utilizando várias técnicas avançadas para elaborar novos set-points, diversas vezes por minuto. Estes set-points são geralmente enviados ao PLC ou DCS de forma automática, sem necessidade de nenhuma ação dos operadores, e visam continuamente atingir objetivos estratégicos para o circuito. Enquanto mantêm a qualidade especificada do produto, perseguem objetivos técnicos e / ou econômicos, melhorando o desempenho do processo.

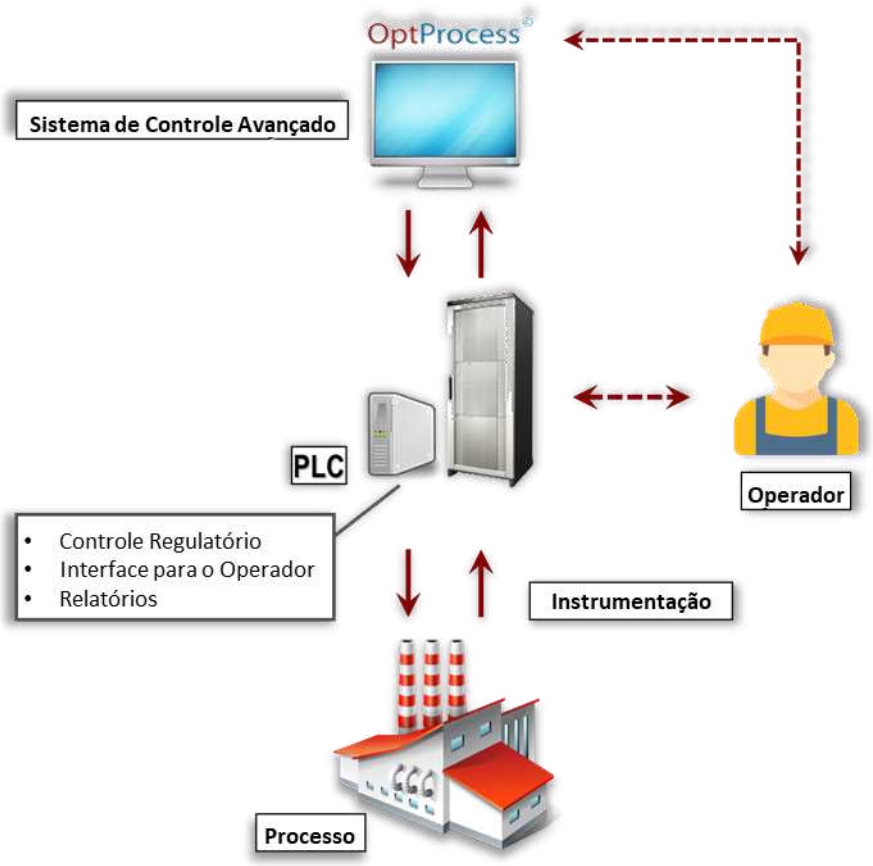



**Figura 4.9: Arquitetura do OptProcess em uma planta industrial**

O sistema OptProcess foi construído em uma estrutura modular, apresentada na Figura 4.10, e oferece uma forma efetiva e flexível de modelar e controlar diferentes sistemas e processos, incluindo problemas associados com a agregação e análise de informação e tomada de decisão. A modelagem do sistema pode se basear em modelos físicos matemáticos, na experiência e conhecimento de especialistas, ou em bancos de dados estatísticos, integrados em um único ambiente.

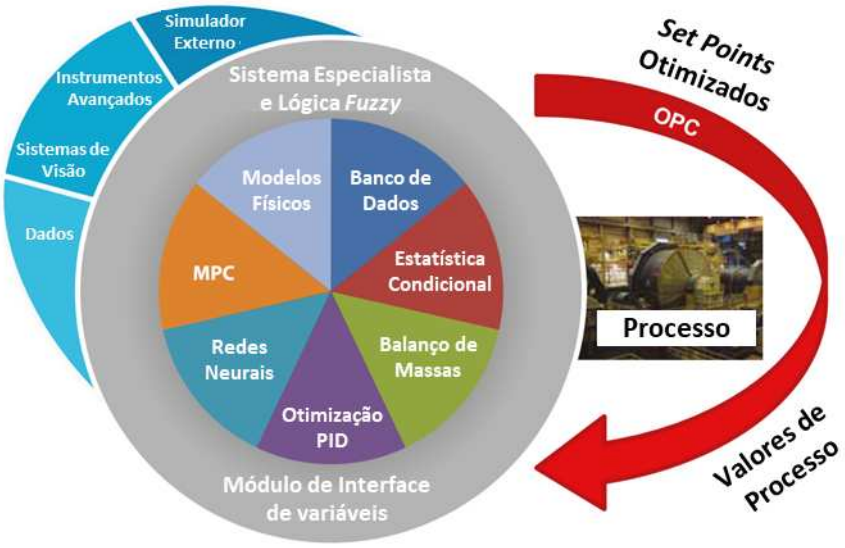



**Figura 4.10: Estrutura modular do OptProcess**

Todos os módulos do **OptProcess** são abertos, sua lógica é de fácil compreensão e passível de mudanças. As interfaces para configuração do módulo Especialista com Lógica *Fuzzy* (que contém a base de regras utilizando lógicas *crisp* e *fuzzy*) são simples e interativas. O sistema gera um histórico, apresentando quais, como, e por que determinadas regras foram ou não disparadas e a situação atual das variáveis. Esse histórico pode ser visualizado através de uma estrutura em árvore ou no estilo de lista do Windows Explorer; e a cada instante ou em um intervalo de tempo passado recente. Alguns dos módulos componentes do sistema são descritos na sequência.

#### 4.3.1.1 Comunicação

Este não é exatamente um módulo, mas uma função que permite ao sistema trocar informações com qualquer planta industrial, utilizando os protocolos OPC ou TCP. Esta característica garante uma forma flexível de integração com muitos sistemas diferentes em qualquer tipo de processo ou indústria. A comunicação é bidirecional e algoritmos de controle de fluxo fornecem robustez ao processo. Nesse estudo foi utilizado o protocolo OPC de comunicação.

#### 4.3.1.2 Sistema Especialista e Lógica *Fuzzy*

O sistema **OptProcess** dispõe de uma máquina de inferência abrangente e um ambiente intuitivo em que as regras para o sistema especialista foram desenvolvidas nesse trabalho, incluindo regras que utilizam lógica *fuzzy*. A Figura 4.11 mostra o painel de regras utilizado.

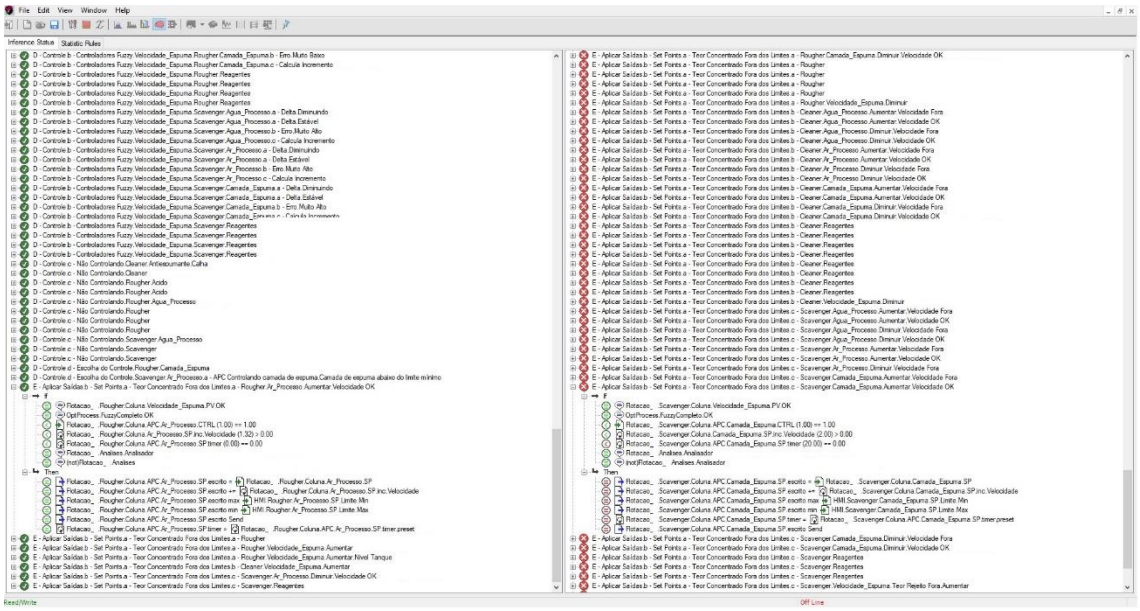


**Figura 4.11: Painel de regras do sistema especialista**

A base de conhecimento foi utilizada tanto para aplicações de controle como para aplicações de tomada de decisão. Com a utilização desse módulo, foi possível alimentar o sistema com um conjunto considerável de regras (*fuzzy* ou *crisp*) criando assim uma base de conhecimento extensa. Seu eficiente mecanismo de inferência é a parte central da aplicação. A Figura 4.12 mostra a tela de interpretação gráfica das regras *fuzzy*. O módulo especialista analisa dados de entrada diversos (painéis sinópticos, Sensores virtuais e ferramentas estatísticas) e toma decisões com base na estratégia de controle estabelecida.

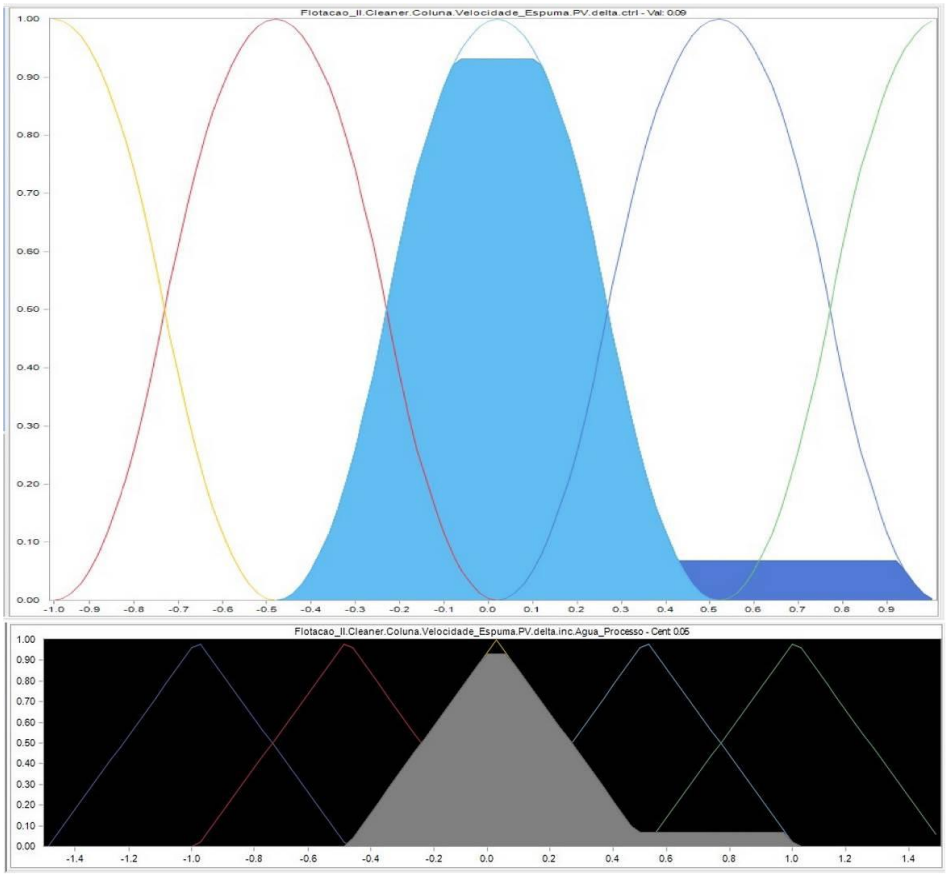



**Figura 4.12: Painel de interpretação das regras *fuzzy***

#### 4.3.1.3 Ferramentas Estatísticas

Esse módulo inclui uma variedade de funções estatísticas (histogramas, médias móveis, filtros e gradientes) que são aplicadas a qualquer uma das medidas ou variáveis calculadas do sistema. Os resultados das estatísticas são utilizados na base de conhecimento (regras *fuzzy* ou *crisp*) e estão disponíveis para os demais módulos do sistema.

O módulo de estatística gera informações estatísticas on-line sobre o processo e dispõe de um poderoso objeto de visualização, que possibilita a apresentação de gráficos, conforme mostrado na Figura 4.13, de uma forma visual e flexível, podendo ser utilizado para avaliação do desempenho da planta. A escolha de funções estatísticas é ampla e permite uma grande flexibilidade para pré-processamento de dados.

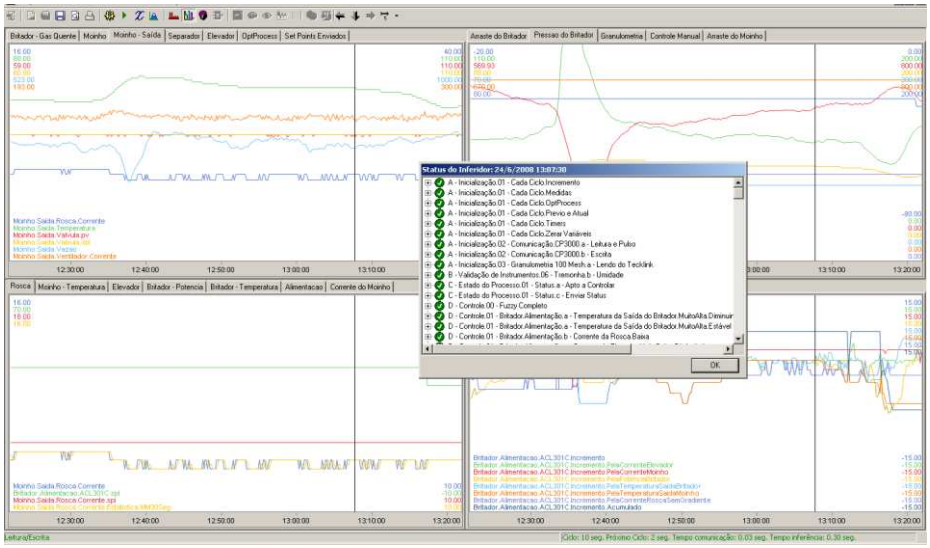


**Figura 4.13: Visualização de gráficos em tempo real do processo**

#### 4.3.1.4 Painéis Sinópticos

Neste módulo, visualiza-se os dados do processo on-line e o operador pode entrar com os objetivos desejados. O módulo é configurável e apresenta uma forma flexível de inserir diferentes tipos de objetos gráficos que representam o processo, e conectá-los para que se obtenha uma visualização completa do sistema real. O módulo fornece uma ou várias interfaces para os usuários, tais como diagramas, gráficos animados, formulários para entrada de dados, como ilustrado na Figura 4.14.

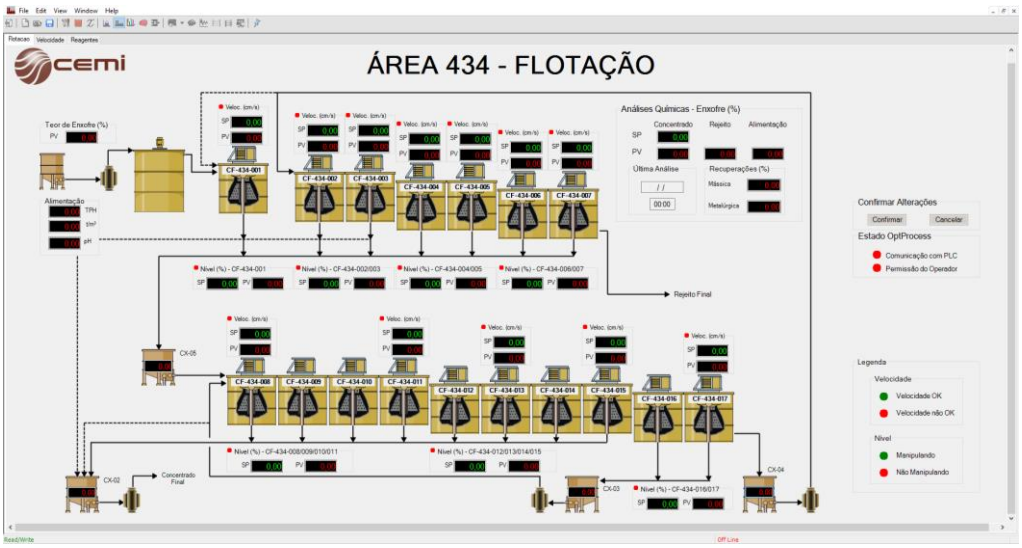



**Figura 4.14: Painel típico de um controle de flotação**

Dessa forma, a implantação do controle avançado envolveu a configuração de *tags* e endereços de leitura e escrita nos sistemas com o qual o OptProcess tem interface, incluindo integração das aplicações com sistemas PIMS, Sistemas de Visão e sistema de supervisão e controle. Envolveu, também a definição de regras de controle e programação no OptProcess utilizando, principalmente, sistemas *fuzzy*. A implantação também contemplou o teste das aplicações de controle desenvolvidas e o acompanhamento da operação do OptProcess, orientando os operadores e realizando ajustes finos ao controle desenvolvido. Em linhas gerais, o controle manipula a dosagem de reagentes, o nível da camada de espuma, a vazão de ar e, onde possível, a vazão da água de lavagem, para atingir os objetivos de teor no concentrado e maximização da recuperação. Esses objetivos são conseguidos pelo controle das variáveis medidas pelos sistemas de visão e demais dados operacionais, como vazão e densidade da polpa do concentrado produzido.

## 4.4 Avaliação do sistema

Após a implantação do sistema, foi avaliado o impacto dele no desempenho e estabilidade no processo de flotação. Para isso foi feita uma análise estatística dos dados operacionais e resultados de produção, através de um teste *On-Off*, ou seja, com um período com o sistema ativo e por um período equivalente com o sistema desligado, voltando para o controle tradicional dos operadores. Foi escolhido o período de trinta dias para avaliar cada cenário, atentando-se para que ambos possuíssem minérios com características semelhantes na alimentação e objetivos iguais de teores no concentrado. Dessa forma foi possível avaliar o real impacto do sistema nos indicadores de desempenho do processo.

Adicionalmente, foi avaliada a aderência do analisador online de teor aos resultados de análise de rotina do laboratório. Para isso, foi realizada a média dos resultados do analisador online que compreendem o tempo de amostragem incremental para análise do laboratório. Com isso foram avaliadas a exatidão e a tendência dos resultados do analisador online.

# 5 RESULTADOS

Após a instalação e configuração do software de análise de imagem e do sistema de Controle Avançado de Processos ser executada com sucesso, foi realizada uma avaliação do impacto do sistema no circuito de flotação. Para isso, foram colhidos dados operacionais durante dois meses. No primeiro mês com o controle desligado e no segundo, com o sistema atuando no circuito.

## 5.1 Alimentação da flotação

Para que a avaliação fosse livre de viés, definiu-se que a usina seria alimentada com minério de teores semelhantes, com taxas de alimentação também semelhantes. A Tabela 5.1 mostra os resultados da alimentação no período, confirmando que essas definições fossem seguidas, com valores praticamente iguais para as duas condições.

**Tabela 5.1: Dados da alimentação do circuito**

| Parâmetro | CAP Desligado | | CAP Ligado | |
|---|---|---|---|---|
| | Média | Desvio Padrão | Média | Desvio Padrão |
| Teor da Alimentação (%) | 4.73 | 0.65 | 4.77 | 0.61 |
| Taxa de Alimentação (t/h) | 141.94 | 11.32 | 147.70 | 12.00 |

## 5.2 Parâmetros Operacionais

Antes de expor os resultados com o impacto do sistema de controle avançado nos indicadores de desempenho da flotação, uma análise dos parâmetros operacionais é apresentada. Os principais parâmetros operacionais da flotação também foram avaliados durante o período, inclusive a velocidade de espuma medida por análise de imagem, correlacionando-os com o teor do concentrado e recuperação do circuito. A análise aqui exibida trata dos dados operacionais da coluna Cleaner, que é a coluna que produz o concentrado final do circuito. Os apêndices deste trabalho trazem os gráficos desses parâmetros para as colunas *Rougher* e *Scavenger*.

### 5.2.1 Velocidade de Espuma

A Figura 5.1 apresenta a variação da velocidade de espuma da coluna *cleaner* no tempo e o teor de concentrado observado para esse mesmo período.

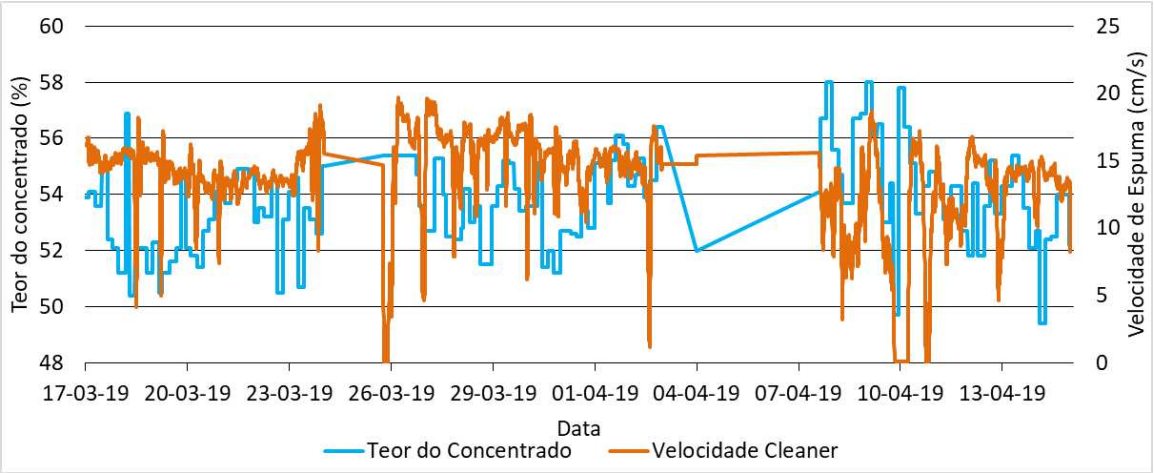



**Figura 5.1: Teor do concentrado e velocidade de espuma variando no tempo**

Apesar de se observar que a velocidade de espuma e o teor de concentrado têm comportamentos distintos, é possível observar, para algumas situações, que uma tendência de queda na velocidade de espuma resultava em uma tendência de aumento do teor do concentrado. Isso pode ser explicado pelo maior tempo de residência do minério na zona de espuma, dando maior chance que a ganga seja lavada da espuma e retorne para a zona de coleta.

Analogamente, a Figura 5.2 mostra a variação da velocidade no tempo em comparação com a recuperação metalúrgica do circuito de flotação.

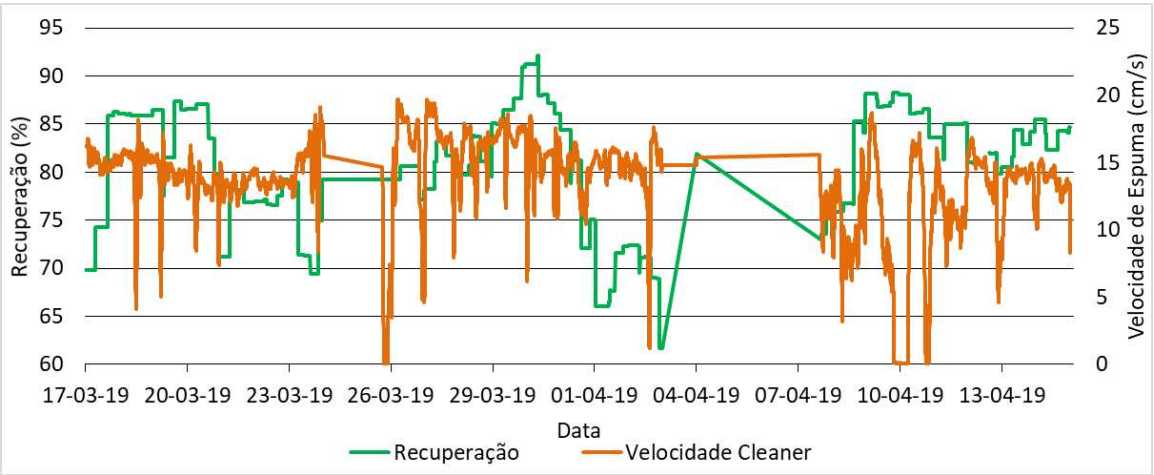


**Figura 5.2: Recuperação do circuito e velocidade de espuma variando no tempo**

O comportamento da recuperação também é distinto do comportamento verificado para a velocidade de espuma, sendo difícil, a princípio, predizer por um modelo qual a recuperação baseando-se na velocidade de espuma.

A Figura 5.3 apresenta um gráfico de correlação entre a velocidade de espuma e o teor do concentrado.

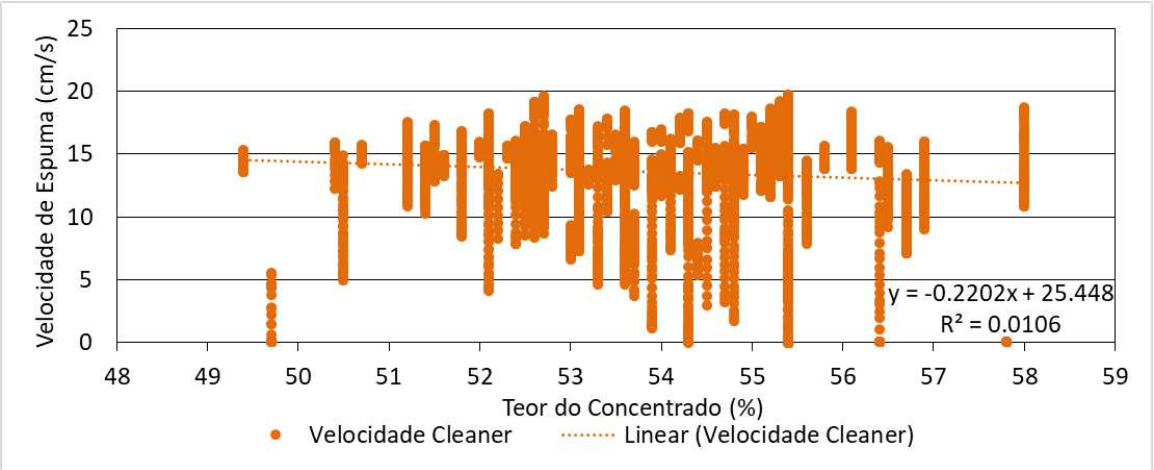



**Figura 5.3: Correlação entre velocidade de espuma e teor do concentrado**

Percebe-se que correlação linear entre os dois parâmetros é praticamente nula, com um $R^2$ de apenas 0,01. Isso confirma que as variáveis não possuem relação direta.

A Figura 5.4 traz a correlação ente a velocidade de espuma e a recuperação do circuito.

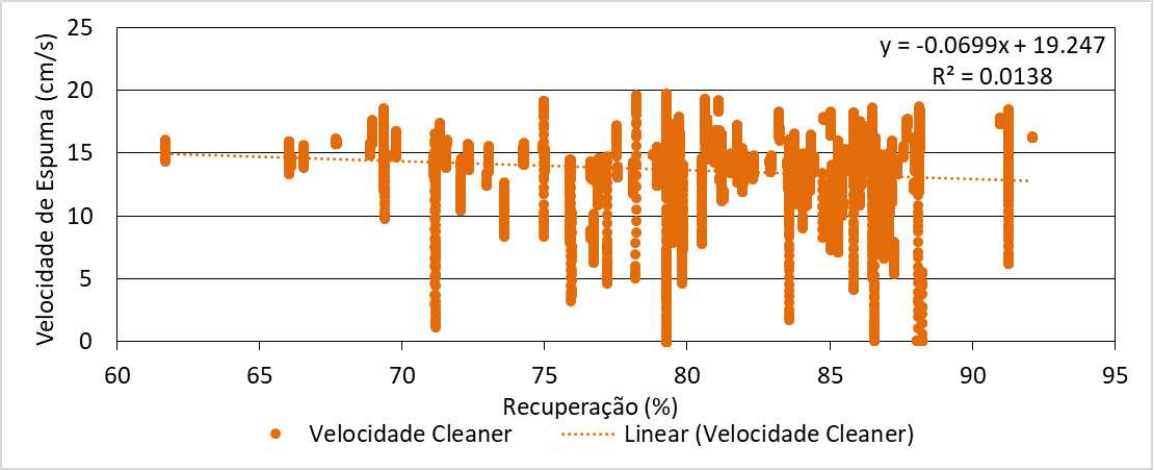



**Figura 5.4: Correlação entre velocidade de espuma e recuperação**

Da mesma forma, a correlação da velocidade de espuma com a recuperação é praticamente ausente. Assim, nem o teor do concentrado nem a recuperação mostram relação direta com a velocidade de espuma. Isso mostra a dificuldade em se encontrar modelos para correlacionar as variáveis.

### 5.2.2 Camada de Espuma

A Altura da camada de espuma da coluna *cleaner* foi correlacionada com o teor do concentrado, conforme Figura 5.5.

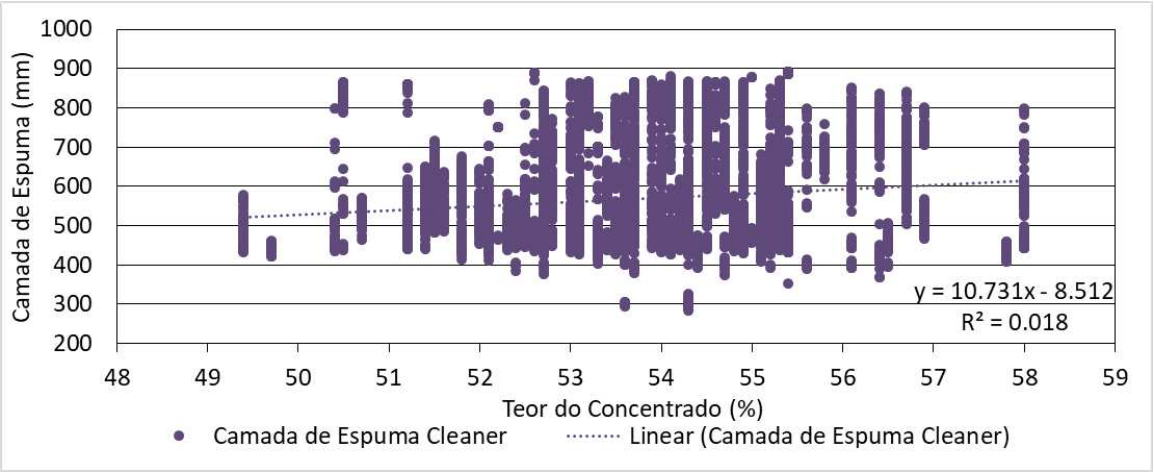



**Figura 5.5: Correlação entre camada de espuma e teor do concentrado**

A altura da camada de espuma não mostrou relação com o teor do concentrado. O que se pode verificar é, apenas, a tendência dos resultados, dada pelo sinal positivo do coeficiente angular da equação, indicando que para maiores camadas de espuma, o teor do concentrado tende a ser maior. Isso pode ser explicado pelo fato de que com a camada de espuma maior, o minério tem mais oportunidade de perder os minerais de ganga que são arrastados para a espuma, gerando um concentrado mais limpo.

A Figura 5.6 representa a correlação da altura da camada de espuma da coluna *cleaner* com a recuperação do circuito de flotação.

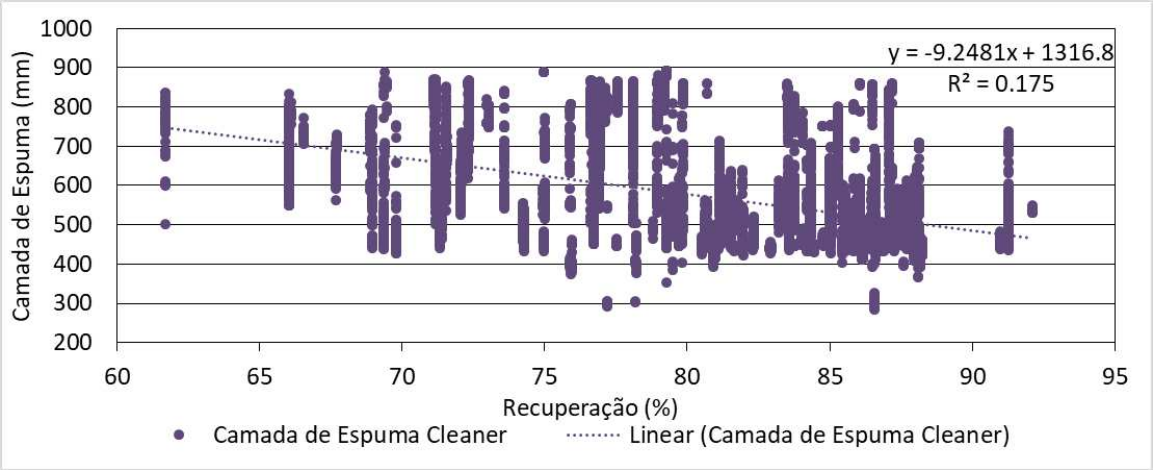



**Figura 5.6: Correlação entre camada de espuma e recuperação**

A relação entre a camada de espuma e a recuperação mostrou um certo grau de correlação, mesmo que ainda baixo, com um R² de 0,175, os parâmetros são inversamente proporcionais. Para uma menor camada de espuma, a tendência da recuperação do circuito é aumentar, pois o minério que vai para a espuma não tem muito tempo para ser classificado e retornar para a zona de coleta, aumentando o percentual do material que vai para o concentrado.

### 5.2.3 Vazão de Ar

A vazão de ar que é injetada na coluna *cleaner* também foi relacionada com o teor do concentrado, conforme visto na Figura 5.7.

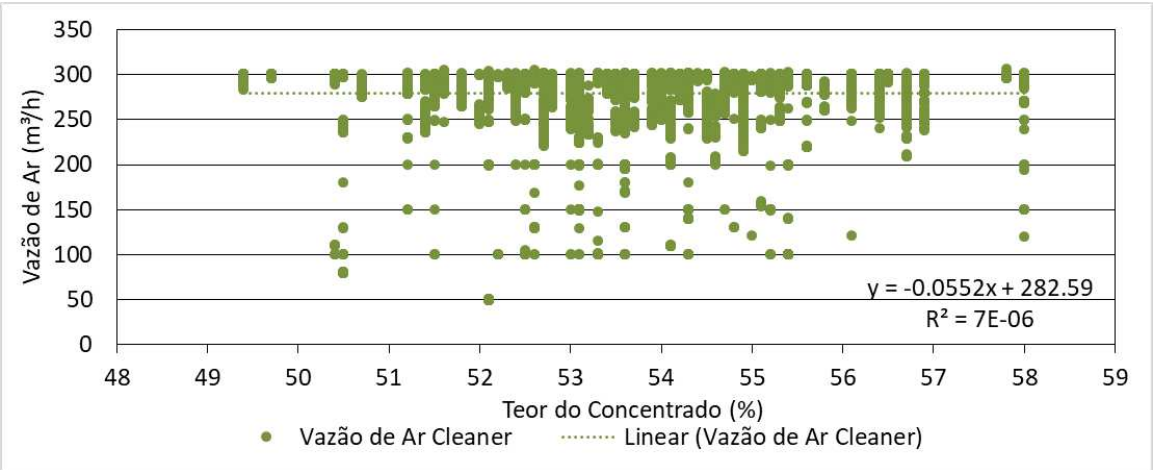


**Figura 5.7: Correlação entre vazão de ar e teor do concentrado**

Os resultados mostram que a vazão de ar não possui correlação com o teor de concentrado, observando-se diversos teores de concentrado com vazões de ampla variação.

A Figura 5.8 correlaciona a vazão de ar com a recuperação da flotação.

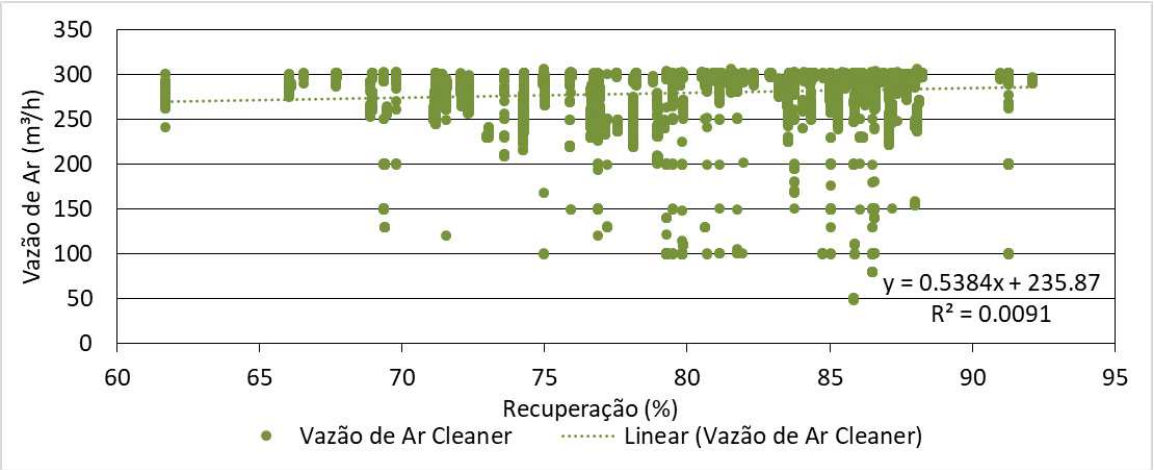



**Figura 5.8: Correlação entre vazão de ar e recuperação**

Da mesma forma que para o teor de concentrado, a recuperação também não apresenta boa correlação com a vazão de ar. Com isso, percebe-se que a vazão de ar não possui relação linear com os indicadores de desempenho da flotação.

### 5.2.4 Água de lavagem

A vazão da água de lavagem da espuma no topo da coluna *cleaner* em relação ao teor do concentrado é mostrada na Figura 5.9.

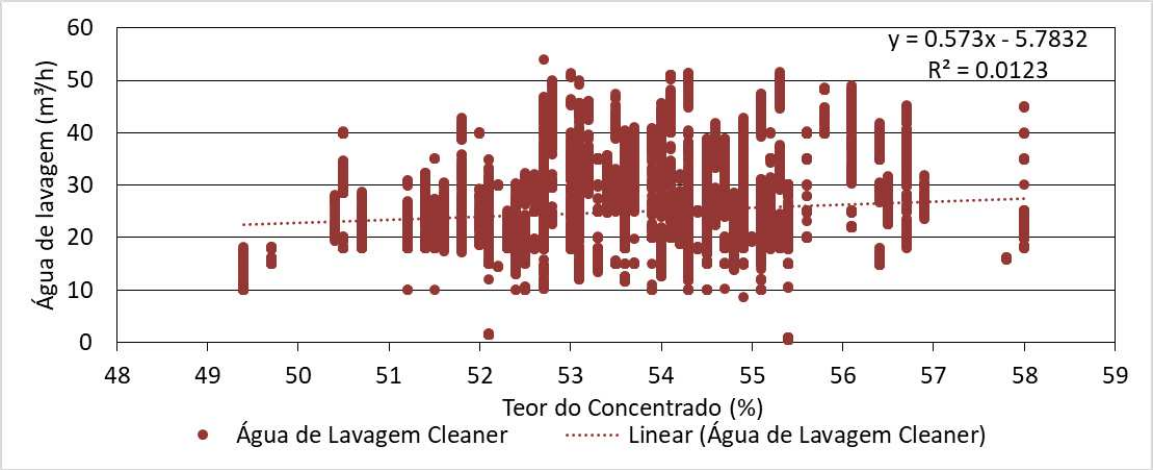



**Figura 5.9: Correlação entre água de lavagem e teor do concentrado**

A água de lavagem mostrou-se sem relação linear com o teor do concentrado da flotação, com um coeficiente de correlação de apenas 0,01. Olhando-se apenas para a tendência, percebe-se que para valores maiores de vazão de água de lavagem, tende-se a se obter maiores teores de concentrado, devido ao poder de limpeza do material flotado que essa vazão de água propicia.

A Figura 5.10 mostra a correlação da água de lavagem com a recuperação do circuito.

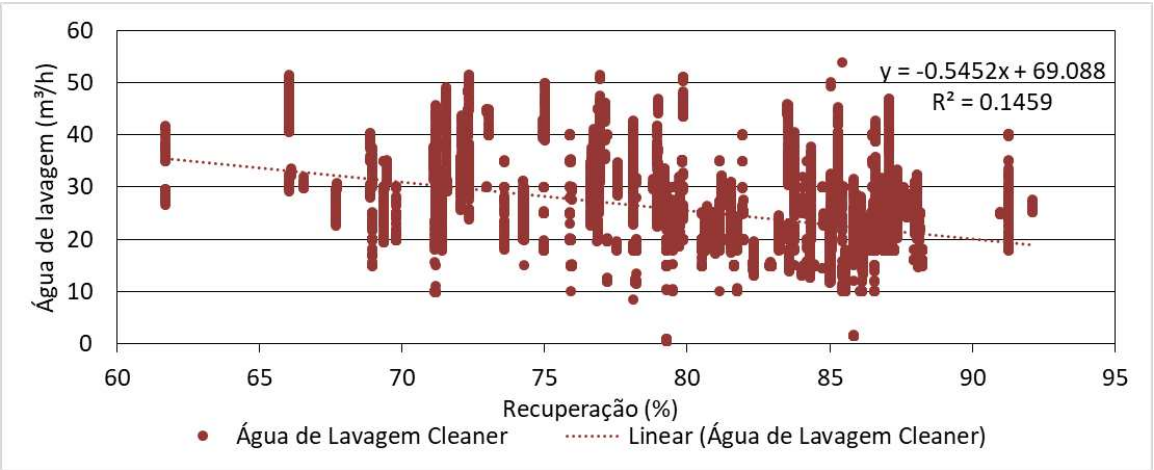



**Figura 5.10: Correlação entre água de lavagem e recuperação**

A água de lavagem apresenta uma melhor correlação, $R^2 = 0{,}146$, com a recuperação, embora essa correlação ainda seja baixa. Essa relação é inversamente proporcional, para menores vazões de água de lavagem, maiores as recuperações do circuito. A água de lavagem oferece um arraste mecânico das partículas na espuma, retornando-as para a zona de coleta. Enquanto isso favorece a produção de concentrados mais limpos, a recuperação fica prejudicada, já que menos material é flotado na coluna.

### 5.2.5 Dosagem de coletor

A dosagem de coletor nos tanques condicionadores da flotação é correlacionada com o teor do concentrado final do circuito na Figura 5.11.

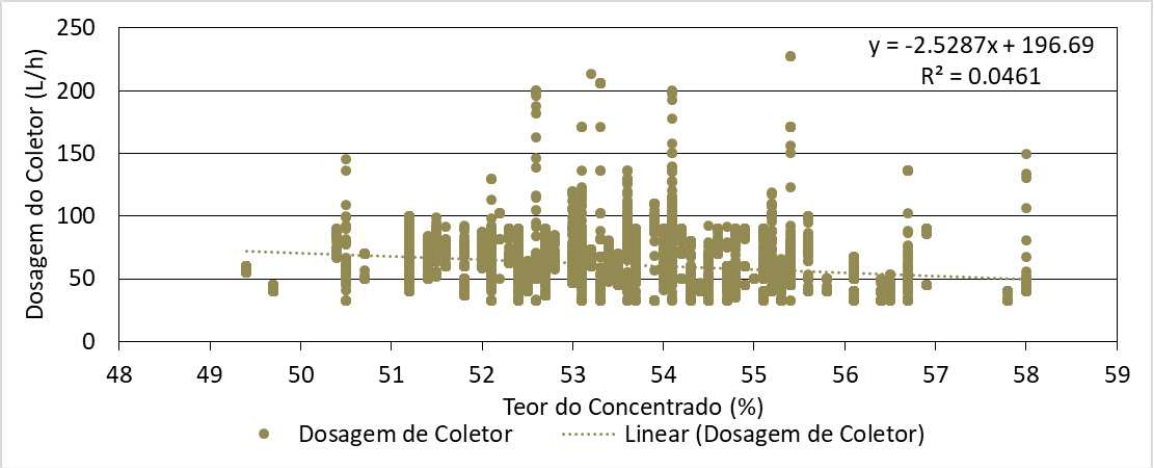



**Figura 5.11: Correlação entre dosagem de coletor e teor do concentrado**

O teor de concentrado não se correlacionou com a dosagem do coletor da flotação. O que se pode perceber é a tendência dos resultados, com maiores dosagens do reagente tendendo a menores resultados de teor. Isso pode ser explicado pelo excesso de reagente que passa a coletar também os minérios de ganga para o flotado.

A Figura 5.12 mostra a relação entre a dosagem de coletor e a recuperação da flotação.

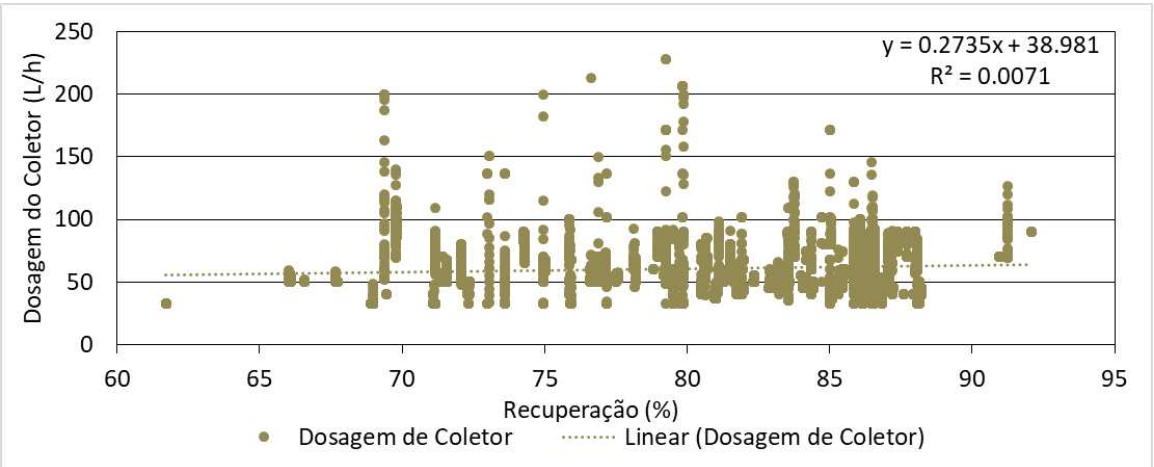



**Figura 5.12: Correlação entre dosagem de coletor e recuperação**

A dosagem do coletor também não mostrou boa correlação com a recuperação do circuito. Apenas a tendência pode ser verificada, com maiores dosagens tendendo a recuperar mais material na flotação, devido ao maior poder de coleta do reagente.

Todos esses parâmetros mostraram correlação linear fraca ou até mesmo ausente com os parâmetros de desempenho da flotação, teor e recuperação, confirmando o que diz a literatura sobre a complexidade de um sistema de flotação, envolvendo propriedades físicas e químicas dos minérios, reagentes, máquinas de flotação e parâmetros operacionais. Dessa forma o controle da flotação através de modelos que levem em conta essas variáveis é ainda um desafio. Isso explica o que a literatura sugere, e o que foi aplicado nesse trabalho, que os controles avançados de processos de flotação mais indicados são os baseados em regras *fuzzy* e com sistema especialista contendo regras *if-then*.

## 5.3 Recuperação Mássica

A recuperação mássica do circuito de flotação é obtida através da razão entre as taxas mássicas de concentrado e de alimentação, medidas através de medidores de vazão de polpa e de densímetros instalados nos circuitos. Dessa forma, a cada ciclo do software, de 10 segundos, uma recuperação era computada, gerando a grande nuvem de dados mostrada na Figura 5.13, que traz uma carta de controle desse parâmetro com o sistema ligado e desligado.

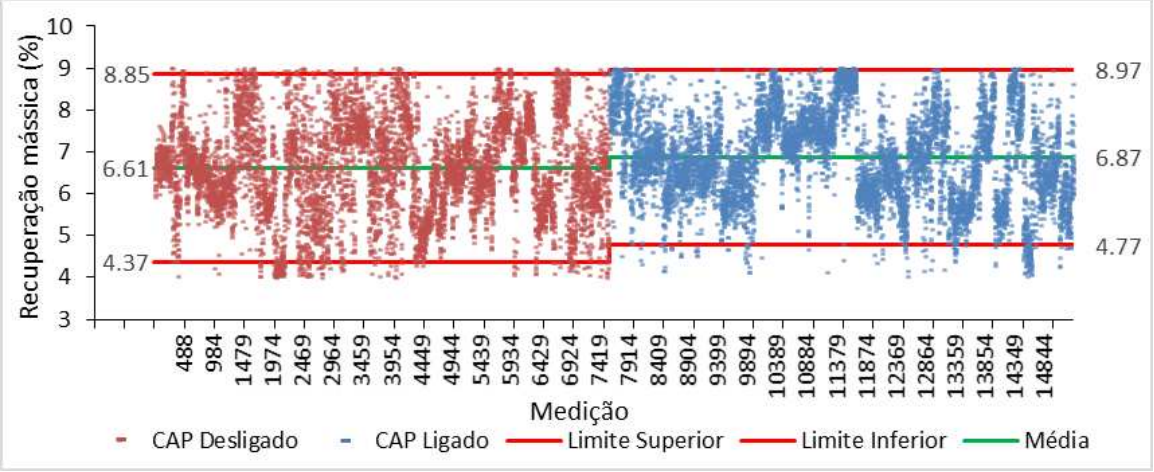



**Figura 5.13: Carta de controle da recuperação mássica do circuito**

A carta de controle mostra uma melhora na recuperação mássica com a ativação do sistema de controle avançado, com a média indo de 6,61% para 6,87%. Isso resulta em um aumento na recuperação mássica de 3,9% para o período avaliado, mostrando o desempenho superior do sistema frente ao controle convencional. A variabilidade do sistema observou uma ligeira redução com a ativação do sistema, resultando em um limite inferior de recuperação maior e, aliado ao aumento da média, um limite superior de recuperação também maior.

## 5.4 Teor do Concentrado

Os teores de concentrado da flotação durante os dois períodos avaliados foram plotados na carta de controle mostrada na Figura 5.14. Durante os dois meses avaliados, a cada duas horas produzidas, uma amostra composta do período era analisada.

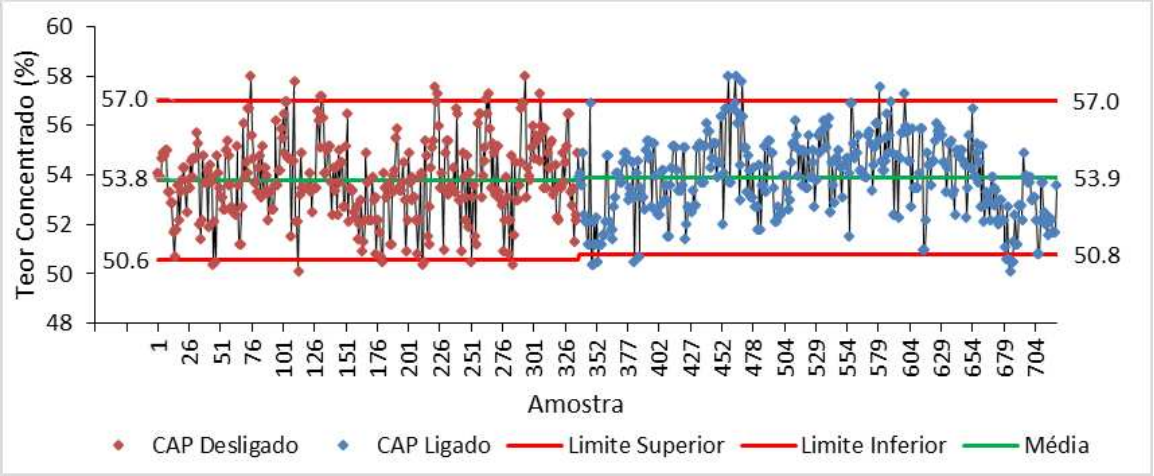



**Figura 5.14: Carta de controle do teor do concentrado**

A Figura 5.14 evidencia que para ambas as condições o teor médio de concentrado permaneceu praticamente inalterado, com uma média ligeiramente superior para o período em que o Controle Avançado de Processos atuou no circuito. Os limites da carta de controle também foram equivalentes, mostrando que ambas as situações produzem concentrados com variância semelhante.

## 5.5 Teor do Rejeito

O teor do rejeito foi medido de maneira semelhante ao concentrado para os dois períodos. A Figura 5.15 mostra a carta de controle desse parâmetro.

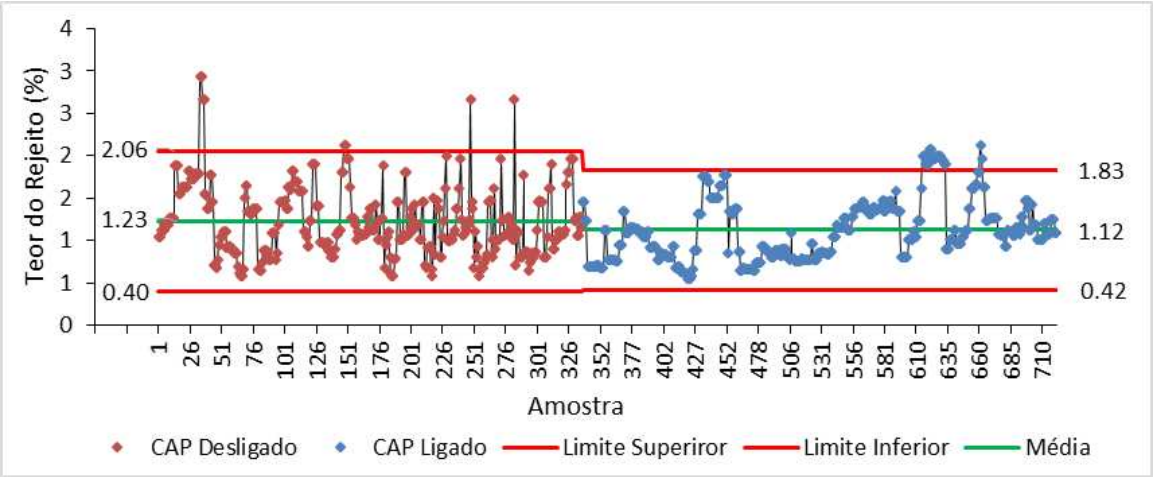



**Figura 5.15: Carta de controle do teor de rejeito**

Percebe-se uma redução no teor médio do rejeito quando o sistema de controle avançado foi ativado, com a média caindo de 1,23% para 1,12%, uma redução de 8,9% e com uma menor variabilidade, com o limite superior reduzindo em 0,2 pontos percentuais com a ativação do sistema, confirmando que o sistema proposto trouxe melhorias ao circuito, com menores perdas de material no rejeito.

## 5.6 Recuperação Metalúrgica

Conforme evidenciado na Equação 3.4, a recuperação pode ser descrita em função dos teores dos fluxos do circuito. Colocando-se o numerador dessa função no eixo das ordenadas e o numerador no eixo das abscissas, tem-se que a inclinação da reta de regressão linear de todos os conjuntos de dados de teores medidos representará a recuperação média desses dados. Dessa forma, foram plotadas as regressões para ambas as situações avaliadas, conforme Figura 5.16.

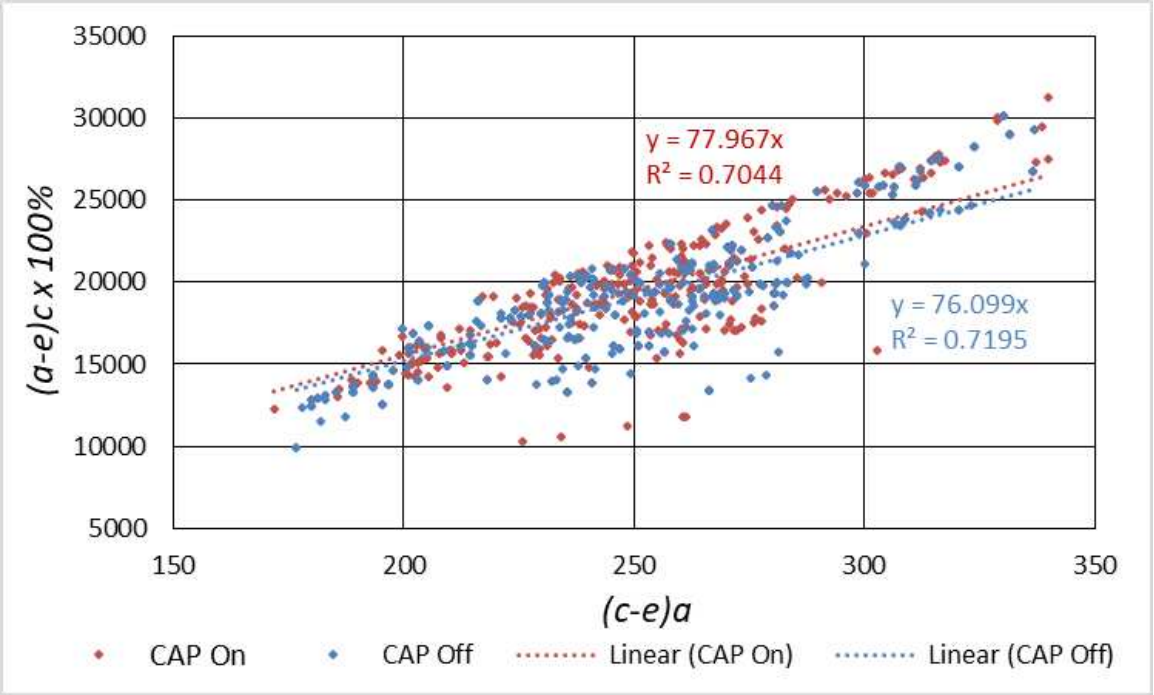



**Figura 5.16: Determinação gráfica da recuperação metalúrgica**

Os resultados mostram que durante o período com o sistema desligado a recuperação média do circuito de flotação foi de 76,1%. Já para o período com o Controle avançado de processos ligado, obteve-se uma média de recuperação de 78.0%. Isso resulta em uma recuperação 1,9 ponto percentual superior, ou um aumento de 2,5% na recuperação da flotação com a utilização do sistema proposto.

## 5.7 Curvas de Recuperação-Teor

As curvas de recuperação média versus teor de concentrado para as duas condições estudadas são vistas na Figura 5.17.

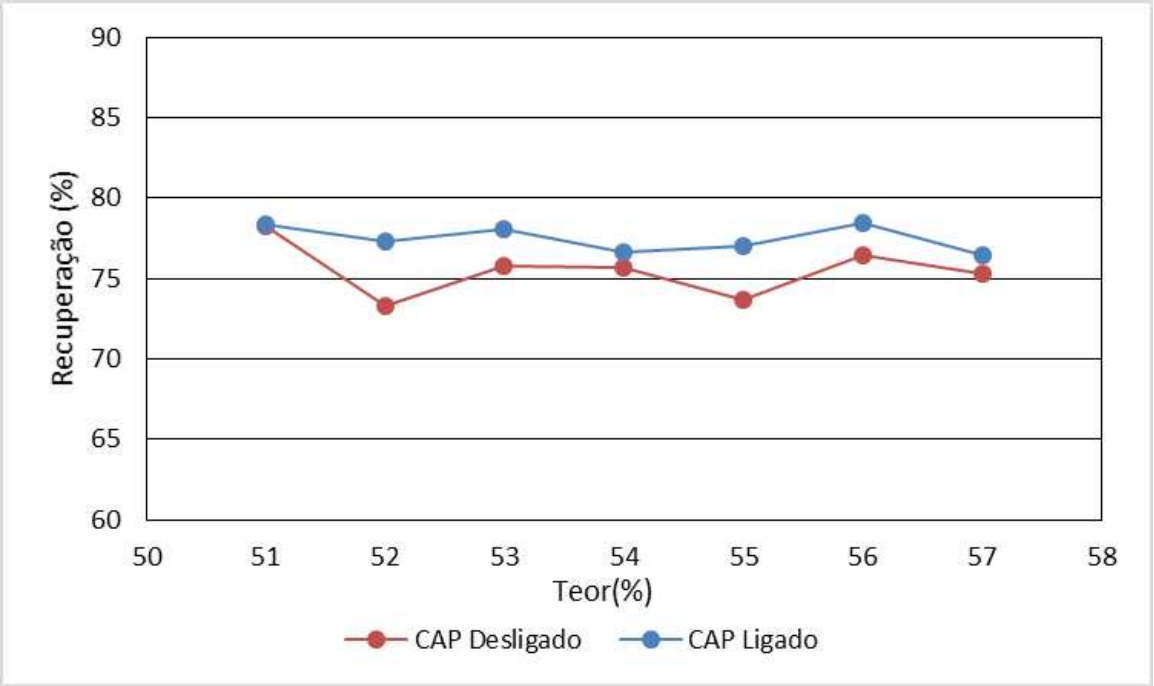



**Figura 5.17: Curvas de recuperação-teor**

Uma vez que, durante o período avaliado, uma pequena variação no teor de concentrado foi verificada, apenas parte da curva de recuperação-teor pôde ser estabelecida. Todavia, para todas as classes de teores representadas, a recuperação média foi maior durante a utilização do CAP em relação ao controle tradicional dos operadores. Isso mostra a maior eficiência do controle avançado proposto. Dessa forma, para o melhor desempenho do circuito, o sistema de Controle Avançado de Processos implantado deve estar ligado sempre que possível.

Um resumo do impacto do sistema de controle avançado de processos na flotação avaliada pode ser feito ao se plotar o teor médio verificado durante as duas situações com as recuperações observadas conforme Figura 5.18, que aproveita a ilustração do objetivo do controle mostrada na Figura 3.17.

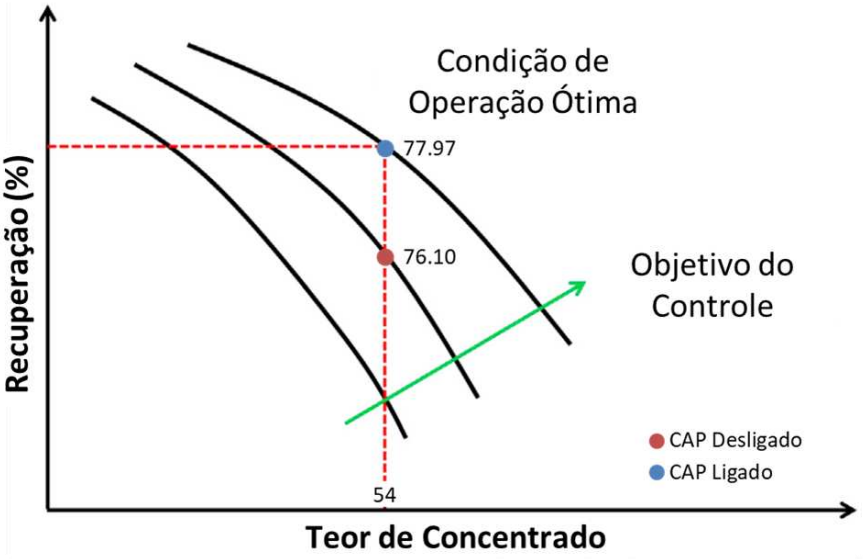



**Figura 5.18: Resumo da recuperação-teor para o período avaliado**

A média do teor de concentrado, de aproximadamente 54%, permaneceu praticamente inalterada para as duas situações avaliadas, já a recuperação subiu quase que 2 pontos percentuais. Isso mostra que o controle avançado de processos trouxe ganhos para o circuito, deslocando para cima a curva de recuperação-teor enquanto a qualidade do produto permaneceu inalterada.

## 5.8 Correlação OptVision Grade

Após a calibração do sistema de previsão de teor por análise de imagem, que utilizou a mesma infraestrutura de câmeras e rede do sistema de medição de velocidade de espuma, foram coletados dados de teor do concentrado medido pelo sistema *online* a cada 30 segundos. A média desses dados foi relacionada com o teor da amostra composta do período equivalente, analisada em laboratório por FRX, conforme mostra a Figura 5.19.

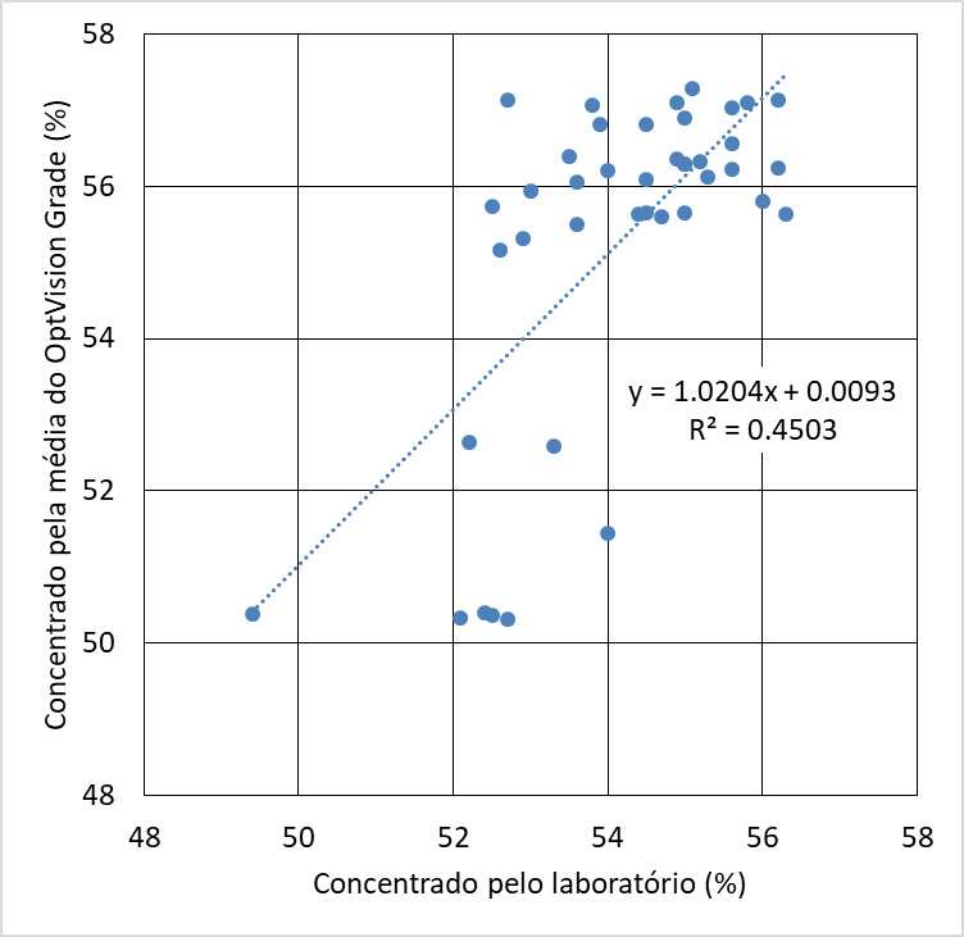



**Figura 5.19: Correlação OptVision Grade e FRX laboratório**

Os dados mostram que existe uma correlação moderada entre as duas metodologias. Indicando, conforme sugere a literatura, que esse tipo de sistema, simples e barato, pode ser bom para a previsão de tendência dos teores, mas não para certificar com exatidão o valor do concentrado. Todavia, percebe-se que as imagens produzidas do material flotado realmente possuem relação com o teor, indicando que com um maior trabalho de calibração do sistema e controle de influências externas, como a luz do sol, a assertividade do método tende a aumentar.

A Figura 5.20 mostra a série temporal dos teores do concentrado medidos pelas duas metodologias, FRX no laboratório e análise de imagem em campo.

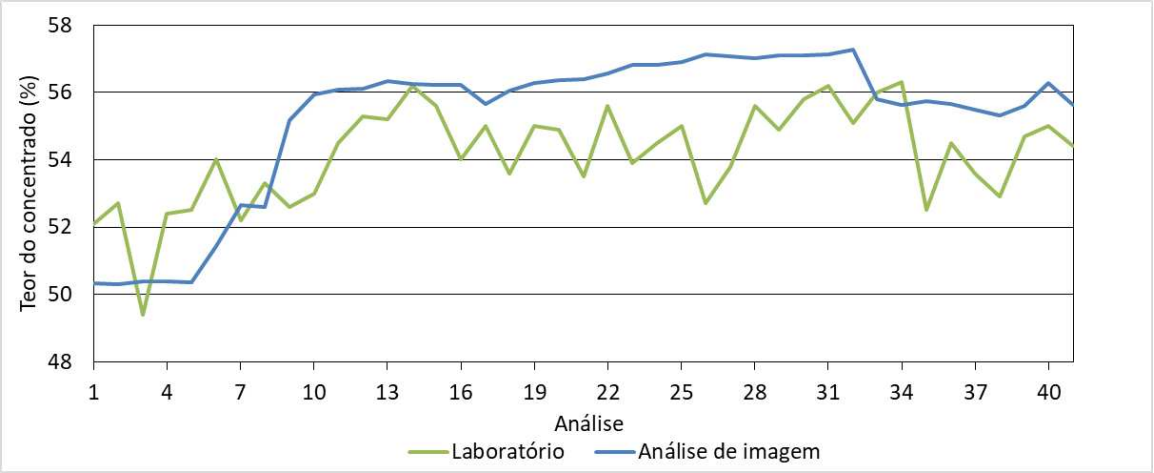



**Figura 5.20: Teor do concentrado no tempo pelo laboratório e pelo OptVision Grade**

O gráfico da Figura 5.20 mostra que o sistema de previsão de teor por análise de imagem tem comportamento semelhante aos dados de análise de laboratório, confirmando que o sistema pode ser utilizado como uma previsão de tendência com menor tempo de resposta do comportamento do teor, aliado aos valores periódicos de análise do laboratório. Para o período analisado, a diferença média absoluta entre as duas metodologias foi de 1,1 pontos percentuais, com a maior diferença absoluta positiva sendo de 4,4 pontos percentuais e a negativa, 2,5 pontos percentuais. Isso mostra que, em geral, o sistema de análise de imagem superestimou os teores de concentrado quando comparados aos valores referenciados do laboratório.

Dessa forma, com resultados promissores para uma calibração simples e em curto intervalo de tempo, sem contemplar toda a variabilidade natural do sistema em diversos dias de operação, um maior empenho deve ser desprendido nessa tecnologia. Um controle com o *feedback* em tempo real do teor do concentrado tende a trazer resultados ainda mais positivos que os apresentados nesse trabalho, sobretudo na diminuição da variabilidade do teor do concentrado no produto final.

# 6 CONCLUSÕES

A realização desse trabalho atendeu os objetivos propostos. A implantação do controle avançado de processos em um circuito de flotação se deu conforme planejado com a instalação da infraestrutura necessária e configuração dos sistemas utilizados.

Os parâmetros operacionais mostraram baixa ou nenhuma correlação com o teor do concentrado ou recuperação da flotação, confirmando a dificuldade de se aplicar controles baseados em modelos para a flotação.

A avaliação do sistema de controle avançado de processos mostrou que, mesmo com a alimentação da flotação possuindo características semelhantes para os dois cenários avaliados, o desempenho da concentração foi melhor com o sistema ativado, com maior recuperação e menor teor do mineral no rejeito.

Durante o período avaliado, o teor do concentrado médio de 53,8% praticamente não foi alterado com o sistema proposto controlando em relação aos dados da condição anterior, mantendo o produto na mesma especificação de qualidade. Por outro lado, o teor médio do rejeito caiu 8,9%, aliado com uma variabilidade total 0,1 ponto percentual menor.

A recuperação mássica sofreu um aumento médio de 3,9% enquanto a recuperação metalúrgica foi, em média, 2,5% maior com o CAP atuando no circuito. Isso corrobora que sistemas de análise de imagem em tempo real associados a sistemas de controle avançado de processos trazem melhor desempenho metalúrgico para os processos de concentração mineral por flotação de colunas.

Os resultados do sistema de previsão de teor por análise de imagem em tempo real mostraram correlação moderada, $R^2 = 0,45$, com os dados de análise por FRX em laboratório. Um maior refinamento do sistema deve ser realizado para que ele seja mais assertivo.

# 7 RELEVÂNCIA DOS RESULTADOS

Os resultados são relevantes por mostrar a complexidade de um circuito de flotação. Com diversas variáveis atuando no sistema, é difícil correlacionar os parâmetros operacionais com os resultados metalúrgicos da flotação.

Além disso, os resultados também se mostram relevantes pois todos os ganhos que o sistema de controle avançado de processos trouxe para a flotação foram conseguidos sem investimentos em novos equipamentos de concentração ou novas rotas de processo, apenas com o refinamento do controle dos equipamentos já existentes.

Os resultados promissores de previsão do teor do material flotado a partir da análise da espuma em tempo real são relevantes para a busca de um controle operacional ainda mais refinado dos processos de flotação.

# 8 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O autor sugere como um possível trabalho futuro a realização de um controle avançado de processos de flotação utilizando-se a metodologia MPC, ou seja, baseado em modelos físicos e fenomenológicos.

Na sequência, esse controle pode ser avaliado frente ao controle tradicional com operadores e o CAP proposto nesse trabalho, mostrando seus benefícios e dificuldades.

Fica também a sugestão de melhor desenvolver e avaliar o sistema de previsão de teores através de análise de imagem, com uma calibração ou treinamento da rede neural com maior detalhe e contendo dados mais distintos das diversas circunstâncias operacionais, buscando uma maior correlação e assertividade do sistema em relação à tendência dos teores quando comparado com os valores de laboratório.

# REFERÊNCIAS

CIPRIANO, A. Industrial Products for Advanced Control of Mineral Processing Plants. In: SBARBARO, D., VILLAR, R. *Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants.* 1 Ed. Londres: Springer, 2010. V.1, Cap. 7, p287s-308s.

DUCHENSNE, C. Multivariate Image Analysis in Mineral Processing. In: SBARBARO, D., VILLAR, R. *Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants.* 1 Ed. Londres: Springer, 2010. V.1, Cap. 3, p85s-142s.

FU, Y., ALDRICH, C. Flotation Froth Image Analysis by Use of a Dynamic Feature Extraction Algorithm. IFAC-PapersOnLine, Pequim, v.49, n.20, p84s-89s, jun. 2016.

GUPTA, A., YAN, D. *Mineral Processing Design and Operations*; an Introduction. 2 Ed. Amsterdam: Elsevier, 2016. 850p.

HERBST, J., FLINTOFF, B. Recent Advances in Modeling, Simulation, and Control of Mineral Processing Operations. In: YOUNG, C. A., LUTTRELL, G. H. *Separation Technologies for Minerals, Coal, and Earth Resources.* 1 Ed. Englewood: SME, 2012. V.1, Cap. 12, p667s-680s.

HOSSEINI, M. R., HAJI AMIN H., MASSINAEI M., MEHRSHAD, N. Modeling the Relationship between Froth Bubble Size and Flotation Performance Using Image Analysis and Neural Networks. Chemical Engineering Communications, Londres, n.202, p911s-919s, ago. 2015.

JAHEDSARAVANI, A., MARHABAN, M. H., MASSINAEI, M., SARIPANC, M. I., NOOR, S. B. M. A Froth-based modeling and control of a batch flotation process. International Journal of Mineral Processing, Londres, n.146, p90s-96s, out. 2016.

JAHEDSARAVANI, A., MASSINAEI, M., MARHABAN, M. H. Development of a machine vision system for real-time monitoring and control of batch flotation process. International Journal of Mineral Processing, Londres, n.167, p16s-26s, out. 2017.

NELSON, M. G. Innovations in Flotation Processing Technology - The Next Hundred Years. In: *Mineral Processing and Extractive Metallurgy.* 1 Ed. Englewood: SME, 2014. V.1, Cap. 3, p147s-157s.

SBARBARO, D., VILLAR, R. Introduction. In: SBARBARO, D., VILLAR, R. *Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants.* 1 Ed. Londres: Springer, 2010. V.1, Cap. 1, p1-14s.

SHAHBAZI, B., CHELGANI, S. C., MATIN, S. S. Prediction of froth flotation responses based on various conditioning parameters by Random Forest method. Colloids and Surfaces A, Manchester, n.529, p936s-941s, out. 2017.

SHEAN, B., HADLER, K., CILLIER, J. J. A flotation control system to optimise performance using peak air recovery. Chemical Engineering Research and Design, Nova Iorque, n.117, p57s-65s, jul. 2017.

SHEAN, B., HADLER, K., NEETHLING, S. CILLIERS, J. J. A dynamic model for level prediction in aerated tanks. Minerals Engineering, Londres, n.125, p140s-1149s, abr. 2018.

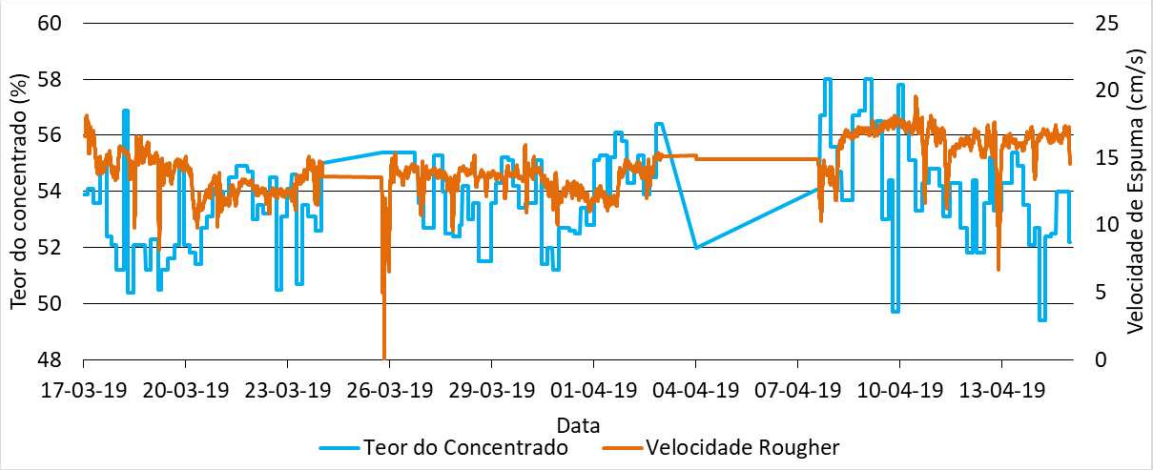
SILVA, F. T. *Propriedades visuais de espuma para predição dos teores da flotação em coluna do segundo concentrador da SAMARCO*. Belo Horizonte: Escola de Engenharia da UFMG, 2012. 139p. (Dissertação, Mestrado em Tecnologia Mineral).

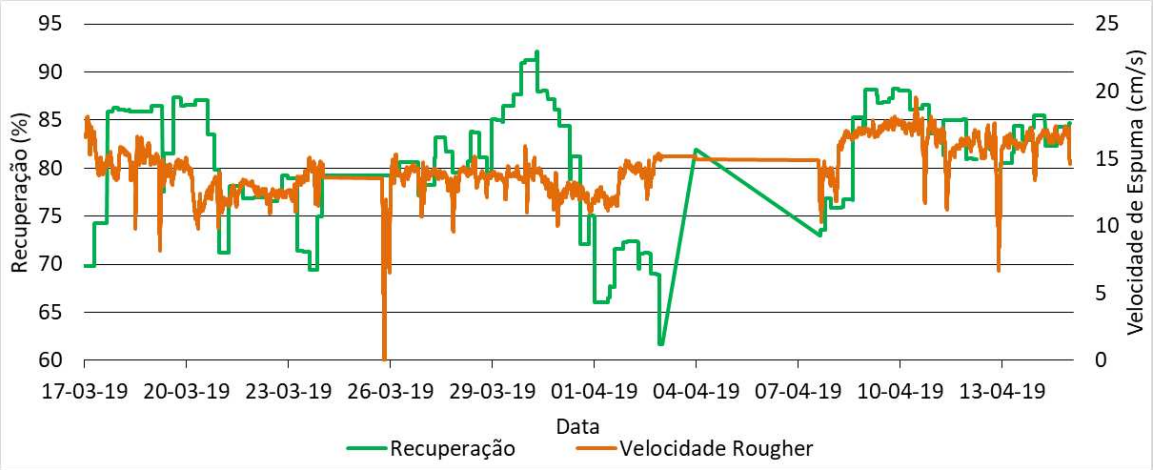
VILAR, R., DESBIENS, A., MALDONADO, M., BOUCHARD, J. Automatic Control of Flotation Columns. In: SBARBARO, D., VILLAR, R. *Advanced Control and Supervision of Mineral Processing Plants.* 1 Ed. Londres: Springer, 2010. V.1, Cap. 6, p249s-286s.

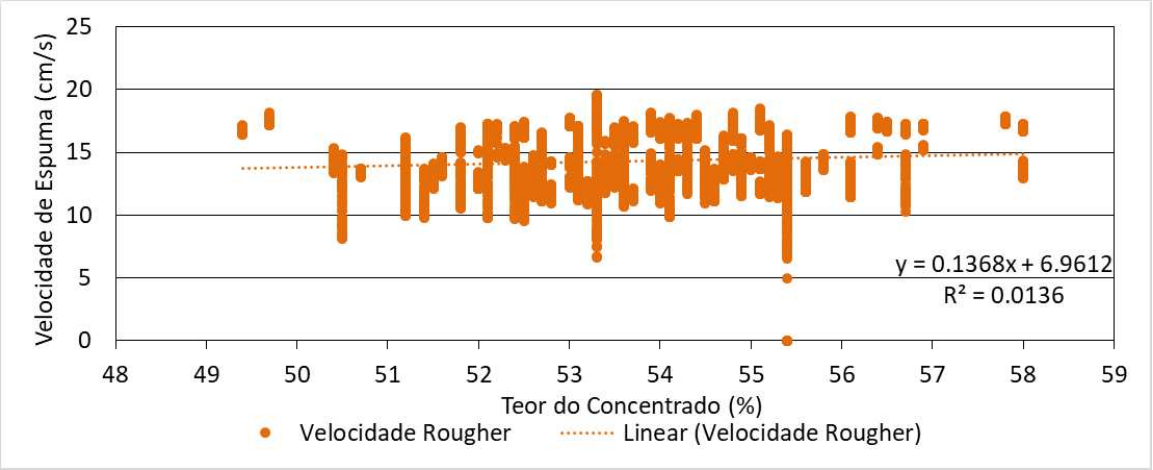
WILLS, B. A., FINCH, J. A., *Wills' Mineral Processing Technology*; an Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 8 ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016. 498p.

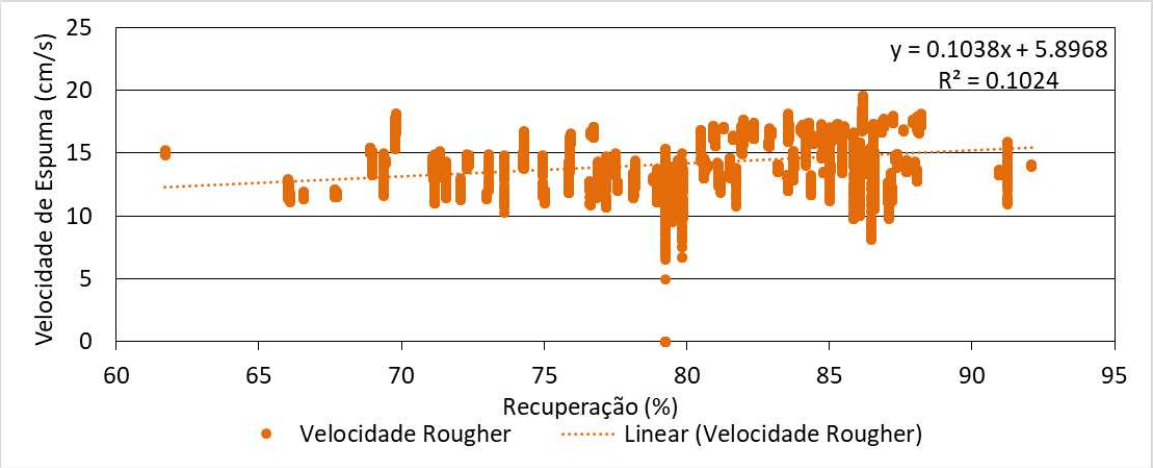
ZHANG, J., TANG, Z., AI, M., GUI W. Fuzzy Association Rule Based Froth Surface Behavior Control in Zinc Froth Flotation. Symmetry, Pequim, v.10, n.216, p1s-17s, jun. 2018.

# APÊNDICES A – COMPARAÇÃO ENTRE INDICADORES OPERACIONAIS E ETAPA ROUGHER

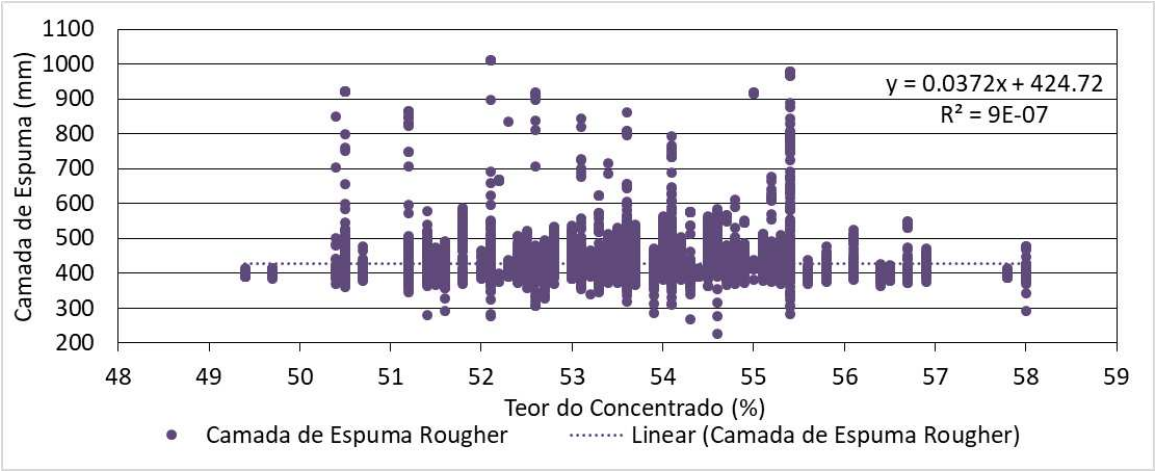


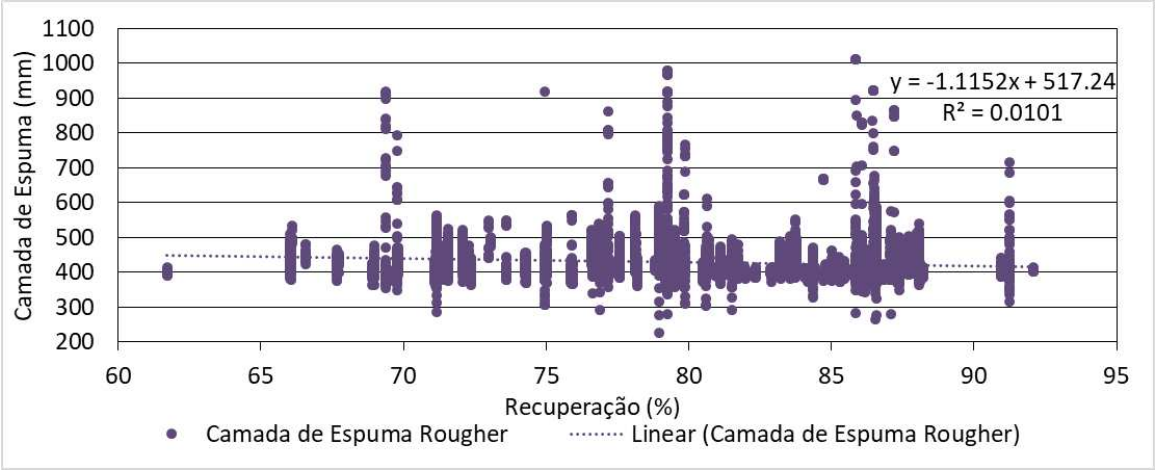



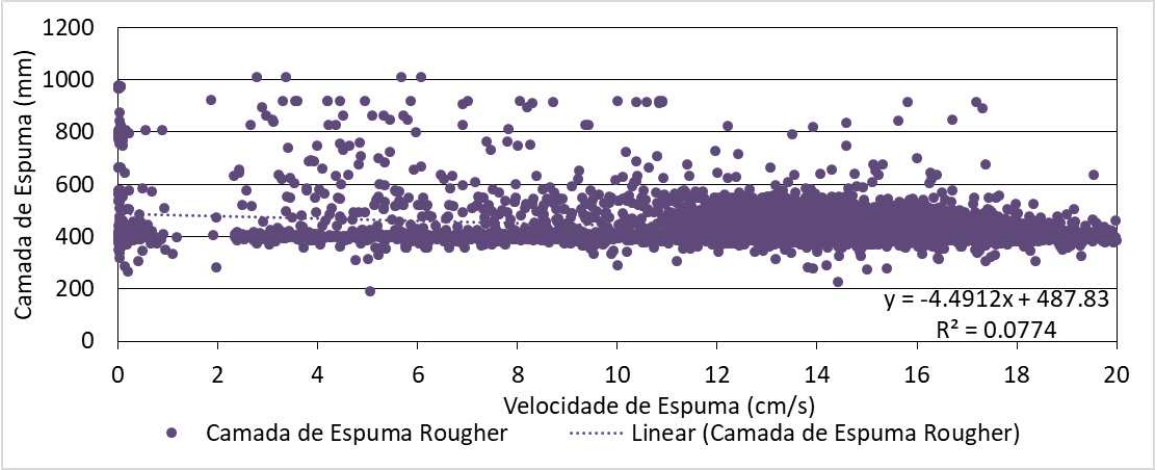




y = 0.1038x + 5.8968
R² = 0.1024
Velocidade de Espuma (cm/s)
25
20
15
10
5
0
60
65
70
75
80
85
90
95
Recuperação (%)
Velocidade Rougher
Linear (Velocidade Rougher)

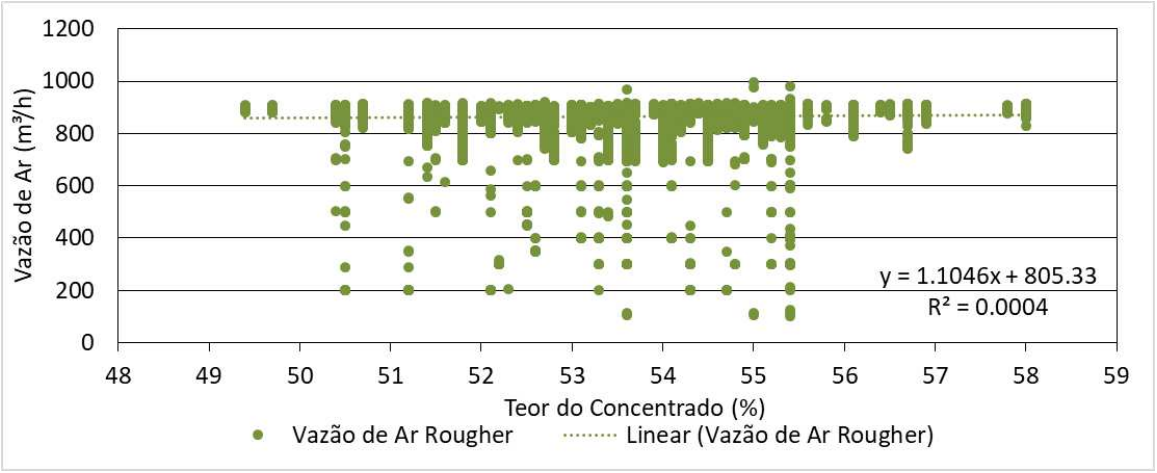
# APÊNDICES B – COMPARAÇÃO ENTRE INDICADORES OPERACIONAIS E CAMADA DE ESPUMA - ETAPA ROUGHER

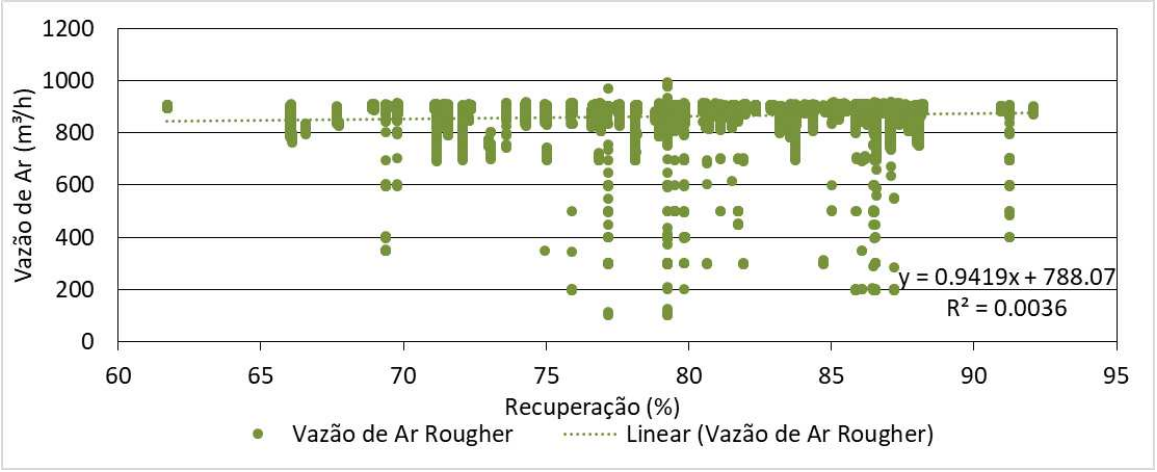


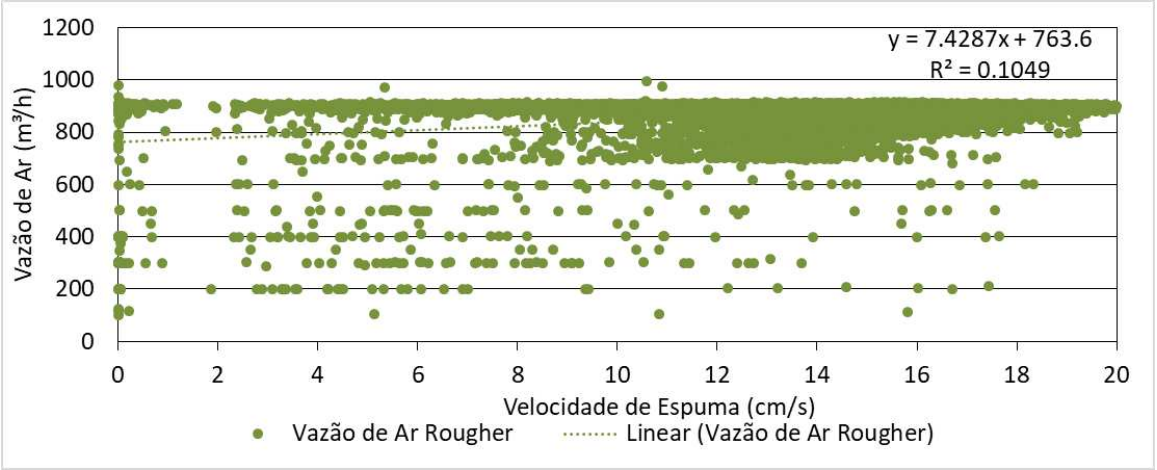



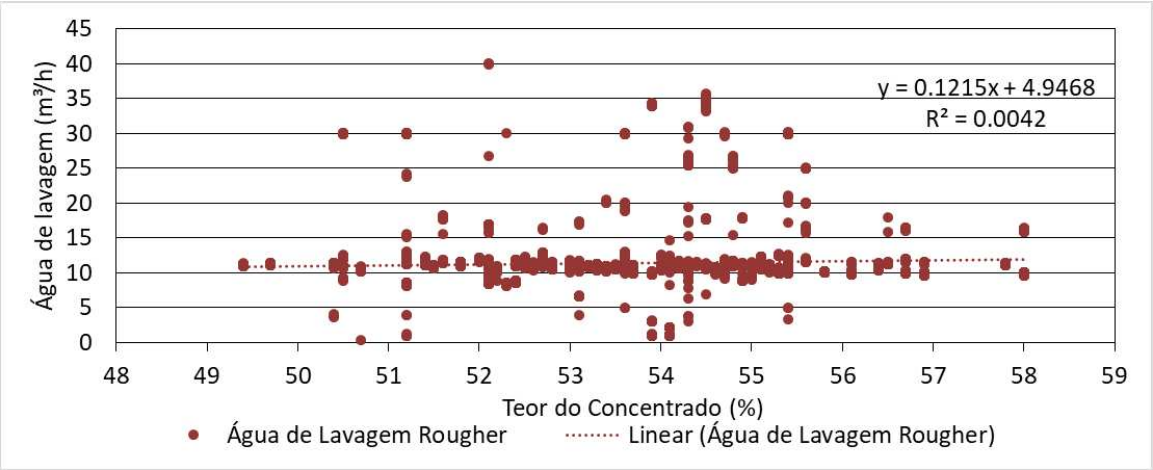
# APÊNDICES C – COMPARAÇÃO ENTRE INDICADORES OPERACIONAIS E VAZÃO DE AR - ETAPA ROUGHER

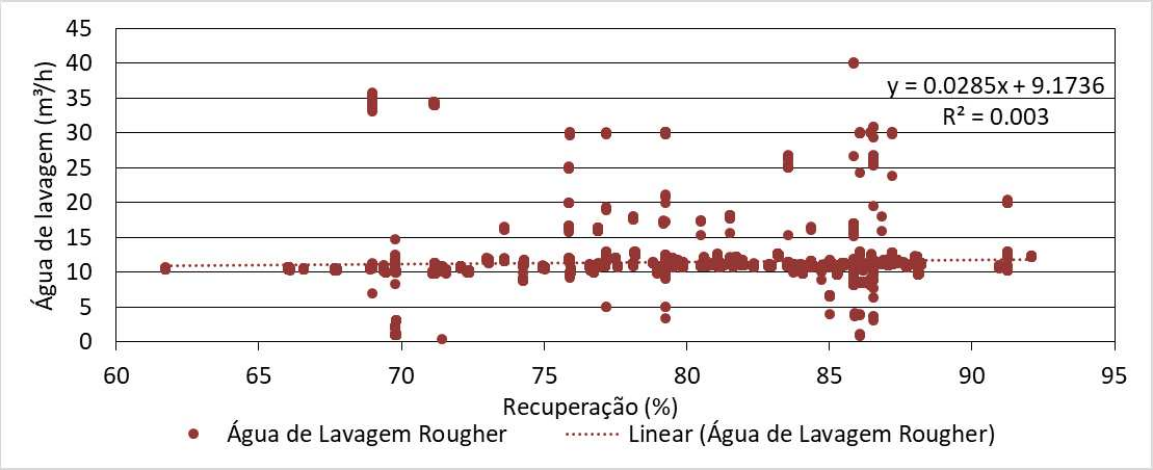


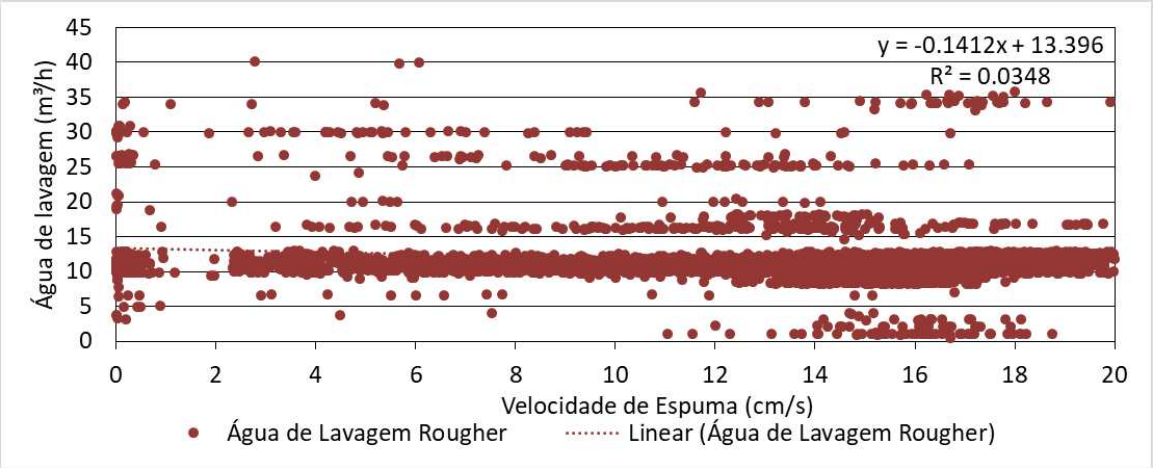



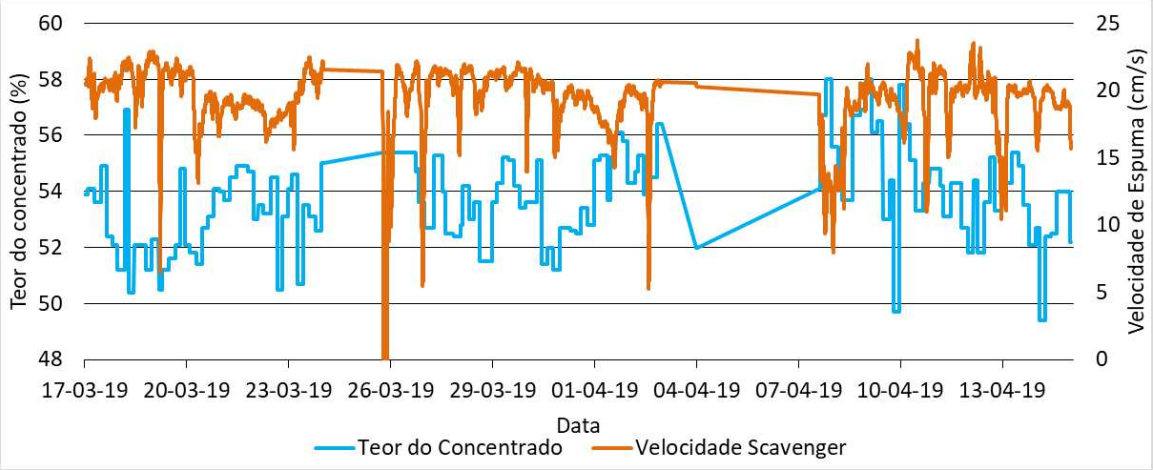
# APÊNDICES D – COMPARAÇÃO ENTRE INDICADORES OPERACIONAIS E ÁGUA DE LAVAGEM - ETAPA ROUGHER

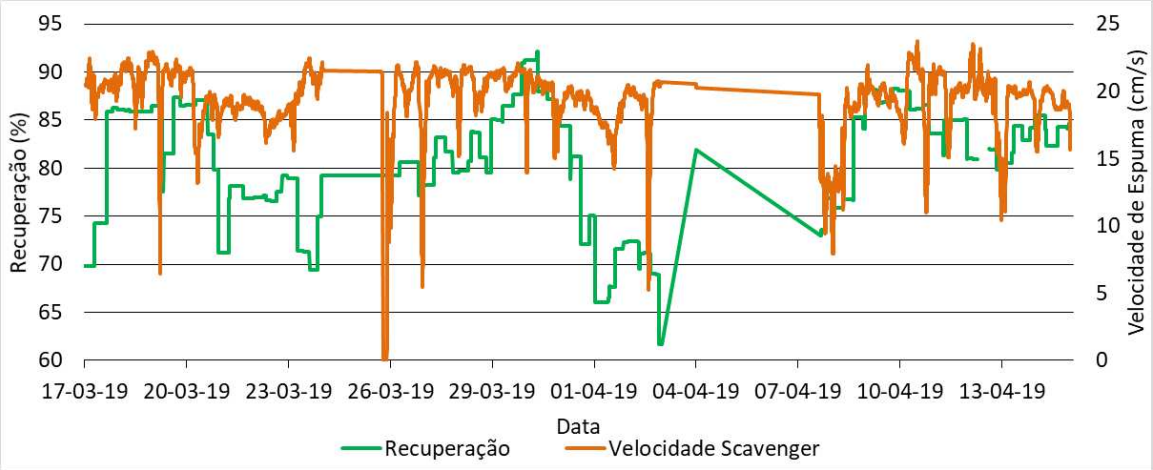


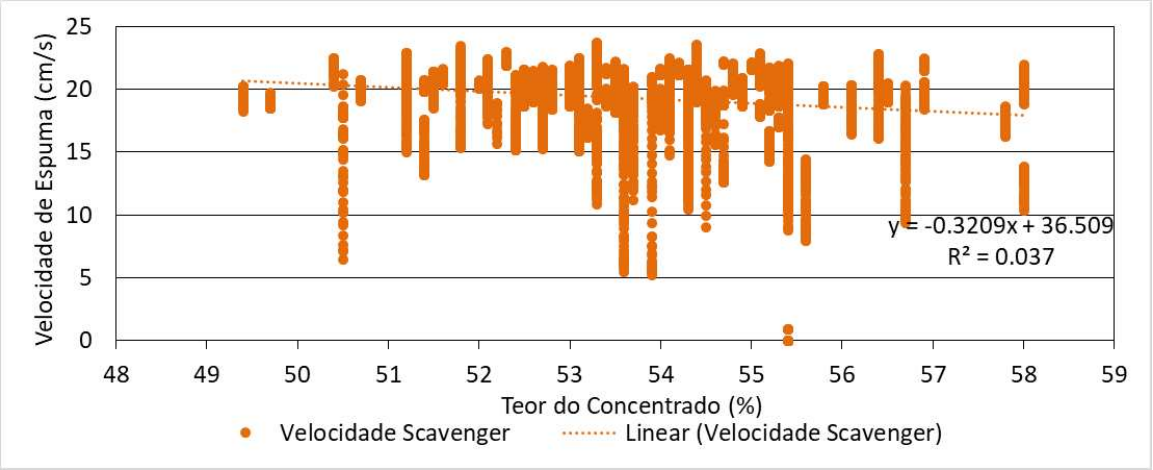



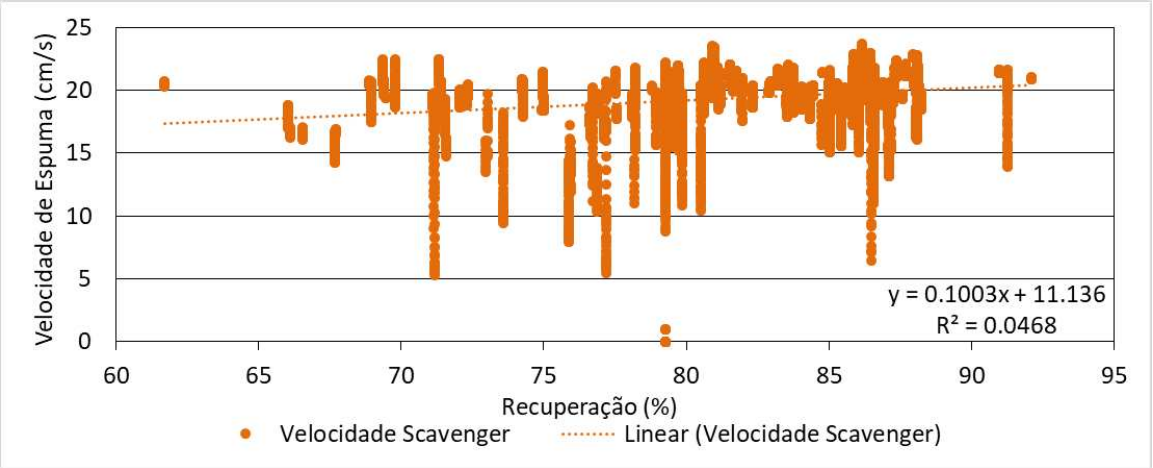



# APÊNDICES E – COMPARAÇÃO ENTRE INDICADORES OPERACIONAIS E VELOCIDADE DE ESPUMA - ETAPA SCAVENGER

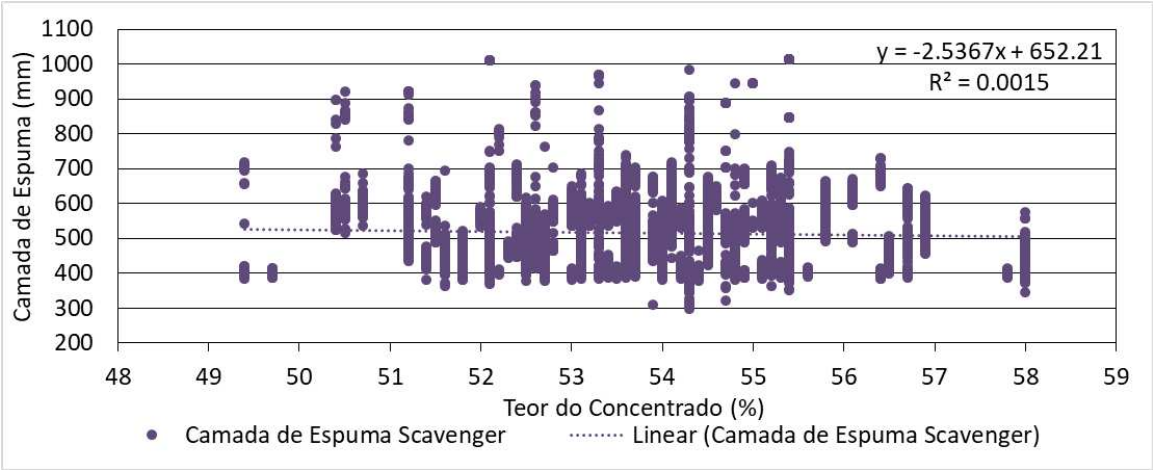


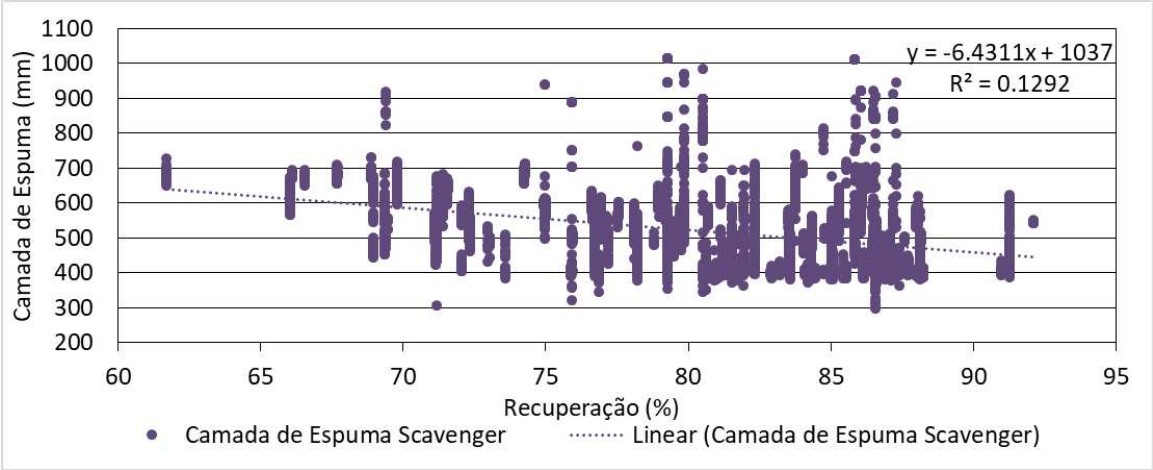



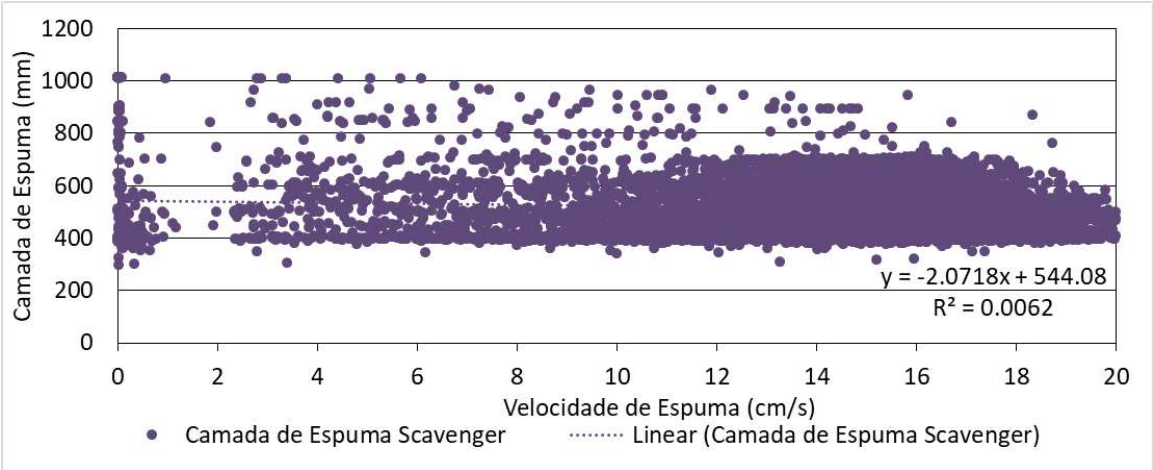




Velocidade de Espuma (cm/s)
25
20
15
10
5
0
60
65
70
75
80
85
90
95
Recuperação (%)
y = 0.1003x + 11.136
R² = 0.0468
Velocidade Scavenger
Linear (Velocidade Scavenger)

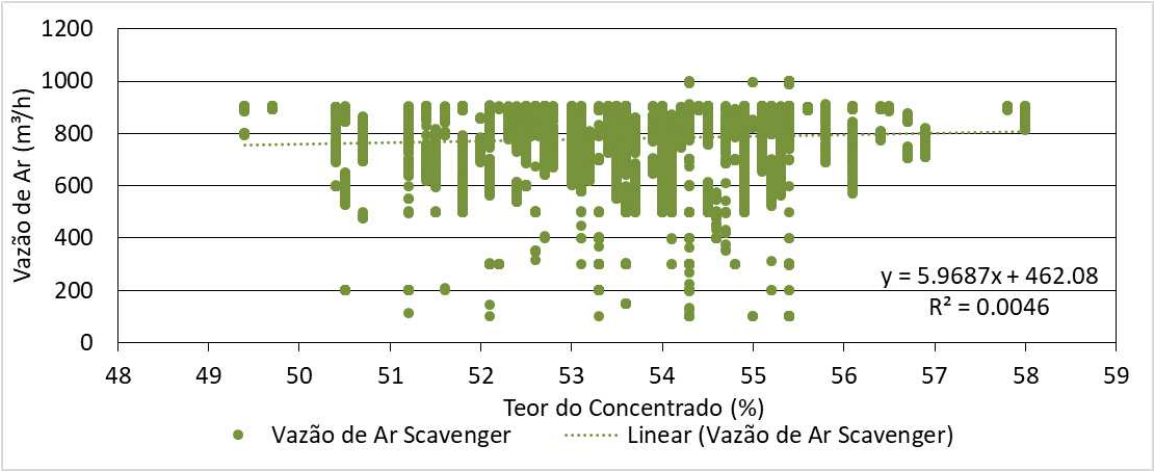
# APÊNDICES F – COMPARAÇÃO ENTRE INDICADORES OPERACIONAIS E CAMADA DE ESPUMA - ETAPA SCAVENGER

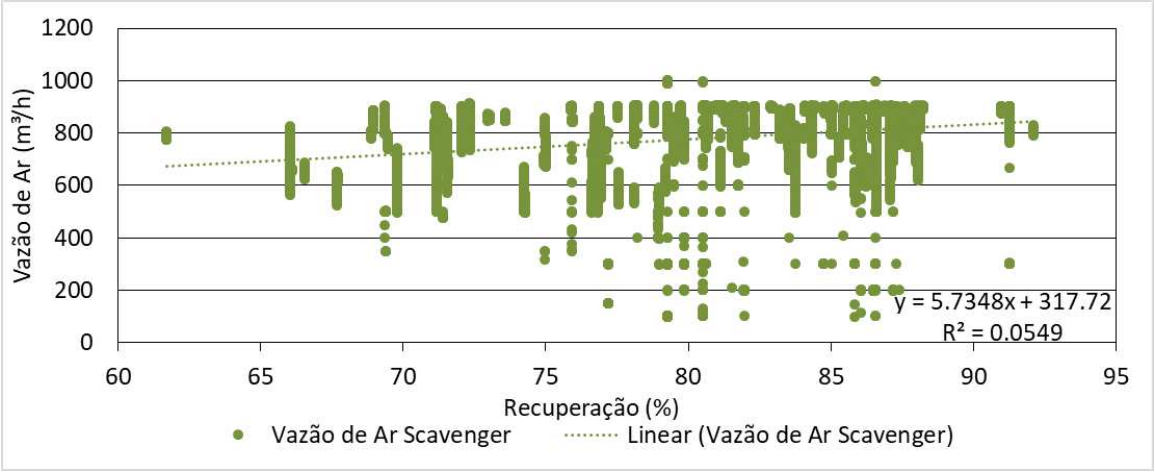


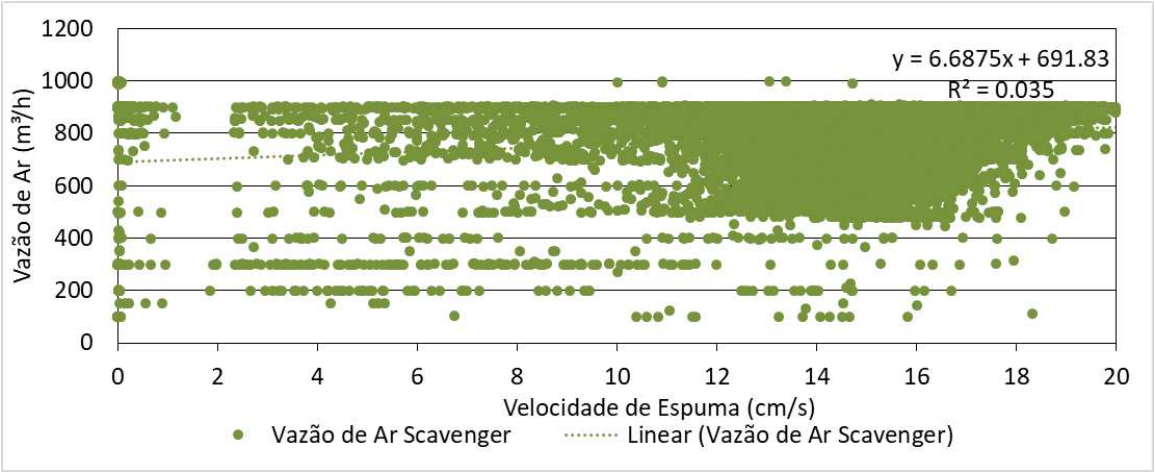
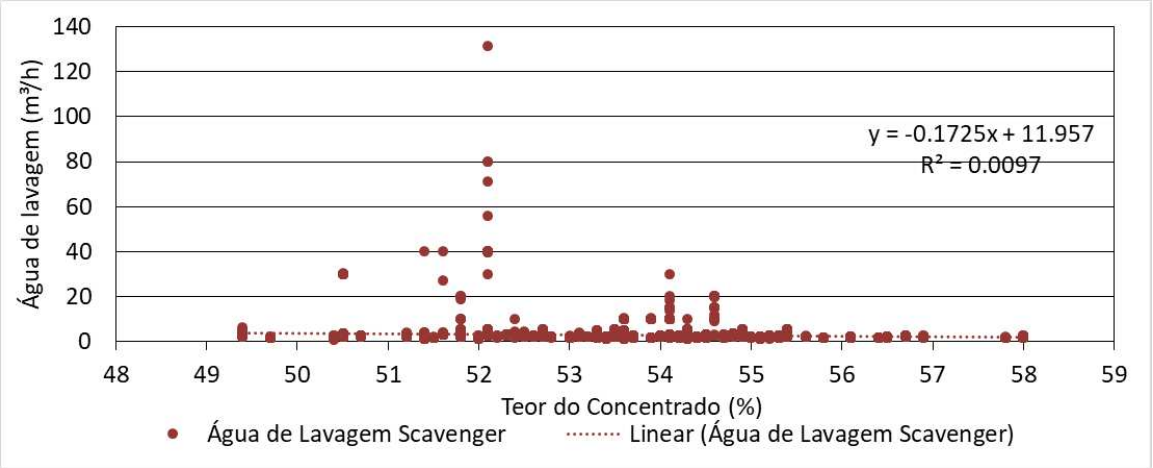
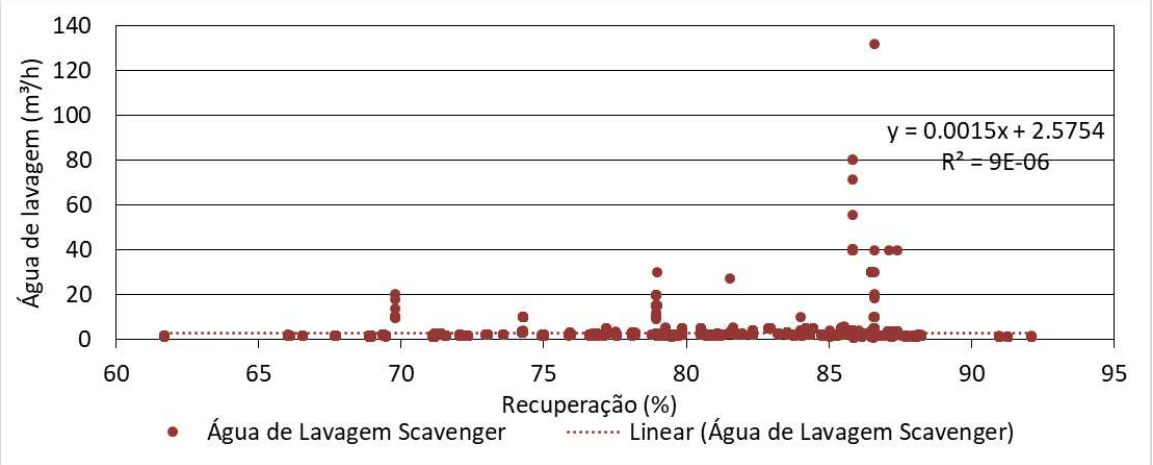
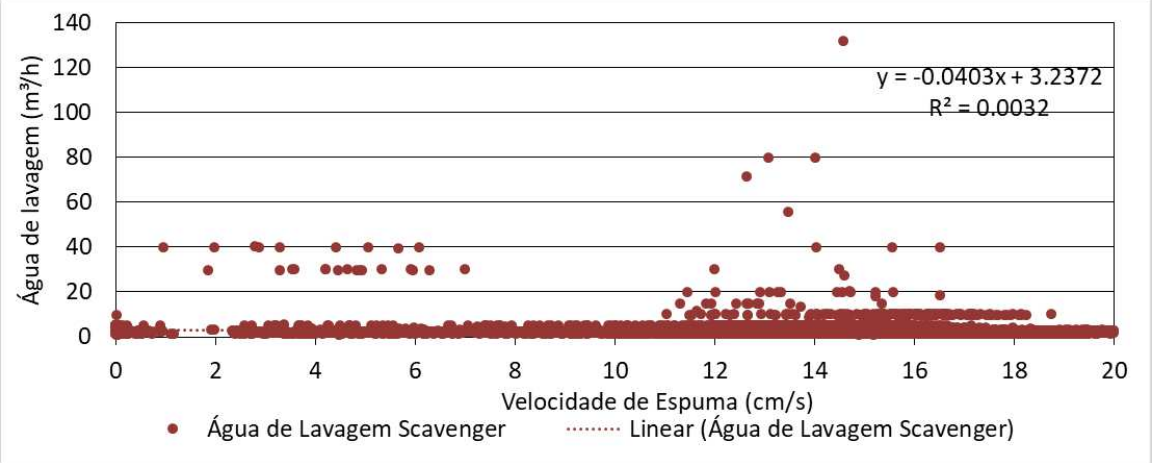



# APÊNDICES G – COMPARAÇÃO ENTRE INDICADORES OPERACIONAIS E VAZÃO DE AR - ETAPA SCAVENGER






# APÊNDICES H – COMPARAÇÃO ENTRE INDICADORES OPERACIONAIS E ÁGUA DE LAVAGEM - ETAPA SCAVENGER