



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
Engenharia de Controle e Automação



Samara Carolina Carlos Teixeira

Desenvolvimento de Estratégias de Controle para Proteção de Ciclones

Ouro Preto
2026

Samara Carolina Carlos Teixeira

Desenvolvimento de Estratégias de Controle para Proteção de Ciclones

Trabalho apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro(a) de Controle e Automação.

Orientador: Prof. Paulo Marcos de Barros Monteiro, Eng., Dr.Sc

Ouro Preto
2026



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Samara Carolina Carlos Teixeira

Desenvolvimento de Estratégias de Controle para Proteção de Ciclones

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheira de Controle e Automação

Aprovada em 12 de fevereiro de 2026

Membros da banca

Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)
MSc. João Carlos Vilela de Castro - Convidado (Universidade Federal de Ouro Preto)
Dr. Agnaldo José da Rocha Reis - Convidado (Universidade Federal de Ouro Preto)

Paulo Marcos de Barros Monteiro, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 25/02/2026



Documento assinado eletronicamente por **Paulo Marcos de Barros Monteiro, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/02/2026, às 09:08, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1062615** e o código CRC **06DF7123**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.002229/2026-13

SEI nº 1062615

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

Agradecimentos

”Entrega o teu caminho ao Senhor, confia nele, e o mais Ele fará”Salmo 37:5

Agradeço, com todo o meu coração, aos meus pais, Edney Adriano Teixeira e Elessandra Maria Carlos Teixeira, por sempre acreditarem em mim, me apoiarem e me guiarem com amor e sabedoria. Ao meu irmão Hugo Adriano Carlos Teixeira, obrigada por sempre estar ao meu lado, comemorando cada vitória, me ouvindo com paciência e me motivando a seguir em frente.

Ao meu esposo, Thales Henrique Simão Silva dos Reis, meu porto seguro, agradeço por acreditar em mim mesmo quando eu duvidei, por me apoiar, aconselhar e estar presente em cada etapa.

Agradeço aos professores que contribuíram para a minha formação e ampliaram minha visão como futura profissional da Engenharia de Controle e Automação. Obrigada pelas aulas, ensinamentos e orientações que foram fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho.

Agradeço profundamente ao meu orientador, professor Dr. Paulo Monteiro, pela orientação dedicada, pela paciência, pelos ensinamentos transmitidos e por todo o suporte técnico e acadêmico ao longo deste trabalho. Sua disponibilidade, seu comprometimento e seu exemplo profissional foram essenciais para que esta pesquisa se concretizasse. Sou imensamente grata pela confiança depositada e por todas as contribuições que ampliaram minha visão e enriqueceram este TCC.

Agradeço ainda aos meus colegas de trabalho da Samarco, que tiveram papel fundamental na minha formação prática e no amadurecimento deste projeto. De forma especial, expresso minha profunda gratidão ao Ricardo Silva e ao Lucas Túlio, obrigada pelo suporte constante, pelos ensinamentos compartilhados, pela paciência diante das minhas dúvidas e pelo companheirismo que tornou cada etapa mais construtiva.

“A persistência é o menor caminho do êxito”.

— Charles Chaplin.

Resumo

Apresenta-se neste trabalho o desenvolvimento e a implementação de uma estratégia de controle integrada para o circuito de alimentação da moagem de uma empresa, cujo processo, anteriormente, operava de forma manual e com baixa estabilidade. O processo de moagem na mineração é uma das etapas mais fundamentais no processo de beneficiamento de minérios. Trata-se do processo de redução do tamanho das partículas do material mineral, transformando os pedaços maiores em partículas menores e mais uniformes. Além disso, a moagem exerce influência direta na eficiência das etapas subsequentes, como a flotação e separação magnética. Uma granulometria adequada aumenta a área de contato das partículas, favorecendo as reações físico-químicas e melhorando a recuperação metalúrgica. O controle existente era limitado à atuação de uma única válvula, responsável apenas pela abertura e fechamento conforme o nível da caixa, sem considerar variáveis essenciais como pressão e comportamento dinâmico do sistema. Para solucionar essas limitações, foi projetada uma lógica de controle baseada na integração das malhas de nível e de pressão, atuando diretamente sobre a velocidade da bomba de alimentação. A implementação permitiu que o sistema ajustasse continuamente a vazão e reagisse de forma rápida a distúrbios, eliminando oscilações de grande amplitude e melhorando a robustez operacional. Os resultados demonstraram redução expressiva nas variações de nível e pressão, além de maior previsibilidade e estabilidade do processo. Como consequência, observou-se aumento da disponibilidade operacional, melhoria na qualidade da alimentação da moagem e elevação da performance global do circuito. Evidencia-se no trabalho que a automação integrada das variáveis-chave proporciona ganhos significativos em eficiência, segurança e confiabilidade do processo, tornando-se uma solução eficaz para otimizar a operação da moagem.

Palavras-chaves: Automação industrial; Controle de nível; Controle de pressão; Sistemas de bombeamento; Estabilidade operacional; Moagem; Malhas de controle.

Abstract

This work presents the development and implementation of an integrated control strategy for the grinding circuit feed of a mining company, whose process previously operated manually and with low stability. The grinding process in mining is one of the most fundamental stages in mineral processing. It consists of reducing the particle size of the mineral material, transforming larger fragments into smaller and more uniform particles. Furthermore, grinding has a direct influence on the efficiency of subsequent stages, such as flotation and magnetic separation. An adequate particle size distribution increases the contact surface area of the particles, enhancing physicochemical reactions and improving metallurgical recovery. The implemented solution enabled continuous flow adjustments and faster disturbance rejection, eliminating large-amplitude oscillations and improving overall robustness. The results show a significant reduction in level and pressure variability, with a more stable and predictable process response. Consequently, the system achieved higher operational availability, improved feed quality to the milling circuit, and enhanced overall performance. The study demonstrates that the integrated automation of key process variables leads to substantial gains in efficiency, safety, and reliability, representing an effective optimization strategy for milling operations.

Key-words: Industrial automation; Level control; Pressure control; Pumping systems; Operational stability; Milling process; Control loops.

Lista de figuras

Figura 1 – Fluxograma do hidrociclone	11
Figura 2 – Impurezas Minério de Ferro	15
Figura 3 – Fluxograma típico de tratamento de minério, com recirculação de água	17
Figura 4 – Grate discharge mill	19
Figura 5 – Circuito de moagem fechado simples	19
Figura 6 – Moinho de barras	19
Figura 7 – Moinho de martelos	20
Figura 8 – Detalhamento de um hidrociclone	21
Figura 9 – Pirâmide da automação	23
Figura 10 – Controle em malha aberta	24
Figura 11 – Controle em malha fechada	25
Figura 12 – Controle por Realimentação (<i>feedback</i>)	25
Figura 13 – Controle antecipatório	26
Figura 14 – Exemplo de controle <i>override</i>	28
Figura 15 – Exemplo de Controle em Cascata	29
Figura 16 – Instrumento de pressão e nível Fieldbus Rosemount	31
Figura 17 – Fluxograma de controle <i>Fluxograma de controle</i>	33
Figura 18 – Fluxograma de controle <i>Desenho da lógica de controle proposta</i>	34
Figura 19 – Fluxograma de controle <i>Implementação da malha de controle LIC</i>	35
Figura 20 – Fluxograma de controle <i>Implementação da malha de controle PIC</i>	35
Figura 21 – Fluxograma de controle <i>Implementação da selecionadora CSEL</i>	36
Figura 22 – Fluxograma de controle <i>Faceplate</i>	37
Figura 23 – Variáveis de processo antes da implementação	38
Figura 24 – Desempenho da malha de controle após implementação	40

Lista de abreviaturas e siglas

ANM	Agência Nacional de Mineração
CLP	Controlador Lógico Programável
CSEL	Seletor de Controle
E/S	Entrada e Saída
Fe	Ferro
FC	Controlador de Vazão
HMI	Interface Homem-Máquina
KPI	Indicador-chave de Desempenho
LIC	Controlador Indicador de Nível
LC	Controlador de Nível
LT	Transmissor de Nível
FV	Válvula de Vazão
FT	Transmissor de Vazão
PID	Proporcional Integral Derivativo
PIC	Controlador Indicador de Pressão
PLC	Controlador Lógico Programável
SCADA	Sistema Supervisório de Aquisição e Controle de Dados
SP	Setpoint (Valor de Referência)

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Contexto	10
1.2	Motivação	11
1.3	Objetivos	13
1.3.1	Objetivo geral	13
1.3.2	Objetivo específicos	13
2	REVISÃO DE LITERATURA	14
2.1	Automação na mineração	14
2.2	Beneficiamento de minério ferro	14
2.3	Processo de moagem	18
2.3.1	Tipos de moagem	18
2.4	Processo de ciclonagem	20
2.5	Instrumentação	22
2.6	Controle de processos	24
2.7	Estratégias Clássicas de Controle	27
2.7.1	Controle em <i>override</i>	27
2.7.2	Controle em cascata	28
3	DESENVOLVIMENTO	30
3.1	Metodologia	30
3.2	Materiais	30
3.2.1	Sistema de controle DeltaV	30
3.2.2	Instrumento de pressão e nível Fieldbus Rosemount	31
3.2.3	Bomba HMS Industrial Network - Profibus	31
3.3	Desenvolvimento da programação	32
3.3.1	Implementação da malha de controle	32
4	RESULTADOS	38
5	CONCLUSÃO	41
	Referências	43

1 Introdução

1.1 Contexto

A mineração é o processo de extração de recursos minerais e geológicos da terra, que podem ser utilizados em diversas aplicações industriais, comerciais e tecnológicas. A mineração desempenha um papel fundamental no desenvolvimento econômico e na infraestrutura global, fornecendo materiais que são de grande importância aos bens de consumo.

O processo de mineração envolve várias etapas, como prospecção, extração, beneficiamento (tratamento do minério, separando o material de interesse) e fechamento da mina. Industrialmente, a única forma pela qual se obtém o ferro (Fe) é a partir de substâncias minerais. O metal é o quarto elemento mais abundante da crosta terrestre, de cuja composição participa com 4,5 por cento em massa, superado apenas pelo oxigênio, o silício e o alumínio. (THOMSON, 1869).

O processo de moagem na mineração é uma das etapas mais fundamentais no processo de beneficiamento de minérios. Trata-se do processo de redução do tamanho das partículas do material mineral, transformando os pedaços maiores em partículas menores e mais uniformes. Esse processo possibilita liberar os minerais valiosos que são associados a outros componentes no minério bruto, facilitando assim a separação e o processamento posterior.

Os ciclones desempenham um papel fundamental para a adequação do tamanho das partículas por meio de uma etapa classificatória. A polpa em alta pressão é bombeada na sua entrada. Dentro do equipamento, existem dois fluxos, sendo, um que carrega as partículas mais grossas, que saem por baixo do hidrociclones (*underflow*) e o outro carrega partículas mais leves e menos densas, que saem por cima (*overflow*) (LOPES JÚNIOR, 2019).

O controle automatizado de um processo é essencial para o funcionamento eficiente nos processos industriais. Desempenha um papel importante ao otimizar operações, garantindo que as etapas funcionem de forma contínua, reduzindo desperdícios e tempo. Além disso, proporciona uma melhor qualidade do produto, visto que, variáveis são pré definidas e durante o controle são asseguradas de atender os limites desejados.

Devido à grande evolução da automação de processos, uma tendência que se segue é que as ações de implementação de controles, tornam-se fundamentais para as empresas. Os motivos são claros: uma vez que os processos existem diversas restrições, é humanamente impossível conseguir acompanhar cada etapa simultaneamente e levar em conta todas as restrições antes de realizar a tomada de decisão, ou seja, na maioria dos casos as ações

podem ser inadequadas e tardias. Além disso, obtém-se uma redução dos custos e um aumento na qualidade do produto. Estratégias de controle que respeitam as restrições do processo podem melhorar a estabilidade da planta. (LOPES JÚNIOR, 2019).

1.2 Motivação

Durante o processo de beneficiamento do minério de ferro, a etapa dos hidrociclones é de extrema importância para a classificação e separação de partículas. A polpa é introduzida na parte superior do equipamento, gerando um fluxo rotacional em alta velocidade. Esse movimento cria uma força centrífuga que separa as partículas com base em suas características físicas.

Na figura 1 é ilustrado o fluxograma de operação do hidrociclone. A polpa é introduzida e as partículas maiores e mais densas migram para as paredes internas, movendo-se em espiral descendo até a saída *underflow*. Por outro lado, as partículas mais leves são direcionadas para o centro do fluxo e saem pela parte superior, chamada de *overflow* (DA CRUZ; ZANINI, 2010). O material *underflow* não atingiu as especificações necessárias para o processo, por esse fato, ele é recirculado, ou seja, passa novamente pela moagem e em seguida direcionado ao hidrociclone. Já o material *overflow* é direcionado ao processo seguinte.

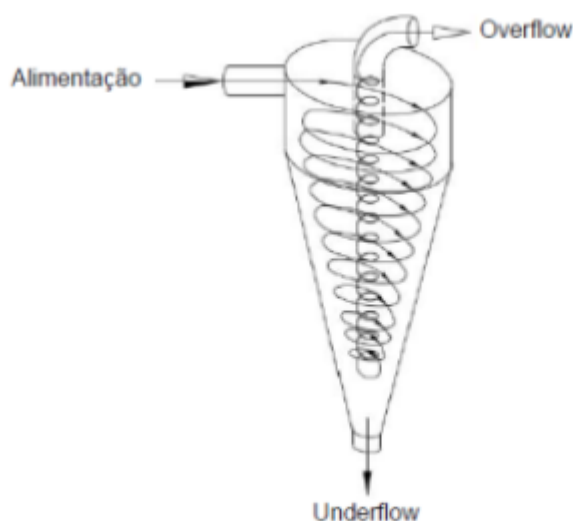


Figura 1 – Fluxograma do hidrociclone.

Fonte: SILVA, 2014.

A pressão é um dos parâmetros operacionais mais importantes no funcionamento de hidrociclones, influenciando diretamente a separação das partículas e a eficiência do processo. A pressão regula a velocidade do fluxo da polpa no interior do equipamento, determinando a intensidade da força centrífuga que atua na separação das partículas.

Quando a pressão é alta, o fluxo interno se intensifica, gerando maior força centrífuga e promovendo uma separação mais eficiente. No entanto, se a pressão for excessivamente alta, aumenta-se o desgaste dos componentes internos devido a abrasão, podendo acontecer também do material se sedimentar ou sair todo pelo *overflow*.

Por outro lado, quando a pressão está abaixo do nível ideal, a força centrífuga gerada é insuficiente para realizar uma separação eficiente. Isso pode resultar na passagem de partículas grossas para o *overflow*, comprometendo a qualidade da classificação. Além disso, uma pressão inadequada pode reduzir a capacidade de processamento do equipamento, prejudicando o fluxo contínuo da planta.

O nível da caixa de recirculação que alimenta a bomba e o hidrociclone desempenha um papel fundamental na pressão do sistema, uma vez que está diretamente relacionado ao volume da polpa para a bomba e, conseqüentemente, para o hidrociclone. Quando o nível da caixa de alimentação está baixo, a bomba não recebe a quantidade necessária de polpa, o que pode resultar em uma redução na vazão de alimentação e com isso diminuir a pressão. Com menos fluxo, a força centrífuga gerada é reduzida, o que pode comprometer a separação eficiente, e como consequência, as partículas do *underflow* podem escapar pelo *overflow*.

Em contrapartida, quando o nível da caixa está alto, a bomba recebe um fluxo maior, devido ao aumento da vazão, o que pode resultar em um aumento da pressão na linha. Com a pressão excessiva, pode causar desequilíbrio no processo, resultando em dificuldade para controlar e com isso maior quantidade de partículas finas no *underflow*.

Diante do exposto, observa-se que o desempenho do hidrociclone está diretamente associado ao controle adequado de variáveis operacionais, especialmente a pressão e o nível da caixa de alimentação. Pequenas variações nesses parâmetros podem provocar impactos significativos na eficiência da classificação, na estabilidade do circuito de moagem e, conseqüentemente, nos resultados metalúrgicos da planta.

A interdependência entre nível, vazão e pressão evidencia a necessidade de um controle mais preciso e integrado do sistema, a fim de evitar perdas de eficiência, aumento da recirculação de carga, desgaste prematuro dos equipamentos e elevação dos custos operacionais. A instabilidade operacional não afeta apenas a qualidade da separação granulométrica, mas compromete também o desempenho global do processo de beneficiamento.

Assim, a motivação para o desenvolvimento deste trabalho está fundamentada na busca por maior estabilidade, eficiência e confiabilidade do circuito de classificação. Ao propor melhorias e estratégias de controle para as variáveis envolvidas, pretende-se otimizar o processo, reduzir variabilidades indesejadas e contribuir para um melhor aproveitamento do minério, garantindo ganhos técnicos e econômicos para a operação.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo geral

Desenvolver e implementar uma estratégia de controle para o sistema de classificação por hidrociclones, visando melhorar a eficiência do processo por meio do controle integrado da pressão do hidrociclone e do nível da caixa de alimentação, garantindo maior estabilidade operacional e melhor desempenho da separação granulométrica.

1.3.2 Objetivo específicos

- Desenvolver uma lógica de controle integrada para as variáveis pressão do hidrociclone e nível da caixa de alimentação.
- Desenvolver uma lógica de controle integrada para as variáveis pressão do hidrociclone e nível da caixa de alimentação.
- Implementar uma estratégia de atuação na velocidade da bomba como variável manipulada do sistema.
- Priorizar o controle de nível em condições normais de operação, assegurando estabilidade na vazão de alimentação.
- Estabelecer limites operacionais de pressão (máximos e mínimos) para atuação das malhas de controle em situações críticas.
- Reduzir oscilações operacionais que impactam a eficiência da classificação.
- Melhorar a qualidade da separação granulométrica, minimizando o envio indevido de partículas grossas para o *overflow* e de finos para o *underflow*.
- Contribuir para maior estabilidade do circuito de moagem e redução de perdas operacionais.

2 Revisão de literatura

O intuito desse capítulo é abordar os principais temas e conceitos utilizados para o desenvolvimento teórico presente nesse trabalho.

2.1 Automação na mineração

A automação na mineração tem sido um dos principais vetores de modernização da indústria mineral, contribuindo para a melhoria da eficiência operacional, segurança dos trabalhadores e sustentabilidade ambiental. Com o avanço das tecnologias da indústria 4.0, com sistemas supervisórios e inteligência artificial, a mineração tem se tornado cada vez mais digitalizada e integrada ([LAGE, 2021](#)).

Historicamente, a indústria mineral passou por diversas fases de evolução tecnológica, desde a mecanização até a atual era da digitalização. No início, as operações dependiam exclusivamente da força humana e de máquinas de operação manual, enquanto hoje há um crescente uso de sistemas inteligentes que permitem a otimização de processos em tempo real.

2.2 Beneficiamento de minério ferro

O minério de ferro é um dos recursos minerais mais importantes para a economia global, sendo a principal matéria-prima para a produção de aço. Extraído de jazidas, ele passa por uma série de processos de beneficiamento antes de ser utilizado na indústria siderúrgica. Entretanto, sua composição natural inclui diversas impurezas, conforme figura 2 ilustrativa, que precisam ser removidas para garantir um produto de alta qualidade.

O processo de extração e processamento do minério de ferro envolve a extração do minério bruto das minas, seguido por etapas de beneficiamento para remover impurezas, como sílica, antes de ser transformado em ferro-gusa. O ferro-gusa é um material intermediário obtido no processo de produção de ferro. Ele é uma liga de ferro com uma alta quantidade de carbono (geralmente entre 3% e 4%) e outras impurezas, como silício, manganês, enxofre e fósforo. O ferro-gusa é produzido em alto-fornos a partir da fusão do minério de ferro (geralmente hematita ou magnetita) com coque (um derivado do carvão) e cal (para remover impurezas).



Figura 2 – Impurezas Minério de Ferro.

Fonte: Clariant, 2020.

O minério de ferro é uma rocha ou mineral que contém ferro em concentrações economicamente viáveis para a extração e processamento. Ele pode ser encontrado de diversas formas, as principais são:

- Hematita (Fe_2O_3): O mais abundante e economicamente viável, com teor de ferro entre 60% e 70%.
- Magnetita (Fe_3O_4): Apresenta teor de ferro superior (cerca de 72%), mas requer beneficiamento mais completo.
- Goethita ($\text{FeO}(\text{OH})$) e limonita ($\text{FeO}(\text{OH}) \cdot n\text{H}_2\text{O}$): Minérios hidratados com menor concentração de ferro (40%-55%).

Os minérios de ferro extraídos das jazidas naturais contêm impurezas que podem comprometer sua qualidade e eficiência nos processos industriais, as principais impurezas incluem:

- Sílica (SiO_2): Um dos contaminantes mais comuns, prejudica o processo de fusão e deve ser removida por flotação ou separação magnética.
- Alumina (Al_2O_3): Aumenta a viscosidade da escória nos altos-fornos, dificultando a separação do ferro metálico.

- Enxofre (S): Causa fragilidade no aço e é removido por flotação ou tratamento em alto-forno.
- Fósforo (P0): Altos teores tornam o aço quebradiço, sendo necessário reduzir sua concentração por processos químicos ou térmicos.

O beneficiamento do minério de ferro é uma etapa essencial na cadeia produtiva da mineração, sendo responsável pela transformação do minério bruto em um produto de maior valor agregado. Esse processo envolve diversas operações, como cominuição, classificação, concentração, desaguamento e pelotização, com o objetivo de aumentar o teor de ferro e reduzir impurezas, garantindo a qualidade do material para a utilização (SALES, 2012).

De acordo com (LUZ; LINS, 2010), de forma geral, as operações para adequações podem ser classificadas como:

1. Cominuição (Britagem ou Moagem)

- Reduz o tamanho das rochas facilitando o processo posterior

1. Peneiramento

- Separa as partículas do minério conforme o tamanho, garantindo que apenas materiais com a granulometria desejada avancem para a próxima etapa.

1. Classificação (Hidrociclones ou Classificação por sedimentação)

- Separa as partículas do minério conforme o tamanho e densidade, melhorando a eficiência da concentração.

1. Concentração (Separação magnética, flotação ou concentração gravimétrica)

- Essa etapa visa aumentar o teor de ferro do minério, separando-o das impurezas.

1. Desaguamento (Filtração ou espessamento)

- Após a concentração, o minério ainda contém alta umidade e precisa ser desaguado.

1. Secagem (Secadores rotativo ou secadores de leito fluidizado)

- A secagem é uma etapa complementar que reduz ainda mais a umidade do minério.

A figura 3 é uma ilustração de todo o processo desde a extração (lavra) até a disposição final.

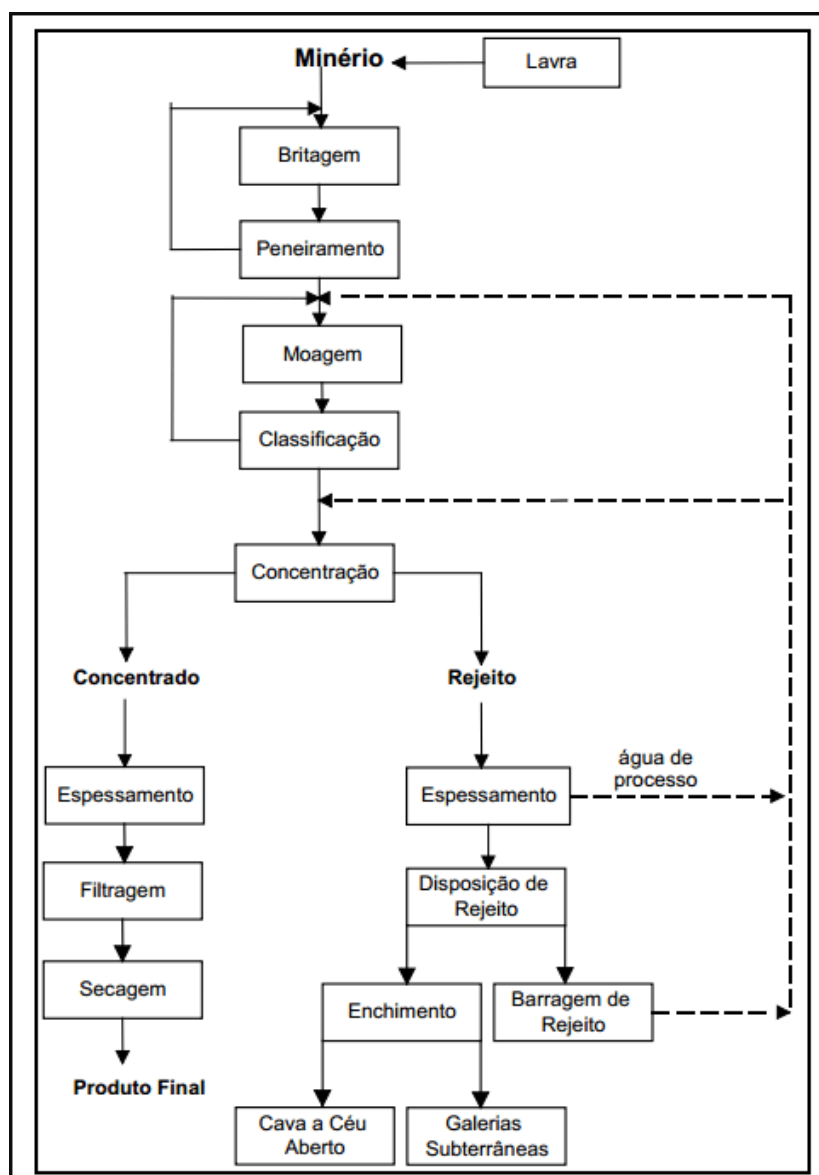


Figura 3 – Fluxograma típico de tratamento de minério, com recirculação de água.

Fonte: Adaptado de LUZ e LINS, 2010.

A disposição final demonstrada na figura 4 representa os rejeitos gerados durante todo o processo e depositados em estruturas nas quais são mais encontradas no Brasil. Segundo (SOUZA JUNIOR; MOREIRA; HEINECK, 2018) as barragens são estruturas utilizadas para contenção de rejeitos gerados oriundas do beneficiamento de minério.

A resolução ANM nº4/2019, publicada pela Agência Nacional de Mineração, estabelece regras para a segurança das barragens de rejeito no Brasil. Ela foi criada após os desastres ambientais ocorridos e tem como principal objetivo eliminar gradualmente as barragens construídas pelo método a montante e a proibição de construções de novas barragens utilizando esse método.

As empresas do setor de mineração desenvolveram diversos estudos visando alternativas para a disposição de rejeitos. As soluções estudadas passam por rotas de desaguoamento, seguidas por etapa de filtragem e por fim o material é disposto a seco em pilhas de maior estabilidade geotécnica e com maior segurança ambiental.

O empilhamento a seco é uma técnica de disposição de rejeitos na mineração que elimina a necessidade de barragens, tornando o processo mais seguro e sustentável. Nesse método, os rejeitos passam por um processo de desaguoamento por meio de filtros, reduzindo a umidade e permitindo sua compactação em pilhas estáveis. As principais vantagens incluem a eliminação do risco de rompimento de barragens, redução do impacto ambiental, a melhoria na reutilização da água, diminuindo o consumo hídrico, e a maior estabilidade geotécnica das pilhas de rejeito (BRAGA, 2021).

2.3 Processo de moagem

A moagem é uma das etapas mais importantes do processo de beneficiamento do minério, sendo responsável pela redução do tamanho das partículas para facilitar a liberação dos minerais de interesse. Segundo (WILLS; FINCH, 2016) o principal objetivo da moagem é promover a redução granulométrica do minério, tornando as partículas finas o suficiente para liberar os minerais valiosos das impurezas associadas.

2.3.1 Tipos de moagem

De acordo com (FINCH; BOYES, 2021) existem vários tipos de moinhos, a escolha do equipamento depende da dureza do minério, do tamanho das partículas desejadas e do tipo de processo adotado.

- Moinhos de bolas: Utilizam esferas de aço para impactar e fragmentar o minério, são amplamente usados na moagem úmida. A moagem em um moinho de bolas é efetuada pelo contato pontual de bolas e partículas de minério e, com o tempo, qualquer grau de finura pode ser alcançado. A figura 4 é uma ilustração da alimentação e produto final (WILLS; FINCH, 2016).

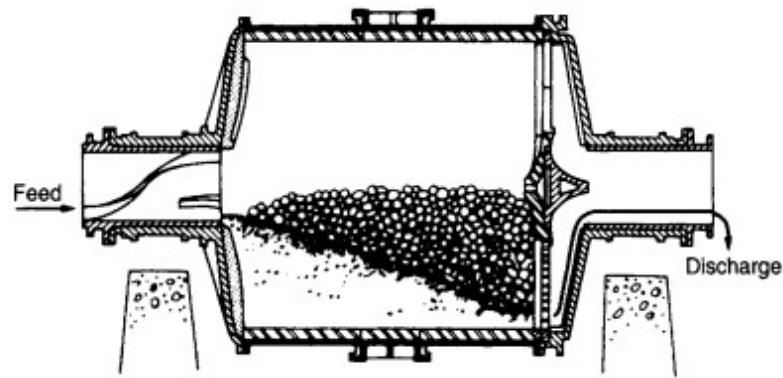


Figura 4 – Representação da alimentação do Moinho.

Fonte: Wills e Finch, 2016.

A figura abaixo, representa o processo de circuito fechado da moagem.

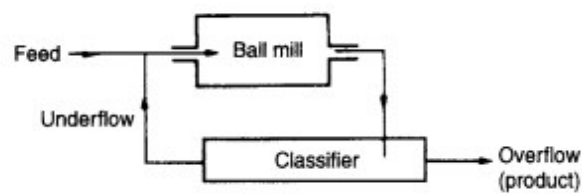


Figura 5 – Circuito de moagem fechado simples.

Fonte: Wills e Finch, 2016.

- Moinhos de barras: Utilizado principalmente para a moagem de materiais mais grossos, produzindo uma granulometria mais uniforme. Para a realização do processo, utilizam barras de aço para moer o material (GUPTA; YAN, 2006).



Figura 6 – Moinho de barras.

Fonte: Flickr, 2016.

- Moinho de martelos: Utilizam martelos rotativos para impactar e moer o material, normalmente possuem partículas maiores, sendo mais comuns em moagem a seco. (WILLS; FINCH, 2016). O material é atingido por uma combinação repetida do martelo e colisão com a parede da câmara de moagem. Além disso, a colisão entre partículas e partículas desempenham um papel fundamental nesse processo de redução de tamanho.

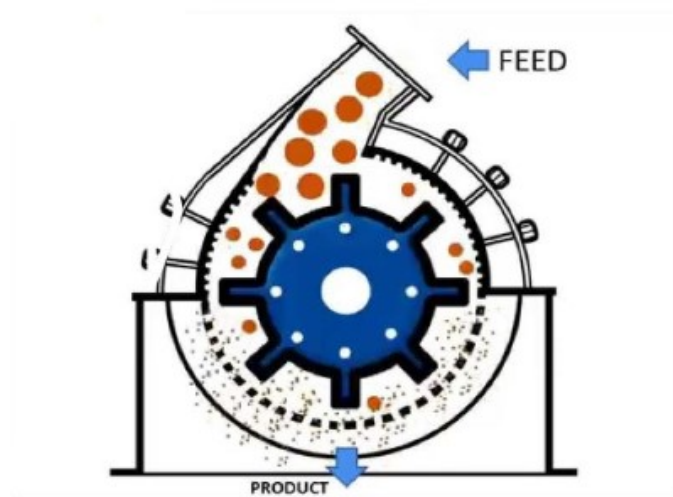


Figura 7 – Moinho de martelos.

Fonte: TRUSTAR, 2016.

2.4 Processo de ciclonação

O hidrociclone é um equipamento cônico onde uma polpa de minério (mistura de sólidos e líquidos) entra em alta velocidade, criando um fluxo rotacional (GONÇALVES et al., 2022). Esse movimento gera uma separação natural:

- Partículas mais grossas e densas: São lançadas para as paredes do ciclone e saem pelo *underflow* (parte inferior) (CAVALCANTE et al., 2019), podendo ser reprocessados na moagem ou descartadas como rejeito.
- Partículas mais finas e leves: São direcionadas para o centro do equipamento e saem pelo *overflow* (parte superior) (CAVALCANTE et al., 2019), sendo enviadas para as etapas seguintes do beneficiamento.

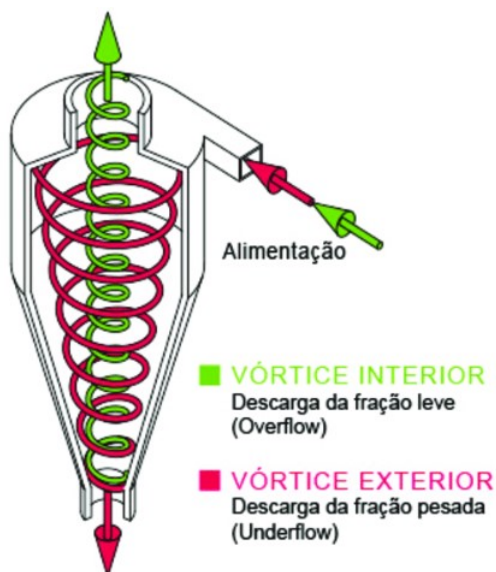


Figura 8 – Detalhamento de um hidrociclone.

Fonte: AKW,2018

Para que a ciclonagem seja eficiente, alguns parâmetros operacionais precisam ser monitorados constantemente:

- Pressão na alimentação: Um aumento excessivo na pressão pode resultar em partículas muito finas no *underflow* ou partículas grossas para o *overflow*, reduzindo a eficiência da separação (LOPES JÚNIOR, 2019).

A pressão é a força exercida por um fluido (líquido ou gás) sobre uma superfície, dividida pela área dessa superfície (KHAN ACADEMY, 2025). Matematicamente, é expressa por:

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

Onde:

- P = Pressão (Pa, bar, psi)
- F = Força exercida (N)
- A = Área da superfície onde a força atua (m²)

Os tipos de pressão incluem:

- Pressão absoluta: Considera a pressão em relação ao vácuo absoluto.

- Pressão manométrica: Mede a diferença entre a pressão do fluido e a pressão atmosférica.
- Pressão hidrostática: Pressão exercida por um líquido em repouso devido à gravidade.

Os métodos de medição de nível, incluem:

- Medição por pressão hidrostática: Baseia-se na relação entre a altura da coluna de líquido e a pressão no fundo do tanque.
- Medição ultrassônica: Utiliza ondas sonoras para determinar a distância entre o sensor e a superfície do fluido.
- Medição por radar: Funciona de forma semelhante ao ultrassônico, mas usa ondas eletromagnéticas, sendo mais eficiente para materiais espumosos ou irregulares.
- Medição capacitiva: Utilizada para sólidos e líquidos, detectando variações na capacitância de um sensor em contato com o material.

2.5 Instrumentação

A instrumentação industrial é um conjunto de técnicas e dispositivos utilizados para medir, monitorar e controlar variáveis essenciais em processos industriais, como, por exemplo, pressão, nível, temperatura, vazão e densidade. A instrumentação desempenha um papel fundamental na automação e otimização dos processos de beneficiamento, garantindo maior eficiência ([FRANCHI, 2015](#)).

Por meio de sensores e dispositivos de medição, responsáveis pela aquisição, registro e processamento dos dados, a instrumentação fornece os dados em tempo real de forma eficaz, permitindo um monitoramento e controle preciso.

A figura 9, representa a pirâmide da automação que apresenta os diferentes níveis de controle de automação industrial, desde os equipamentos em campo até o gerenciamento.

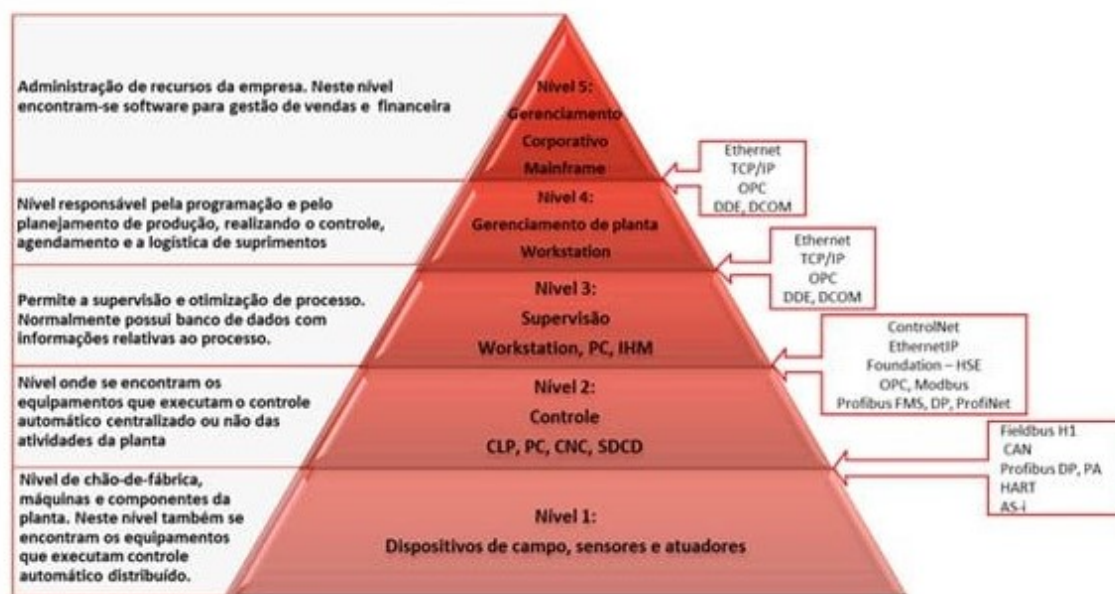


Figura 9 – Pirâmide da automação.

Fonte: automacaoindustrial.info, 2016

O primeiro nível é composto pelos instrumentos de campo. Eles atuam como uma fonte de captura dos dados e auxiliam na implementação das ações de controles garantindo um desempenho otimizado e confiável do sistema e das malhas de controle presentes na planta. Os dados que são obtidos pelos instrumentos, são utilizados no segundo nível da pirâmide, onde os algoritmos e estratégias de controle são desenvolvidos para tomar decisões e ajustar os atuadores, visando atender os requisitos do processo produtivo.

Os principais instrumentos encontrados em plantas industriais são:

- **Sensores:** São dispositivos que detectam variáveis físicas ou químicas dos processos e as transformam em sinais elétricos ou digitais.
- **Indicadores:** Exibem as medições realizadas pelos sensores, permitindo que os operadores visualizem as variáveis do processo.
- **Transmissores:** Convertem os sinais dos sensores em sinais elétricos ou digitais, que podem ser enviados para sistemas de controle.
- **Registradores:** Armazenam e registram dados das variáveis medidas ao longo do tempo, permitindo análise histórica e rastreabilidade dos processos.
- **Conversores:** Transformam um tipo de sinal em outro para permitir a comunicação entre diferentes equipamentos e sistemas.

- Controladores: Processam os sinais dos sensores e ajustam os elementos finais de controle para manter as variáveis dentro dos limites desejados.
- Elementos finais de controle (atuadores): Atuam diretamente no processo para ajustar variáveis com base nas medições e comandos recebidos.

2.6 Controle de processos

O controle de processos é uma área fundamental que garante a operação eficiente e segura de sistemas industriais. Ele envolve o monitoramento e ajuste de variáveis para que um processo atinja os resultados esperados, como qualidade do produto, eficiência energética e segurança operacional.

Conhecer a instrumentação industrial é fundamental para o controle de processos, o qual constitui o segundo nível da pirâmide de automação. Com a instrumentação industrial o controle desses processos pode ser feito de forma remota através de softwares responsáveis por converter os sinais enviados pelos instrumentos em informações e através dessas informações realizar o controle dos processos de produção (NERIS, 2022).

Conforme descrito por (GARCIA, 2017), os processos industriais podem ser classificados em três categorias principais: contínuos, batelada e discretos. Nos processos contínuos, a produção ocorre de forma interrupta, com material sendo processado constantemente ao longo do tempo. Nos processos de batelada, a produção ocorre em lotes, o sistema é carregado com uma quantidade específica de material, processado até a conclusão e depois descarregado para iniciar um novo ciclo. Os processos discretos envolvem a montagem de produtos individuais ou unidades separadas.

O controle de processos pode ser classificado em malha aberta e malha fechada. No controle de malha aberta, a ação de controle é aplicada sem considerar a resposta do sistema. Ilustrado na figura 10, o controlador envia um comando ao atuador, mas não há realimentação (*feedback*) para corrigir possíveis desvios.

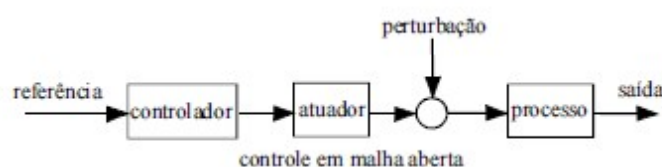


Figura 10 – Controle em malha aberta.

Fonte: tecconcursos, 2008

No controle de malha fechada, conforme ilustrado na figura 11, há um sistema de realimentação (*feedback*), onde os sensores medem a variável controlada e enviam esses

dados para o controlador. Se houver desvios (erro) em relação a referência, o sistema ajusta automaticamente a ação de controle.

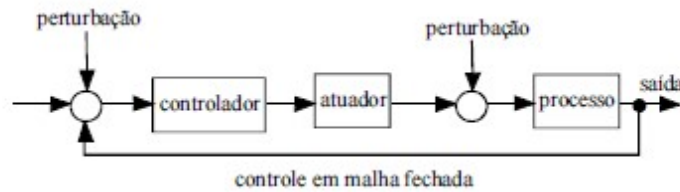


Figura 11 – Controle em malha fechada.

Fonte: teconconcursos, 2008

De acordo com (GARCIA, 2017), existem três tipos principais de controle:

- Controle por realimentação (*feedback*): O sistema mede a variável de processo e ajusta a ação de controle com base no erro (diferença entre referência e variável medida). Se houver perturbação, o controlador reage corrigindo o desvio.

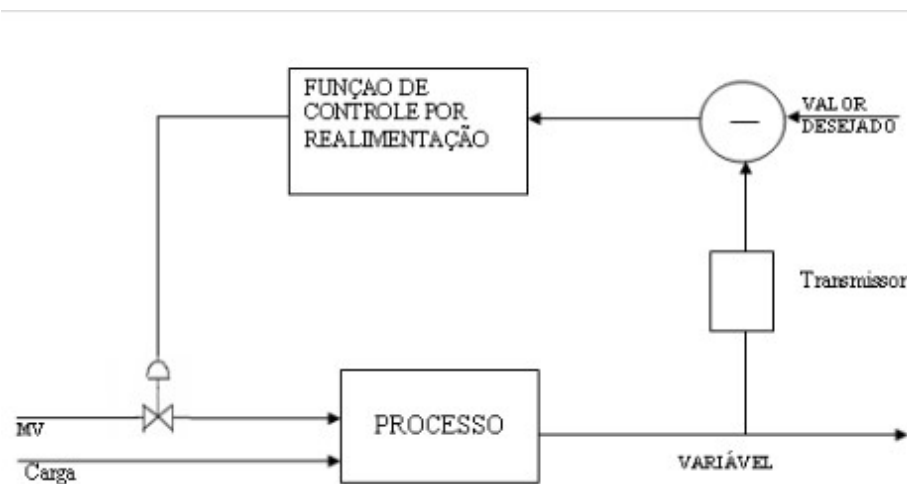


Figura 12 – Controle por Realimentação (*feedback*).

Fonte: José Lamartine de Andrade Lima-Neto, 2017

- Controle antecipatório (Feedforward): Atua de forma preventiva, ajustando a variável de controle antes que a perturbação afete o processo. Ele utiliza medições de variáveis externas para prever e corrigir variações antes que elas causem erros.

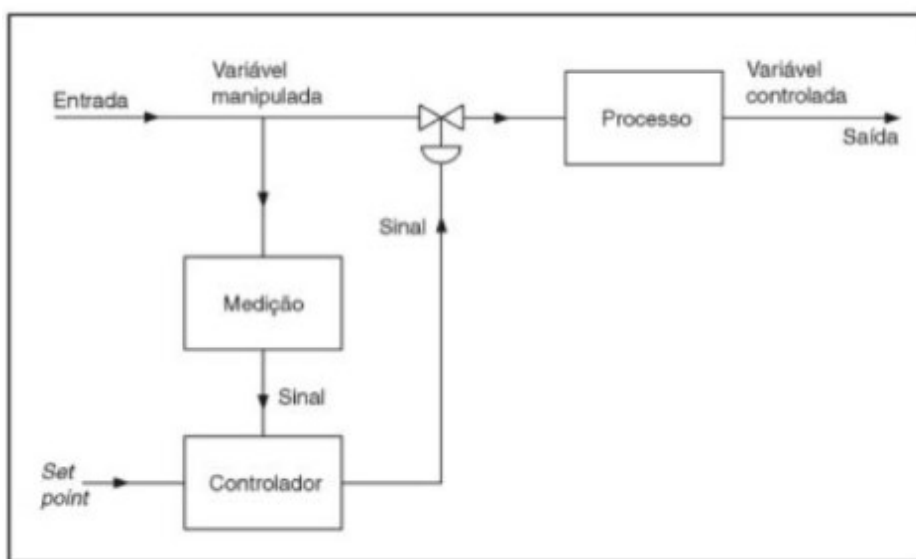


Figura 13 – Controle antecipatório.

Fonte: Alves (2012)

- Feedback + Feedforward: Esse tipo de controle combina as vantagens do controle por realimentação e do controle antecipatório. O feedforward corrige antecipadamente perturbações previsíveis, enquanto o feedback corrige erros residuais que não foram eliminados.

É importante ressaltar que o controle de realimentação tem como objetivo que o sistema tenha as respostas conforme características desejadas. Para que haja esse comportamento, segundo (FRANCHI, 2011), as condições abaixo devem ser atendidas.

- O sistema de controle deve ser estável.
- Os efeitos das perturbações devem ser minimizados.
- Resposta rápida para variações de referência.
- O erro em regime permanente (*offset*) deve ser eliminado.

No processo de hidrociclones, a implementação de um sistema de controle automático tem como principal objetivo assegurar que os materiais alimentados no sistema atendam às especificações exigidas para alcançar máxima eficiência na separação. Além disso, busca garantir que as etapas subsequentes recebam o material com as características ideais para dar continuidade ao processo de beneficiamento. A manutenção dos padrões operacionais dentro dos parâmetros estabelecidos contribui diretamente para o aumento

da eficiência do processo, elevando o teor de ferro recuperado e reduzindo a quantidade de material descartado.

A adição de material no hidrociclone é regulada com base na pressão e no nível da caixa de alimentação. A atuação do controle automático sobre a velocidade da bomba possibilita uma resposta rápida às variações do processo. Por exemplo, por meio de um medidor de pressão instalado na linha e integrado a uma malha de controle, é possível automatizar o ajuste da velocidade da bomba, garantindo que a pressão se mantenha dentro dos limites estabelecidos nas configurações. Essa abordagem é feita de modo a assegurar um controle contínuo, que visa precisão e melhoria na qualidade de processo.

2.7 Estratégias Clássicas de Controle

As estratégias clássicas de controle vêm sendo utilizadas para regular processos industriais e garantir estabilidade, precisão e eficiência na operação. No caso do processo dos hidrociclones, é possível assegurar que a separação dos materiais acontecerá de forma adequada, fazendo com que o material de interesse tenha sua devida direção (WADE, 2004).

Os tópicos considerados estar na categoria de controle regulatório avançado incluem:

- Controle em *override*;
- Controle em cascata;
- Controle em *feedforward*;
- Controle em razão;
- Controle de múltiplas entradas, múltiplos processos de saída;
- Compensação de tempo morto e controle baseado em modelo elementar.

Nesta seção, serão abordadas os controle em *override* e controle em cascata, devido a utilização neste presente projeto.

2.7.1 Controle em *override*

O controle *override* é uma estratégia de controle avançada utilizada em processos industriais para priorizar a variável mais crítica em situações onde múltiplas condições de operação precisam ser gerenciadas simultaneamente. Ele garante que, caso um limite de segurança ou operacional seja atingido, a ação de controle mude automaticamente para proteger o sistema.

O sistema de *override* funciona com dois ou mais controladores atuando sobre a mesma variável final de controle (como válvula ou uma bomba). No entanto, apenas um deles tem prioridade em determinado momento, de acordo com a necessidade do processo

(wade2004).

Ele normalmente opera com seletores lógicos, que podem ser:

- Seleção do mínimo (low select): prioriza o menor valor de saída dos controladores.
- Seleção do máximo (high select): prioriza o maior valor de saída dos controladores.

Conforme é explicado por (WADE, 2004), um elemento chave de uma estratégia de controle *override* é uma chave seletora, implementada como um dispositivo de *hardware* ou um bloco de funções de *software*. Essa chave seletora passa o maior ou o menor sinal de entrada para a sua saída. Por exemplo, a mais alta temperatura de processo pode ser selecionada automaticamente para se tornar a temperatura de controle.

Na figura 14 é apresentada uma estratégia de controle utilizando o *override*. Nesse exemplo, é implementado um controle de nível do tanque. Em situações comuns, o *setpoint* do LC (controlador de nível), assume o controle, regulando a velocidade da bomba para a operação, mas o ponto focal nessa planta é permanecer com fluxo mínimo para prevenir entupimento. Caso o fluxo esteja chegando ao nível crítico, o FC (controle de vazão) assume o controle acelerando a bomba.

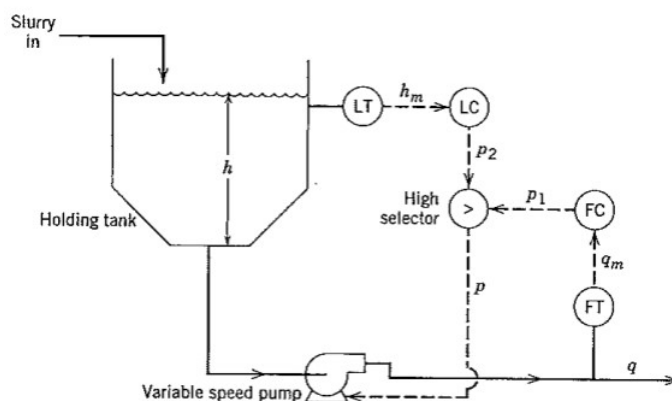


Figura 14 – Exemplo de controle *override*

Fonte: Prof. Eduardo Stockler, 2013

2.7.2 Controle em cascata

O controle em cascata é uma estratégia de controle de processos que utiliza dois ou mais controladores interligados para melhorar a estabilidade e o desempenho do sistema. Ele é amplamente utilizado em processos industriais para reduzir os efeitos de perturbações externas e melhorar a resposta dinâmica.

O Controle em Cascata consiste em uma estrutura com duas malhas (ou mais): Malha externa (primária) e interna (secundária). A malha primária regula a variável principal do processo, gerando o valor desejado (SP), enquanto a secundária controla uma variável auxiliar que influencia a primária. A principal função da malha secundária é corrigir rapidamente os distúrbios que afetam a variável auxiliar, evitando que esses impactos cheguem à malha primária. Dessa forma, essa estratégia melhora a estabilidade do sistema e reduz o tempo de resposta da malha primária às perturbações na secundária. Para garantir um desempenho eficiente, a malha secundária deve operar pelo menos três vezes mais rápido que a primária (FRANCISCO, 2017).

Na figura 15 é apresentado uma estratégia de controle utilizando controle em cascata. Nesse exemplo, é implementado um controle de nível do tanque. O controlador primário (malha mestre) LC (controlador de nível), assume o controle gerando o *setpoint* para o controlador secundário (malha escrava). Conforme a indicação do LT (transmissor de nível) é regularizado a abertura e fechamento da válvula de vazão (FV), esse controle possui uma realimentação (*feedback*) realizado pela transmissor de vazão (FT).

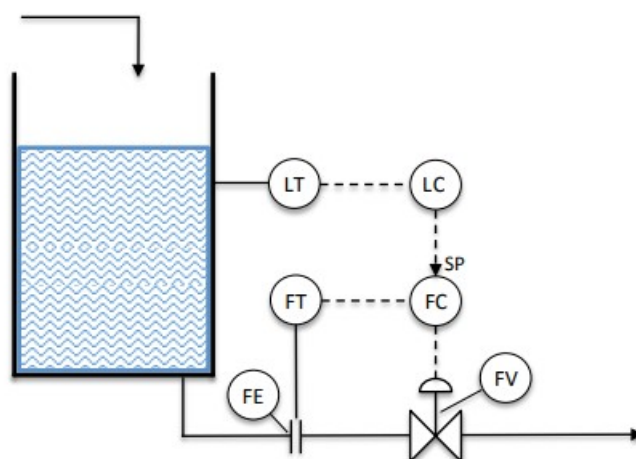


Figura 2- Exemplo de Controle em Cascata⁵.

Figura 15 – Exemplo de Controle em Cascata

Fonte: Francisco, 2017

(WADE, 2004) reforça que se a velocidade de resposta da malha primária for muito próxima à da malha secundária, pode ocorrer uma interferência indesejada entre os controladores, resultando em uma competição entre eles. Além disso, se a malha primária já responde rapidamente às variações do sistema, a utilização do controle em cascata pode ser desnecessária, pois um único controlador de *feedback* seria suficiente para compensar as perturbações tanto na malha primária quanto na secundária. No entanto, se as velocidades de resposta forem muito semelhantes, pode ser necessário ajustar o desempenho da malha primária, por exemplo, reduzindo o ganho do controlador e aumentando o tempo integral para amortecer sua resposta e evitar instabilidades.

3 Desenvolvimento

O controle eficiente de variáveis de processo é essencial para garantir a estabilidade operacional, a segurança e o desempenho de sistemas industriais. Em unidades onde há operação com hidrociclones, o gerenciamento adequado da pressão e do nível desempenha um papel fundamental na qualidade do produto final e na proteção dos equipamentos. No entanto, historicamente, o sistema analisado neste trabalho era operado manualmente e contava apenas com um controle básico de nível da caixa, o que tornava a operação suscetível à variações, intervenções constantes do operador e risco de operação fora dos limites recomendados.

Com essa abordagem, busca-se não apenas aumentar a estabilidade operacional, mas também reduzir intervenções manuais, minimizar riscos e proporcionar maior eficiência ao processo, contribuindo para uma operação mais confiável e automatizada.

3.1 Metodologia

O desenvolvimento do presente trabalho, realizado em uma empresa de Minas Gerais, está organizado em partes, sendo elas:

1. Elaboração do desenho da estratégia a ser implementada: Tem como propósito estruturar as ideias sobre a forma de execução. A lógica foi desenvolvida no sistema de controle DeltaV, cuja a programação é em blocos.
1. Disponibilização do controle na tela: após concluída a implementação, o controle é integrado ao supervisório, permitindo o monitoramento e a atuação da equipe de operação conforme as demandas do sistema.

3.2 Materiais

3.2.1 Sistema de controle DeltaV

O DeltaV é um sistema de controle desenvolvido pela Emerson Process Management para automação de processos industriais. Ele foi projetado para integrar controle, segurança, instrumentação e operações em uma única plataforma, proporcionando alta confiabilidade e facilidade de uso. O DeltaV permite o gerenciamento inteligente de processos contínuos e por batelada, com recursos avançados de diagnóstico, controle preditivo e integração digital com instrumentos de campo, como transmissores HART e Fieldbus. Além disso, o

sistema oferece interfaces gráficas intuitivas e ferramentas de configuração simplificadas. Por sua robustez e escalabilidade, o DeltaV é amplamente utilizado em indústrias químicas, petroquímicas, de óleo e gás, papel e celulose, mineração e energia (EMERSON, 2025).

O método de programação utilizado é em blocos, uma abordagem de desenvolvimento que utiliza elementos gráficos modulares para representar instruções lógicas de um programa. Nesse modelo, o usuário cria algoritmos por meio do encaixe de blocos visuais que simbolizam comandos, estruturas de repetição, condições, variáveis e eventos. Essa técnica elimina a necessidade de digitação de código textual, reduzindo erros de sintaxe e tornando o processo mais acessível, especialmente para iniciantes.

3.2.2 Instrumento de pressão e nível Fieldbus Rosemount

Os transmissores de pressão da linha Rosemount, fabricados pela Emerson, são amplamente utilizados na indústria devido à sua alta precisão, estabilidade a longo prazo e confiabilidade em ambientes industriais severos. Quando configurados com protocolo FOUNDATION Fieldbus, esses instrumentos passam a operar de forma totalmente digital, permitindo integração avançada com sistemas de controle distribuído (DCS) (FICHA..., 2023).



Figura 16 – Instrumento de pressão e nível Fieldbus Rosemount

Fonte: Emerson, 2024

3.2.3 Bomba HMS Industrial Network - Profibus

A bomba utilizada no sistema é acionada por um inversor de frequência que se comunica com o sistema de controle por meio do protocolo Profibus DP, empregando um módulo de comunicação fornecido pela HMS Industrial Networks. A HMS é amplamente reconhecida no setor industrial por disponibilizar interfaces e gateways que viabilizam a integração de diferentes equipamentos a redes de automação, garantindo compatibilidade, estabilidade e confiabilidade na troca de dados (NETWORKS, 2025).

No contexto deste trabalho, a comunicação Profibus desempenha um papel fundamental na operação da bomba, uma vez que permite ao controlador ajustar de forma precisa a velocidade de rotação, variável diretamente associada à vazão do sistema hidráulico. Por meio do módulo HMS, o inversor envia e recebe dados cíclicos do controlador, possibilitando o envio de comandos como start, stop, reset e setpoint de velocidade, além do retorno de informações essenciais para o monitoramento, como velocidade atual, corrente do motor, alarmes e estado operacional

3.3 Desenvolvimento da programação

Na área onde será implementado o novo controle, anteriormente não existia um sistema que contemplasse todas as variáveis envolvidas no processo. O controle existente era limitado a uma única válvula responsável apenas pela abertura e fechamento de acordo com o nível da caixa. Dessa forma, não havia integração entre as demais variáveis de processo, como pressão, vazão, nem um acompanhamento em tempo real dos parâmetros operacionais.

Com a nova implementação, desenvolveu-se um controle mais abrangente e automatizado, capaz de monitorar e atuar sobre múltiplas variáveis simultaneamente, garantindo maior estabilidade, eficiência operacional e segurança do equipamento.

3.3.1 Implementação da malha de controle

A figura 17 apresenta a organização hierárquica das estratégias de controle no sistema DeltaV, evidenciando como a lógica de automação é estruturada desde o nível mais alto da planta até os parâmetros internos dos blocos de função. No topo da hierarquia encontra-se a planta (*Plant*), que representa toda a instalação industrial a ser automatizada. Essa planta é subdividida em áreas de processo (*Plant Areas*), como, por exemplo, *Boiler*, *Tank* e *Recovery*, permitindo uma melhor organização do projeto, além de facilitar a navegação, manutenção e expansão do sistema de controle.

Dentro de cada área estão os módulos de controle (*Modules*), que correspondem a equipamentos físicos ou malhas específicas do processo. Na figura 17, são apresentados exemplos como o MTR-101, representando um motor de dois estados (ligado e desligado), o FIC-101, que corresponde a uma malha de controle de vazão com controlador PID, e o XV-101, que representa uma válvula de bloqueio. Cada módulo encapsula a lógica necessária para operação do equipamento, incluindo intertravamentos, alarmes, comandos e estratégias de controle.

No interior dos módulos encontra-se a estratégia de controle propriamente dita, implementada por meio de algoritmos como o *Function Block Diagram* (FBD) ou o *Sequential Function Chart* (SFC). A figura destaca o uso do FBD, que organiza a lógica

em forma de blocos interligados, permitindo a execução estruturada de cálculos, decisões e ações de controle.

O FBD é composto por blocos de função (*Function Blocks*), sendo o controlador PID um exemplo central mostrado na figura 17. Cada bloco executa uma tarefa específica dentro da estratégia, como controle, condicionamento de sinais, geração de alarmes ou manipulação de dados. Essa abordagem modular facilita o entendimento e a reutilização da lógica de controle.

Por fim, no nível mais detalhado da hierarquia estão os parâmetros dos blocos (*Parameters*), responsáveis por definir o comportamento e a configuração dos blocos de função. No exemplo do bloco PID, aparecem parâmetros como HI_{LIM} , que representa um limite alto de alarme, IO_{IN} , que corresponde ao sinal de entrada do processo, $Gain$, relacionado ao ajuste do controlador, e SP , que indica o valor de referência (*setpoint*). Esses parâmetros permitem a sintonia e adaptação da estratégia de controle às necessidades operacionais do processo.

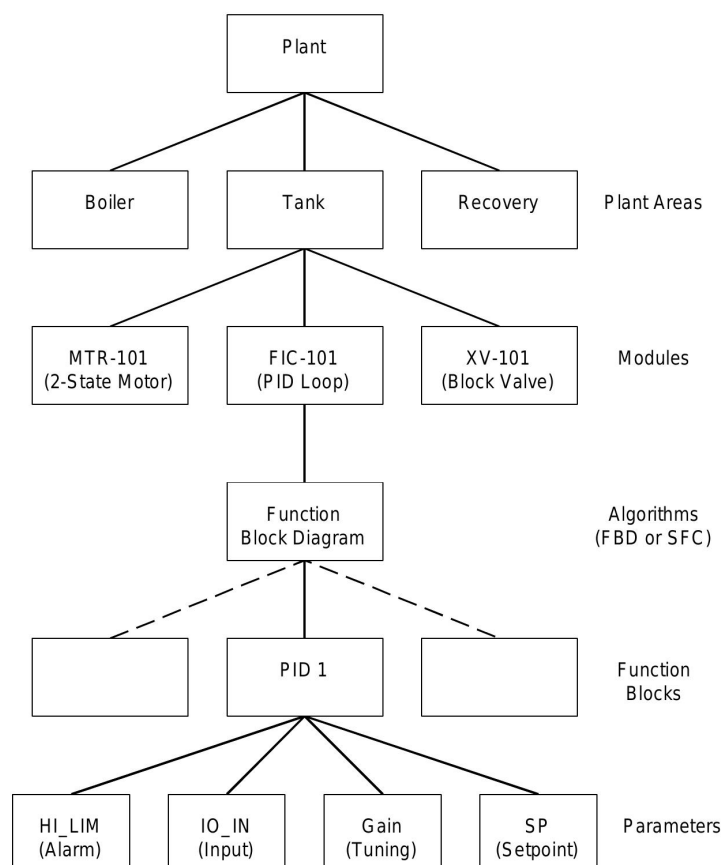


Figura 17 – Fluxograma de controle

Fonte: Emerson, 2006

Devido à organização em blocos, foi desenvolvido um diagrama para auxiliar na visualização e na implementação do controle, conforme ilustrado na Figura 18. Nesse diagrama, foi criado um bloco correspondente ao controlador indicador de nível (LIC) e dois blocos referentes aos controladores indicadores de pressão (PIC), responsáveis por verificar as pressões extremas do circuito.

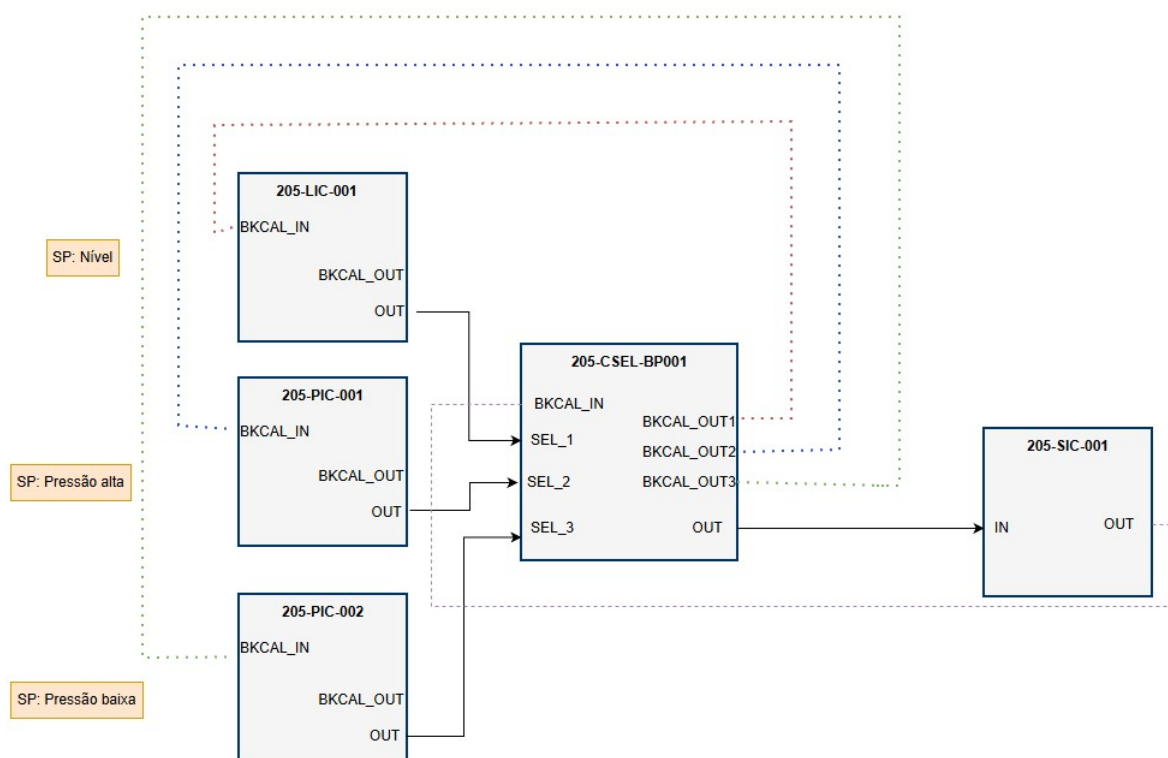


Figura 18 – Desenho da lógica de controle proposta

Fonte: Própria autora, 2025

O bloco denominado CSEL recebe as saídas desses controladores e, por meio de um script dedicado, realiza a verificação das condições operacionais. Com base nessa análise, o CSEL seleciona automaticamente o controle que se encontra em condição crítica, atuando sobre a velocidade da bomba por intermédio do Controlador Indicador de Velocidade (SIC).

Os blocos são continuamente realimentados com o valor de saída da velocidade da bomba para garantir que, caso seja necessária uma atuação imediata, não ocorra um degrau significativo que possa comprometer o desempenho da malha, o que pode ocasionar perda de controle ou prolongar o tempo de estabilização. O objetivo dessa estratégia é assegurar uma resposta rápida diante de qualquer distúrbio que venha a ocorrer. Além

disso, essa realimentação contínua permite que os controladores mantenham suas ações internas atualizadas, evitando saturações e minimizando a ocorrência de *overshoot* durante transições. Dessa forma, o sistema opera de maneira mais robusta e estável.

As estratégias de controle criadas no DeltaV são apresentadas nas figuras 19, 20 e 21. O bloco "AI1" é uma entrada analógica referente ao valor que está medido em campo.

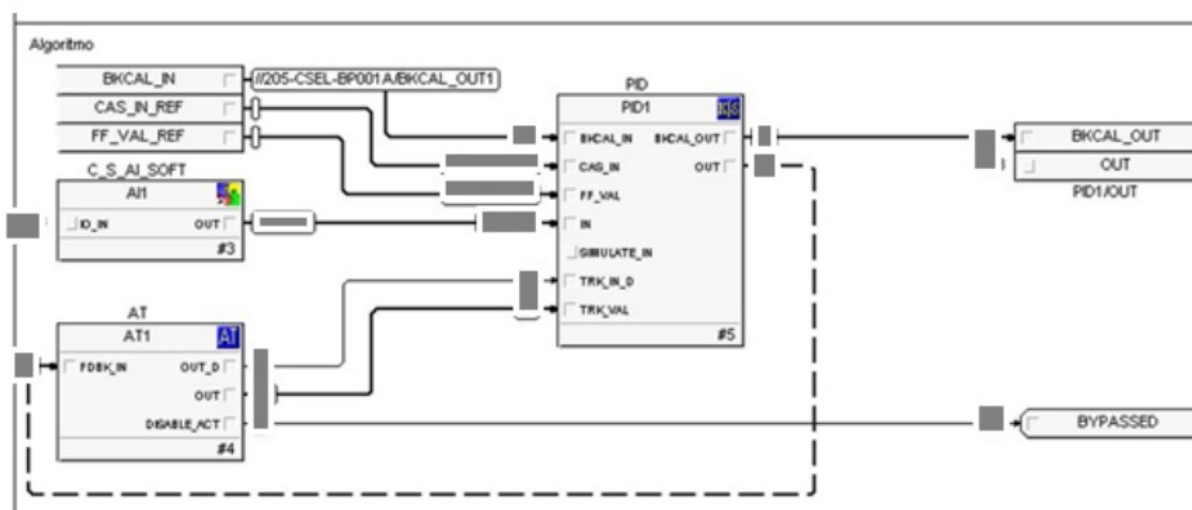


Figura 19 – Implementação da malha de controle LIC

Fonte: Própria autora, 2025

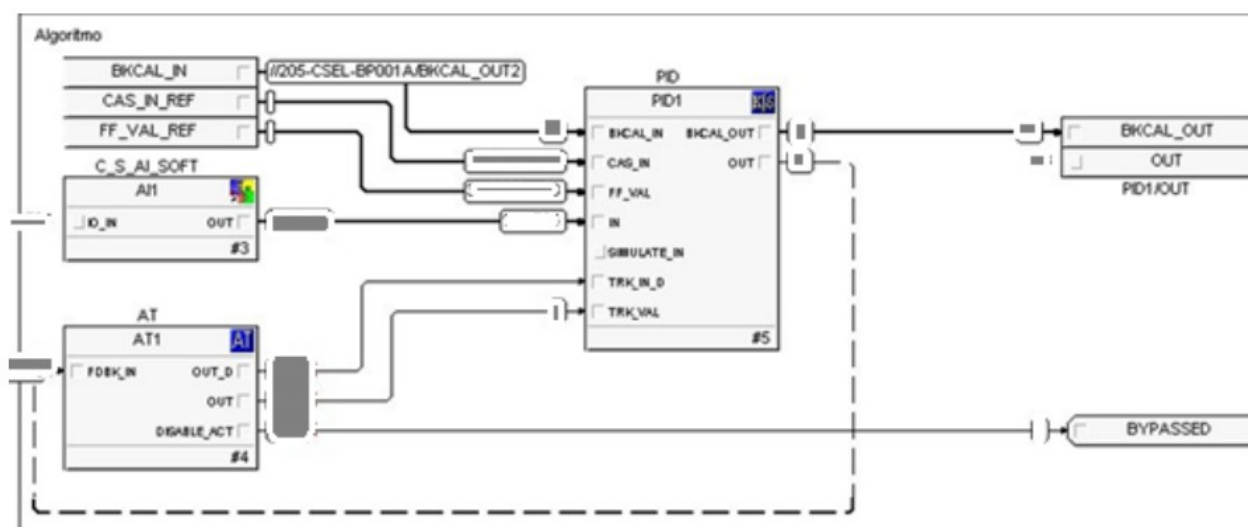


Figura 20 – Implementação da malha de controle PIC

Fonte: Própria autora, 2025

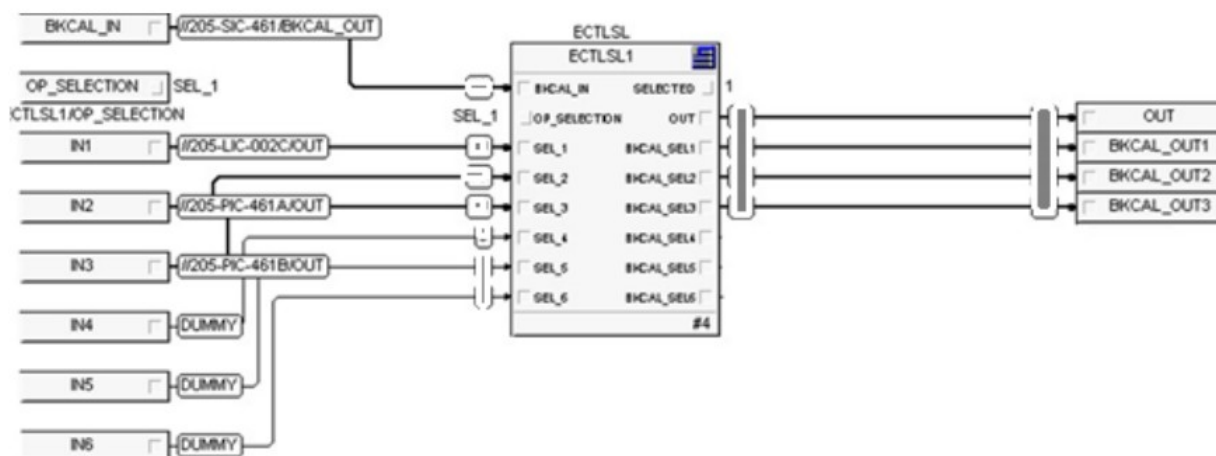


Figura 21 – Implementação da selecionadora CSEL

Fonte: Própria autora, 2025

O parâmetro BKCAL_IN recebe o valor de saída da malha de velocidade da bomba; o parâmetro CAS_IN_REF recebe a referência; o parâmetro FF_VAL_REF corresponde ao valor de alimentação antecipada (*feedforward*); e o parâmetro BKCAL_OUT representa o valor que o controlador ativo envia para que o controlador inativo o acompanhe.

O bloco de função *Analog Tracking* (AT) é utilizado em sistemas de controle distribuído para realizar o acompanhamento (*tracking*) de um valor analógico proveniente de outra fonte, garantindo a transição suave entre diferentes modos de operação. Seu principal objetivo é sincronizar a saída do controlador com um valor externo de referência, de forma a evitar degraus abruptos, saturações ou desvios significativos quando o controle alterna entre modos manual, automático, cascata ou quando ocorre retomada após falha.

O funcionamento do AT consiste em monitorar continuamente um sinal de entrada considerado a “variável de acompanhamento”. Quando o bloco está habilitado para realizar o *tracking*, sua saída é forçada a seguir exatamente o valor dessa referência. Assim, quando a malha retorna ao modo normal de operação, o sinal já está alinhado ao ponto de controle, garantindo um comportamento mais estável e eliminando transições bruscas.

Na figura 22 é ilustrado o *faceplate* criado para acompanhar os valores atuais e os controles que estão ativo.

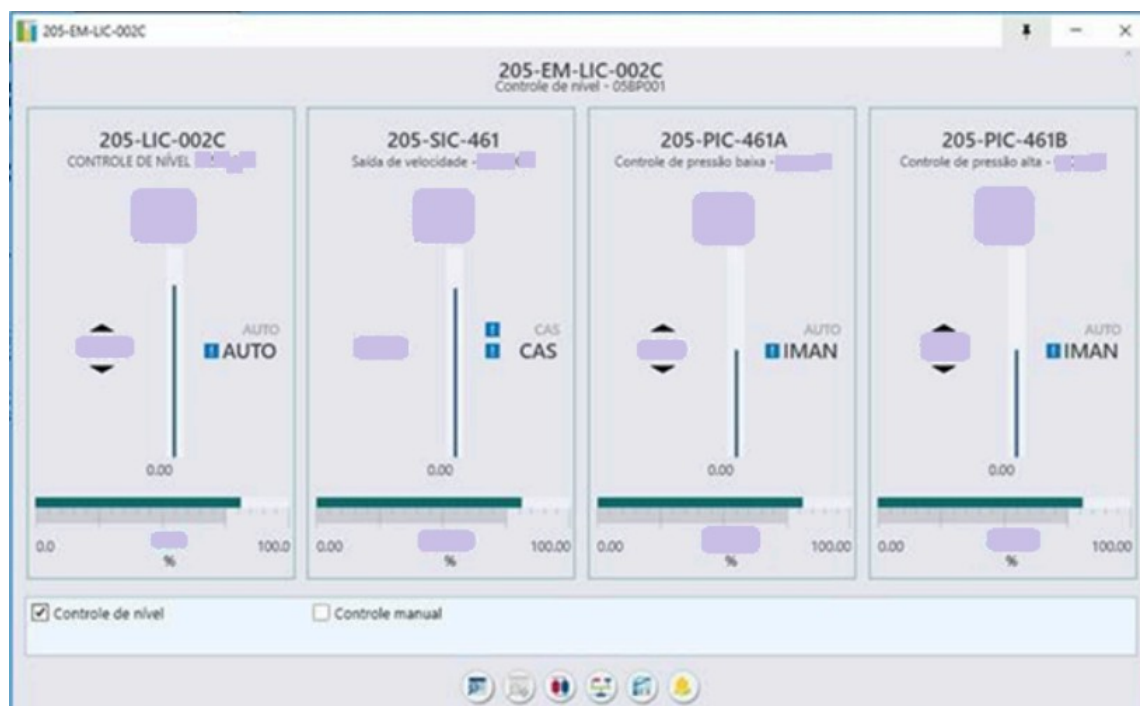


Figura 22 – Faceplate

Fonte: Própria autora, 2025

4 Resultados

O gráfico da figura 23, evidencia um comportamento altamente oscilatório tanto para o nível da caixa (curva verde) quanto para a pressão (curva rosa). Essas oscilações são consequência direta do método de controle utilizado anteriormente, que era totalmente manual e limitado à atuação de uma única válvula responsável apenas por abrir ou fechar conforme o nível da caixa.

Por não haver um sistema que integrasse todas as variáveis relevantes do processo, o controle era reativo e pouco sensível às dinâmicas completas do circuito. Isso explica a grande variabilidade observada no nível, com oscilações de alta frequência e amplitude significativa.

A pressão acompanha parcialmente a dinâmica do nível, apresentando flutuações ao longo de todo o intervalo analisado. Essa relação é típica de sistemas em que a variação volumétrica não é amortecida por mecanismos de controle adequados. Sem um controlador capaz de modular a vazão de forma contínua e proporcional às mudanças de processo, as variações de carga no interior da caixa resultam em oscilações de pressão, como as observadas no gráfico.

É importante destacar que, devido à ausência de um controle automatizado que considerasse simultaneamente nível, pressão e demais variáveis operacionais, o sistema operava com baixa estabilidade. As oscilações constantes demonstram claramente a limitação da estratégia manual, evidenciando a necessidade de um controle mais abrangente que integrasse diferentes variáveis para garantir maior suavidade e segurança operacional.

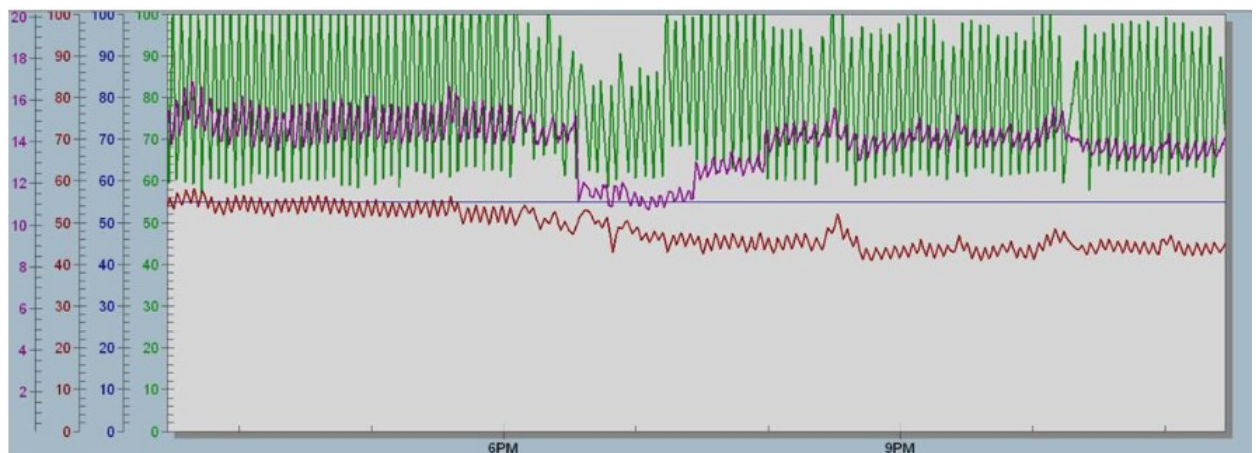


Figura 23 – Variáveis de processo antes da implementação

Fonte: Própria autora, 2025.

Legenda: Nível da caixa (curva verde) e Pressão (curva rosa).

O gráfico da figura 24, demonstra uma mudança significativa no comportamento dinâmico do sistema após a implementação do novo controle integrado. Diferentemente do cenário anterior, no qual o nível da caixa e a pressão apresentavam oscilações de grande amplitude e alta frequência, observa-se agora uma resposta muito mais estável e previsível.

A curva de nível (verde) apresenta oscilações de menor amplitude e com padrão mais uniforme ao longo de todo o período analisado. Isso indica que o novo controle atuante sobre a velocidade da bomba consegue ajustar continuamente a vazão de saída, mantendo o nível dentro de uma faixa de operação mais estreita e reduzindo o comportamento errático observado quando o controle era manual.

Da mesma forma, a pressão (roxa) demonstra um padrão consideravelmente mais estável. Embora ainda haja pequenas flutuações, naturais do processo, a amplitude dessas variações é significativamente menor do que no controle anterior. Os picos abruptos, comuns quando a válvula era operada manualmente e sem integração com as demais variáveis do processo, praticamente desapareceram. Esse resultado evidencia que o controlador agora consegue amortecer rapidamente distúrbios e evitar variações bruscas na pressão do circuito.

Além disso, nota-se que os poucos eventos de maior queda ou aumento de pressão são rapidamente compensados, com retorno rápido ao regime normal de operação. Isso demonstra que a malha apresenta maior robustez e capacidade de resposta, assegurando maior estabilidade operacional mesmo diante de perturbações.

Em síntese, os resultados comprovam que a estratégia de controle implementada, baseada na integração de nível e pressão, atuando na velocidade da bomba, proporcionou uma operação mais suave, eficiente e confiável. A redução expressiva das oscilações confirma que a malha agora trabalha dentro de padrões de controle adequados, minimizando desgaste mecânico, variações indesejadas no processo e riscos operacionais.

Como consequência direta dessa maior estabilidade, houve um aumento da disponibilidade operacional, uma vez que o sistema passou a operar com menos intervenções e menos paradas por instabilidade. Também foram observados ganhos na qualidade da alimentação da moagem, que se tornou mais uniforme, e na performance global do circuito, refletida em maior eficiência e melhor desempenho da moagem.

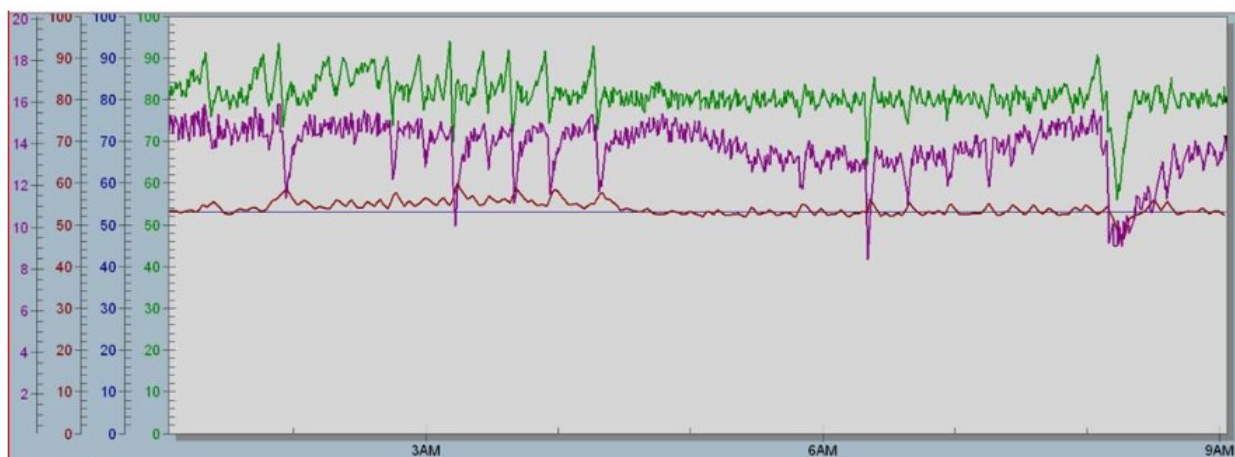


Figura 24 – Desempenho da malha de controle após implementação

Fonte: Própria autora, 2025.

Legenda: Nível da caixa (curva verde) e Pressão (curva rosa).

5 Conclusão

A implementação da nova estratégia de controle integrada para a caixa de alimentação demonstrou resultados expressivos na melhoria da estabilidade, da confiabilidade e do desempenho operacional do circuito. Antes da automatização, o processo era conduzido de forma totalmente manual, limitando-se à atuação de uma única válvula e sem considerar a interação entre variáveis essenciais, como nível e pressão. Essa limitação resultava em oscilações de alta amplitude, baixa previsibilidade e frequentes intervenções operacionais.

Com o desenvolvimento e aplicação da lógica de controle proposta, envolvendo malhas dedicadas de nível e pressão, selecionadora CSEL, foi possível assegurar transições suaves entre modos, sincronização adequada de sinais e atuação dinâmica sobre a velocidade da bomba. Esses elementos permitiram que o sistema operasse de forma integrada e responsiva às variações reais do processo.

Os resultados gráficos demonstram a eficácia da solução implementada: tanto o nível da caixa quanto a pressão apresentaram redução significativa nas oscilações, comportamento mais uniforme e rápida compensação de distúrbios. A operação tornou-se mais estável e previsível, minimizando riscos operacionais e reduzindo o desgaste dos equipamentos associados.

Além da otimização direta do controle, observou-se um impacto positivo em indicadores fundamentais da planta. A maior estabilidade refletiu-se no aumento da disponibilidade operacional, pela diminuição de paradas causadas por instabilidades e intervenções manuais. Da mesma forma, a qualidade da alimentação da moagem tornou-se mais consistente, contribuindo para uma operação mais uniforme do circuito de cominuição. Como consequência, registrou-se também melhoria na performance global da moagem, graças à redução de variações indesejadas e à maior eficiência no processo.

Assim, conclui-se que a solução desenvolvida cumpriu plenamente os objetivos propostos: modernizou a estratégia de controle, reduziu instabilidades, aumentou a confiabilidade do processo e trouxe ganhos reais à operação. O trabalho evidencia a importância da integração de variáveis, da automação bem estruturada e da aplicação de ferramentas adequadas para a obtenção de processos mais eficientes e robustos.

Como trabalhos futuros, diversas melhorias podem ser exploradas a partir dos resultados alcançados com a implementação da nova estratégia de controle. Uma possibilidade é a ativação do controle *feedforward*, que apesar de previsto na lógica não foi utilizado nesta etapa, podendo contribuir para uma rejeição mais eficiente a distúrbios e variações rápidas no processo. Também se recomenda a realização de estudos voltados à otimização avançada dos parâmetros das malhas, empregando técnicas como controle

adaptativo ou algoritmos de otimização, de modo a tornar o sistema ainda mais robusto frente às mudanças operacionais e às variações na densidade da polpa.

Também se sugere o desenvolvimento de painéis e indicadores de desempenho (KPIs) voltados ao monitoramento contínuo da variabilidade do nível, da pressão, da disponibilidade da bomba e da eficiência da moagem, facilitando a análise operacional e a tomada de decisão. A estabilidade obtida com o novo controle abre ainda a possibilidade de integrar técnicas de manutenção preditiva, monitorando vibração, corrente e desgaste dos equipamentos, aumentando a confiabilidade do circuito.

Referências

- BRAGA, Frederic Yann Armache. *Utilização de tecnologias de filtragem de rejeitos para empilhamento a seco*. abr 2021. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/39325>. Citado 1 vez na página 18.
- CAVALCANTE, I. R. M. et al. Modelagem e simulação numérica de escoamento bifásico para estudo de hidrociclone via CFD. *Brazilian Journal of Development*, v. 5, n. 9, p. 15362–15378, set. 2019. DOI: [10.34117/bjdv5n9-122](https://doi.org/10.34117/bjdv5n9-122). Citado 2 vezes na página 20.
- DA CRUZ, Othon C.; ZANINI, José R. Eficiência de um hidrociclone de geometria "rie-tema" para pré-filtragem de água para irrigação. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 14, n. 4, p. 396–400, 2010. DOI: [10.1590/S0100-69162010000400008](https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000400008). Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-69162010000400008>. Citado 1 vez na página 11.
- EMERSON. *Ficha de Dados do Produto: Transmissor de Pressão Rosemount 3051*. Abr. 2023. Abril 2023. Citado 1 vez na página 31.
- EMERSON. *Emerson — Homepage*. 2025. <https://www.emerson.com/pt-br>. Acesso em: 10 dez. 2025. Citado 1 vez na página 31.
- FINCH, James; BOYES, Gregory J. A. N. *Mineral Processing and Extractive Metallurgy: 100 Years of Innovation*. CRC Press, 2021. Citado 1 vez na página 18.
- FRANCHI, C. M. *Controle de Processos Industriais: Princípios e Aplicações*. São Paulo: Érica, 2011. Citado 1 vez na página 26.
- FRANCHI, C. M. *Instrumentação de Processos Industriais: Princípios e Aplicações*. [S.l.]: Saraiva Educação SA, 2015. Citado 1 vez na página 22.
- FRANCISCO, Marcos Salazar. *Simulador de Processos Industriais Aplicado ao Ensino da Teoria de Controle de Processos Industriais*. setembro 2017. Disponível em: <http://repo.ifsp.edu.br/123456789/180>. Citado 1 vez na página 29.
- GARCIA, C. *Controle de Processos Industriais: Estratégias Convencionais*. São Paulo: Editora Blucher, 2017. Disponível em: Minha Biblioteca. Disponível em: <https://integrada.minhabiblioteca.com.br/books/9788521211860/>. Citado 2 vezes nas páginas 24, 25.

GONÇALVES, S. M. et al. Análise do impacto da filtração sobre um hidrociclone concentrador de geometria otimizada / Analysis of the impact of filtration on a concentrator hydrocyclone of optimized geometry. *Brazilian Journal of Development*, v. 8, n. 2, p. 10018–10029, 2022. DOI: [10.34117/bjdv8n2-104](https://doi.org/10.34117/bjdv8n2-104). Disponível em: <https://doi.org/10.34117/bjdv8n2-104>. Citado 1 vez na página 20.

GUPTA, A.; YAN, D. S. *Mineral Processing Design and Operation: An Introduction*. Oxford: Elsevier, 2006. Citado 1 vez na página 19.

KHAN ACADEMY. *O que é pressão?* 2025. Disponível em: <https://pt.khanacademy.org/science/physics/fluids/density-and-pressure/a/pressure-article>. Citado 1 vez na página 21.

LAGE, Eron Antonio. *Controle e automação na indústria da mineração: estudo de caso*. 2021. Citado 1 vez na página 14.

LOPES JÚNIOR, Ê. *Estratégias de Controle Regulatório Avançado para uma Planta de Desaguamento de Minério de Ferro*. 2019. Diss. (Mestrado) – Escola de Minas - Universidade Federal de Ouro Preto - Associação Instituto Tecnológico Vale, Ouro Preto. Disponível em: <https://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/11836>. Citado 3 vezes nas páginas 10, 11, 21.

LUZ, A. B. D.; LINS, F. A. F. Introdução ao tratamento de minérios. In: *TRATAMENTO de minérios*. 5. ed. Rio de Janeiro: CETEM/MCTIC, 2010. Citado na página 18. cap. 1, p. 1–20. Citado 1 vez na página 16.

NERIS, Roberto Ferrarezi. *Instrumentação e Controle de Processos na Indústria*. Atto Solar Engenharia, mar. 2022. DOI: [10.51891/rease.v8i3.4698](https://doi.org/10.51891/rease.v8i3.4698). Disponível em: <https://doi.org/10.51891/rease.v8i3.4698>. Citado 1 vez na página 24.

NETWORKS, HMS. *HMS – Hardware Meets Software*. 2025. <https://www.hms-networks.com/>. Acesso em: 30 novembro 2025. Citado 1 vez na página 31.

SALES, Cristiano Geraldo de. *Rotas de beneficiamento para recuperação de minerais portadores de ferro do underflow do espessador de lamas da usina de Brucutu*. Jun. 2012. Diss. (Mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Disponível em: <http://hdl.handle.net/1843/BUOS-967J27>. Citado 1 vez na página 16.

SOUZA JUNIOR, Tennison Freire de; MOREIRA, Eclesielter Batista; HEINECK, Karla Salvagni. Barragens de contenção de rejeitos de mineração no Brasil. *Nome do Periódico*, 2018. Disponível em: <http://hdl.handle.net/10183/187208>. Citado 1 vez na página 17.

THOMSON, William. Minério de ferro. *Proceedings of the Royal Society of Edinburgh*, Royal Society of Edinburgh Scotland Foundation, v. 6, p. 94–105, 1869. DOI: [10.1017/S0370164600045430](https://doi.org/10.1017/S0370164600045430). Citado 1 vez na página 10.

WADE, H. L. *Basic and Advanced Regulatory Control: System Design and Application*. ISA, 2004. Citado 3 vezes nas páginas 27–29.

WILLS, B. A.; FINCH, J. *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. 8. ed. Oxford: Butterworth-Heinemann, 2016. Citado 3 vezes nas páginas [18](#), [20](#).