



**GIOVANNA DE ALBUQUERQUE QUINTÃO**

**REDUÇÃO DO CONSUMO DE PERMANGANATO DE  
POTÁSSIO NA ETAPA DE LIXIVIAÇÃO NEUTRA DE UMA  
USINA METALÚRGICA**

**LAVRAS – MG  
2021**

**GIOVANNA DE ALBUQUERQUE QUINTÃO**

**REDUÇÃO DO CONSUMO DE PERMANGANATO DE POTÁSSIO NA ETAPA DE  
LIXIVIAÇÃO NEUTRA DE UMA USINA METALÚRGICA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

Prof<sup>a</sup>. Dra. Lidja Dahiane Menezes Santos Borél  
Orientadora

Prof. Dr. Gilson Campani Junior  
Coorientador

**LAVRAS – MG  
2021**

**GIOVANNA DE ALBUQUERQUE QUINTÃO**

**REDUÇÃO DO CONSUMO DE PERMANGANATO DE POTÁSSIO NA ETAPA DE  
LIXIVIAÇÃO NEUTRA DE UMA USINA METALÚRGICA**

Monografia apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Curso de Engenharia Química, para a obtenção do título de Bacharel.

APROVADA em 10 de Novembro de 2021.

Prof<sup>a</sup>. Dra. Lidja Dahiane Menezes Santos Borél  
DEG/UFLA

Prof. Dr. Gilson Campani Junior  
DEG/UFLA

Prof. Dr. Luciano Jacob Correa  
DEG/UFLA

Prof. Dr. Tiago José Pires de Oliveira  
DEG/UFLA

**LAVRAS – MG  
2021**

## AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por me conceder o dom da sabedoria e por colocar pessoas especiais no meu caminho, que contribuíram com a minha conquista.

Aos meus pais, Rosa e Enoque, pelos ensinamentos e cuidados ao longo da vida, pelo amor que sempre me passaram, pelo apoio e pela força que me transmitiram.

Ao meu irmão, Álvaro, que com seu carinho e amizade me permitiu persistir diante das dificuldades.

Às minhas avós, Ana e Luzia, e aos meus padrinhos, Marli e Rosângelo, pelas constantes orações.

Ao meu namorado, Matheus, que com seu companheirismo, carinho e amor me manteve firme e me motivou constantemente.

Aos meus amigos do Gramado que fizeram de Lavras um lar e que me alegraram em diversos momentos.

Às minhas amigas de João Monlevade, Carol, Maísa e Paulline, pelo apoio, conselhos e amizade.

Aos professores que me formaram durante a vida, pelos conhecimentos transmitidos.

À Universidade Federal de Lavras e ao Engenheiros Sem Fronteiras por me permitirem conhecer pessoas incríveis e fazer grandes aprendizados.

À minha orientadora, Lidja, coorientador, Gilson, e aos professores Luciano e Tiago, pelos ensinamentos valiosos, sugestões certeiras, paciência, confiança e disponibilidade.

À Nexa de Três Marias que possibilitou o desenvolvimento desse trabalho, em especial ao Reginaldo, Junio, Felipe, Karen, Cícero e toda a operação da Equipe Sulfeto. Agradeço a confiança, o apoio e os ensinamentos.

## RESUMO

A mineração e metalurgia são setores de grande dimensão industrial para o país, sendo o zinco um mineral que ganha. O processo produtivo do mineral consiste, basicamente, na ustulação, lixiviação e eletrólise. O presente trabalho se aprofunda na etapa de lixiviação neutra de uma planta produtora de zinco. A etapa possui como um dos objetivos promover o primeiro refino do processo por meio da precipitação do ferro que carregará as impurezas – germânio, arsênio e antimônio – que comprometem a qualidade do produto. O permanganato de potássio é o insumo utilizado com a finalidade de oxidar o ferro e, assim, permitir sua precipitação e eliminação das impurezas. Apesar da alta performance como oxidante, o permanganato possui um custo elevado, e o seu uso em excesso implica em um gasto econômico expressivo e um alto descarte da sua embalagem (baldes plásticos). Sob essa ótica, o estudo teve como objetivo propor e implementar medidas para redução do consumo do permanganato a fim de promover ganhos econômicos e ambientais. O seu desenvolvimento consistiu na identificação de oportunidades de melhoria, por meio da metodologia *brainstorming*, na padronização do processo em batelada existente e no desenvolvimento de um sistema de dosagem aquosa e contínua, de modo a evitar desperdícios e impactos negativos na qualidade do processo. Mediante resultados após a implementação das ações, estima-se uma economia, para esse ano, próxima a 900 mil reais, além de uma redução de 1700 embalagens plásticas descartadas. Diante da efetividade dos procedimentos, foi proposta a automação da dosagem aquosa, elaborado o diagrama de tubulação e instrumentação (P&ID, do inglês *piping and instrumentation diagram*) e, por fim, realizado a análise de viabilidade econômica do sistema automático, que obteve um *payback* descontado de 1,18 meses. Assim, foi possível compreender e reforçar a importância da realização de uma gestão apropriada de insumos e da identificação de oportunidades de melhoria nos procedimentos.

**Palavras-chave:** Zinco. Sistema de dosagem. P&ID. Análise econômica. Automação.

## **ABSTRACT**

Mining and metallurgy are sectors of great industrial dimension for the country, zinc being a mineral that gains. The mineral production process basically consists of ustulation, leaching and electrolysis. The present work deepens in the neutral leaching stage of a zinc-producing plant. The stage has as one of the objectives to promote the first refining of the process through the precipitation of the iron that will carry impurities – germanium, arsenic and antimony – that compromise the quality of the product. Potassium permanganate is the insum used for the purpose of oxidizing iron and thus allowing its precipitation and elimination of impurities. Despite the high performance as an oxidant, permanganate has a high cost, and its use in excess implies an expressive economic expenditure and a high disposal of its packaging (plastic buckets). From this perspective, the study aimed to propose and implement measures to reduce permanganato consumption in order to promote economic and environmental gains. Its development consisted of the identification of opportunities for improvement, through the brainstorming methodology, the standardization of the existing batch process and the development of an aqueous and continuous dosing system, in order to avoid waste and negative impacts on the quality of the process. Through results after the implementation of the actions, it is estimated an economy, for this year, close to 900 thousand reais, in addition to a reduction of 1700 plastic packaging discarded. Given the effectiveness of the procedures, the automation of the aqueous dosage was proposed, the piping and instrumentation diagram (P&ID) was elaborated and, finally, the economic viability analysis of the automatic system was performed, which obtained a payback of 1.18 months. Thus, it was possible to understand and reinforce the importance of carrying out an appropriate management of inums and the identification of opportunities for improvement in procedures.

**Keywords:** Zinc. Dosing system. P&ID. Economic analysis. Automation.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Estrutura de um espessador .....	14
Figura 2 – Fluxograma do processo de hidrometalurgia do zinco – Três Marias. ....	16
Figura 3 – Fluxograma da Lixiviação Neutra.....	17
Figura 4 – Diagrama de blocos de uma malha de controle aberta.....	20
Figura 5 – Diagrama de blocos de uma malha de controle. ....	19
Figura 6 – Malha de controle em cascata. ....	19
Figura 7 – Resposta no limite de estabilidade para a sintonia pelo método de Ziegler Nichols em malha fechada. ....	22
Figura 8 – Identificação de parâmetros na curva de resposta de uma variação degrau.....	23
Figura 9– Tanque de preparação da solução de permanganato. ....	30
Figura 10 – Aferição da vazão.....	30
Figura 11 – Consumo específico de permanganato.....	33
Figura 12 – Impactos financeiros e ambientais do projeto.....	34
Figura 13– Carga de ferro alimentada e consumo específico de permanganato no processo. .	35
Figura 14 – Concentração de Fe+2 no tanque de amostragem.....	36
Figura 15 – Parâmetros de processo da lixiviação neutra. ....	37
Figura 16 – Concentração de impurezas na SNC.....	38
Figura 17 – Diagrama P&ID proposto para automação da dosagem. ....	40

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1– Regras de sintonia dos parâmetros do controlador a partir .....	23
Tabela 2 – Regras de sintonia dos parâmetros do controlador a partir do método de Ziegler-Nichols de malha aberta. ....	23
Tabela 3 – Regras de sintonia dos parâmetros do controlador a partir do método de Cohen Coon. ....	24
Tabela 4 - Determinação de payback descontado .....	28
Tabela 5 – Orçamento para sistema de controle automático. ....	41
Tabela 6 – Avaliação de viabilidade econômica. ....	41

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Simbologia para identificação de variáveis e função.....	25
Quadro 2 - Simbologia para identificação de instrumentos .....	26
Quadro 3 – Simbologia para identificação dos sinais entre os instrumentos. ....	27

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO .....	10
2. OBJETIVOS.....	12
2.1. Objetivo geral .....	12
2.2. Objetivos específicos.....	12
3. REFERENCIAL TEÓRICO .....	13
3.1. Operações unitárias abordadas .....	13
3.2. Processo Ustulação-Lixiviação-Eletrólise.....	14
3.3. Fluxograma da lixiviação neutra .....	17
3.4. Instrumentação de processos .....	18
3.5. Malhas de controle.....	19
3.6. Tipos de controladores.....	21
3.7. Sintonia de controladores .....	22
3.8. Diagrama P&ID.....	24
3.9. Avaliação econômica de investimentos.....	27
4. METODOLOGIA .....	29
4.1. Padronização do processo do permanganato .....	29
4.1.1. Construção de um sistema de dosagem contínua de permanganato aquoso.....	29
4.2. Sistema de controle de vazão.....	31
4.3. Análise de viabilidade econômica .....	32
5. RESULTADOS.....	33
5.1. Padronização da dosagem do permanganato .....	33
5.2. Avaliação econômica do investimento proposto .....	39
Fonte: Da autora (2021).....	40
5.3. Avaliação econômica do investimento proposto .....	41
6. CONCLUSÃO .....	43
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	44

## 1. INTRODUÇÃO

O cenário atual da metalurgia no Brasil culmina de uma sequência histórica: a expansão marítima portuguesa, em busca de novos domínios, ascendeu à exploração de metais em terras brasileiras, o que proporcionou o desenvolvimento de indústrias metalúrgicas. O resultado desse processo foi uma produção mineral correspondente a 129 bilhões de reais em 2019 (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2020), evidência que ressalta a dimensão do setor no país.

Dentre os minerais produzidos no Brasil, destaca-se, pela sua aplicabilidade e valor econômico, o zinco. Encontrado principalmente sob a forma de sulfetos, o zinco é comumente empregado na galvanização em virtude do seu baixo potencial eletroquímico (FEIJÓ, 2007). Tal característica permite o seu emprego em materiais de construção, automóveis e eletrodomésticos. Além dessas aplicações, o mineral promove benefícios à saúde - por influenciar no crescimento de células de defesa do organismo, sua suplementação possui um importante papel para o sistema imunológico (CRUZ, et. al., 2011) - e atua como micronutriente para o desenvolvimento de plantas (SILVA, 2020).

De acordo com o anuário mineral brasileiro de 2020, 97,16% da produção de zinco no país corresponde à indústria Nexa Recursos Minerais S.A. (AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO, 2020). A rota para produção do zinco utilizada pela empresa é a hidrometalúrgica. O processo hidrometalúrgico traduz-se como a extração de metais por meio de uma solução aquosa (MORAES, 2011). Na Nexa de Três Marias, o fluxo de produção de zinco consiste das seguintes etapas: ustulação do concentrado, lixiviação neutra, lixiviação ácida, precipitado de ferro, purificação e eletrólise (FEIJÓ, 2007).

A etapa de lixiviação neutra possui o objetivo de solubilizar o óxido de zinco proveniente da ustulação e realizar o primeiro refino da solução por meio da precipitação do ferro que carregará as impurezas (arsênio, germânio e antimônio). Para promover a precipitação, o ferro, presente sob a forma de sulfato ferroso, deve sofrer uma reação de oxidação. Dentre os agentes oxidantes utilizados na planta de Três Marias, o permanganato de potássio é o que possui melhor performance, e é dosado em batelada na lixiviação neutra. No entanto, seu custo é dispendioso: em 2020, a empresa gastou mais de 3 milhões de reais com o insumo (importado), além de ocasionar um descarte de 5600 embalagens plásticas.

A gestão apropriada dos insumos é imprescindível para alcançar a operação ecoeficiente e eliminar desperdícios em qualquer setor. Segundo Antunes et. al. (2008), a ausência de um padrão de processo eficiente resulta em gasto de material superior ao necessário, de modo que

o aperfeiçoamento da padronização existente constitui uma oportunidade de melhoria no processo. Para isso, o primeiro passo deve ser a identificação do desperdício através da observação analítica das etapas. Baseados neste princípio, um estudo realizado em uma indústria têxtil do país identificou propostas para reduzir a quantidade de efluentes gerados, ao padronizar procedimentos (CUNHA et al., 2015) e outro, desenvolvido em uma indústria de montagem automotiva, executou 31 atuações de avanço no processo, o que possibilitou a redução do tempo na entrega do produto final, uma vez que foi possível eliminar atividades que não agregavam valor (SANTOS et al., 2017).

Na atual conjuntura pandêmica, as consequências decorrentes do desperdício se intensificaram: 73% das indústrias do país foram atingidas com a escassez de insumos nacionais (CONFEDERAÇÃO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS, 2021). Tal circunstância, aliada à desvalorização do real perante ao dólar, gera um contexto de dificuldades e incertezas com relação às importações para as empresas.

Em face do exposto, o presente trabalho buscou aprimorar o processo de dosagem de permanganato de potássio da usina de Três Marias a fim de reduzir o seu consumo na etapa de lixiviação neutra e assim contribuir para a ecoeficiência da operação, que se reflete também em ganhos econômicos.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1. Objetivo geral**

Identificar e implementar melhorias no processo de dosagem de permanganato de potássio na etapa de lixiviação neutra do processo de hidrometalurgia do zinco na empresa Nexa situada em Três Marias, MG.

### **2.2. Objetivos específicos**

- Padronizar o processo existente de dosagem do permanganato;
- Construir um sistema de dosagem contínua de permanganato aquoso;
- Avaliar a eficiência dos procedimentos implementados;
- Propor um sistema de controle automático da vazão de permanganato aquoso;
- Elaborar um diagrama de tubulação e instrumentação (P&ID, do inglês *piping and instrumentation diagram*) correspondente à malha de controle do processo;
- Efetuar o cálculo de medidas de avaliação econômica do investimento proposto.

### 3. REFERENCIAL TEÓRICO

Segundo Souza (2005), as principais rotas para a produção do zinco são: processo de Ustulação-Lixiviação-Eletrólise, conhecido como RLE (do inglês, Roast-Leaching-Electrolisis), empregado em 85% das usinas metalúrgicas do zinco; Lixiviação Direta Atmosférica e Lixiviação sob Pressão, presentes em apenas 2 e 3 usinas do mundo, respectivamente; Processo de Forno Imperial, inserido em 15% das usinas.

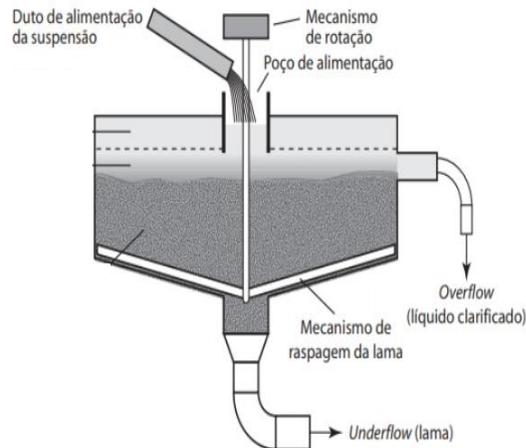
Das tecnologias de produção apresentadas, a Ustulação-Lixiviação-Eletrólise será a abordada nesse trabalho, em virtude de estar presente na maioria das indústrias metalúrgicas e ser a rota aplicada em Três Marias.

#### 3.1. Operações unitárias abordadas

A lixiviação é a principal operação unitária presente na hidrometalurgia (BALARINI, 2009). Trata-se da extração da espécie solúvel contida em um sólido por meio de um solvente (MORAIS, et.al., 2014). O solvente pode ser neutro, básico ou ácido. Nas duas etapas de lixiviação da usina em estudo o solvente utilizado é ácido, e o que as diferem é a concentração de acidez em que elas ocorrem, sendo a primeira denominada de lixiviação neutra e a segunda de lixiviação ácida.

Outra operação que compreende a rota hidrometalúrgica é a sedimentação. O processo de sedimentação possui como fundamento a separação sólido-líquido a partir da diferença de densidade entre os componentes da suspensão submetidos à ação do campo gravitacional (LUZ, et.al., 2010). A separação permite obter o clarificado, produto líquido com baixa concentração de partículas, e a polpa, fase particulada (AROUCA, 2007). A fase rica de particulados é denominada *underflow*, enquanto a clarificada *overflow* (MASSARANI, 2004). A Figura 1 apresenta a estrutura de um espessador.

Figura 1 – Estrutura de um espessador,



Fonte: Adaptado de Massarani, 2004.

De acordo com a literatura, os espessadores são empregados nas mineradoras e metalúrgicas com os seguintes propósitos (LUZ, et.al., 2010):

- i. Espessamento de rejeitos;
- ii. Recuperação de água para reaproveitamento;
- iii. Obtenção de polpas com concentrações determinadas;
- iv. Nos processos hidrometalúrgico para recuperar produtos advindos da lixiviação.

Como apresentado por Luz (2010), por tratar-se de uma rota hidrometalúrgica, os espessadores relatados nesse trabalho possuem como finalidade o último item apresentado, isto é, a recuperação de particulados ou clarificados provenientes da lixiviação.

### 3.2. Processo Ustulação-Lixiviação-Eletrólise

O processo hidrometalúrgico empregado em Três Marias possui como primeira etapa a ustulação do concentrado sulfetado, com o objetivo de produzir óxido de zinco e dióxido de enxofre, conforme reação expressa na Equação 3.2.1.



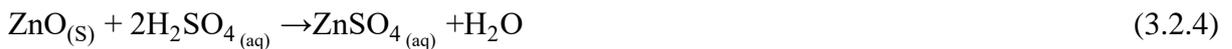
O ZnO obtido, pó de ustulado, segue para etapa de lixiviação neutra, enquanto o SO<sub>2</sub> é convertido em SO<sub>3</sub> na torre de conversão, para, posteriormente, originar o ácido sulfúrico. As Equações 3.2.2 e 3.2.3 representam as reações para produção do ácido, que é utilizado nas etapas seguintes.



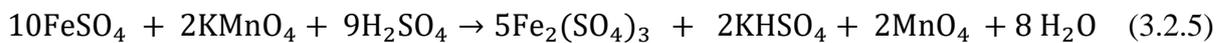


O ustulado é, então, solubilizado na etapa de lixiviação neutra através da solução de ataque (SAT, solução composta pelo ácido sulfúrico e a solução exaurida da eletrólise, com a concentração de ácido de 185 a 210 g/L). Essa etapa ocorre numa faixa de pH de 2,8 a 4,4, de modo que seu acréscimo se dá gradativamente pelos 9 tanques da lixiviação.

A reação principal é evidenciada na Equação 3.2.4.



Além da reação acima, ocorre a oxidação do sulfato ferroso utilizando o permanganato de potássio ( $\text{KMnO}_4$ ) como agente oxidante, conforme a Equação 3.2.5:



A oxidação é primordial para que ocorra a precipitação do ferro ainda nessa etapa e, dessa forma, promova a primeira purificação do processo. O ferro precipitado remove o germânio, antimônio e arsênio. A reação de precipitação é retratada na Equação 3.1.6.



Após a lixiviação, a solução segue para a etapa de sedimentação no espessador. O *overflow* do espessador possui como destino a purificação e por fim, a eletrólise. Enquanto o *underflow* segue para lixiviação ácida.

Na lixiviação ácida, ocorre a solubilização das ferritas de zinco,  $\text{ZnOFe}_2\text{O}_3$  – composto formado na ustulação por meio da reação do óxido de zinco com a hematita. A lixiviação das ferritas necessita de um ambiente mais ácido. Para tal, utiliza-se, além da SAT, uma vazão de ácido sulfúrico, produzido na ustulação. A Equação 3.2.7 traduz a lixiviação das ferritas.



Parte da solução retorna para a lixiviação neutra a fim de disponibilizar ferro solúvel,  $\text{Fe}_2(\text{SO}_4)_3$  e o restante segue para a etapa nomeada de precipitado de ferro, em que o ferro proveniente da reação acima é precipitado sob a forma de jarosita de amônio,  $\text{NH}_4\text{Fe}_3(\text{SO}_4)_2(\text{OH})_6$ . Assim como na lixiviação neutra, essa etapa possui o objetivo de precipitar as impurezas – arsênio, germânio e antimônio. A precipitação na condição de jarosita é em função da sua boa performance de filtrabilidade para etapa de filtração de zinco – a fase

da filtração tem como intuito remover o flúor e disponibilizar zinco solúvel ( $\text{ZnSO}_4$ ) remanescente ao processo.

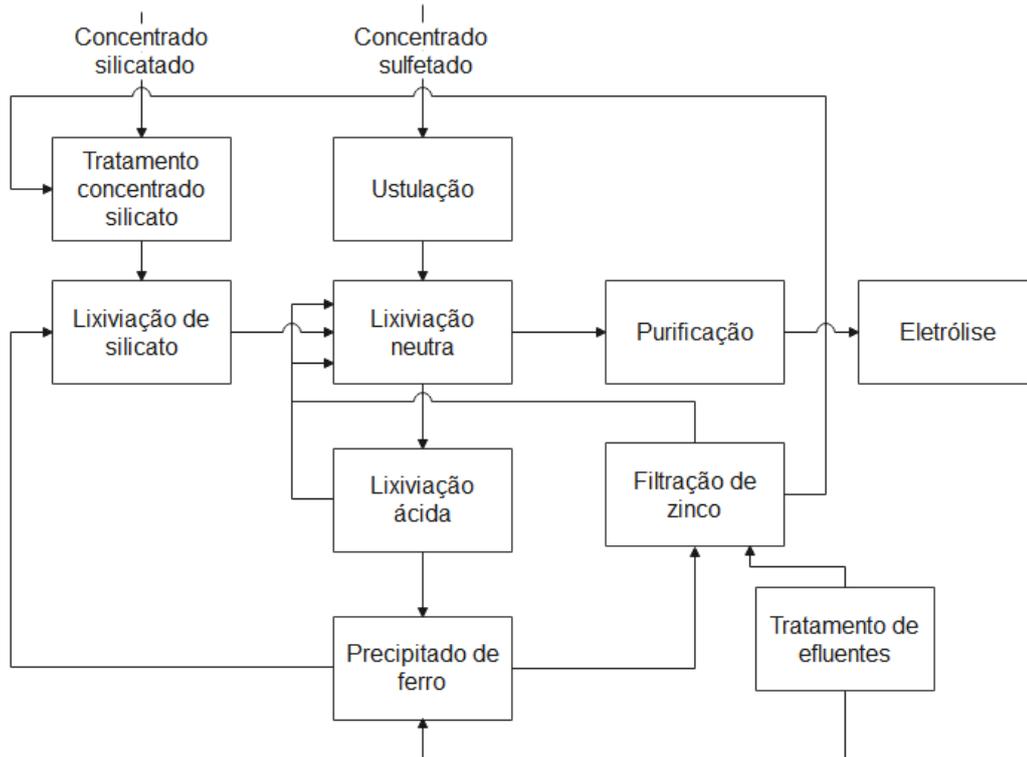
Na fase de purificação, o *overflow* da lixiviação neutra é tratado com pó de zinco para que, assim, ocorra a deslocação dos metais nocivos à eletrólise contidos na solução: cobre, cobalto e cádmio. A solução purificada é denominada de solução neutra concentrada (SNC) e possui como destino a eletrólise.

Por fim, na eletrólise, a SNC alimenta as cubas carregadas de anodos de chumbo e prata e catodos de alumínio. Por meio da inserção de corrente, o zinco é depositado no catodo, enquanto se produz oxigênio no anodo. Há ainda a combinação do íon  $\text{H}^+$  com o  $\text{SO}_4^{2-}$  contido na solução. A combinação resulta na solução exaurida da eletrólise, que retorna ao processo ao compor a SAT.

Além do concentrado de sulfeto de zinco,  $\text{ZnS}$ , a planta recebe o minério silicatado de zinco,  $\text{ZnSiO}_2$  (willemita). A willemita passa por um pré-tratamento e após solubilização do zinco com solução de ataque alimenta a lixiviação neutra. Por esse motivo, a lixiviação neutra é a etapa que dá origem ao circuito integrado sulfeto-silicato, processo exclusivo da unidade de Três Marias (Souza, 2001).

A Figura 2 representa o fluxograma sintetizado nessa subseção.

Figura 2 – Fluxograma do processo de hidrometalurgia do zinco – Três Marias.

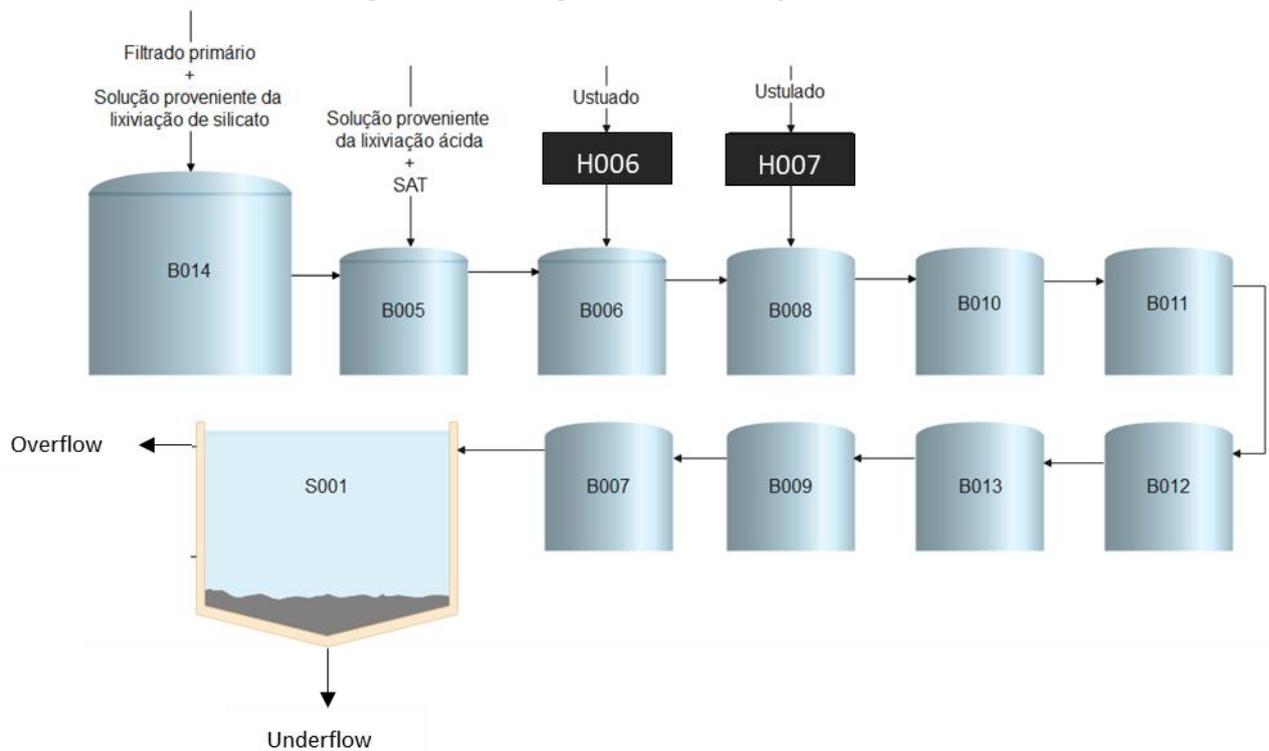


Fonte: Da autora (2021).

### 3.3. Fluxograma da lixiviação neutra

A fase de lixiviação neutra inicia-se com a alimentação da solução proveniente do circuito silicato e de parte do filtrado obtido na filtração de zinco, denominado primário, no tanque B014, como apresentado na Figura 3. A solução segue para o tanque B005 em que há a adição da SAT e do *under* da lixiviação ácida. Do tanque B005, percorre a contínua pelos 9 tanques da lixiviação neutra (cada um com um volume equivalente à 80 m<sup>3</sup>): B006, B008, B010, B011, B012, B013, B009 e B007. O ustulado, ZnO, é dosado nos tanques B006 e B008 por meio de duas balanças dosadoras, H006 e H007. Em todos os tanques da lixiviação neutra existe a inserção de ar para promover a expulsão da solução pelas chicanas e para auxiliar na oxidação do sulfato ferroso, além da dosagem em batelada do permanganato de potássio em todos os tanques mediante análise do Fe<sup>+2</sup> do tanque de amostragem. Há ainda adição de floculante na calha de saída do último tanque, em direção ao espessador S001, onde finaliza a lixiviação neutra.

Figura 3 – Fluxograma da Lixiviação Neutra.



Fonte: Da autora (2021).

A oxidação do sulfato ferroso deve-se à necessidade de precipitar o ferro como hidróxido férrico e, dessa maneira, propiciar o primeiro refino do processo, ao carrear

impurezas. As impurezas prejudicam a eletrólise: ocasionam redissolução e formação de buracos nos depósitos de zinco, que comprometem a viabilidade do produto.

O ferro, quando presente na SNC, provoca o aumento do consumo de energia na eletrólise – ocorre um ciclo de oxidação do ferroso no anodo e redução do férrico no catodo, o que afeta a eficiência da corrente. Por essas razões, a dosagem de permanganato de potássio se faz tão necessária.

### 3.4. Instrumentação de processos

O advento da indústria 4.0 em 2011 suscitou a transformação da tecnologia de modo a proporcionar mudanças que tornassem os trabalhos mais ágeis e confiáveis (AYDEMIR, 2020). Inserida nessa conjuntura de transformação industrial, tem-se a instrumentação de processos (SOUZA, 2021).

Franchi (2015) define a instrumentação como o estudo que aplica equipamentos de medição e de controle que permitem a antecipação e correção de variáveis em um sistema. No período anterior à automação, os mecanismos de controles eram majoritariamente manuais. Isso significa que o próprio trabalhador regulava um equipamento de maneira a alcançar o resultado especificado (FRANCHI, 2015). No entanto, controles por instrumentos asseguram uma melhor precisão, sendo, atualmente, preferenciais (BEGA, 2011).

A automação permite ganhos produtivos e econômicos. No que tange a redução de custos em processos, Melo (2020) implementou um conjunto de instrumentos em uma caldeira de uma usina termoeletrica, situada na região do Vale do Aço, Minas Gerais, com o propósito de mitigar despesas. O trabalho consistiu em criar meios automáticos para evitar a cavitação da bomba de alimentação da caldeira. Para tanto, o autor partiu da criação de automatismos que envolveram controle *feedforward* (antecipatório), que corrige o processo antes de impactar a variável de processo controlada, e *feedback* (realimentação), no qual a correção ocorre após a variável sob controle desviar do valor estabelecido – *setpoint* (FRANCHI, 2015). Como resultado, obteve-se uma melhora no desempenho do processo, visto que promoveu um aumento da produção de vapor, além da economia ao evitar manutenção corretiva da bomba.

Além das estratégias de controle avaliadas no trabalho de Melo (2020), *feedforward* e *feedback*, existem outras concepções cujos conceitos são imprescindíveis para o entendimento da instrumentação. Para isso, é relevante conhecer as etapas básicas para o controle de processos (FRANCHI, 2015):

- i. Medição da condição de processo (se a medição é feita por um instrumento que possui comunicação direta com o controlador, nomeia-se medição *online*, do contrário, *offline*);
- ii. Cálculo do erro (ação) entre o valor obtido pelo medidor e o valor estabelecido, *setpoint*, por meio de um controlador;
- iii. Sinal de resposta do controlador que chegará ao atuador (dispositivo responsável pela ação corretiva, por exemplo, uma válvula);
- iv. Reação do processo, que altera o seu estado.

Dentro da instrumentação, as variáveis são classificadas como variáveis de entrada e de saída. As variáveis de entrada são aquelas que afetam o processo, as quais podem ser do tipo carga (perturbação) ou as ditas manipuladas, isto é, àquelas cujo atuador irá agir sobre (ALVES, 2017). Por exemplo, em um sistema de controle de temperatura em reservatório, em que a vazão de alimentação da corrente quente impactará na temperatura, a abertura da válvula que controla a alimentação é a variável manipulada. Já as variáveis de saída são as respostas do processo, medidas ou não, sendo as primeiras aquelas em que há geralmente o interesse de se controlar (ALVES, 2017). Para o mesmo exemplo, as variáveis controladas seriam a vazão de alimentação do fluido quente e a temperatura do reservatório. Se no exemplo, além da corrente quente, existisse uma corrente fria sem regulagem da vazão, essa corresponderia à variável de entrada do tipo perturbação – variável que interfere na controlada, mas não é manipulada (ALVES, 2017).

Por fim, de maneira simplista, os instrumentos que constituem um sistema de controle automático são (ALVES, 2017):

- Sensor/medidor/elemento primário: mede o estado da variável;
- Indicador: indica o valor da variável medida;
- Transmissor: a partir do sinal do medidor, produz um sinal de saída padrão (por exemplo, 4-20 mA ou 3-15 psi) proporcional ao valor da variável medida;
- Controlador: realiza o cálculo do erro e determina a ação de controle;
- Atuador: elemento final que atua sobre a variável manipulada.

### 3.5. Malhas de controle

À configuração que une o erro obtido pelo controlador com o ajuste da variável manipulada dá-se o nome de malha de controle (FRANCHI, 2015). A Figura 4 apresenta um

diagrama de blocos de uma malha de controle aberta, isto é, em que a ação independe da resposta (ALVES, 2017).

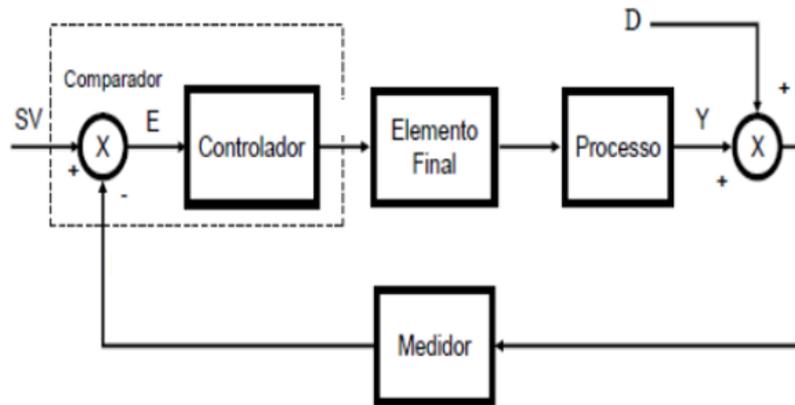
Figura 4 – Diagrama de blocos de uma malha de controle aberta.



Fonte: Alves (2017).

E a Figura 5 ilustra uma malha de controle fechada, em que a ação é tomada com base na variável de resposta (ALVES, 2017).

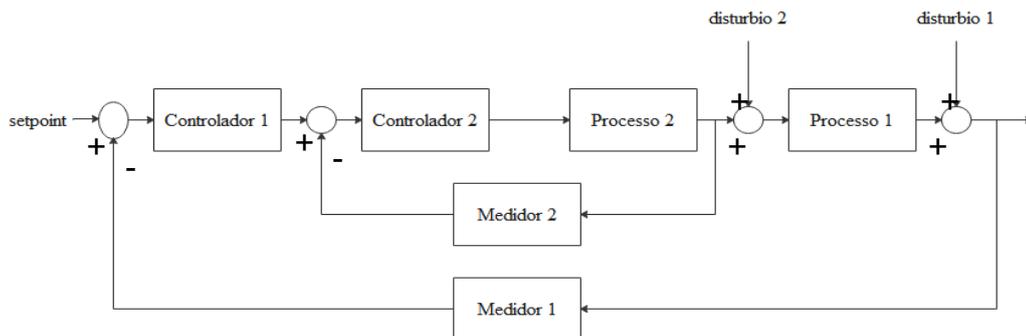
Figura 5 – Diagrama de blocos de uma malha de controle.



Fonte: Adaptado de Silva et. al. (2019).

Uma malha de controle pode ter sua configuração no modo cascata. O sistema em cascata tem como característica a inserção de uma variável adicional ao processo com o objetivo de auxiliar o controle do sistema nos casos em que há perturbações associadas à variável manipulada (SILVA et. al., 2019). A Figura 6 demonstra esse sistema.

Figura 6 – Malha de controle em cascata.



Fonte: Da autora (2021).

Na configuração em cascata, a malha externa, reproduzida na Figura 6 pelo índice “1”, é nomeada de malha mestre ou primária, enquanto a malha interna, índice “2”, de malha servo ou secundária. De acordo com Seborg et al. (2010), o sistema em cascata proporciona melhor estabilidade quando a malha interna tem uma ação mais rápida do que a externa. Ademais, é importante que a variável controlada pela malha secundária esteja disponível para medição *online* e que influencie a variável controlada pela malha primária (TORGA, 2018).

### 3.6. Tipos de controladores

Os principais controladores encontrados industrialmente são: controlador proporcional (P), proporcional integral (PI), proporcional derivativo (PD) e proporcional integral derivativo (PID). Esse capítulo irá discutir as vantagens e desvantagens dos controladores, bem como suas equações. Para o primeiro, a atuação de controle é diretamente proporcional ao erro em função do tempo, isto é, à diferença entre o valor da variável controlada e o *setpoint* (PINTO, 2014). A Equação 3.6.1 mostra essa razão de proporcionalidade:

$$u(t) = K_C e(t) \quad (3.5.1)$$

em que  $u(t)$  representa o sinal de controle num dado instante,  $K_C$  a constante de proporcionalidade (ou ganho do controlador) e  $e(t)$  o erro no mesmo instante.

Esse tipo de controlador possui uma dinâmica rápida, em virtude da sua ação apenas amplificar o erro. Apesar disso, tem como desvantagem a apresentação de erros em regime estacionário, além de ser mais oscilatório como aumento do  $K_C$  (PINTO, 2014).

O segundo controlador, PI, além de ser proporcional ao erro, é proporcional à integral do erro, conforme Equação 3.6.2.

$$u(t) = K_C e(t) + K_C \frac{1}{T_i} \int e(t) \quad (3.6.2)$$

sendo  $T_i$  o tempo integral a ser sintonizado.

O controlador PI consegue eliminar as desvantagens do proporcional. No entanto, tem como limitação o aumento da oscilação da resposta podendo levar à instabilidade do sistema (PINTO, 2014).

O controlador proporcional derivativo (PD) é o proporcional acrescido da derivada do erro. Esse controlador tende a mitigar a instabilidade do sistema, em contrapartida, não atua em regime permanente, ou seja, a limitação do primeiro controlador se mantém. A Equação 3.6.3 representa o sinal do controlador PI (PINTO, 2014).

$$u(t) = K_C e(t) + K_C \tau_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.6.3)$$

Na Equação 3.6.3,  $\tau_d$  refere-se à constante derivativa.

Por último, o controlador PID une as atuações dos demais, sendo utilizado nos dois regimes, estacionário e transiente (PINTO, 2014). Seu sinal é apresentado na Equação 3.6.4.

$$u(t) = K_C e(t) + K_C \frac{1}{T_i} \int e(t) + K_C \tau_d \frac{de(t)}{dt} \quad (3.6.4)$$

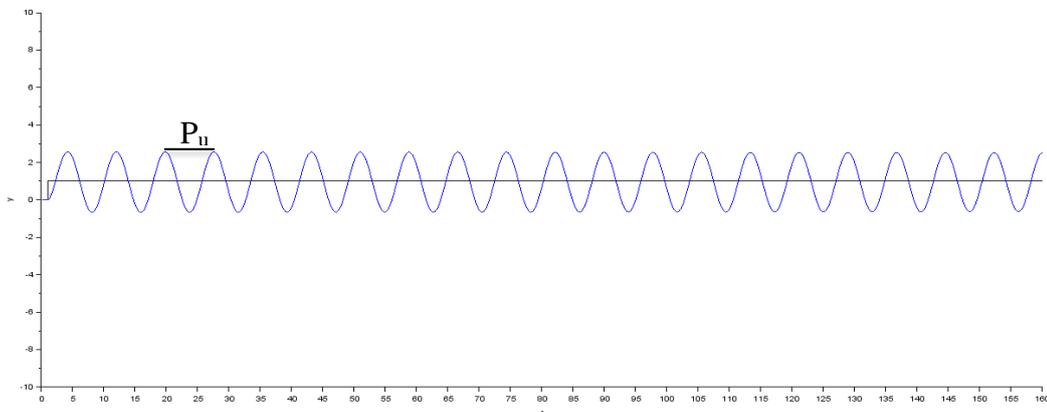
Por corrigir as limitações dos outros controladores, o controlador PID é o mais usual para os casos onde as medidas são pouco ruidosas.

### 3.7. Sintonia de controladores

A sintonia de controladores tem como finalidade encontrar valores adequados para os parâmetros do controlador ( $K_C$ ,  $T_i$  e  $\tau_d$ ). Para isso existem os métodos convencionais, sendo os mais conhecidos e aplicados o método de Ziegler-Nichols (ZN) e o de Cohen e Coon, e os heurísticos, como o Algoritmo Genético (AG) e o método de tentativa e erro (MAZZO et al., 2019). Essa subseção tem como objetivo proporcionar o conhecimento das principais bases dos métodos de sintonia relatados.

O método de Ziegler-Nichols em malha fechada foi o primeiro método experimental do ajuste de parâmetros do controlador PID. O ajuste parte do aumento do ganho de um controlador proporcional, de forma gradativa, até alcançar uma oscilação com amplitude constante. Assim, encontra-se o período crítico identificado por  $P_u$  (PINTO, 2014). A Figura 7 representa essa primeira parte do ajuste.

Figura 7 – Resposta no limite de estabilidade para a sintonia pelo método de Ziegler Nichols em malha fechada.



Fonte: Da autora (2021).

Para esse ponto, determina-se o ganho crítico,  $K_u$  (valor do ganho do controlador P que possibilitou encontrar  $P_u$ ). Por fim, calcula-se os parâmetros conforme a tabela apresentada na Tabela 1.

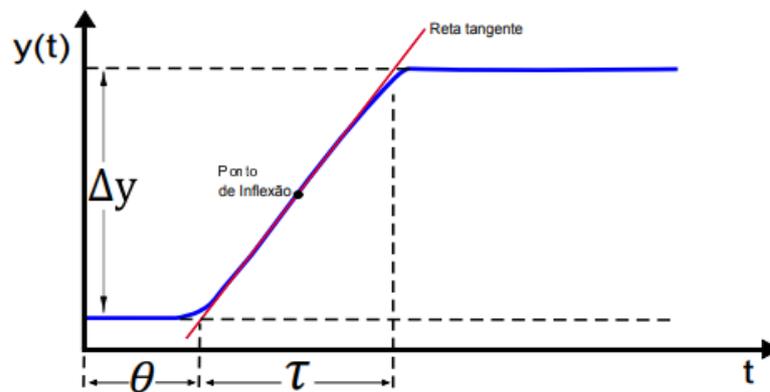
Tabela 1– Regras de sintonia dos parâmetros do controlador a partir do método de Ziegler-Nichols em malha fechada.

Controlador	$K_c$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5K_u$	-	-
PI	$0,45K_u$	$T_u/1,2$	-
PID	$0,6K_u$	$T_u/2$	$T_u/8$

Fonte: Adaptado de Pinto (2014).

Ziegler-Nichols também desenvolveram um método de sintonia partindo de uma malha aberta. Neste método ocorre uma excitação do sistema em malha aberta com um degrau ( $\Delta U$ ) na variável de entrada, obtendo a curva de resposta, formada pelo tempo morto ( $\theta$ ) e pela constante de tempo ( $\tau$ ) (PINTO, 2014). A Figura 8 apresenta como identificar  $\theta$  e  $\tau$ .

Figura 8 – Identificação de parâmetros na curva de resposta de uma variação degrau.



Fonte: Adaptado de Pinto (2014).

Em posse dos valores, calcula-se os parâmetros de ajuste de acordo com a Tabela 2.

Tabela 2 – Regras de sintonia dos parâmetros do controlador a partir do método de Ziegler-Nichols de malha aberta.

Controlador	$K_c$	$T_i$	$T_d$
P	$\tau/K\theta$	-	-
PI	$0,9(\tau/K\theta)$	$3,33\theta$	-
PID	$1,2(\tau/K\theta)$	$2\theta$	$0,5\theta$

Fonte: Adaptado de Pinto (2014).

Sendo  $K$  o ganho estático definido pela Equação 3.7.1.

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta U} \quad (3.7.1)$$

Na Equação 3.7.1,  $\Delta y$  é a variação apresentada na Figura 8.

O método Cohen Coon surgiu com a intenção de aprimorar o de Ziegler-Nichols e parte do mesmo princípio, geração de um degrau em malha aberta. Basicamente, possui o objetivo de trabalhar com tempos mortos mais elevados (PINTO, 2014). A Tabela 3 traz o ajuste dos parâmetros de controle com base no método Cohen Coon.

Tabela 3 – Regras de sintonia dos parâmetros do controlador a partir do método de Cohen Coon.

Controlador	$K_c$	$T_i$	$T_d$
P	$(1,03 + 0,35(\tau/\theta))\tau/K\theta$	-	-
PI	$(0,9 + 0,083(\tau/\theta))0\tau/K\theta$	$(0,9 + 0,083(\tau/\theta))\theta / (1,27 + 0,6(\tau/\theta))$	-
PID	$(1,35 + 0,25(\tau/\theta))\tau/K\theta$	$(1,35 + 0,25(\tau/\theta))\theta / (0,54 + 0,6(\tau/\theta))$	$0,5\theta / (1,35 + 0,25(\theta/\tau))$

Fonte: Adaptado de Pinto (2014).

Os métodos heurísticos constituem-se de aproximações sequenciais até alcançar uma solução ótima (REIS, 2014). O método heurístico de tentativa e erro fundamenta-se na experiência acumulada da operação. Nele, os parâmetros são ajustados por tentativas até se obter uma solução ótima (NETO, et.al., 2010).

### 3.8. Diagrama P&ID

Além da representação por diagramas de blocos, semelhante às Figuras 5 e 6, existe o diagrama de tubulação e instrumentação (P&ID, do inglês *piping and instrumentation diagram*). O P&ID reproduz o sistema de controle por meio de símbolos padronizados que buscam replicar as condições de operação, sendo fundamental em processos industriais (JOAQUIM, et.al., 2017). Os símbolos seguem a norma ISA 5.1 (*International Society of Automation*), mas também é possível que a indústria crie identificações próprias (FRANCHI, 2015). O Quadro 1 traz a relação do instrumento com as letras e posições que elas ocupam.

Quadro 1 - Simbologia para identificação de variáveis e função.  
Fonte: Alves (2017).

	Primeira Letra		Letras subsequentes		
	Variável medida ou inicial	Modificadora	Função de informação ou Passiva	Função Final	Modificadora
<b>A</b>	Analizador	-	Alarme	-	-
<b>B</b>	Chama de queimador	-	Indefinida	Indefinida	Indefinida
<b>C</b>	Condutividade elétrica	-	-	Controlador (12)	-
<b>D</b>	Densidade ou massa específica ( <i>Density</i> )	Diferencial	-	-	-
<b>E</b>	Tensão elétrica	-	Elemento primário	-	-
<b>F</b>	Vazão ( <i>Flow</i> )	Razão (fração)	-	-	-
<b>G</b>	Medida dimensional	-	Visor	-	-
<b>H</b>	Comando Manual ( <i>Hand</i> )	-	-	-	-
<b>I</b>	Corrente Elétrica	-	Indicador	-	-
<b>J</b>	Potência	Varredura ou seletor	-	-	-
<b>L</b>	Nível ( <i>Level</i> )	-	Lâmpada piloto	-	-
<b>M</b>	Umidade ( <i>Moisture</i> )	-	-	-	-
<b>N</b>	Indefinida	-	Indefinida	Indefinida	Indefinida
<b>O</b>	Indefinida	-	Orifício de restrição	-	-
<b>P</b>	Pressão ou Vácuo	-	Ponto de teste	-	-
<b>Q</b>	Quantidade ou Evento	Integrador ou totalizador	-	-	-
<b>R</b>	Radioatividade	-	Registrador ou Impressor	-	-
<b>S</b>	Velocidade ou frequência ( <i>Speed</i> )	Segurança	-	Chave	-
<b>T</b>	Temperatura	-	-	Transmissor	-
<b>U</b>	Multivariável	-	Multifunção	Multifunção	Multifunção
<b>V</b>	Viscosidade	-	-	Válvula	-
<b>W</b>	Peso ou Força ( <i>weigh</i> )	-	Poço	-	-
<b>X</b>	Não classificada	-	Não classificada	Não classificada	Não classificada
<b>Y</b>	Indefinida	-	-	Relé ou computação	-
<b>Z</b>	Posição	-	-	Elemento final de controle não classificado	-

O Quadro 2 apresenta a simbologia para identificação da localidade dos instrumentos.

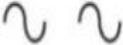
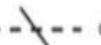
Quadro 2 - Simbologia para identificação de instrumentos.

	Localização Principal Normalmente Acessível ao Operador	Montado no Campo	Localização Auxiliar Normalmente Não Acessível ao Operador
Instrumentos Discretos	1 	2 	3 
Mostrador ou Controle Compartilhados	4 	5 	6 
Função Computadorizada	7 	8 	9 
Controle Lógico Programável	10 	11 	12 

Fonte: Alves (2017).

Enquanto o Quadro 3 traz os sinais de comunicação utilizados entre os instrumentos.

Quadro 3 – Simbologia para identificação dos sinais entre os instrumentos.

Alimentação do instrumento ou conexão ao processo		Sinal sônico ou eletromagnético guiado	
Sinal indefinido		Sinal sônico ou eletromagnético não guiado	
Sinal pneumático		Ligação interna de sistema (ligação por software ou dado)	
Sinal elétrico	----- ou 	Ligação mecânica	
Sinal hidráulico		Sinal pneumático binário	
Tubo capilar		Sinal elétrico binário	---  --- ou 

Fonte: Adaptado de Alves (2017).

### 3.9. Avaliação econômica de investimentos

Camargos (2013, p. 325) define investimento como “a decisão de aplicar determinada soma de recursos em um ativo, baseada geralmente na expectativa de ganhos futuros”. A análise da viabilidade econômica em uma indústria é, portanto, de suma importância para avaliar um investimento de projeto (DAGOSTIN, 2014). Sob esse contexto, existem conceitos fundamentais para a compreensão da avaliação econômica de projetos (GOMES, 2013) e (SUAVE, 2017):

- Investimento Financeiro: refere-se à compra de títulos;
- Investimento de Capital: remete à aquisição durante reformas e construções, bem como custos de equipamentos, bens de consumo e outros;
- Fluxo de caixa (FC): movimentação financeira;
- Capex (*Capital Expenditure*): montante destinado ao investimento de capital;
- Taxa mínima de atratividade (TMA): expressa a taxa mínima de remuneração aceita por um investimento para que ele seja economicamente rentável;
- Liquidez: velocidade de transição no mercado;
- *Payback* Tradicional: indicador definido como o período necessário para recuperação do investimento;
- *Payback* Descontado: possui o mesmo princípio que o *payback* tradicional, porém leva em consideração a TMA, isto é, considera o valor do dinheiro no tempo, uma vez que no futuro ocorre a desvalorização do poder aquisitivo (DAGOSTIN, 2014).

É importante ressaltar que o *payback*, tanto o tradicional, quanto o descontado, indicam, sobretudo, a liquidez de um projeto. Sullivan et.al (2015) explica que “o *payback* tem sido usado como uma medida de risco para investimentos, uma vez que avaliza a sua liquidez, ou seja, o tempo no qual o investimento inicial do projeto pode ser recuperado”. Para medições de lucratividade existem outros indicadores, como a taxa interna de retorno (TIR), que possui o intuito de avaliar o retorno financeiro do investimento (DAGOSTIN, 2014) e o valor presente líquido (VPL) que compara projetos diferentes em um mesmo período de tempo (CAMARGOS, 2013).

De modo a exemplificar a determinação do *payback* descontado, considera-se um investimento inicial de R\$50000,00, em uma empresa que possui uma TMA de 20% ao ano e um retorno financeiro de R\$15000 por ano durante 5 anos. A Tabela 4 auxilia a identificar o *payback* para esse exemplo.

Tabela 4 - Determinação de *payback* descontado

Ano	Fluxo de Caixa	Fluxo Descontado	Saldo
0	-R\$ 50.000,00	-R\$ 50.000,00	-R\$ 50.000,00
1	R\$ 15.000,00	R\$ 13.636,36	-R\$ 36.363,64
2	R\$ 15.000,00	R\$ 12.396,69	-R\$ 23.966,94
3	R\$ 15.000,00	R\$ 11.269,72	-R\$ 12.697,22
4	R\$ 15.000,00	R\$ 10.245,20	-R\$ 2.452,02
5	R\$ 15.000,00	R\$ 9.313,82	R\$ 6.861,80

Fonte: Da autora (2021).

Pela tabela, identifica-se que o *payback* descontado se encontra entre o quarto e o quinto ano, uma vez que no quinto ano o projeto terá um retorno positivo.

Há na literatura uma série de trabalhos que evidenciam a relevância da avaliação econômica no desenvolvimento de projetos. No contexto metalúrgico, Costa (2016) estudou a viabilidade econômica para criação de sistemas de resfriamento em uma usina. Ao adotar uma TMA de 10% ao ano, o autor encontrou um *payback* descontado de 6,7 anos, menor que o tempo de estudo do projeto, 10 anos, considerando o investimento economicamente viável.

## 4. METODOLOGIA

Este trabalho foi desenvolvido com base na etapa de lixiviação neutra do processo de produção de zinco em uma usina hidrometalúrgica situada em Três Marias, MG. A operação desta unidade ocorre em três turnos de 8 horas, sendo o primeiro de 23h às 7h, o segundo de 7h às 15h e o terceiro de 15h às 23h. O período de implementação das iniciativas compreendeu-se de março a junho de 2021.

### 4.1. Padronização do processo do permanganato

Inicialmente buscou-se aprofundar a compreensão do funcionamento da unidade e das limitações do processo através de um *brainstorming* com os operadores das quatro equipes responsáveis pelo processo (A, B, C e D), que trabalham em 3 turnos: 23 às 7 horas, 7 às 15 horas e 15 às 23 horas. Com isso, foram levantadas sugestões que influenciariam na redução do consumo de permanganato e, em seguida, foi aplicada uma análise de priorização das ideias.

Então fez-se a observação analítica das etapas através do acompanhamento diário do trabalho dos colaboradores na coleta de amostras, análise de íon ferroso e dosagem de permanganato, a fim de encontrar oportunidades de melhoria. Deste modo, identificou-se a ausência de um padrão de dosagem coerente.

Assim, no mês de março, procedeu-se então a padronização da dosagem de sólidos em batelada. Considerando a vazão volumétrica de alimentação da etapa fixada em 300 m<sup>3</sup>/h e a concentração do íon Fe<sup>+2</sup> no tanque medida a cada hora por meio de análise de espectrofotometria, estabeleceu-se a relação entre a quantidade de doses de permanganato a serem administradas (de acordo com a massa do insumo correspondente ao recipiente) e a concentração do íon ferroso do tanque de amostragem, através do balanço de massa por componente de acordo com a reação apresentada na Equação 3.1.5.

#### 4.1.1. Construção de um sistema de dosagem contínua de permanganato aquoso

Com base nas informações obtidas na etapa anterior, propôs-se a construção de um sistema para dosagem contínua de permanganato aquoso no tanque B010. A estruturação do tanque se deu por meio da cooperação dos operadores. Assim instalou-se um container, reaproveitado, de 1.000 L contendo a solução de permanganato com válvula de regulagem da vazão para controle manual. A solução era preparada com aproximadamente 50 kg do permanganato de potássio, a fim de manter um distanciamento do ponto de saturação do sal (70 kg/m<sup>3</sup>). A Figura 11 apresenta a estrutura do container.

Figura 9 – Tanque de preparação da solução de permanganato.



Fonte: Da autora (2021).

O início da dosagem aquosa ocorreu no mês de maio de 2021. A fim de garantir um preparo com duração próxima de 24 horas, a vazão foi fixada a 700 mL/min e instruído o seu ajuste manual a cada 8 horas. A homogeneização da solução se deu por meio da inserção de uma lança de ar. Por fim, foi realizada a atualização do procedimento operacional e o treinamento da equipe. A Figura 12 representa o modo de controle da vazão.

Figura 10 – Aferição da vazão.



Fonte: Da autora (2021).

A eficácia das propostas implementadas foi avaliada tomando-se como base o consumo específico médio de permanganato em 2020 (0,82 kg  $\text{KMnO}_4$ /tonelada de cátodo de zinco produzido). Como Indicador-Chave de Desempenho (KPI, do inglês *Key Performance Indicator*)

para o projeto foi estabelecido um consumo específico médio de 0,48 kg  $\text{KMnO}_4$ / tonelada de cátodo de zinco produzido, o que corresponde a uma meta mensal de consumo de, aproximadamente, 7950 kg de permanganato de potássio.

Para verificar se a redução do consumo foi decorrente das ações implementadas ou das condições de processo, definiram-se indicadores que relacionavam a carga de ferro na alimentação com o consumo de permanganato. Ademais, foram avaliados os parâmetros de saída do processo (ferroso e ferro total no *over* do espessador S001, ferro total e impurezas na solução neutra concentrada) de acordo com os limites de especificação estabelecidos pela GPP – gestão por processo. Construíram-se então as cartas de controle dos parâmetros e indicadores utilizando-se o *software Minitab*, sendo os dados obtidos pelo *PI System* – sistema da OSIsoft utilizado na empresa.

Os gastos mensais com o insumo foram então obtidos por meio de relatório de gestão interna, de janeiro de 2020 ao fim do período de estudo das novas ações, junho de 2021. Então o cálculo da projeção de economia financeira para 2021 foi feito com base no consumo acumulado no ano até o mês de junho e no valor mensal equivalente aos 7950 kg dos meses de julho a dezembro, tendo como base o preço R\$540,00 por 25 kg de permanganato (referência interna).

#### 4.2. Sistema de controle de vazão

Diante dos resultados da eficiência dos procedimentos, sobretudo da dosagem aquosa de permanganato, foi levantada a proposta da automação do sistema implementado. Um sistema de controle automático promoveria um ajuste de vazão mais ágil, evitaria possíveis ocorrências de diluição no processo e possibilitaria um acompanhamento mais eficaz da dosagem aquosa. Para tanto, definiu-se como:

- Variáveis controladas: a vazão volumétrica de permanganato,  $F$ , e a concentração mássica de  $\text{Fe}^{+2}$  na entrada do tanque de dosagem,  $C_{\text{Fe}}$ ;
- Variável manipulada: a abertura da válvula,  $x$ .

Foi proposto o sistema de controle em cascata, em que  $F$  corresponde à variável medida (*online*) e controlada da malha servo e  $C_{\text{Fe}}$  a variável medida (*offline*) e controlada da malha mestre, sendo necessário um medidor de vazão e um controlador PID com sintonia heurística de tentativa e erro (por ser o método de sintonia mais usual dos instrumentistas da planta).

Por fim, desenvolveu-se o diagrama P&ID da malha proposta por meio do *software EdrawMax*.

### 4.3. Análise de viabilidade econômica

A partir do P&ID, foi realizado o orçamento para aquisição de materiais e confecção do sistema de controle. Em posse dele e da economia obtida pela dosagem aquosa calculou-se o *payback* descontado para análise da viabilidade econômica a partir do exemplo apresentado na subseção 3.9.

Para cálculo do indicador, a TMA utilizada foi de 10% ao ano, por ser uma taxa reportada na literatura para outra usina metalúrgica (MELO, 2016). De acordo com o *payback* obtido discutiu-se a viabilidade do projeto de automação da dosagem aquosa de permanganato de potássio.

## 5. RESULTADOS

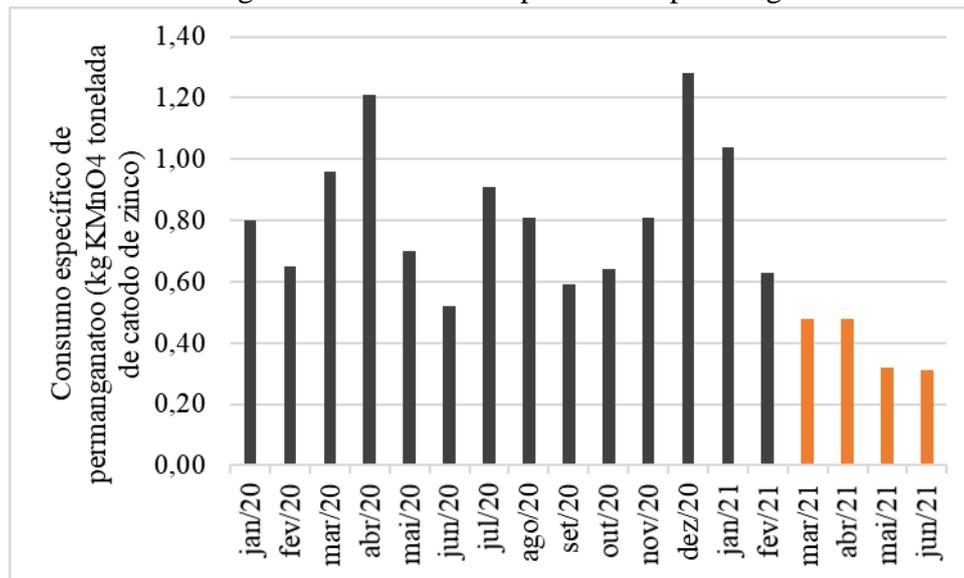
As ações implementadas promoveram uma redução do consumo de permanganato na indústria. Esse avanço proporcionou, além de uma economia financeira, um impacto ambiental positivo e um ganho ergonômico para o operador.

As subseções a seguir apresentam os resultados alcançados com o desenvolvimento das propostas.

### 5.1. Padronização da dosagem do permanganato

A padronização da dosagem de permanganato, ocasionou uma queda em seu consumo. Para evidenciar tal afirmação, a Figura 11 apresenta o consumo específico de permanganato no período de janeiro de 2020 a junho de 2021.

Figura 11 - Consumo específico de permanganato.



Fonte: Da autora (2021).

Como pode ser visto na Figura 11, o consumo específico médio de permanganato de potássio em 2020 foi de  $0,82 \pm 0,22$  kg KMnO<sub>4</sub>/tonelada de cátodo de zinco produzido, sendo este valor tomado como referência para aferir a eficácia das propostas implementadas. Após implementação das iniciativas, no período entre março e abril de 2021, o consumo específico médio do agente oxidante passou para  $0,48 \pm 0,10$  kg KMnO<sub>4</sub>/tonelada de cátodo de zinco produzido, uma redução de 41 %. Ao nível de significância de 5%, é possível afirmar que houve redução do consumo de permanganato (valor-p = 0,015) devido à padronização da dosagem de sólidos. Depreende-se, portanto, que a primeira alteração no procedimento operacional permitiu a eliminação de desperdícios, o que sustenta a importância da gestão apropriada de insumos,

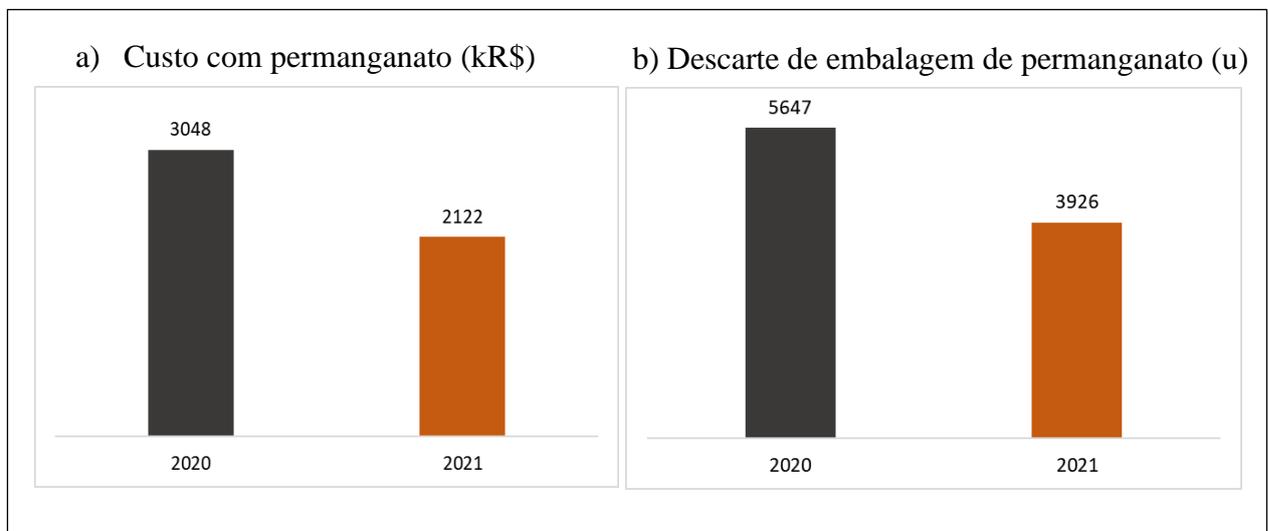
isto é, da identificação de oportunidades de melhoria, do acompanhamento do processo e da instrução aos operadores.

Com a dosagem aquosa instituída em maio de 2021, o consumo específico médio ( $0,32 \pm 0,01$  kg  $\text{KMnO}_4$ /tonelada de cátodo de zinco produzido) reduziu em 33% em relação ao período de março e abril do mesmo ano. Também ao nível de significância de 5%, constata-se que a queda do consumo (valor-p = 0,019) é decorrente da introdução da dosagem aquosa. Assim, a construção de um tanque para dosagem contínua conduziu a um consumo ainda menor em relação a dosagem sólida.

Em posse das certificações acima, é possível afirmar que a diferença do consumo específico médio de 2020 para o período de implementação das ações, março a junho de 2021, - equivalente a uma redução de 51% - resulta da padronização do procedimento de dosagem, tanto em batelada quanto contínua, sendo que a última promoveu uma redução adicional.

A economia exposta possibilita ganhos financeiros e ambientais, como mostrado na Figura 11.

Figura 12 – Impactos financeiros e ambientais do projeto.



Fonte: Da autora (2021).

Como pode ser visto na Figura 12, houve uma projeção econômica com a continuidade das propostas para 2021 de 926 mil reais. Essa economia é o resultado do trabalho desenvolvido dos meses de março a junho de 2021. Ela contabiliza também os meses de janeiro e fevereiro, que tiveram um consumo 52% acima do período de implementação.

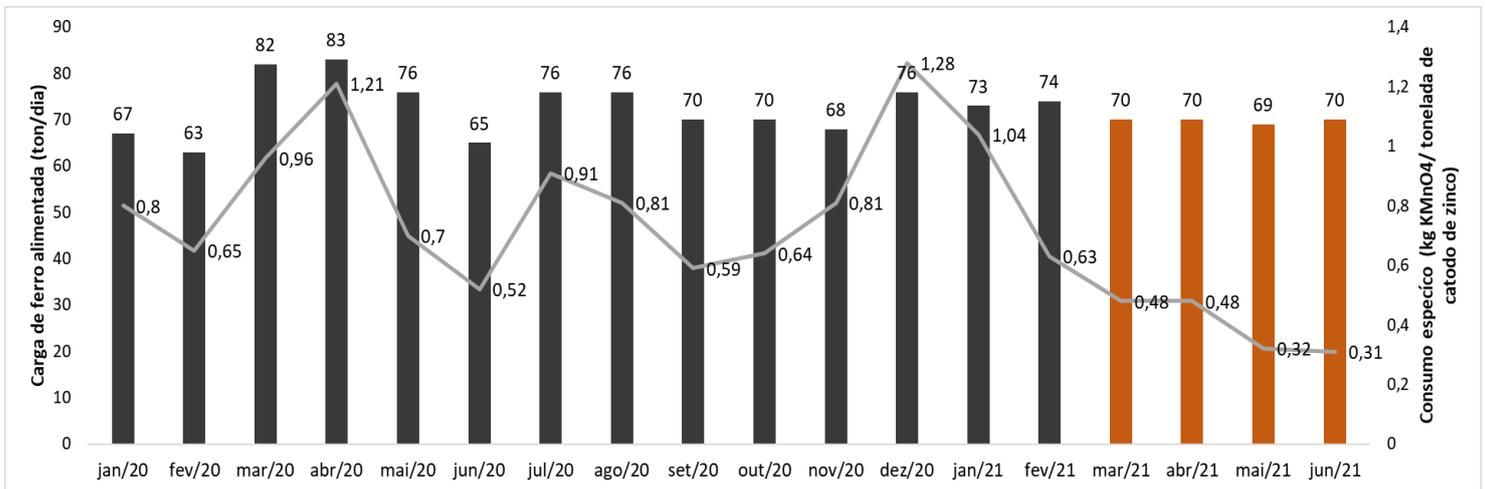
No que tange o impacto ambiental, o projeto possibilita um descarte amenizado em mais de 1700 resíduos plásticos. Uma vez que o peso da embalagem unitária é igual a 1 kg, a proposta geraria 1700 kg de embalagens a menos. Em 2020, a usina de Três Marias gerou 42

toneladas de resíduos plásticos, a continuidade da iniciativa promoveria, nesse caso, a redução de 4% desses resíduos. Sendo o balde de permanganato composto por polipropileno e tomando como base os dados disponibilizados pela Braskem, que realizou o mapeamento da pegada de carbono deste componente (1,33 t CO<sub>2</sub>/ t polipropileno referente à extração, refino e beneficiamento da matéria-prima), o projeto impactaria numa mitigação de 2,26 t CO<sub>2</sub> para esse ano (BRASKEM, 2013).

Além dos impactos apresentados na Figura 12, a economia do insumo proporcionaria um ganho ergonômico para a operação: 42500 kg a serem carregados a menos. Atividades que exigem um esforço físico podem acarretar em distúrbios posturais devido à sobrecarga na coluna vertebral, como dores na região lombar, dorsal, nas pernas, inflamação nos tendões e entre outras complicações (RUMAQUELLA, 2009). Assim, o projeto também visa impactar positivamente a saúde do colaborador.

Investigou-se ainda se a causa da redução foi consequência apenas das propostas aplicadas, avaliando-se a carga de ferro entrante no processo e o consumo específico de permanganato de potássio (kgKMnO<sub>4</sub>/tonZn) no período em estudo, conforme Figura 13.

Figura 13 – Carga de ferro alimentada e consumo específico de permanganato no processo.

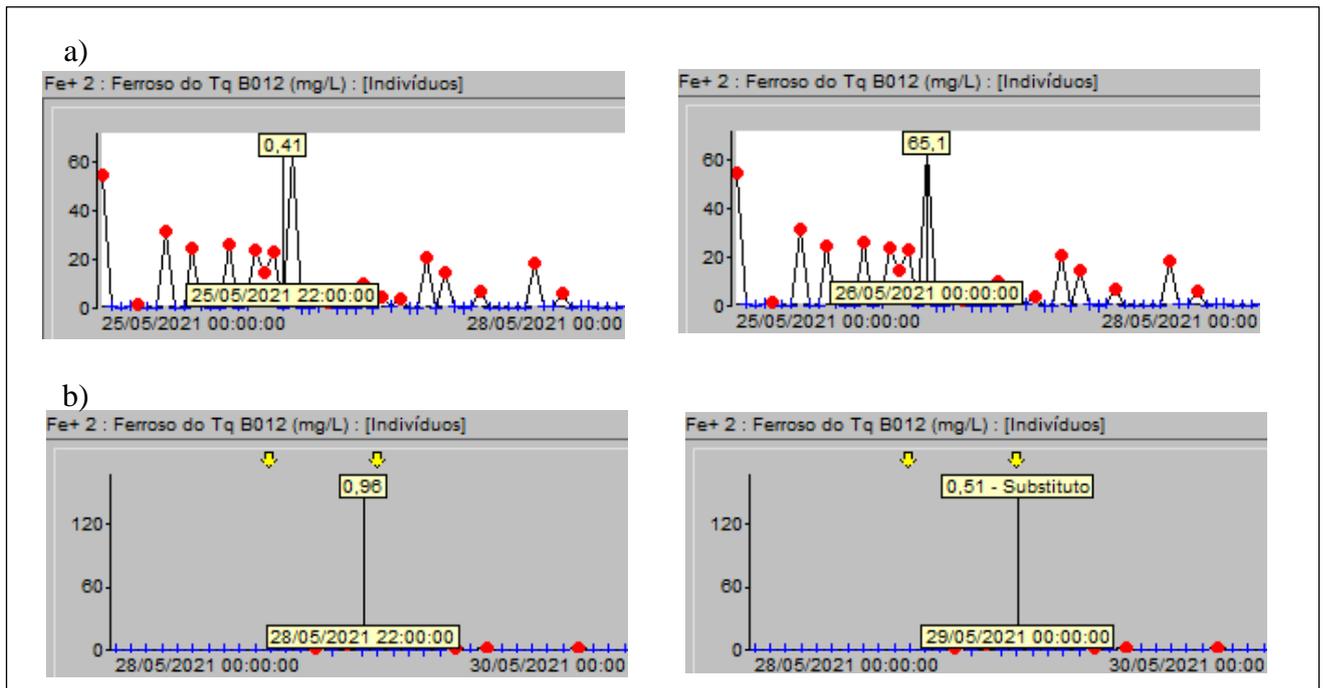


Fonte: Da autora (2021).

De acordo com o evidenciado na Figura 13, em 2020, nos meses de setembro e outubro, em que as cargas de ferro foram semelhantes às de março a junho de 2021, o consumo específico médio de permanganato ( $0,61 \pm 0,04$  kg KMnO<sub>4</sub>/ tonelada de cátodo) foi cerca de 35% acima do alcançado com a efetivação das propostas (valor-p de 0,027 ao nível de significância de 5%). Em razão do exposto, salienta-se que a redução do consumo de permanganato se deu pelas ações implantadas e não por uma condição favorável do processo.

A dosagem aquosa do permanganato, iniciada em maio, além de proporcionar a economia do material, assegurou uma estabilidade na concentração de  $\text{Fe}^{+2}$  no tanque de amostragem durante as trocas de turno. Tal consequência evita a passagem de uma condição de quantidade de íons ferroso descontrolada para o *over* da lixiviação neutra. Na Figura 14 são apresentados os gráficos dos valores de concentração de  $\text{Fe}^{+2}$  nos dias em que não ocorreu preparação da solução de permanganato (Figura 14.a) em conjunto com aqueles em que houve a preparação (Figura 14.b).

Figura 14 – Concentração de  $\text{Fe}^{+2}$  no tanque de amostragem.



Legenda: (a) dias em que não ocorreu preparação da solução de permanganato (b) dias em que houve a preparação.

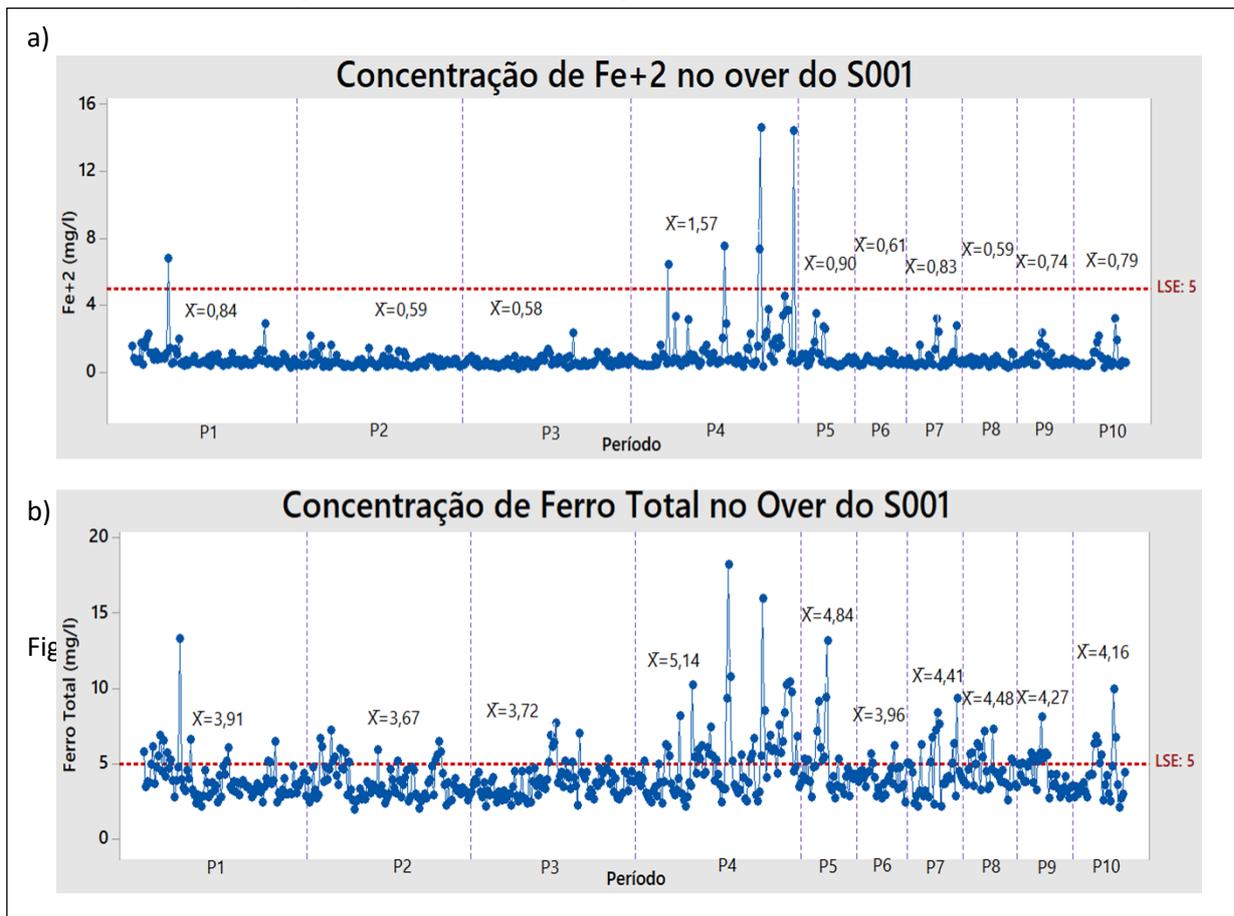
Fonte: Da autora (2021).

Como pode ser visto na Figura 14, as cartas de controle representadas em a) mostram como a ausência da dosagem aquosa e contínua de permanganato implica no aumento da concentração de  $\text{Fe}^{+2}$  no tanque de amostragem durante a passagem de turno: às 22 horas do dia 25 de maio a concentração era de 0,41 mg/L; na primeira análise do próximo turno o valor encontrado foi de 65,1 mg/L. Enquanto em b), com a dosagem contínua já estabelecida, a concentração se manteve abaixo do limite de especificação, 1 mg/L, durante a troca de turno. Salienta-se que apesar da dosagem aquosa ter iniciado em maio, ocorreu sua descontinuidade em alguns dias, como os retratados na Figura 14.a, devido à alta demanda de atividades operacionais naquele período que não permitiram a preparação do tanque. A escolha das cartas

teve como intuito evidenciar períodos com condições de processo próximas, isto é, na mesma semana.

A avaliação dos parâmetros de processo do *over* do espessador da lixiviação neutra é retratada na Figura 15.

Figura 15 – Parâmetros de processo da lixiviação neutra.



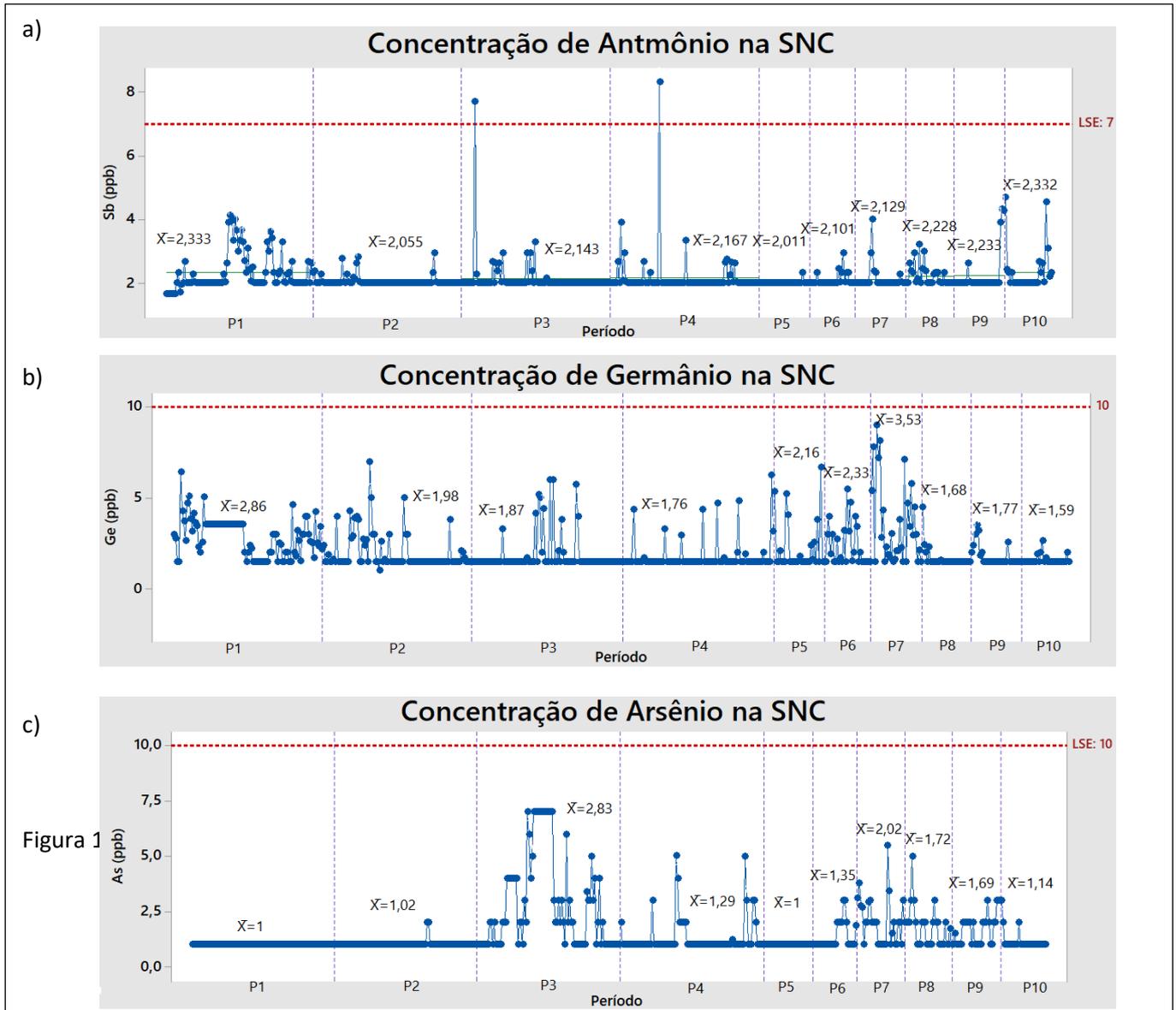
Legenda: Cartas de controle em que os períodos de P1 a P4 referem-se aos trimestres de 2020 e P5 a P10 aos meses de janeiro a junho de 2021.

Fonte: Da autora (2021).

Na Figura 15.a), evidencia-se que os períodos pós a implementação das ações, P7 a P10, trabalharam com a concentração média de Fe<sup>+2</sup>, representado por  $\bar{X}$ , abaixo do limite superior de especificação (LSE) de 5 mg/L e sem a presença de desvios. Em b), que apresenta a concentração do ferro total, isto é, o ferro sob todas as suas formas, a concentração média também foi majoritariamente inferior ao LSE. No entanto, apresenta alguns desvios, que podem ser vistos em outros períodos. Apesar disso, uma vez que há ausência de desvios relacionados à concentração de Fe<sup>+2</sup> no over do espessador, os pontos acima do LSE presentes no gráfico do ferro total não decorrem do Fe<sup>+2</sup>. Portanto, as iniciativas não comprometeram a qualidade da

etapa e, como consequência, foi alcançada a precipitação das impurezas de modo a evitar a contaminação da solução neutra concentrada, como pode ser visto na Figura 16.

Figura 16 – Concentração de impurezas na SNC.



Legenda: Cartas de controle em que os períodos de P1 a P4 referem-se aos trimestres de 2020 e P5 a P10 aos meses de janeiro a junho de 2021.

Fonte: Da autora (2021).

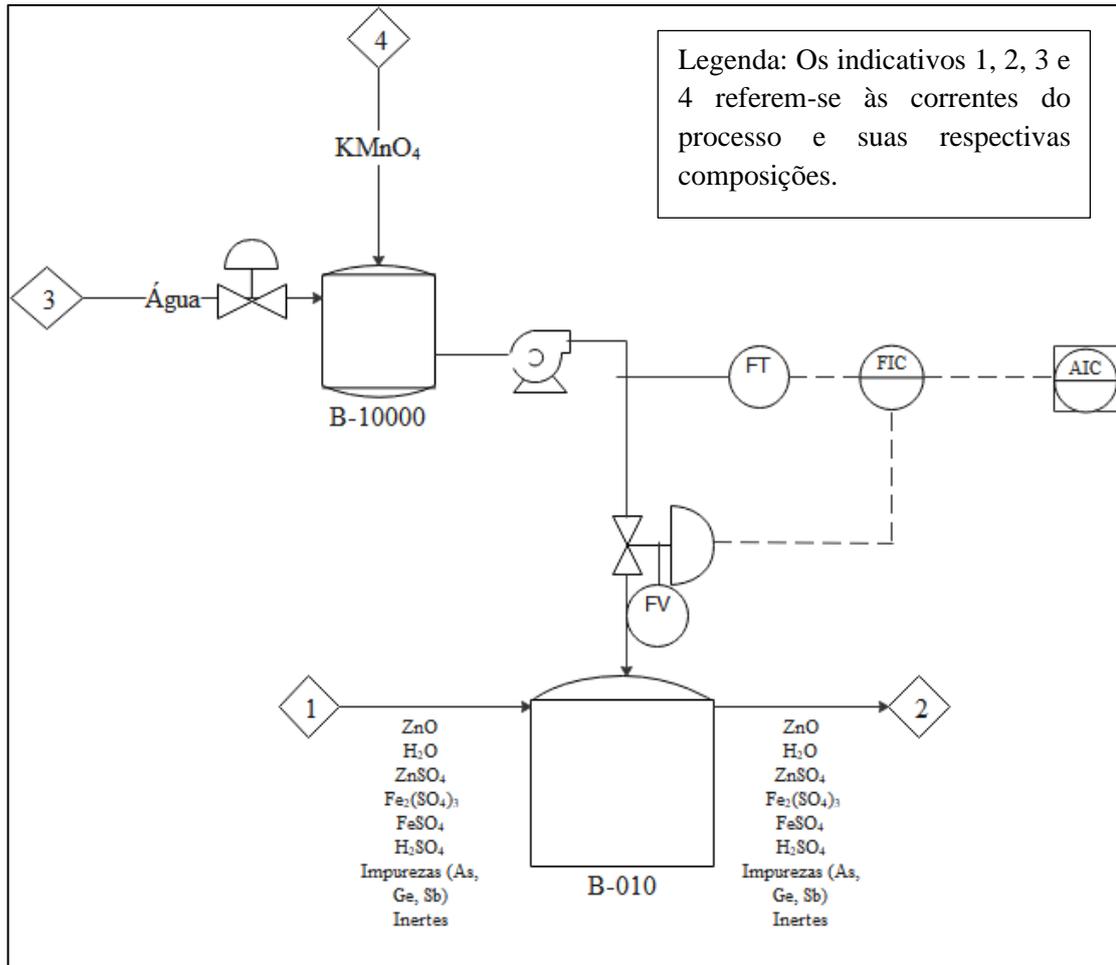
As cartas acima reforçam que a qualidade da solução neutra concentrada, SNC, não sofreu alteração com o projeto e, dessa maneira, não promoveu perdas na produção de catodo de zinco, visto que a presença das impurezas na eletrólise ocasiona buracos nos depósitos, que se alargam e os tornam inviáveis para utilização. Posto isso, o projeto adquire validação por promover a economia do insumo enquanto prevalece a qualidade do processo.

Sob essa ótica, a automação do sistema de dosagem aquosa constitui um aprimoramento das iniciativas. O sistema automático reduziria o tempo gasto para preparação do permanganato aquoso, visto que a aferição da vazão deixaria de ser realizada manualmente. Por facilitar a preparação, o projeto impediria a descontinuidade da dosagem – como o retratado na Figura 14.a – e, por conseguinte, tornaria o controle de  $\text{Fe}^{+2}$  mais eficiente. Além disso, evitaria uma diluição na planta, uma vez que não ocorreria dosagem em excesso. A diluição promove um aumento no volume a ser tratado e, como consequência, uma alta quantidade de água nas barragens, sendo esse o motivo da mitigação de fontes que contribuem com o acréscimo de água na planta.

## **5.2. Avaliação econômica do investimento proposto**

A partir das definições para automação do sistema de dosagem aquosa, foi construído o diagrama P&ID que representa a malha de controle proposta. A Figura 17 apresenta o referido diagrama.

Figura 17 – Diagrama P&ID proposto para automação da dosagem.



Fonte: Da autora (2021).

No P&ID acima, a retroalimentação da medida da variável controlada ( $C_{Fe}$ ) na malha principal é feita manualmente para o controlador (AIC). Por essa razão, a malha mestre proposta é uma malha com medidas *offline*, que possui um controlador PID sintonizado pelo método heurístico de tentativa e erro, isto é, uma sintonia com abordagem empírica fundamentada na experiência dos operadores para alcançar uma solução aproximada. A escolha de utilizar uma medição analítica se deu pela ausência de um medidor de concentração de  $Fe^{+2}$  no mercado, ou de um que relacionasse a concentração com outras variáveis do processo (por exemplo, potencial, pH e condutividade). Ademais, em razão da característica do material da lixiviação neutra, necessitar-se-ia de um sensor com mecanismo autolimpante e uma manutenção recorrente para que o sistema operasse com eficiência.

A variável de entrada da malha servo,  $F$ , é uma variável medida por meio de um medidor eletromagnético. Nessa malha, a válvula de controle tem o papel de atuador e sua abertura,  $x$ , corresponde à variável manipulada.

### 5.3. Avaliação econômica do investimento proposto

Mediante o P&ID apresentado na subseção anterior, foi orçado o custo para efetuação do sistema de controle proposto (investimento) conforme Tabela 5.

Tabela 5 – Orçamento para sistema de controle automático.

<b>Equipamento</b>	<b>Custo (R\$)</b>
Medidor de vazão eletromagnético com transmissor, sinal de saída 4-20 mA, Fabricante: Endress+Hauser	17.257,39
Bomba de diafragma, Fabricante: Omega	15.225,00
Válvula controladora, sinal de entrada de 4-20 mA, vazão máxima de 850 mL/min, Fabricante: Omega	6.095,00
Tubulações, cabos elétricos e parafusos * De acordo com outros serviços realizados na empresa (2021)	10.000,00
Serviços (elétrica e mecânica) * De acordo com outros serviços realizados na empresa (2021)	20.000,00
<b>Total</b>	<b>68.577,39</b>

Fonte: Da autora (2021).

Em posse do investimento, realizou-se o cálculo de viabilidade econômica conforme Tabela 6.

Tabela 6 – Avaliação de viabilidade econômica.

<b>Indicador</b>	<b>Valor</b>
Retorno (R\$ ao mês)	63.720,00
Capex/Investimento (R\$)	68.577,39
<i>Payback</i> Descontado (meses)	1,18

Fonte: Da autora (2021).

O retorno financeiro correspondeu à economia adquirida com o sistema de dosagem aquosa (diferença entre o consumo de abril e maio de 2021, equivalente a R\$63.720,00 por mês), e a TMA adotada foi de 10% ao ano.

Conforme resultado do indicador de análise de viabilidade econômica definido, *payback* descontado de 1,18 meses, pode-se afirmar que a automação da dosagem de permanganato é economicamente viável, visto que o investimento é único e se paga em um prazo curto, menor que o período de análise (4 meses). Assim, valida-se a iniciativa de elaborar um sistema de controle da dosagem a partir do P&ID sugerido.

## 6. CONCLUSÃO

O alto custo do permanganato de potássio levou à construção desse trabalho, conduzido de maneira a reduzir o gasto com o insumo sem interferir no desempenho do processo. A primeira ação, padronização do processo em batelada habitual, partiu da observação analítica das etapas e alcançou uma redução de 41% do consumo de permanganato, tendo como referência o consumo de 2020; enquanto a segunda (dosagem aquosa e contínua do insumo), originada de um *brainstorming*, permitiu uma economia adicional de 33%. Por meio da avaliação dos parâmetros de controle do processo – concentração do íon  $\text{Fe}^{+2}$ , do antimônio, germânio e arsênio – infere-se que a redução do insumo não interferiu de forma negativa no desempenho do processo.

A implementação das ações permite uma economia de 926 mil reais para esse ano e um descarte de embalagens plásticas amenizado em 1700 unidades.

Em virtude das exposições, foi elaborado o diagrama de tubulação e instrumentação de uma malha de controle que representasse o sistema automático de dosagem aquosa. Esse projeto reduziria o tempo gasto para aferição da vazão, a qual deixaria de ser realizada manualmente, e evitaria possíveis diluições das correntes de lixiviação que levam ao acúmulo de água nas barragens. Para o sistema automático proposto, foi realizada a análise de viabilidade econômica e encontrado um *payback* de 1,18 meses, sendo considerado economicamente viável. Depreende-se, portanto, que as ações tomadas obtiveram resultados eficientes, que promovem ganhos financeiros e ambientais, o que reforça a importância de uma gestão apropriada de insumos.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE MINERAÇÃO – ANM. Anuário Mineral Brasileiro. Principais Substâncias Metálicas, 2020. Disponível em: < [Dados Abertos — Português \(Brasil\) \(www.gov.br\)](http://dados.gov.br) >. Acessado em 5 de jul. de 2021.

ALVES, J. L. L. **Instrumentação, controle e automação de processos**. 2017. ed. 2. ISBN 978-85-216-1762-4 (e-book).

ANTUNES, J.; ALVAREZ, R.; BORTOLOTTI, P.; KLIPPEL, M., PELEGRIN. I. **Sistemas de Produção: Conceitos e práticas para projeto e gestão de produção enxuta**. Bookman. p. 195-1972, Porto Alegre, 2008.

AROUCA, F. O. **Uma contribuição ao estudo da sedimentação gravitacional em batelada**. 2007. Tese de doutorado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

AYDEMIR, G.; ACAR, B. 2020. O monitoramento de anomalias melhora a vida útil restante estimativa de maquinaria industrial. **Journal of Manufacturing Systems**. v. 56, p. 463-469. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmsy.2020.06.014> >. Acessado em: 20 de ago. de 2021.

BALARINI, J, C, **Estudo cinético do ustulado de zinco da Votorantim Metais: mecanismo não catalítico associado à caracterização e à determinação de tempos de residência**. 2009. Tese de Doutorado (Pós-Graduação em Engenharia Química), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

BRASKEM. Pegada de Carbono, Abril de 2013. Disponível em: < Apresentação do PowerPoint ([braskem.com.br](http://braskem.com.br)) >. Acessado em: 8 de set. de 2021.

CAMARGOS, M.A. D. **Matemática financeira - Aplicada a produtos financeiros e à análise de investimentos**. Disponível em: Minha Biblioteca, Editora Saraiva, p. 329-370, 2013.

COSTA, D. S. **Análise de viabilidade de projeto de implantação de um sistema de resfriamento forçado em uma usina siderúrgica**. 2016. Monografia (Curso de Especialização em Otimização de Sistema de Departamento de Ciência da Computação). Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DAS INDÚSTRIAS. Mercado de insumos e matérias primas. Disponível em: < Estatísticas - CNI - Portal da Indústria ([portaldaindustria.com.br](http://portaldaindustria.com.br)) >. Acessado em 5 de jul. de 2021.

CRUZ, J. B. F.; SOARES, F. H. Uma revisão sobre o zinco. **Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde**. v.15, n. 1. p. 207-222, 2011.

CUNHA, B. S.; GASPAROVIC, C. L. M.; FOUTO, G.; SOLANA, I.; MEES, J. B. R. **Proposta de produção mais limpa no setor de lavanderia de uma indústria têxtil**. 2015. Trabalho apresentado no Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Rio de Janeiro.

DAGOSTIN, J.S. **Análise de viabilidade econômica e financeira de novo produto: um estudo de caso em uma empresa do setor químico localizada no município de Criciúma – SC.** Trabalho de Conclusão de Curso (Curso Bacharel em Ciências Contábeis). Universidade do Extremo Sul Catarinense, Criciúma.

FEIJÓ, F. D. **Redução das perdas de zinco associadas aos processos de purificação de licor por cementação e de tratamento dos resíduos gerados da Votorantim Metais.** 2007. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Metalúrgica), Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte. -

FRANCHI, C.M. **Controle de processos industriais – Princípios e Aplicações.** 2015. ed. 1. p. 18-62. ISBN 978-85-365-1828-2 (ebook).

GOMES, J. M. **Elaboração e análise de viabilidade econômica de projetos: tópicos práticos de finanças para gestores não financeiros.** 2013. ISBN 978-85-224-7962-7 (e-book).

JOAQUIM, C. V.; MOSSIN, E.A.; TURCATO, R. PANTONI. R. P. Instrumentação do separador sólido-líquido para remoção de particulados à indústria sucroalcooleira. 2017. **Revista Brasileira de Energias Renováveis.** v.6, n.1, p.67-73.

LUZ, A.B.; SAMPAIO, J. A.; ALMEIDA, S.L. **Tratamento de minérios.** 2010. 5. ed. Rio de Janeiro, RJ: CETEM, 2010. 932 p. ISBN 9788561121624 (ebook).

MASSARANI, G.; FRANÇA, S.C. Separação sólido-líquido. In: FREIRE, J.J; SILVEIRA, A. N. **Tratamento de minérios.** 2004. Comunicação Técnica – CETEM. Rio de Janeiro.

MAZZO, R. C.; GREMES, M. F.; ANDRADE, C. M.; DEMIT, F. T.; KOEPSE, R. N. BERLATTI, V. 2019. **Desenvolvimento de software para a implementação meta-heurística de controle PID e investigação do seu desempenho versus métodos clássicos.** Artigo apresentado no XI Encontro Internacional de Produção Científica. Universidade Estadual do Maringá, Paraná.

MELO, R. T.; FERNANDES, M. S. Redução de custos em processos industriais: aplicação da instrumentação e automação. 2020. **Revista Multidisciplinar.** Faculdade do Nordeste de Minas – FINOM. v. 22. n. ISSN 1809-1628.

MORAES, V. T. **Recuperação de metais a partir do processamento mecânico e hidrometalúrgico de placas de circuito impressos de celulares obsoletos.** 2011. Tese de Doutorado (Engenharia Metalúrgica e de Materiais), Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

MORAIS, C.A.; ALBUQUERQUE, R. O.; LADEIRA, A. C. Q. Processos Físicos e Químicos Utilizados na Indústria Mineral. **Cadernos Temáticos de Química Nova na Escola.** n.8, p. 9-17, 2014.

NETO, A. F. S.; GOMES, F. J. **Controladores PID: Introduzindo inteligência computacional no controle industrial.** 2010. Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia. Fortaleza.

NEXA. Relatório Anual de 2020. Disponível em: < <https://www.nexareport.com/2020/> >. Acessado em: 3 de jul. de 2021.

- PINTO, J. E. M. G. **Aplicação prática do método de sintonia de controladores PID utilizando o método do relé com histerese**. 2014. Dissertação de Mestrado (Pós-Graduação em Engenharia Elétrica e de Computação). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.
- REIS, M. R. C. **Análise comparativa de métodos de otimização aplicados à sintonia do controlador PI**. 2014. Dissertação de Mestrado (Mestrado em Engenharia Elétrica e de Computação). Universidade Federal de Goiás, Goiânia.
- RUMAQUELLA, M. R. **Postura de trabalho relacionada com as dores na coluna vertebral em trabalhadores de uma indústria de alimentos: estudo de caso**. 2009. Dissertação (Curso de Pós-Graduação em Design). Universidade Estadual Paulista. Bauru.
- SANTOS, F. G.; ZANGIACOMO, M. C. **Redução do desperdício nas operações em uma linha de produção de uma indústria automotiva**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecânica), Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa.
- SEBORG, D. E.; EDGAR, T. F.; MELLICHAMP, D. A.; DOYLE, F. J. **Process Dynamics and Control**. 2010. ed. 3. ISBN 978-0-470-12867-1 (e-book).
- SILVA, S. M. **Detecção de zinco em fertilizantes de estruvita por voltametria de redissolução anódica de onda quadrada utilizando um eletrodo de ouro descartável**. 2020. Trabalho de Conclusão de Curso (Química Industrial), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- SILVA, M. A. P.; BRANQUINGO, L. R. **Implementação de estratégia de controle em cascata e tratamento dos distúrbios do processo da malha de controle da alimentação da moagem semi-autógena (SAG)**. 2019. Trabalho de Conclusão de Curso (Engenharia Mecatrônica). Faculdade do Nordeste de Minas – FINOM.
- SOUZA, A.D. **Processo de integração dos tratamentos de concentrados ou minérios de zinco e ustulados de zinco sulfetado**. 2001. Patente PI 0106186-0.
- SOUZA, A.D. **Processo integrado: biolixiviação e lixiviação química na indústria do zinco**. 2005. Dissertação de Mestrado (Engenharia de Minas e Metalurgia), Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- SOUZA, M. C. L. H.; COSTA, C. A.; RAMOS, G. O. A feature identification method to explain anomalies in condition monitoring. 2021. **Computers in Industry**. v. 133. Disponível em: < <https://doi.org/10.1016/j.compind.2021.103528> >. Acessado em: 20 de ago. de 2021.
- SUAVE, S. **Modernização do sistema de geração de energia térmica para o secador de leite vibro-fluidizado**. 2017. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Universidade de Uberaba, Uberaba.
- SULLIVAN, William G.; WICKS, Elin M.; KOELLING, C. Patrick. **Engineering economy**. Pearson, 2015.
- TORGA, D. **Método de sintonia ótimo PID em sistema cascata aplicação em controle de densidade de um processo simulado de remoagem**. 2018. Dissertação de Mestrado (Mestrado Profissional em Instrumentação, Controle e Automação de Processos de Mineração), Universidade Federal de Ouro Preto.