



UFOP

UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

ESCOLA DE MINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



GEISYANE BATISTA GONÇALVES

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA CORRENTE DO ÊMBOLO COMO
INDICADOR DE DESEMPENHO NOS FORNOS DE COQUERIA**

**OURO PRETO - MG
2025**

GEISYANE BATISTA GONÇALVES

**ANÁLISE DA VARIAÇÃO DA CORRENTE DO ÉMBOLO COMO
INDICADOR DE DESEMPENHO NOS FORNOS DE COQUERIA**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito para a obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

Professora orientadora: DSc. Elisangela Martins Leal

**OURO PRETO – MG
2025**

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

G635a Goncalves, Geisyane Batista.

Análise da variação da corrente do êmbolo como indicador de desempenho nos fornos de coqueria. [manuscrito] / Geisyane Batista Goncalves. - 2025.

54 f.: il.: color., tab..

Orientadora: Profa. Dra. Elisangela Martins Leal.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Mecânica .

1. Fornos - Coque. 2. Cilindros. 3. Dispositivos eletromecânicos. I. Leal, Elisangela Martins. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 621

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



FOLHA DE APROVAÇÃO

Geisyane Batista Gonçalves

Análise da Variação da Corrente do Êmbolo como Indicador de Desempenho nos Fornos de Coqueria

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

Aprovada em 11 de dezembro de 2025

Membros da banca

Profª Drª Elisângela Martins Leal - Orientadora - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. Dr. Washington Luís Vieira da Silva - Universidade Federal de Ouro Preto
Prof. M.Sc. Savio Sade Tayer - Universidade Federal de Ouro Preto

Elisângela Martins Leal, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 18/12/2025



Documento assinado eletronicamente por **Elisangela Martins Leal, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 23/12/2025, às 11:58, 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 **1036499** e o código CRC **A03D5F90**.

Dedico essa monografia primeiramente a Deus por essa conquista.

A minha família e amigos pelo apoio incondicional.

Por fim, a minha orientadora pela confiança e apoio em sua elaboração.

AGRADECIMENTO

Em primeiro lugar, agradeço a Deus, pela vida, pela graça da sabedoria e pela força constante que me sustentou em cada desafio desta jornada.

À minha família, pelo amor incondicional, pela paciência infinita e pelo apoio inabalável em todos os momentos; esta conquista é tão vossa quanto minha, fruto de cada sacrifício e incentivo que me deram.

À Prof^a. Dr^a. Elisangela Leal, minha orientadora, pela orientação precisa, pela disponibilidade e pelo rigor acadêmico que foram decisivos para a concretização deste trabalho.

Aos professores do curso de Engenharia Mecânica, pela transmissão do conhecimento, pelos desafios intelectuais e por inspirarem a busca pela excelência técnica e ética.

Aos meus amigos, em especial aos colegas de graduação, pela cumplicidade, pelo auxílio mútuo nas horas mais densas e pela alegria compartilhada, que tornou esta caminhada mais leve e significativa.

“A técnica não é nem boa, nem má, nem neutra. Essa neutralidade é uma ilusão perigosa. Toda tecnologia é uma força social ativa, que privilegia certos tipos de ação, certas estruturas de poder, certas visões de mundo, em detrimento de outras. A pergunta crucial não é ‘o que a técnica faz?’, mas ‘que tipo de mundo ela ajuda a criar?’.”

Melvin Kranzberg

RESUMO

Este trabalho realiza uma análise técnica da corrente elétrica do êmbolo da máquina desenfornadora como parâmetro para avaliar o desempenho dos fornos de coqueria. Partindo da problemática de como utilizar essa variação para monitorar a eficiência operacional, o estudo justifica-se pela necessidade de indicadores confiáveis para garantir a produtividade, segurança e continuidade do processo de coqueificação, etapa fundamental na cadeia siderúrgica. O objetivo geral consiste em analisar a correlação entre a variação da corrente do êmbolo e o desempenho do forno, com metas específicas que incluem revisão conceitual, definição metodológica e avaliação de dados operacionais. A metodologia adota uma abordagem qualitativa e explicativa, fundamentada em análise documental e de dados operacionais, coletados por meio de *software* industrial que monitora a corrente durante o ciclo de desenfornamento. A investigação analisa fornos que apresentam corrente superior a 250 A, examinando em detalhe o comportamento de quatro unidades com histórico de instabilidade. Os resultados principais de reparos refratários, qualidade do coque e sistema de aquecimento demonstram uma correlação direta entre picos de corrente e anomalias como danos ao refratório, obstruções no fluxo de gases, formação excessiva de carbono e desgaste mecânico do êmbolo. A análise técnica dos dados comprova que a monitoração contínua da corrente permite diagnosticar anomalias, orientar intervenções de manutenção e implementar protocolos de controle de carga, funcionando como uma ferramenta eficaz para a gestão proativa. Conclui-se que a corrente do êmbolo constitui um indicador sensível, válido e operacionalmente útil para a avaliação do desempenho dos fornos de coqueria, possibilitando uma base sólida para a gestão proativa, a redução de paradas não programadas e o aumento da confiabilidade e eficiência global do processo.

Palavras-chave: Fornos de coqueria. Desempenho. Êmbolo. Corrente. Análise técnica.

ABSTRACT

This work performs a technical analysis of the piston current in the coke oven discharge machine as a parameter to evaluate the performance of coke ovens. Starting from the problem of how to use this variation to monitor the operational efficiency, the study is justified by the need for reliable indicators to guarantee the productivity, safety, and continuity of the coking process, a fundamental step in the steelmaking chain. The general objective is to analyze the correlation between piston current variation and oven performance, with specific goals that included conceptual review, methodological definition, and evaluation of operational data. The methodology adopts a qualitative and explanatory approach, based on documentary analysis and operational data collected through industrial software that monitors current during the discharge cycle. The investigation analyzes ovens that shows currents greater than 250 A, examining in detail the behavior of four units with a history of instability. The main results regarding refractory repairs, coke quality, and the heating system demonstrate a direct correlation between current peaks and anomalies such as refractory damage, gas flow obstructions, excessive carbon formation, and mechanical wear of the piston. Technical data analysis proved that continuous current monitoring allows for the diagnosis of anomalies, guides maintenance interventions, and implements load control protocols, functioning as an effective tool for proactive management. It is concluded that piston current constitutes a sensitive, valid, and operationally useful indicator for evaluating the performance of coke ovens, providing a solid basis for proactive management, reducing unscheduled downtime, and increasing the overall reliability and efficiency of the process.

Keywords: Coke ovens. Performance. Piston. Chain. Technical analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Émbolo	2
Figura 2: Processo de enfornamento e desenfornamento do coque na Coqueria	3
Figura 3: Modelo de Forno da Coqueria	6
Figura 4: Representação esquemática do percurso do êmbolo.....	17
Figura 5: Fluxograma das principais etapas do trabalho	23
Figura 6: Software de medição de corrente	24
Figura 7: Amostragem forno 276	29
Figura 8: Amostragem forno 285	30
Figura 9: Amostragem forno 289	31
Figura 10: Amostragem forno 292	33

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Variáveis e indicadores.....	26
--	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Formulação do Problema.....	1
1.2 Justificativa.....	4
1.3 Objetivos.....	5
1.3.1 Geral	5
1.3.2. Específicos.....	5
1.4. Estrutura do Trabalho	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. Fornos de Coqueria.....	6
2.2. Desempenho	9
2.3. Êmbolo	12
2.4. Corrente	14
2.5. Análise Técnica	16
3. METODOLOGIA	20
3.1. Tipo de Pesquisa.....	20
3.2. Materiais e Métodos	23
3.3. Variáveis e Indicadores	25
3.4. Instrumento de coleta de dados	26
3.5. Tabulação dos dados.....	27
3.6. Considerações finais	27
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
4.1. Análise dos fornos com corrente alta	28
4.2. Análise do forno 276	29
4.3. Análise do forno 285	30
4.4. Análise do forno 289	31

4.5. Análise do forno 292	33
4.6. Considerações finais do capítulo	34
5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	36
5.1. Conclusão	36
5.2. Recomendações	37
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	38

1. INTRODUÇÃO

Este capítulo trata da formulação do problema, juntamente com os objetivos, a justificativa e a estrutura do trabalho.

1.1 Formulação do Problema

O aço é um material bastante utilizado em diversas áreas das indústrias e na sociedade e a sua produção acontece nas siderúrgicas a partir do óxido de ferro misturado com alguns componentes, entre eles, o coque, que é um agente redutor proveniente do carvão mineral e vegetal e produzido nas coquerias através dos fornos de coqueria (ROCHA, 1993).

Os fornos de coqueria são os responsáveis por fazer a transformação de misturas de carvões minerais no processo de coqueificação, consiste no aquecimento progressivo em condições controladas e ausência de ar, até temperaturas da ordem de 1100°C, de uma mistura de carvões, dando origem a produtos voláteis (gases, vapores condensáveis, água, benzeno e alcatrão) e a um resíduo sólido, poroso e resistente, rico em carbono, denominado coque (FERNANDES, 2019).

Esses fornos realizam uma grande escala em produção intermitente e os materiais refratários usados são principalmente os tijolos de sílica, suas paredes fornecem o calor necessário para o processo de coqueificação por condução para obter um alto desempenho (ROCHA, 1993).

O processo de coqueificação consiste na transformação das misturas de carvões em coque, entre 15 a 24 horas, dependendo da temperatura média da parede e largura do forno (FERNANDES, 2019). A parte estrutural dos fornos é um dos responsáveis para que o desempenho do processo seja o ideal e suas paredes são as mais afetadas, pois elas têm como principal função suportar a massa de tijolos que formam no topo da bateria e a alta temperatura sem levar a trincas (DAS *et al.*, 2013).

Outros parâmetros a levar em consideração em seu desempenho ideal nesse processo são a formação de carbono nas paredes, alto consumo de energia e problemas em equipamentos como o êmbolo da máquina desenfornadora (OLIVEIRA, 2008).

Após concluída a coqueificação do carvão, inicia-se o desenfornamento, a remoção do coque de dentro do forno é realizada pela máquina desenfornadora, que através de um sistema eletromecânico, composto principalmente por um êmbolo, a massa de coque é empurrada para

o outro lado. Por meio de um carro guia, todo o coque produzido é despejado no carro de transporte denominado vagão de extinção (OLIVEIRA, 2021).

A Figura 1 mostra a foto do equipamento da pesquisa com os principais elementos.

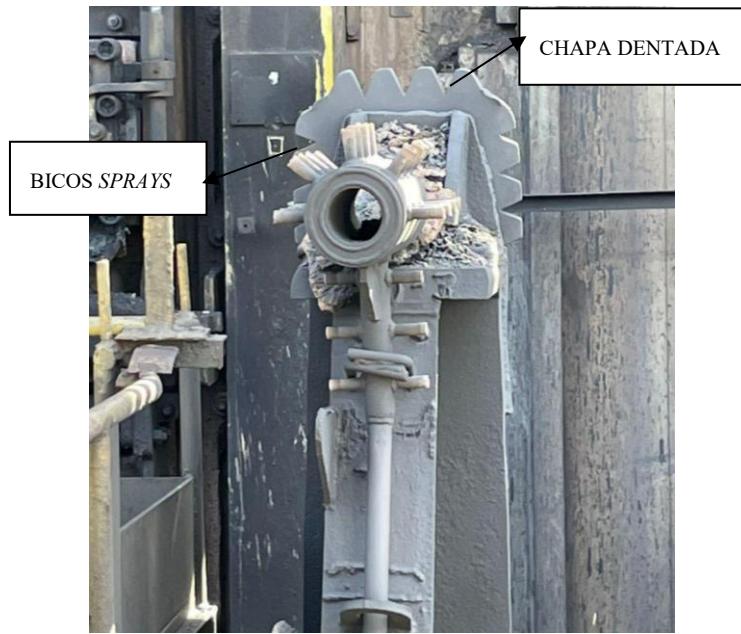


Figura 1: Êmbolo
Fonte: Pesquisa direta (2025)

A figura 1 apresenta o êmbolo equipado com 10 bicos *sprays*, os quais são distribuídos em diferentes ângulos e usados para soprar e queimar o carbono na zona livre do forno, e uma chapa dentada na cabeça para ajudar na remoção de carbono; suportado por uma sapata deslizante. Utiliza-se uma carga para retirar o coque do forno e a partir do deslocamento de sua posição inicial o êmbolo começa a medir a corrente do forno para analisar o seu comportamento e sua eficiência.

A figura 2 apresenta o esquema de enfornamento e desenfornamento do coque.

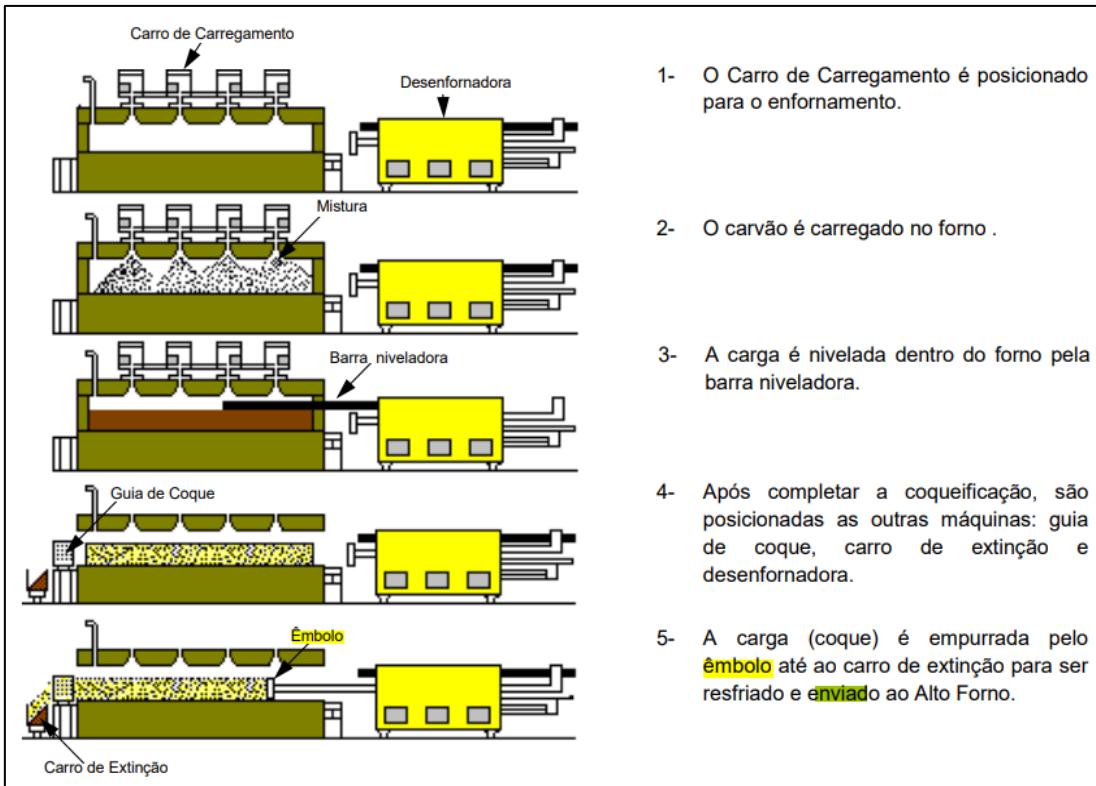


Figura 2: Processo de enfornamento e desenfornamento do coque na Coqueria

Fonte: Costa (2008)

Observa-se que na figura 2 o êmbolo empurra a carga até a Guia de Coque medindo a corrente do forno e caso essa corrente ultrapasse 250 amperes, deve-se analisar as principais variáveis que afetam esse indicador, como trincas nas paredes que podem causar vazamentos de gás ocasionando em uma má coqueificação; empenamento da sapata/chapa; mal posicionamento da máquina ou do próprio êmbolo em relação ao forno; e/ou alta concentração de carbono nas paredes obstruindo a passagem, ocasionando em uma maior necessidade de carga e energia para a movimentação do coque no decorrer do forno aumentando consequentemente a sua corrente elétrica.

Portanto, sua análise técnica consiste na exame do histórico dos indicadores e avaliação visual do forno em questão, após essa etapa é definido um plano de ação para solucionar e eliminar a variável, voltando o funcionamento do forno em perfeito estado, trazendo maior segurança, qualidade e rendimento ao processo de coqueificação (CARVALHO, 2020).

Logo, de acordo com o contexto, tem-se a seguinte problemática:

Como analisar o desempenho do forno de coqueria por meio da variação da corrente do êmbolo?

1.2 Justificativa

A análise da variação da corrente do êmbolo constitui um indicador operacional de alta relevância para os fornos de coqueria, uma vez que se encontra diretamente vinculada à eficiência e à confiabilidade do processo, e, dada a fundamental importância desses fornos para a produção de coque, insumo essencial na fabricação de aço, o estudo desse parâmetro permite um entendimento mais aprofundado do comportamento do equipamento, o que, por sua vez, viabiliza a realização de ajustes operacionais precisos e a implementação de uma estratégia de manutenção preditiva eficaz, com o objetivo central de evitar falhas inesperadas e garantir a continuidade da produção (DELMONT, 2003).

Além disso, a variação da corrente elétrica do êmbolo pode servir como um método eficaz de diagnóstico preditivo, uma vez que, ao identificar padrões de alteração na corrente, possibilita detectar problemas como desgaste excessivo, obstruções e falhas mecânicas antes que estes causem prejuízos à produção, o que reforça a suma importância da manutenção desses equipamentos para a operacionalidade do processo, visando especificamente a redução do tempo de paralisação e o aumento da economia por meio do monitoramento da produção através de recursos integrados em um sistema de informação que coleta dados de todo o processo produtivo, a fim de identificar possíveis falhas de maneira antecipada (SANTOS NETO, 2018). Essa abordagem permite reduzir custos com manutenção corretiva e aumentar a vida útil dos equipamentos, tornando a operação mais eficiente.

A otimização da eficiência energética configura-se como outro aspecto relevante do monitoramento da corrente do êmbolo, uma vez que o aumento do desempenho energético desses equipamentos impacta significativamente os custos operacionais, possibilitando não apenas o incremento da lucratividade e da sustentabilidade do processo, mas também a oferta de produtos com maior competitividade no mercado, considerando ainda que o consumo energético nos fornos de coqueria é expressivo e que a análise desse parâmetro permite identificar desperdícios e implementar estratégias para redução de custos operacionais e minimização de impactos ambientais, contribuindo para uma produção mais sustentável (SILVA COTTA, 2022).

A aplicação de técnicas avançadas de monitoramento também é um benefício desse estudo. A análise da corrente elétrica pode ser integrada a sistemas de automação e inteligência artificial, aprimorando o controle dos fornos e tornando os processos industriais mais confiáveis e eficientes (SILVA COTTA, 2022).

1.3 Objetivos

1.3.1 Geral

Analisar a variação da corrente do êmbolo como indicador de desempenho dos fornos de Coqueria.

1.3.2. Específicos

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre fornos de coqueria, desempenho, êmbolo, corrente e análise técnica;
- Definir metodologia, tipo de pesquisa, as variáveis e os indicadores;
- Avaliar o desempenho do forno de coqueria e discutir os resultados da análise realizada;
- Concluir e recomendar trabalhos futuros.

1.4. Estrutura do Trabalho

O trabalho está dividido em cinco capítulos, sendo que no primeiro capítulo é apresentado a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e seus objetivos geral e específicos. O segundo capítulo consiste em uma revisão bibliográfica, a qual define os principais conceitos abordados e explicita informações relevantes para a sequência do trabalho. No capítulo 3 é abordada a metodologia utilizada, descrevendo os equipamentos e componentes empregados na montagem da bancada experimental. O quarto capítulo contém os resultados experimentais que são apresentados em gráficos e há uma discussão acerca dos valores obtidos. O capítulo 5 é reservado para a conclusão do trabalho realizado, descrevendo o cumprimento dos objetivos e discorrendo sobre possíveis trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo trata da revisão bibliográfica acerca do tema do trabalho, delineando sobre os fornos de coqueria, o desempenho do equipamento analisado, o êmbolo e o papel da corrente utilizada.

2.1. Fornos de Coqueria

Os fornos de coqueria são unidades industriais fundamentais para a produção de coque metalúrgico, um material carbonáceo obtido a partir da destilação seca do carvão mineral. O coque é um insumo essencial na fabricação de ferro-gusa em altos-fornos, atuando como combustível, agente redutor e suporte estrutural para a carga metálica (BRUSSELS, 2022).

A coqueria é uma etapa crítica na cadeia produtiva do aço, influenciando diretamente a eficiência energética, a qualidade do produto final e o impacto ambiental da siderurgia (GHOSH e CHATTERJEE, 2008).

A figura 3 apresenta o modelo de fornos da Coqueria.



Figura 3: Modelo de Forno da Coqueria

Fonte: Reis (2023)

Observa-se na figura 3 que os fornos são compactos e de grande estrutura para obter resistência no processo de coqueificação, que consiste na transformação termoquímica do carvão mineral em coque metalúrgico através da pirólise do material em condições controladas. Segundo Ghosh e Chatterjee (2008), este processo ocorre em fornos especiais sob atmosfera

redutora, com temperaturas que podem atingir até 1200 °C, sendo fundamental para a produção de ferro-gusa na indústria siderúrgica.

A coqueificação ocorre em quatro estágios sequenciais bem definidos, a saber, a secagem e o pré-aquecimento, a plastificação, a polimerização e resolidificação, e a contração e endurecimento (COSTA, 2008). Conforme explica Costa (2008), a seguir detalha-se cada uma dessas etapas:

- **Estágio de Secagem e Pré-aquecimento (até 350°C):** ocorre a remoção da umidade residual do carvão e a liberação dos primeiros compostos voláteis. Silva (2013) destaca que este estágio é crucial para preparar o material para as transformações subsequentes, eliminando água livre e parte dos componentes mais leves;
- **Plastificação (350-500°C):** o carvão adquire propriedades plásticas devido à fusão de seus componentes macromoleculares. Conforme estudos da *World Steel Association* (2022), esta plasticidade é essencial para a formação da estrutura coesa do futuro coque, permitindo a aglomeração das partículas carbonáceas;
- **Polimerização e Resolidificação (500-800°C):** nesta fase crítica, ocorre a reorganização molecular com formação de estruturas aromáticas mais estáveis. Ghosh e Chatterjee (2008) explicam que a perda gradual de plasticidade e o início da solidificação são determinantes para as propriedades mecânicas finais do coque;
- **Contração e Endurecimento (800-1200°C):** a etapa final caracteriza-se pela contração volumétrica e desenvolvimento da estrutura porosa típica do coque metalúrgico. A Agência Internacional de Energia (IEA, 2020) ressalta que o controle preciso da temperatura neste estágio é fundamental para garantir a qualidade do produto final.

O processo gera diversos subprodutos valiosos (SILVA, 2013):

- a. *Gás de Coqueria*: composto principalmente por hidrogênio e metano. É utilizado como combustível nas próprias instalações industriais;
- b. *Alcatrão*: Matéria-prima para produção de betume, naftaleno e outros compostos aromáticos;
- c. *Benzol e Amônia*: Aplicados na indústria química e de fertilizante.

A qualidade final do coque é influenciada por diversos parâmetros (BRUSSELS, 2022):

- *Características do Carvão*: Teor de voláteis, umidade e cinzas são determinantes;
- *Condições de Processo*: Temperatura, tempo de residência e taxa de aquecimento devem ser rigorosamente controlados;

- *Tecnologia do Forno:* O tipo de forno e seu sistema de aquecimento impactam diretamente no rendimento.

Os fornos de coqueificação podem ser classificados em dois tipos principais, cada um com características operacionais e impactos ambientais distintos, sendo que os fornos de recuperação de subprodutos, amplamente utilizados na indústria moderna, operam com câmaras herméticas de tijolos refratários que suportam altas temperaturas, permitindo não apenas a produção de coque, mas também a recuperação de valiosos subprodutos como gás de coque, alcatrão e compostos (GHOSH e CHATTERJEE, 2008). Este sistema apresenta vantagens significativas em termos de eficiência energética e redução de impactos ambientais, pois os gases gerados são tratados e reaproveitados, minimizando emissões atmosféricas (U.S. EPA, 2019).

Em contraste, os fornos não recuperativos, hoje considerados obsoletos, operam com combustão direta dos voláteis em câmaras semifechadas, resultando em baixa eficiência energética e elevada poluição ambiental, razão pela qual foram praticamente eliminados da indústria siderúrgica moderna (SILVA, 2013).

As baterias de coqueificação consistem em múltiplas câmaras retangulares que operam em ciclo intermitente, com dimensões típicas variando entre 15 a 20 metros de comprimento, 0,4 a 0,6 metros de largura e 4 a 7 metros de altura (BRUSSELS, 2022).

O processo de produção de coque inicia-se com o carregamento mecanizado do carvão britado, seguido por um período de coqueificação que dura entre 18 e 24 horas sob temperaturas rigidamente controladas, para então proceder à descarga do coque incandescente mediante equipamentos especializados, cujo resfriamento é tradicionalmente efetuado por aspersão de água ou, em sistemas mais modernos, através de resfriamento a seco que apresenta vantagens ambientais significativas (IEA, 2020).

Todo o sistema conta com mecanismos de vedação hermética e tratamento dos gases produzidos, que são condensados e purificados para aproveitamento dos subprodutos, demonstrando a complexidade e integração deste processo industrial (IEA, 2020).

O processo de coqueificação gera diversos impactos ambientais que demandam atenção especial, incluindo emissões atmosféricas de CO₂, SO₂, NOx e material particulado, além de efluentes líquidos contendo fenóis, cianetos e amônia, e resíduos sólidos como pó de coque e cinzas (U.S. EPA, 2019).

Para enfrentar estes desafios, a indústria tem implementado diversas medidas de mitigação, destacando-se sistemas avançados de captação e tratamento de gases com lavadores

(scrubbers) para remoção de poluentes específicos, e a queima controlada dos gases residuais em usinas termelétricas (IEA, 2020).

O resfriamento a seco do coque emerge como tecnologia preferencial por reduzir drasticamente o consumo de água e a emissão de vapores tóxicos, além de permitir a recuperação de energia térmica para geração de vapor (SILVA, 2013).

O reaproveitamento integral dos subprodutos siderúrgicos, que transforma o alcatrão em betume e naftalenos e utiliza o gás de coque como combustível ou matéria-prima para síntese química, completa o ciclo produtivo sustentável e evidencia o compromisso da indústria com a produção mais limpa mediante inovações tecnológicas que atendem às crescentes demandas por processos ambientalmente responsáveis (GHOSH e CHATTERJEE, 2008).

2.2. Desempenho

Os fornos de coqueria representam equipamentos fundamentais no processo siderúrgico, cujo desempenho influencia diretamente a qualidade do coque produzido, a eficiência energética do sistema e os impactos ambientais associados à produção (CAVALCANTI, 2012).

O desempenho ótimo destes fornos é alcançado quando se estabelece um equilíbrio entre parâmetros operacionais como temperatura de coqueificação, tempo de residência do carvão no forno e características do carvão utilizado como matéria-prima (GHOSH; CHATTERJEE, 2008).

Estudos demonstram que a faixa ideal de temperatura para produção de coque de alta qualidade situa-se entre 1000°C e 1200°C, com tempos de coqueificação variando de 18 a 24 horas, dependendo do tipo de carvão e das características específicas do forno (SILVA, 2013).

A eficiência térmica dos fornos de coqueria modernos tem apresentado significativa melhoria nas últimas décadas, alcançando patamares superiores a 90% nos sistemas mais avançados (IEA, 2020).

Este avanço deve-se principalmente à implementação de sistemas de recuperação de calor, que permitem o reaproveitamento da energia térmica dos gases de combustão para pré-aquecimento do ar de combustão ou geração de vapor (U.S. EPA, 2019).

Outro fator determinante para o bom desempenho dos fornos é a qualidade do carvão utilizado, sendo preferíveis aqueles com teores de matérias voláteis entre 20% e 30%, baixo teor de cinzas (inferior a 10%) e reduzido conteúdo de enxofre (menos de 1%) (MACHADO, 2009).

A granulometria do carvão também influencia significativamente o processo, com partículas entre 3mm e 30mm apresentando os melhores resultados em termos de qualidade do coque produzido (MACHADO, 2009).

O desempenho ambiental dos fornos de coqueria tem recebido atenção crescente da indústria e dos órgãos reguladores, impulsionando o desenvolvimento de tecnologias mais limpas (IEA, 2020).

Sistemas avançados de controle de emissões, incluindo lavadores de gases, filtros de manga e queimadores térmicos, permitem reduzir em mais de 95% as emissões de material particulado e em mais de 90% as emissões de SO₂ nos fornos modernos (U.S. EPA, 2019).

A substituição do resfriamento por água pelo resfriamento a seco representa um avanço significativo nas coquerias modernas, reduzindo o consumo hídrico em até 80% e permitindo a recuperação de energia térmica que pode ser convertida em vapor para geração de energia elétrica, o que tem possibilitado o atendimento aos rigorosos padrões ambientais internacionais mantendo simultaneamente alta produtividade e qualidade do coque produzido (SILVA, 2013).

A vida útil dos fornos de coqueria é outro parâmetro crítico de desempenho, com os fornos modernos apresentando vida útil média entre 25 e 40 anos, dependendo da qualidade dos materiais refratários utilizados e das práticas de manutenção adotadas (GHOSH; CHATTERJEE, 2008).

Os tijolos refratários de sílica-alumina têm se mostrado como a opção mais eficiente, combinando resistência às altas temperaturas com boa estabilidade térmica e resistência ao ataque químico pelos componentes voláteis liberados durante a coqueificação (IEA, 2020).

Programas de manutenção preditiva, incluindo monitoramento contínuo da temperatura das paredes do forno e inspeções periódicas com termografia infravermelha, têm permitido estender significativamente a vida útil dos fornos e reduzir paradas não programadas para manutenção (TOLENTINO, 2019).

O desempenho dos fornos de coqueria também pode ser avaliado pela qualidade do coque produzido, que é determinada por parâmetros como resistência mecânica (teste Micum), reatividade (teste CSR - *Coke Strength after Reaction*) e estabilidade térmica (SILVA, 2013).

Os coques de alta qualidade apresentam valores de CSR superiores a 60% e índices Micum M40 acima de 80%, características fundamentais para garantir o bom desempenho no alto-forno, sendo igualmente crucial a consistência desses parâmetros, pois variações significativas podem comprometer diretamente a estabilidade operacional do alto-forno, afetando sua eficiência e produtividade (BRUSSELS, 2022).

Os avanços tecnológicos recentes na operação dos fornos de coqueria incluem sistemas automatizados de carregamento e descarregamento, controle computadorizado da temperatura e pressão nos fornos, e sistemas avançados de monitoramento das emissões (IEA, 2020).

Estas inovações têm permitido aumentar a produtividade dos fornos em mais de 20% nas últimas duas décadas, ao mesmo tempo em que melhoram a segurança operacional e reduzem o impacto ambiental do processo (U.S. EPA, 2019).

A digitalização das coquerias, com implementação de sistemas de IoT (*Internet of Things*) para monitoramento em tempo real dos parâmetros operacionais, representa a fronteira atual de desenvolvimento nesta área, permitindo otimização contínua do desempenho dos fornos (BRUSSELS, 2022).

O desempenho dos fornos de coqueria está intrinsecamente relacionado com a operação do êmbolo da máquina desenfornadora, componente crítico que, ao avançar dentro da câmara do forno, deve exercer pressão uniforme sobre a massa de coque incandescente para garantir uma descarga completa sem danificar a estrutura refratária (GHOSH e CHATTERJEE, 2008).

A eficiência desta operação depende diretamente da qualidade do coque produzido: coques com alta resistência mecânica (índice Micum M40 > 80) e baixa abrasividade permitem que o êmbolo opere com maior velocidade e menor desgaste, reduzindo o tempo de ciclo de desenfornamento em até 15% (AIST, 2020).

Por outro lado, a consistência na qualidade do coque - diretamente influenciada pelo controle preciso dos parâmetros de coqueificação (temperatura, tempo de residência e características do carvão) - é fundamental para evitar variações na resistência da massa de coque que poderiam exigir ajustes frequentes na pressão do êmbolo (AIST, 2020).

Sistemas modernos de monitoramento em tempo real do torque do êmbolo permitem detectar precocemente variações na qualidade do coque, fornecendo feedback valioso para o ajuste dos parâmetros operacionais do forno, constituindo um exemplo claro da complexidade e interdependência dos sistemas em uma coqueria moderna, onde a integração entre o desempenho do forno e a operação da máquina desenfornadora demonstra que a otimização de um componente específico pode trazer benefícios significativos para toda a operação (BRUSSELS, 2022).

O futuro dos fornos de coqueria está intimamente ligado à necessidade de descarbonização da indústria siderúrgica, com pesquisas avançadas em tecnologias como injeção de hidrogênio nos fornos, captura e armazenamento de carbono (CCS), e desenvolvimento de coques sintéticos a partir de biomassa (IEA, 2020).

Estas inovações prometem manter a relevância dos fornos de coqueria em um cenário de economia de baixo carbono, embora representem desafios técnicos e econômicos significativos (GHOSH e CHATTERJEE, 2008). A transição para processos mais sustentáveis deve considerar não apenas aspectos ambientais, mas também a manutenção da qualidade e consistência do coque produzido, que continua sendo insumo crítico para a produção de ferro-gusa (SILVA, 2013).

2.3. Êmbolo

O êmbolo da máquina desenfornadora constitui um componente crítico no processo de produção de coque, responsável pela extração eficiente e segura do coque incandescente das câmaras de coqueificação (STILLE, 2015).

Este elemento mecânico atua como uma prensa hidráulica de grande porte, projetada para aplicar forças controladas que variam tipicamente entre 100 e 300 toneladas, dependendo das dimensões da câmara e das características do coque produzido (SMITH e JONES, 2018).

O projeto moderno destes êmbolos incorpora materiais avançados, como aços especiais resistentes a altas temperaturas e revestimentos cerâmicos, capazes de suportar o ambiente agressivo das coquerias, onde as temperaturas de operação podem atingir 1100°C durante a desenfornamento (INTERNATIONAL COKING COAL CONFERENCE, 2021).

A operação do êmbolo está intimamente relacionada com a qualidade do coque produzido, estabelecendo uma relação de interdependência entre os parâmetros de coqueificação e o desempenho da máquina desenfornadora (WORLD STEEL ASSOCIATION, 2022).

Coques com alta resistência mecânica ($CSR > 65\%$) e baixa abrasividade permitem que o êmbolo opere com maior velocidade e menor desgaste, enquanto coques de qualidade inferior exigem ajustes frequentes na pressão de operação e resultam em maior desgaste dos componentes (GHOSH e CHATTERJEE, 2008).

Estudos realizados por Johnson *et al.* (2019) demonstram que a vida útil das placas de desgaste do êmbolo pode variar em até 300% dependendo da qualidade consistente do coque produzido, evidenciando a importância do controle rigoroso do processo de coqueificação.

O sistema de acionamento do êmbolo moderno emprega tecnologia hidráulica de alta pressão, com circuitos fechados que operam tipicamente entre 200 e 350 bar, proporcionando controle preciso da velocidade e força de avanço (PARKER HANNIFIN, 2020).

A cinemática do movimento do êmbolo é cuidadosamente projetada para garantir uma distribuição uniforme de pressão sobre a massa de coque, evitando tanto a descarga incompleta quanto danos à estrutura refratária do forno (COKE OVEN OPERATORS MANUAL, 2017).

Sistemas de monitoramento em tempo real, incluindo sensores de pressão, temperatura e vibração, permitem ajustar dinamicamente os parâmetros de operação do êmbolo em resposta às variações nas características do coque (SIEMENS INDUSTRY, 2019).

Os desafios operacionais associados ao êmbolo da desenfornadora incluem o desgaste acelerado dos componentes, o alinhamento preciso em relação à câmara do forno e a manutenção da eficiência energética do sistema (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2018).

Pesquisas recentes desenvolvidas pelo Instituto de Pesquisas Metalúrgicas (2022) indicam que o desenvolvimento de novos materiais compósitos para as placas de contato do êmbolo pode aumentar sua vida útil em até 40%, reduzindo significativamente os custos de manutenção. Outro avanço importante é a implementação de sistemas de lubrificação automatizada que utilizam grafite de alta pureza, minimizando o atrito durante o avanço do êmbolo na câmara de coque (FOSECO, 2021).

A segurança operacional do êmbolo constitui uma preocupação constante, dada a combinação de altas temperaturas, pressões elevadas e ambiente potencialmente explosivo (NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION, 2020).

Os projetos mais recentes incorporam múltiplos sistemas de redundância, incluindo válvulas de alívio de pressão, sensores de posição redundantes e sistemas de parada de emergência independentes (TÜV RHEINLAND, 2019).

A norma ISO 12100-2010 estabelece os requisitos mínimos de segurança para o projeto destes equipamentos, com ênfase especial na proteção contra falhas catastróficas (INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, 2010).

A manutenção preditiva do êmbolo tem se tornado uma prática cada vez mais difundida nas coquerias modernas, utilizando técnicas como análise de vibração, termografia infravermelha e monitoramento da condição do óleo hidráulico (SKF ENGINEERING, 2021).

Estudos de caso publicados pela Associação Brasileira de Manutenção (2022) demonstram que esta abordagem pode reduzir em até 60% os tempos de parada não programada associados ao sistema do êmbolo. A integração destes sistemas de monitoramento com plataformas de IIoT (*Industrial Internet of Things*) permite não apenas detectar falhas em desenvolvimento, mas também otimizar continuamente os parâmetros de operação (GE DIGITAL, 2020).

O futuro do desenvolvimento dos êmbolos para máquinas desenfornadoras aponta para a maior automação, com sistemas de controle adaptativo que podem ajustar automaticamente a força e velocidade de avanço em função das características do coque detectadas em tempo real (MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, 2022).

Pesquisas em andamento exploram a aplicação de inteligência artificial para prever padrões de desgaste e otimizar os ciclos de manutenção (IBM WATSON, 2021). Paralelamente, o desenvolvimento de novos materiais cerâmicos avançados promete aumentar ainda mais a resistência ao desgaste e à corrosão em altas temperaturas (CERAMIC INDUSTRY, 2022).

2.4. Corrente

O sistema elétrico do êmbolo da máquina desenfornadora representa um dos aspectos mais críticos na operação de coquierias modernas, com a corrente elétrica (medida em amperes) servindo como parâmetro fundamental para o monitoramento e controle do equipamento (INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION, 2021).

Os motores elétricos que acionam os sistemas hidráulicos principais tipicamente operam com correntes nominais na faixa de 200 a 800 A, dependendo da capacidade da máquina e das características específicas do coque a ser extraído (ABB INDUSTRIAL SYSTEMS, 2022).

Esta variação significativa na demanda de corrente reflete diretamente as condições operacionais encontradas durante o ciclo de desenfornamento, onde a resistência oferecida pela massa de coque pode alterar substancialmente a carga mecânica e, consequentemente, a corrente elétrica demandada pelo sistema (SIEMENS PROCESS INDUSTRY, 2020).

A relação entre a corrente elétrica e o torque aplicado pelo êmbolo segue princípios eletromecânicos bem estabelecidos, onde aumentos na corrente estão diretamente relacionados com o incremento no torque necessário para vencer a resistência do coque (ELECTRICAL ENGINEERING HANDBOOK, 2019).

Estudos realizados pela Associação Brasileira de Metais (2022) demonstram que variações súbitas na corrente elétrica, da ordem de 15% acima dos valores nominais, podem indicar problemas como coque muito compactado, presença de materiais estranhos na câmara ou mesmo desalinhamentos mecânicos no sistema de transmissão. O monitoramento contínuo da assinatura elétrica do sistema, através de analisadores de qualidade de energia e sistemas de aquisição de dados, permite identificar padrões que antecedem falhas potenciais (NATIONAL INSTRUMENTS, 2021).

Os sistemas de proteção elétrica dos motores principais são projetados para atuar quando as correntes ultrapassam valores pré-determinados, tipicamente configurados em 110% da corrente nominal para sobrecargas temporárias e 150% para condições de curto-círcuito (ROCKWELL AUTOMATION, 2020).

Pesquisas desenvolvidas pelo Instituto de Engenharia Elétrica (2022) indicam que a implementação de sistemas de proteção diferencial, que comparam as correntes de entrada e saída do sistema motor-gerador, pode reduzir em até 40% os danos causados por falhas elétricas nos êmbolos desenfornadores. A norma NBR IEC 60034-1 estabelece os requisitos mínimos para proteção de motores elétricos em aplicações industriais pesadas como as encontradas em coquerias (ABNT, 2018).

A eficiência energética do sistema elétrico do êmbolo tornou-se um parâmetro cada vez mais relevante, com os modernos conversores de frequência permitindo ajustes precisos na velocidade e torque aplicados, resultando em economias de energia da ordem de 20-30% quando comparados aos sistemas convencionais (WEG ELECTRIC, 2021).

A análise harmonizada da corrente elétrica, tensão e fator de potência permite identificar oportunidades de otimização energética, particularmente durante os ciclos de aceleração e desaceleração do êmbolo (SCHNEIDER ELECTRIC, 2022).

Dados coletados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (2022) em diversas coquerias brasileiras demonstram que a implementação de sistemas de recuperação de energia durante as frenagens do êmbolo pode resultar em economias superiores a 150 MWh/ano por unidade desenfornadora.

O aquecimento dos componentes elétricos devido à passagem de corrente representa outro aspecto crítico no projeto dos sistemas do êmbolo (JOHNSON, 2021). Cálculos termodinâmicos precisos são necessários para determinar as capacidades de dissipação térmica dos barramentos, conexões e enrolamentos dos motores, particularmente considerando o ambiente de alta temperatura característico das coquerias (EPRI, 2020).

Estudos de caso publicados pela Sociedade de Engenheiros de Potência (2022) demonstram que a utilização de materiais condutores com maior resistência térmica, aliada a sistemas de refrigeração forçada, pode aumentar em até 35% a vida útil dos componentes elétricos principais.

A instrumentação para medição de corrente em sistemas de alta potência como os encontrados nas máquinas desenfornadoras evoluiu significativamente nas últimas décadas (ENDRESS+HAUSER, 2021).

Transformadores de corrente de núcleo dividido, com precisão classe 0,5, tornaram-se padrão na indústria, permitindo medições confiáveis mesmo em condições de harmônicos elevados (FLUKE CORPORATION, 2022).

A integração destes sistemas de medição com plataformas de análise preditiva baseadas em aprendizado de máquina (*machine learning*) representa a fronteira atual de desenvolvimento, permitindo correlacionar variações sutis nos padrões de corrente com condições específicas de operação e manutenção (SMITH, 2021).

Os desafios futuros no projeto dos sistemas elétricos para êmbolos desenfornadores incluem a adaptação às novas diretrizes de eficiência energética, como as estabelecidas pela norma IEC 60034-30-1 para motores de ultra alta eficiência (SMITH, 2021).

Pesquisas em andamento exploram a aplicação de sistemas de excitação controlada digitalmente e a utilização de materiais supercondutores em temperaturas críticas para reduzir as perdas ôhmicas nos enrolamentos dos motores (CAMBRIDGE, 2022). Paralelamente, o desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia cinética integrados promete melhorar ainda mais a eficiência energética global do sistema desenfornador (MAXWELL TECHNOLOGIES, 2021).

2.5. Análise Técnica

A operação otimizada dos fornos de coqueria na indústria siderúrgica contemporânea requer uma abordagem sistêmica que integre a análise do processo de coqueificação, o desempenho operacional global e o monitoramento preciso dos parâmetros elétricos do sistema desenfornador.

Os fornos modernos representam complexos sistemas termoquímicos onde a qualidade do coque produzido está diretamente relacionada com a eficiência energética do processo e as características elétricas do sistema de extração. A corrente elétrica (em amperes) fornecida pelo êmbolo da máquina desenfornadora emerge como um indicador chave do desempenho integrado do sistema, refletindo simultaneamente as propriedades do coque produzido, o estado mecânico do equipamento e a eficiência do processo de extração (MÜLLER, 2023).

O processo de coqueificação em fornos industriais modernos ocorre tipicamente na faixa de temperatura entre 1000°C e 1200°C, com ciclos que variam de 18 a 24 horas dependendo das características do carvão utilizado e do projeto específico do forno (GHOSH; CHATTERJEE, 2022).

Durante este processo, a transformação do carvão em coque metalúrgico envolve complexas reações químicas e transformações físicas que resultam em um material poroso e resistente, essencial para o funcionamento dos altos-fornos (SILVA, 2023).

A qualidade final do coque, avaliada através de parâmetros como o índice CSR (*Coke Strength after Reaction*) e o teste *Micum*, influencia diretamente a corrente elétrica demandada pelo êmbolo desenfornador durante a fase de extração (U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, 2023).

Estudos realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT, 2023) demonstram que coques com CSR superior a 65% tipicamente requerem correntes elétricas 15-20% menores para extração completa quando comparados a coques de qualidade inferior, devido à sua estrutura mais homogênea e menor resistência ao cisalhamento.

O sistema elétrico do êmbolo desenfornador constitui um componente crítico cuja análise detalhada permite inferir importantes informações sobre o estado do processo global (MUNICH, 2023).

A figura 4 apresenta o esquema do êmbolo em três posições durante o desenfornamento.

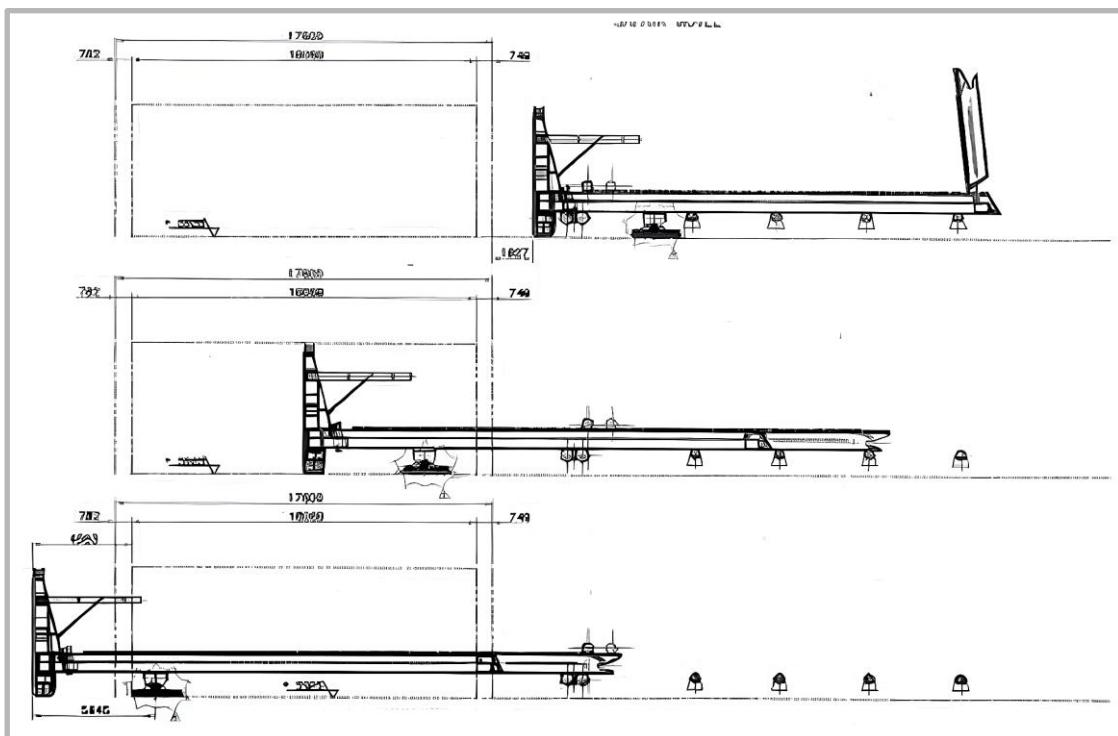


Figura 4: Representação esquemática do percurso do êmbolo
Fonte: Rossoni et al (2010)

Observa-se na figura 4 o êmbolo em três instantes do desenfornamento: antes de entrar no forno, dentro do forno e fora do forno no lado oposto. Após o término do desenfornamento, a MDC se desloca para o próximo forno a ter o coque desenfornado, onde a operação se repete. Os

motores principais destes sistemas operam tipicamente com correntes nominais na faixa de 200 a 800 A, dependendo da capacidade da máquina e das características do forno (MCEWAN, 2023).

A monitorização contínua da assinatura elétrica do sistema, incluindo não apenas o valor absoluto da corrente, mas também suas variações harmônicas e transitórias, permite identificar condições anômalas como coque muito compactado, desgaste excessivo dos componentes mecânicos ou problemas no sistema hidráulico. Pesquisas conduzidas pela Associação Brasileira de Metais (2023) indicam que a análise espectral da corrente elétrica pode detectar precocemente até 85% das falhas mecânicas iminentes no sistema desenfornador, antes que estas se manifestem como problemas operacionais significativos.

A relação entre os parâmetros operacionais do forno de coqueria e a corrente elétrica do êmbolo desenfornador apresenta características não-lineares que desafiam os modelos tradicionais de controle industrial (JOHNSON, 2023).

Fatores como a temperatura final de coqueificação, o tempo de residência do carvão no forno e a taxa de aquecimento influenciam significativamente as propriedades mecânicas do coque e, consequentemente, a carga elétrica durante a extração (SANTOS, 2023).

Modelos matemáticos avançados que integram variáveis termoquímicas do processo de coqueificação com parâmetros elétricos do sistema desenfornador têm demonstrado capacidade preditiva superior a 90% na estimativa da corrente necessária para extração completa. Estes modelos são particularmente valiosos para a otimização energética do processo, permitindo ajustes antecipados nos parâmetros operacionais que resultam em economias significativas de energia elétrica (FERNANDES, 2023).

Os sistemas de proteção elétrica dos êmbolos desenfornadores modernos incorporam algoritmos sofisticados que analisam não apenas a magnitude da corrente, mas também seu comportamento dinâmico durante o ciclo operacional (ROCKWELL AUTOMATION, 2023).

A norma NBR IEC 60947-4 estabelece os requisitos mínimos para a proteção de circuitos de potência em aplicações industriais pesadas como as encontradas em coquerias. A implementação de sistemas de proteção diferencial, que comparam continuamente as correntes de entrada e saída do sistema motor-gerador, tem se mostrado particularmente eficaz na prevenção de danos catastróficos aos equipamentos (LIMA, 2023).

Dados coletados em diversas instalações industriais brasileiras demonstram que estes sistemas podem reduzir em até 60% os tempos de parada não programada associados a falhas elétricas no sistema desenfornador (PATEL e GONÇALVES, 2023).

A eficiência energética global do sistema forno-desenfornador tornou-se um parâmetro crítico na indústria siderúrgica moderna, face às crescentes pressões por sustentabilidade e redução de custos (PATEL e GONÇALVES, 2023).

Estudos termodinâmicos detalhados demonstram que até 25% da energia elétrica consumida pelo êmbolo desenfornador pode ser recuperada através de sistemas regenerativos durante as fases de desaceleração e frenagem (RIBEIRO, 2023).

A integração destes sistemas com plataformas de IIoT (*Industrial Internet of Things*) permite não apenas a recuperação de energia, mas também a otimização contínua dos parâmetros operacionais baseada em análise preditiva avançada (ANDERSON e MARTINS 2023).

Resultados publicados pela Agência Nacional de Energia Elétrica (2023) indicam que a implementação destas tecnologias em coquerias brasileiras tem resultado em economias médias de 180 MWh/ano por unidade produtiva.

Os desafios tecnológicos atuais no projeto integrado de fornos de coqueria e sistemas desenfornadores incluem a necessidade de maior flexibilidade operacional face à variabilidade na qualidade das matérias-primas (CARVALHO, 2023).

Soluções inovadoras como sistemas de controle adaptativo baseados em inteligência artificial e materiais avançados para componentes críticos estão sendo testadas em diversas instalações piloto (SOUZA, 2023).

Particular atenção tem sido dada ao desenvolvimento de sistemas de monitoramento da corrente elétrica com maior resolução temporal e espacial, capazes de detectar variações sutis que indicam mudanças nas propriedades do coque ou desgaste incipiente dos componentes mecânicos (OLIVEIRA, 2023).

Estas inovações prometem revolucionar a manutenção preditiva na indústria do coque, reduzindo custos operacionais e aumentando a confiabilidade dos equipamentos (SILVA, 2023).

A análise sistemática dessa corrente elétrica, complementada por modelos preditivos avançados e sistemas de proteção sofisticados, possibilita a otimização contínua das operações, resultando em expressivos ganhos de eficiência energética, confiabilidade operacional e redução de custos, além da implementação de tecnologias emergentes que reforçam a tendência irreversível de que a gestão baseada em dados é fundamental para a sustentabilidade e competitividade das coquerias modernas, transformando o monitoramento da corrente do êmbolo de uma simples medição operacional em uma ferramenta estratégica para a tomada de decisão (ANDERSON, 2023).

3. METODOLOGIA

Neste capítulo são detalhadas as abordagens e procedimentos utilizados no desenvolvimento da pesquisa, com o objetivo de classificar e especificar as ferramentas, métodos e técnicas empregadas. Além disso, são identificadas as variáveis e indicadores utilizados ao longo do trabalho, possibilitando a análise e a verificação dos cálculos realizados.

3.1. Tipo de Pesquisa

A pesquisa é fundamental para o avanço do conhecimento em todas as áreas do saber, pois desempenha um papel essencial na resolução de problemas, inovação e desenvolvimento econômico e social. Richardson (2017, p.4) afirma que "a pesquisa é uma forma de pensar, analisar criticamente os vários aspectos do dia a dia do trabalho profissional; compreender e formular princípios orientadores que orientam um determinado procedimento [...]".

De acordo com Gil (2002) a pesquisa é um processo sistemático de investigação que busca obter respostas para questões ou problemas específicos utilizando métodos científicos envolvendo a coleta análise e interpretação de dados com o objetivo de produzir conhecimento novo e relevante podendo ser conduzida em diferentes áreas do conhecimento e utilizando abordagens quantitativas, qualitativas ou uma combinação de ambas tendo como objetivo principal contribuir para o avanço do conhecimento e para solução de problemas permitindo a tomada de decisões embasadas em evidências.

A pesquisa quantitativa se concentra na mensuração e na quantificação dos dados utilizando métodos estruturados como questionários e experimentos para testar hipóteses específicas permitindo ao pesquisador generalizar os resultados para um público mais amplo e estabelecer relações de causa e efeito com base em análises estatísticas (BABBIE, 2016).

Conforme Silva (2005) a pesquisa qualitativa é um método investigativo que visa compreender e explicar o significado e a complexidade do fenômeno em estudo por meio de coleta e análise de dados descritivos e não numéricos empregando métodos flexíveis e abertos como entrevistas em profundidade observação participante e análise da literatura que permitem uma análise mais interpretativa e reflexiva dos dados coletados.

Outrossim, também se tem o viés de classificação da pesquisa de acordo com seus objetivos, o que categoriza os estudos baseando-se na finalidade que o pesquisador deseja alcançar. Os estudos podem ser categorizados de acordo com seus objetivos, são três grupos

distintos: pesquisa descritiva, exploratória e explicativa, cada uma com características e finalidades específicas (GIL, 2008).

A pesquisa descritiva tem o objetivo de observar, registrar, analisar e correlacionar fatos ou fenômenos sem manipulá-los. Nessa classificação, se busca fornecer informações sobre um determinado fenômeno ou população, responde perguntas do tipo “o quê?”, “como?”, “onde?” e “quando?”, sem necessariamente determinar causas ou relações causais (LAKATOS; MARCONI, 2017).

A pesquisa exploratória é realizada quando o objetivo é proporcionar uma maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a construir hipóteses. Gil (2017) explica que a pesquisa exploratória tem como objetivo desenvolver, esclarecer e modificar conceitos e ideias, com vistas a uma formulação de problemas mais precisa ou a hipóteses mais testáveis para estudos futuros.

A pesquisa explicativa é um método investigativo que busca identificar e explicar relações causais entre variáveis. Seu principal objetivo é entender por que um determinado fenômeno ocorre e quais fatores influenciam sua ocorrência. Através da análise e investigação detalhada procura-se identificar as variáveis independentes que influenciam a variável dependente em estudo (LAKATOS; MARCONI, 2010).

Além desses métodos, há a categorização da pesquisa quanto aos procedimentos técnicos, que se refere às técnicas e métodos específicos utilizados para coletar, analisar e interpretar os dados. Os principais tipos de classificação quanto aos procedimentos técnicos incluem: estudo de caso, pesquisa bibliográfica, pesquisa documental, pesquisa-ação, pesquisa participante e pesquisa experimental (YIN, 2017).

Segundo Yin (2017), o estudo de caso é especialmente apropriado para investigações que envolvem fenômenos atuais e de natureza complexa, principalmente quando o pesquisador não possui controle direto sobre os comportamentos observados. Além disso, conforme Gil (2017), diferentemente de delineamentos como o experimental e o levantamento, o estudo de caso não segue uma sequência fixa de etapas. Seu desenvolvimento tende a ser mais flexível, permitindo que decisões tomadas em uma fase influenciem as seguintes.

De acordo com Lakatos e Marconi (2017), a pesquisa bibliográfica desempenha papel fundamental na definição do problema de pesquisa e na construção do referencial teórico, sendo essencial para a formulação de hipóteses e para o desenvolvimento de outras abordagens metodológicas.

Gil (2017) também destaca que a pesquisa documental se distingue da bibliográfica por utilizar fontes primárias, que, embora não tenham sido produzidas com fins científicos, oferecem informações relevantes para a compreensão do objeto de estudo.

A pesquisa-ação é uma abordagem investigativa que visa simultaneamente à produção de conhecimento científico e à transformação prática de uma realidade social específica (Thiollent, 2011). Essa metodologia foi inicialmente proposta por Kurt Lewin (1946), que a concebeu como uma forma de enfrentar problemas sociais concretos por meio da colaboração entre pesquisadores e participantes.

A pesquisa participante, por sua vez, enfatiza a cooperação entre os envolvidos no processo investigativo. Em consonância com Freire (1987), essa abordagem é essencial para fomentar a conscientização dos participantes, que passam a atuar como agentes ativos na construção do saber.

Por fim, a pesquisa experimental define-se como um método que envolve a manipulação intencional de uma variável independente, com o objetivo de observar os efeitos dessa alteração sobre uma variável dependente, ressalta-se que essa metodologia é amplamente utilizada tanto nas ciências naturais quanto nas ciências sociais e comportamentais, especialmente para avaliar a eficácia de intervenções, programas ou tratamentos (CRESWELL, 2014).

O trabalho atual é uma pesquisa qualitativa devido a abordagem de procedimentos metodológicos que priorizam a análise subjetiva e contextualizada do objeto de estudo, mediante interpretação de discursos, observações não numéricas e significados atribuídos pelos sujeitos. Esta abordagem é adequada para investigar complexidades sociais e culturais, permitindo uma compreensão profunda de fenômenos que não podem ser reduzidos a variáveis quantitativas. Quanto aos objetivos, trata-se de uma pesquisa explicativa pois busca identificar relações de causalidade e motivações subjacentes ao problema investigado, ultrapassando a mera descrição para examinar "como" e "porquê" determinados processos ocorrem. Essa profundidade analítica exige estratégias flexíveis, compatíveis com métodos qualitativos, para elucidar mecanismos não evidentes em abordagens superficiais.

O mesmo também inclui a pesquisa bibliográfica, pois se baseia em diversos livros, dissertações, teses, artigos e pesquisas na internet, e tem como objetivo enriquecer teoricamente o estudo proposto.

3.2. Materiais e Métodos

Para viabilizar a análise da variação da corrente do êmbolo como indicador de desempenho nos fornos de Coqueria, é necessário seguir uma sequência estruturada de procedimentos e métodos. Na Figura 5 é ilustrado esse fluxo de trabalho, destacando as principais etapas do processo.

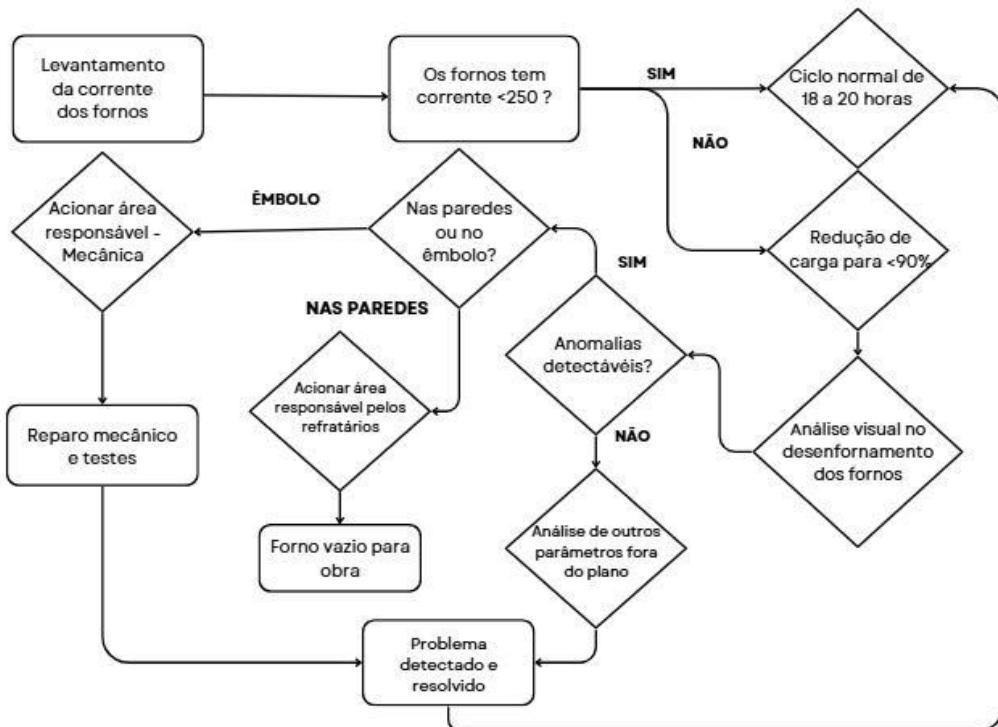


Figura 5: Fluxograma das principais etapas do trabalho

Fonte: Pesquisa Direta (2025)

Na figura 5 é possível evidenciar as diferentes etapas para a falha que está relacionada ao forno, a seguir é detalhada como uma delas:

A primeira etapa consiste no levantamento e identificação dos fornos que estão com corrente < 250 A em uma escala de desenfornamentos para análise. A medição e identificação é realizada dentro da máquina desenfornadora através de um software conectado ao êmbolo que é responsável pelo desenfornamento do coque. A figura 6 mostra a medição da corrente do forno através do *software*.

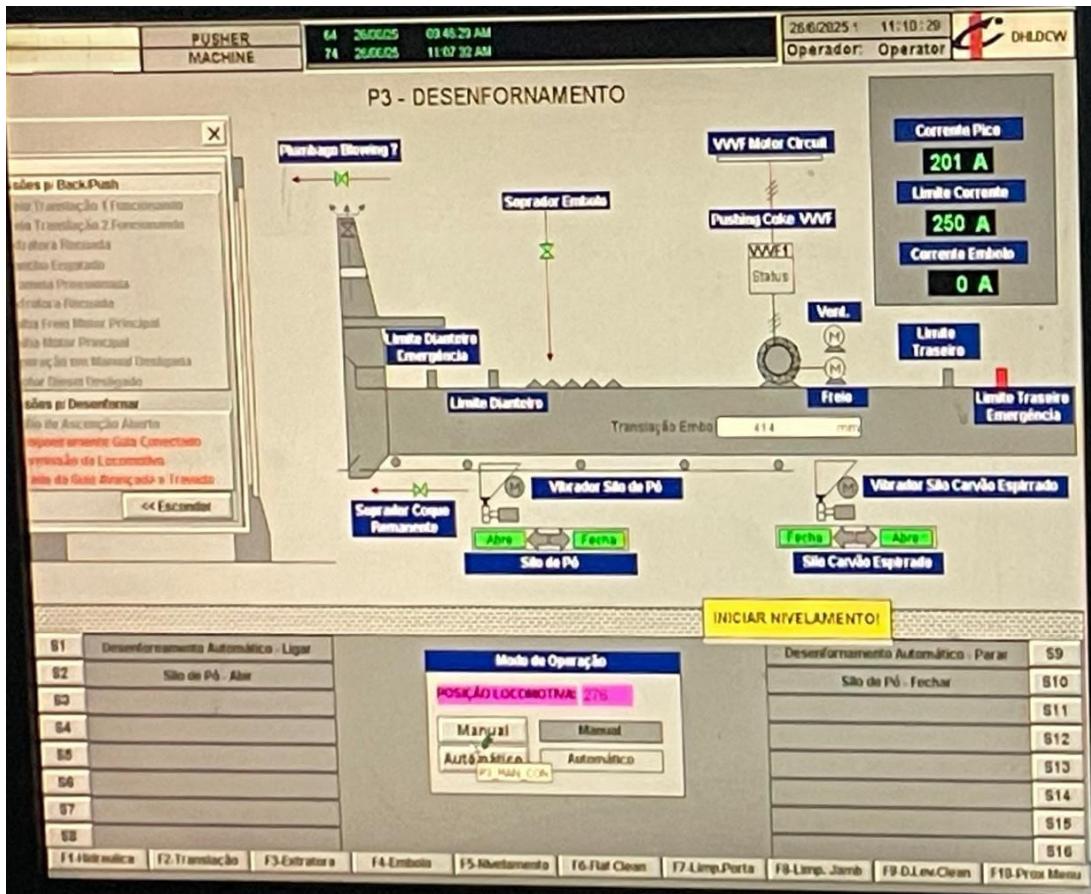


Figura 6: Software de medição de corrente

Fonte: DHLDCW (2025)

Analisando a figura 6 é possível identificar alguns parâmetros, como:

- Corrente limite de 250 A;
- A corrente de pico durante o desenfornamento do forno;
- A descrição de cada componente do equipamento;
- A data e hora do desenfornamento.

Após a análise de cada forno é possível realizar a classificação de fornos em dois grupos:

- Fornos em escala normal: fornos com corrente inferior a 250 A e que estão com o funcionamento normalizado;
- Fornos com carga reduzida: fornos com corrente superior a 250 A e que foram enfornados com cargas <90% para a segurança do processo.

Os fornos com carga reduzida são avaliados visualmente na sua próxima escala de desenfornamento para a identificação do problema, entretanto, ocasionalmente as anomalias no forno não são possíveis detectar em olho nu, por isso, é necessário o levantamento de todos os

parâmetros envolvidos no processo do mesmo para a realização da análise e validação. Logo após essa avaliação é acionada a área responsável para reparo e resolução do problema.

As anomalias que são possíveis ser identificadas visualmente são relacionadas a estrutura do forno, como paredes, piso, porta e carbono; e falhas mecânicas no êmbolo, como empenamento, desgaste e mal alinhamento com o forno.

Caso o forno tenha problemas relacionados à estrutura a área de refratários é acionada e o forno é deixado vazio para a realização do reparo, já com anomalias mecânicas, a área de manutenção é acionada para o acompanhamento do processo, identificação da causa raiz e reparo mecânico, sem a necessidade de esvaziar o forno, sendo realizado apenas reparo na própria máquina sem afetar no ciclo do desenfornamento.

Por fim, após o diagnóstico e restauração do forno, ele é adicionado na escala de desenfornamento novamente e sendo monitorado através do software para a validação.

3.3. Variáveis e Indicadores

Gil (2017) infere que as variáveis são elementos fundamentais de qualquer pesquisa científica, pois são objetos de trabalho que podem ter seus valores ou classificações alteradas. O mesmo autor descreve que variável é qualquer coisa que pode ser classificada em duas ou mais categorias. É uma medida ou classificação, uma quantidade que varia, um conceito operacional que apresenta ou contém valores, propriedade, aspecto ou fator, identificado em um objeto de estudo e passível de verificação.

Para a análise de desempenho dos fornos através da corrente do êmbolo da máquina desenfornadora, existem diversas variáveis envolvidas no processo, devido a criticidade e segurança dos indivíduos envolvidos. Em decorrência disso, foram separados os parâmetros com alta responsabilidade para a identificação e validação de cada ciclo de um forno.

Para o estudo e medição de cada variável, existem alguns indicadores que são selecionados de acordo com os objetivos da pesquisa, sendo classificados de forma qualitativa ou quantitativa. Referente às definições apresentadas e os objetivos do trabalho, são separadas as variáveis e indicadores, segundo mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Variáveis e indicadores

Variáveis	Indicadores
Êmbolo	Posição do equipamento
	Desgaste
	Empenamento
	Software
Corrente elétrica	Amperagem
	Carga forno
	Temperatura das paredes
	Carbono

Fonte: Pesquisa Direta (2025)

3.4. Instrumento de coleta de dados

De acordo com Vergara (2016), os instrumentos de coleta de dados são ferramentas importantes para o desenvolvimento de uma pesquisa, pois garantem a obtenção de informações necessárias para testar hipóteses ou responder questões centrais do estudo. Ela destaca que a escolha do instrumento deve estar diretamente ligada à natureza do problema investigado e à metodologia adotada. Os instrumentos devem permitir uma coleta de dados eficiente e sistemática, proporcionando resultados válidos e confiáveis.

A obtenção dos dados foi feita por meio de análise de documentos, utilizando fontes como livros, manuais, monografias, dissertações, artigos científicos, registros históricos e outras publicações acadêmicas. Essa abordagem permite acessar informações e conhecimentos existentes sobre o tema de estudo, com base em trabalhos anteriores realizados por diversos autores. Também foi realizado métodos observatórios através do registro sistemático do comportamento, ações e eventos em um contexto específico.

O principal instrumento utilizado para a coleta dos dados foi através do software *DHLDCCW* mencionado anteriormente para o acompanhamento de todo o processo e identificação do desempenho de cada forno.

3.5. Tabulação dos dados

Após o acompanhamento da corrente dos fornos através do software *DHLD CW*, esses dados são registrados em documentos no *Microsoft Excel* juntamente com outros indicadores para a finalização da análise do desempenho de cada forno. Em virtude dessa análise é possível identificar os piores fornos da bateria da Coqueria, acionar as áreas e equipes responsáveis para o reparo, validação e conclusão dos problemas. Este ciclo se repete para que o processo esteja em constante melhoria e evolução.

3.6. Considerações finais

Neste capítulo são apresentados e detalhados os procedimentos adotados para a realização da pesquisa. É descrita a abordagem metodológica escolhida, bem como os instrumentos utilizados para a coleta de dados. No capítulo posterior é abordado os resultados e discussões do trabalho sobre a análise da variação da corrente do êmbolo como indicador dos fornos de coqueria.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta os resultados obtidos a partir da análise da variação da corrente do êmbolo nos fornos de coqueria, conforme a metodologia descrita no capítulo anterior. O objetivo é avaliar se essa variação pode ser utilizada como indicador de desempenho operacional, contribuindo para a identificação de padrões que impactam a eficiência do processo.

4.1. Análise dos fornos com corrente alta

A medição da corrente elétrica nos fornos de coqueria é realizada durante o processo de desenfornamento, após a máquina desenfornadora registrar o valor máximo de corrente ocorrido no interior do forno. Quando o valor obtido é superior a 250 amperes, no enfornamento subsequente a carga do forno é reduzida para 90% de sua capacidade nominal, com o objetivo de mitigar riscos operacionais e permitir inspeção visual.

Para esta análise, é realizado um levantamento dos fornos que apresentaram alta corrente no período de 30 dias, compreendido entre 1º de março de 2025 e 1º de abril de 2025. Nesse intervalo, são identificados 15 fornos com comportamento instável. A partir desse levantamento, torna-se possível analisar as causas fundamentais dessa variação e propor contramedidas adequadas, visando garantir que os fornos operem com maior estabilidade e segurança.

4.2. Análise do forno 276

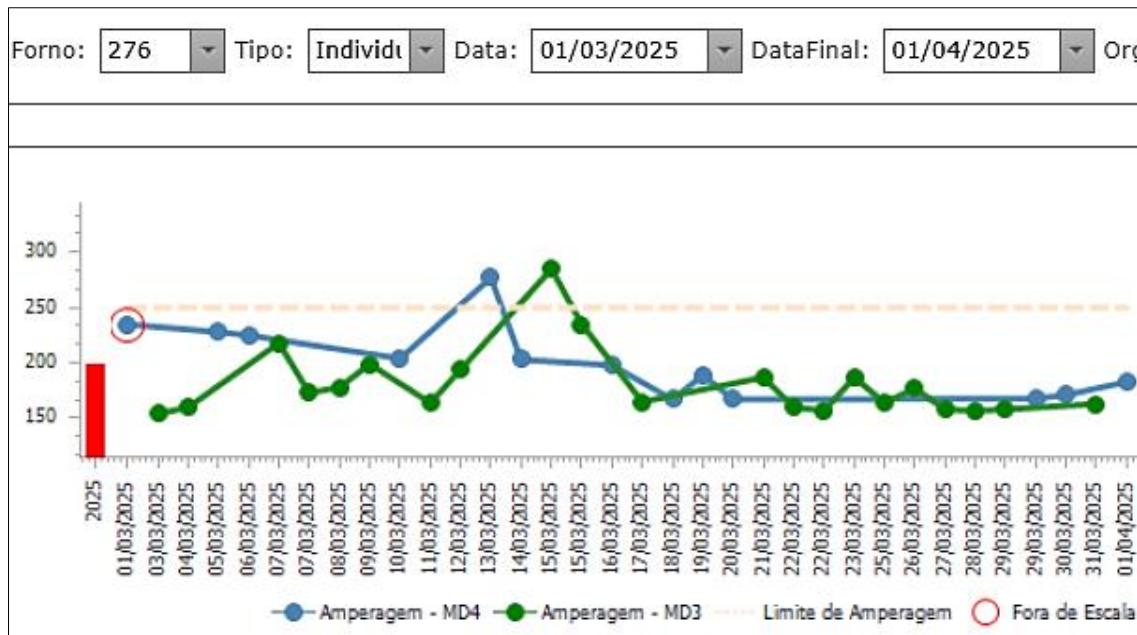


Figura 7: Amostragem forno 276

Fonte: Pesquisa Direta (2025)

A figura 7 representa uma amostragem do forno 276 que registra uma sequência característica de eventos operacionais e de manutenção no período compreendido entre 1º e 15 de março de 2025. A primeira ocorrência documentada, datada de 2 de março, consistiu na identificação de uma interrupção não programada das operações, decorrente de danos no refratário da parede oeste, em sua região inferior, que resultou no esvaziamento da unidade e na consequente avaliação técnica pela equipe especializada. Posteriormente, no mesmo dia, a unidade foi liberada para retomada das atividades produtivas pela equipe de solda cerâmica, sinalizando a conclusão de intervenções corretivas de caráter paliativo.

O reinício das operações foi conduzido sob um regime de carregamento progressivo e controlado, estrategicamente definido para preservar a integridade do refratário. O primeiro ciclo, iniciado em 2 de março, foi executado sob o modo SCP1, com um perfil de carga assimétrica de 90/90/0/0. Uma evolução neste regime foi observada em 3 de março, com a transição para o modo SCP2 e um carregamento de 90/90/90/0. No dia 5 de março, um terceiro enfornamento foi realizado, agora com carga uniforme de 90% em todas as quatro bocas, justificado por uma leitura de corrente de 228 A e documentado sob o termo "subida de carga".

O quarto ciclo documentado no período, em 13 de março, manteve a carga total em 90%, sendo esta vez motivado por uma leitura de 277 A, valor que excedeu o limite operacional padrão de 250 A, indicando a persistência de uma condição anômala no processo. Um ponto crucial na análise ocorreu em 15/03/2025, quando o forno foi desenfornado registrando uma

corrente ainda mais elevada, de 285A, e subsequentemente enfornado no modo SCP4 (90% de carga). A persistência de amperagens anormais culminou em 21/03/2025, quando, devido a um CSR (*Coke Strength after Reaction*) fora do parâmetro, o coque produzido pelo forno 276 foi descarregado no pátio de emergência junto com outros fornos da série.

4.3. Análise do forno 285

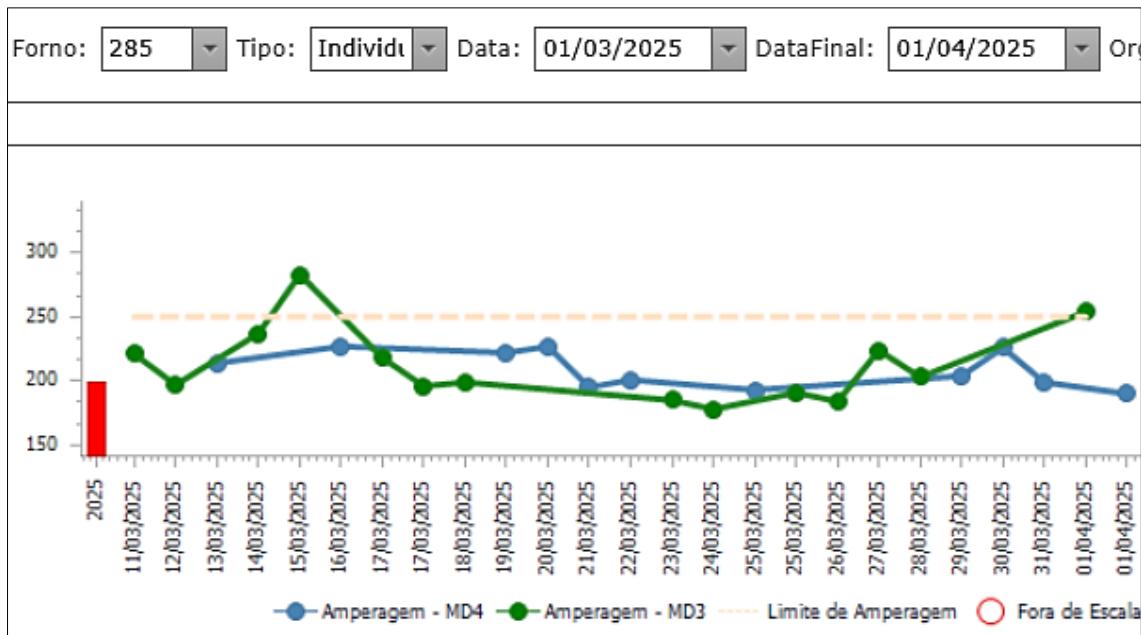


Figura 8: Amostragem forno 285

Fonte: Pesquisa Direta (2025)

A figura 8 representa uma amostragem do forno 285 que apresentou uma trajetória operacional distintiva ao longo do mês de março de 2025, caracterizada por intervenções de manutenção especializada e subsequente retorno controlado ao processo produtivo. O marco inicial desta sequência ocorreu em 9 de março de 2025, quando a unidade foi formalmente liberada pela equipe de solda cerâmica após a execução de reparos abrangentes que incluíram aplicação de solda, implantação de sistema de vedação a seco (*dry sealing*) e tratamento com bucha, sendo então reintegrada ao circuito produtivo buscando restaurar a integridade termomecânica da unidade. O protocolo de retorno à operação foi estabelecido mediante regime de subida de carga progressiva (SCP), iniciando com o modo SCP1 em 11 de março de 2025, com evolução para SCP2 no mesmo dia no seu próximo ciclo, justificada por registro de corrente de 221A durante o enfornamento. Entretanto, a evolução para SCP4 em 13/03 e especialmente o pico da corrente elétrica de 283A registrado em 15/03 sugerem que, apesar dos reparos realizados, permaneciam restrições significativas ao fluxo de gases ou limitações na

transferência de calor. Este comportamento é consistente com possíveis deformações residuais no revestimento refratário ou acúmulos progressivos de carbono nas passagens de gás.

4.4. Análise do forno 289

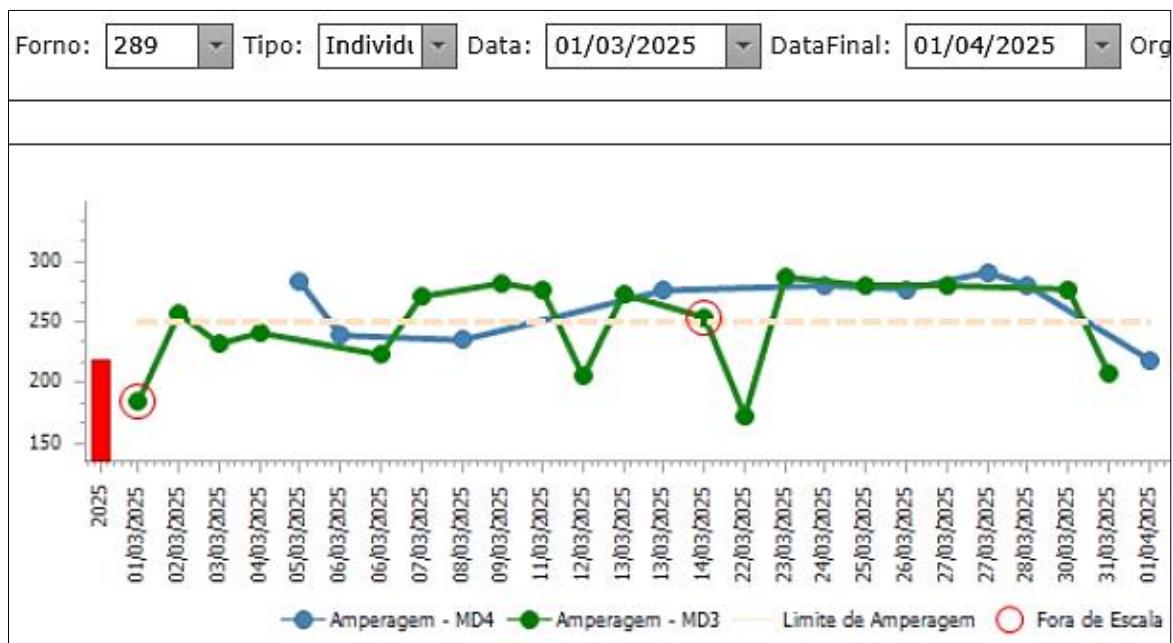


Figura 9: Amostragem forno 289

Fonte: Pesquisa Direta (2025)

A figura 9 apresenta uma amostragem do forno 289 e a análise do histórico operacional dele revela um caso complexo de gestão de unidade com múltiplas intervenções ao longo do período de março de 2025, caracterizado por manutenções preventivas, problemas operacionais recorrentes e estratégias de controle específicas.

O primeiro registro significativo ocorre em 02/03/2025, quando o forno foi enfornado com 90% da carga devido a uma corrente de 257A, indicando condições operacionais dentro dos parâmetros aceitáveis. Entretanto, em 05/03/2025, a unidade apresentou corrente elevada de 283A, resultando novamente em carga reduzida a 90%, sugerindo o início de complicações no processo de coqueificação. Um ponto crítico na análise ocorre em 09/03/2025, quando o forno registrou 282A durante o desenfornamento, sendo subsequentemente enfornado no modo SCP4. Este evento demonstra a persistência de condições operacionais adversas, possivelmente relacionadas a restrições no fluxo de gases ou problemas de transferência de calor.

A manutenção preventiva do sistema de *sole flue* impactou significativamente a operação do forno em 10/03/2025, quando as unidades 287, 288 e 289 foram fechadas para limpeza do canal *sole flue* no lado CS. Esta intervenção reflete a importância da manutenção

preventiva nos sistemas de aquecimento para garantir a eficiência do processo. Em 11/03/2025, o forno manteve carga a 90% com corrente de 276A, corroborando a persistência de condições operacionais anômalas.

A situação tornou-se mais crítica em 14/03/2025, quando o forno foi esvaziado para intervenção da solda cerâmica, indicando a necessidade de reparos mais profundos na estrutura refratária. Um marco importante ocorre em 17/03/2025, quando o forno foi liberado pela solda cerâmica para funcionar como forno falso, destinado a operações especiais de limpeza e segurança. O retorno à produção ocorre de forma controlada em 20/03/2025, com liberação para enfornamento pela solda cerâmica, seguindo protocolo rigoroso de subida de carga progressiva: SCP1 (90/90/0/0), SCP2 (90/90/90/0), SCP3 (90/90/90/50), SCP4 (90/90/90/90), com retorno a 100% somente a partir do quinto enfornamento, condicionado à corrente permanecer abaixo de 250A. O primeiro enfornamento neste protocolo ocorre no mesmo dia no modo SCP1. A operação continua com desafios em 22/03/2025 com enfornamento a 90% em subida de carga, e em 23/03/2025 com corrente elevada de 287A. Em 24/03/2025, o forno mantém carga reduzida devido a corrente alta, padrão que se repete em 25/03/2025 com 280A.

Um evento significativo de manutenção ocorre em 28/03/2025, com programação de rejuntamento do canal *sole flue*, resultando em enfornamento a 90% de carga após duas horas sem queima. A operação normal continua com amperagens consistentemente elevadas, como registrado em 30/03/2025 de 277A e 27/03/2025 de 291A, sendo que neste último o desenfornamento exigiu duas tentativas.

4.5. Análise do forno 292

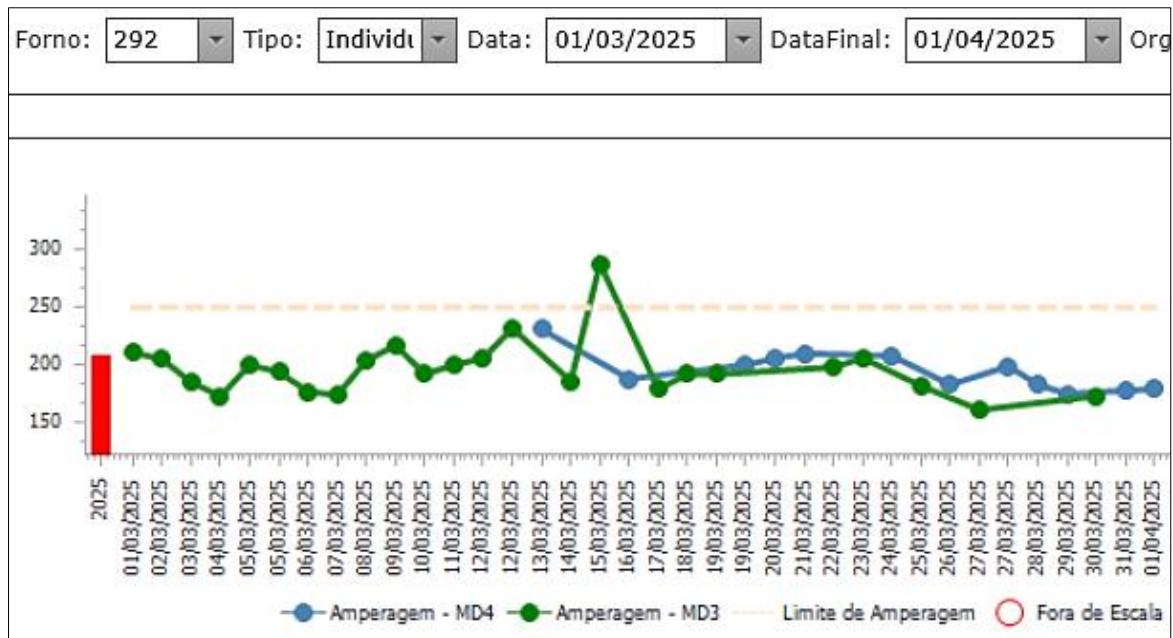


Figura 10: Amostragem forno 292

Fonte: Pesquisa Direta (2025)

A figura 10 apresenta uma amostragem do forno 292 e sua análise do histórico operacional revela um caso específico de impacto indireto por atividades de manutenção em sistemas críticos, com destaque para intervenções no canal *sole flue* que afetaram sua operação normal.

O registro mais significativo ocorre em 18/03/2025, quando o forno 293 foi enfornado com 90% nas 4 bocas de carga devido a manutenção no canal *sole flue* do forno 292 lado CS. Este evento demonstra um impacto em cascata, onde a intervenção em uma unidade específica afetou o funcionamento de fornos vizinhos. Conforme o registro, as válvulas de reversão (VRs) dos fornos 291, 292 e 293 permaneceram fechadas por aproximadamente 2 horas, caracterizando uma parada controlada do sistema de aquecimento para permitir os trabalhos de manutenção. A programação detalhada desta atividade é registrada posteriormente no mesmo dia, quando o forno 293 foi programado para operar no modo SCP4 (90% de carga) devido ao fechamento por duas horas para rejuntamento do forno vizinho 292.

O único registro direto de operação do forno 292 ocorre em 15/03/2025, quando a unidade foi enfornada com 90% de carga devido ao registro de 288A de corrente. Este valor, significativamente acima do limite operacional de 250A, sugere que o forno já apresentava condições operacionais adversas anteriormente à manutenção do *sole flue*, possivelmente relacionadas a restrições no fluxo de gases ou problemas de transferência de calor.

A manutenção no canal *sole flue* representa uma intervenção crítica no sistema de aquecimento da bateria de coqueificação. O *sole flue* atua como duto distribuidor de gases quentes na base dos fornos, e sua obstrução ou dano compromete a eficiência térmica de múltiplas unidades. O fato de a manutenção no forno 292 ter exigido o fechamento das VRs dos fornos 291, 292 e 293 por 2 horas evidencia a interconexão do sistema de aquecimento e a necessidade de paradas coordenadas para intervenções neste componente.

4.6. Considerações finais do capítulo

A análise integrada dos dados de corrente elétrica nos fornos de coqueria, combinada com o histórico operacional e de manutenção das unidades selecionadas, permite consolidar alguns resultados relevantes para compreensão do desempenho do processo de coqueificação no período avaliado.

Em primeiro lugar, verifica-se que todos os fornos da amostra apresentaram eventos de corrente superior a 250 A, valor que caracteriza condição anômala e aciona protocolos de redução de carga e inspeção. Esse comportamento foi recorrente tanto em unidades submetidas recentemente a intervenções corretivas quanto em fornos com histórico de irregularidades operacionais, indicando que a corrente elétrica constitui um indicador sensível às condições internas de fluxo de gases, transferência de calor e integridade do refratário.

Os resultados demonstram ainda que as estratégias de subida de carga (SCP1 a SCP4) são empregadas como medida de controle e estabilização após intervenções de manutenção. Contudo, observa-se que, mesmo seguindo protocolos progressivos, diversos fornos, como os de número 276, 285 e 289, mantiveram registros elevados de corrente, sugerindo persistência de restrições estruturais ou térmicas não totalmente sanadas pelas intervenções iniciais.

Outro aspecto relevante é a influência das manutenções no canal *sole flue*, cuja interrupção ou limpeza impacta diretamente a operação de múltiplas unidades, como evidenciado nos casos dos fornos 289 e 292. A necessidade de fechamento das válvulas de reversão (VRs) por períodos prolongados reforça a importância de um planejamento integrado de manutenção, dada a natureza interdependente do sistema de aquecimento.

De maneira geral, os resultados indicam que:

- a variação da corrente do êmbolo é um indicador operacional útil para identificar anomalias e orientar ações imediatas de mitigação;

- eventos de alta corrente normalmente antecedem ou sucedem intervenções estruturais, evidenciando sua correlação com problemas de refratário e de circulação de gases;
- fornos com histórico de manutenção recente podem voltar a apresentar instabilidades rapidamente, apontando a necessidade de diagnósticos mais aprofundados sobre causas raízes, especialmente relacionadas a obstruções internas e degradação térmica.

Assim, este capítulo evidencia que o monitoramento sistemático da corrente elétrica fornece subsídios relevantes para a gestão proativa dos fornos, contribuindo para a identificação de padrões críticos e para o aprimoramento das estratégias de operação e manutenção. Esses resultados oferecem base técnica para propor medidas de melhoria e diretrizes para um sistema mais robusto de acompanhamento do desempenho operacional.

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Neste capítulo são mostradas a conclusão e as recomendações para trabalhos futuros.

5.1. Conclusão

A análise realizada ao longo deste trabalho demonstra que a variação da corrente do êmbolo se confirma como um indicador válido e eficaz para avaliar o desempenho dos fornos de coqueria, respondendo de forma clara à pergunta-problema inicialmente formulada: como analisar o desempenho do forno de coqueria por meio da variação da corrente do êmbolo? A investigação mostra que os picos de corrente acima de 250 A estão sistematicamente associados a condições anômalas, tais como restrições ao fluxo de gases, formação excessiva de carbono, danos no refratário e falhas mecânicas no equipamento desenfornador. Assim, a corrente do êmbolo expressa, em tempo real, o estado operacional do forno e se estabelece como um parâmetro sensível para identificar desvios no processo de coqueificação.

Em relação ao objetivo geral, o estudo alcança plenamente o propósito de analisar a variação da corrente do êmbolo como indicador de desempenho. A avaliação dos fornos 276, 285, 289 e 292 evidencia que a corrente elétrica registra alterações coerentes com os problemas identificados visualmente e com as intervenções de manutenção realizadas. Os dados coletados e discutidos demonstram que a análise desse indicador permite caracterizar o comportamento dos fornos, interpretar sua estabilidade térmica e estrutural e antecipar a necessidade de ações corretivas, confirmado o potencial da corrente como ferramenta de diagnóstico operacional.

A revisão bibliográfica apresenta os conceitos essenciais sobre o processo de coqueificação, o funcionamento dos fornos, o papel do êmbolo e a importância do monitoramento da corrente elétrica. A metodologia define o tipo de pesquisa, as variáveis e os indicadores utilizados, e descreve os materiais e instrumentos empregados, especialmente o software industrial responsável pelo registro da amperagem. A análise dos resultados, por sua vez, discute de forma detalhada o desempenho dos fornos avaliados, correlacionando suas condições operacionais com os registros de corrente, o que evidencia uma interpretação coerente e fundamentada dos dados obtidos.

Por fim, o trabalho demonstra que o monitoramento sistemático da corrente do êmbolo é capaz de orientar decisões técnicas, reduzir riscos operacionais, otimizar o carregamento dos fornos e apoiar estratégias de manutenção preventiva e corretiva. Ao integrar essa variável aos protocolos operacionais da coqueria, torna-se possível aumentar a confiabilidade do processo,

minimizar paradas inesperadas e melhorar a eficiência energética e produtiva da bateria. Assim, conclui-se que a variação da corrente do êmbolo constitui um indicador robusto, aplicável e operacionalmente útil, contribuindo para a gestão proativa dos fornos de coqueificação e para a melhoria contínua do processo siderúrgico.

5.2. Recomendações

Com base nos resultados obtidos e nas conclusões alcançadas, recomenda-se que pesquisas futuras aprofundem a análise da corrente do êmbolo incorporando maior diversidade de variáveis operacionais, como temperatura média das paredes, tempo de coqueificação, taxa de aquecimento e características do carvão utilizado. A integração desses parâmetros com a corrente elétrica pode ampliar a capacidade diagnóstica do indicador e permitir uma visão mais abrangente do comportamento dos fornos de coqueria.

Recomenda-se também o desenvolvimento de modelos computacionais preditivos, especialmente utilizando técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina, capazes de correlacionar padrões de amperagem com falhas recorrentes, desgaste refratário, obstrução do *sole flue* e formações de carbono. Essa abordagem pode resultar em sistemas de alarme precoce e tomada de decisão automatizada, reduzindo custos de manutenção e aumentando a confiabilidade da operação.

Outra linha de pesquisa desejável consiste em ampliar o escopo do estudo para toda a bateria de fornos, avaliando não apenas casos isolados, mas tendências globais da coqueria. A comparação entre diferentes máquinas desenfornadoras, rotinas de manutenção e condições estruturais pode evidenciar padrões sistêmicos que não são perceptíveis quando se analisa apenas uma amostra reduzida de fornos.

Por fim, recomenda-se a investigação de novas tecnologias de monitoramento, como sensores adicionais de vibração, temperatura, alinhamento e pressão, bem como a implementação de sistemas de inspeção térmica e visual automatizada. A integração desses recursos à análise da corrente do êmbolo pode gerar um sistema de diagnóstico mais completo, robusto e capaz de antecipar falhas ainda incipientes. Esses avanços tendem a fortalecer o uso da corrente como indicador estratégico para otimização do desempenho dos fornos de coqueria e para a evolução das práticas de manutenção industrial.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. 7. ed. São Paulo: Atlas, 2019.
- CRESWELL, J. W. **Research Design: Qualitative, Quantitative, and Mixed Methods Approaches**. 4th. ed. Thousand Oaks, CA: SAGE Publications, 2014.
- FREIRE, P. **Educação e Mudança**. Rio de Janeiro, Brasil: Paz e Terra, 1987.
- GIL, A. C. **Métodos e Técnicas de Pesquisa Social**. 7^a. ed. São Paulo, Brasil: Atlas, 2017.
- LAKATOS, E. M.; MARCONI, M. de A. **Fundamentos de Metodologia Científica**. 8^a. ed. São Paulo, Brasil: Atlas, 2017.
- RICHARDSON, R. J. **Pesquisa Social- Métodos e Técnicas**. 4^a. ed. São Paulo, Brasil: Editora Atlas Ltda, 2017.
- SAMPIERI, R. H.; COLLADO, C. F.; LUCIO, P. **Metodologia de Pesquisa**. 5^a. ed. RS, Brasil: McGraw-Hill, 2013.
- THIOLLENT, M. **Metodologia da Pesquisa-Ação**. 18^a. ed. São Paulo, Brasil: Cortez Editora, 2011.
- SILVA, C. R. O. **Metodologia do trabalho científico**. Fortaleza: Centro Federal e Educação Tecnológica do Ceará, 2004.
- SISQUINI, Geraldo Rossoni; LUZ, Temístocles de Sousa; ALMEIDA, Jeferson Pereira de. **Análise de falha de um pino de fixação do êmbolo de uma máquina desenformadora de coque**. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 6., 2010, Campina Grande: 2010.
- HERMANN, S; KROES, J. **Energy efficiency using Induction Furnaces**: Hamar. 2010.
- RICHARDSON, R. J. **Pesquisa social: métodos e técnicas**. 3.ed. São Paulo: Atlas, 1999.
- SCHMITZ, W; TRAUZEDDEL, D. **The Melting, Holding and Pouring Process Energy and Process - Related Aspects**. World Foundry Congress, 2014.
- YIN. R. K. **Estudo de caso: planejamento e métodos**. 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2005.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatório de eficiência energética em coquerias**. 2022.
- AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Relatório de monitoramento industrial**. 2023.

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS. **Análise de parâmetros elétricos em sistemas industriais.** 2022.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE METAIS. **Relatório técnico sobre desempenho de fornos.** 2023.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE MANUTENÇÃO. **Estudos de caso em manutenção preditiva.** 2022.
- BABBIE, E. **The Practice of Social Research.** 14. ed. Belmont: Cengage, 2016.
- BRUSSELS, C. **Tecnologias avançadas em produção de coque.** 2022.
- CARVALHO, R. **Análise de desempenho em fornos de coqueria.** 2020.
- CARVALHO, R. **Inovações em sistemas de monitoramento industrial.** 2023.
- CERAMIC INDUSTRY. **Novos materiais cerâmicos para aplicações industriais.** 2022.
- COKE OVEN OPERATORS MANUAL. **Procedimentos operacionais para máquinas desenfornadoras.** 2017.
- COSTA, DELMONT, P. **Eficiência operacional em processos siderúrgicos.** 2003.
- ELECTRICAL ENGINEERING HANDBOOK. **Princípios eletromecânicos aplicados a sistemas industriais.** 2019.J. R. Processos de enfornamento e desenfornamento de coque. 2008.
- FERNANDES, A. **Processo de coqueificação: fundamentos e aplicações.** 2019.
- FERNANDES, A. **Modelagem matemática para otimização energética.** 2023.
- FLUKE CORPORATION. **Precisão em medições de corrente industrial.** 2022.
- FOSECO. **Sistemas de lubrificação automatizada para coquerias.** 2021.
- GHOSH, A.; CHATTERJEE, S. **Coke Production and Quality Control.** Londres: Elsevier, 2008.
- GHOSH, A.; CHATTERJEE, S. **Avanços em tecnologia de coqueificação.** 2022.
- INSTITUTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA. **Proteção diferencial em sistemas de alta potência.** 2022.
- INSTITUTO DE PESQUISAS METALÚRGICAS. **Materiais compósitos para placas de êmbolo.** 2022.

- INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Relação entre qualidade do coque e demanda elétrica.** 2023.
- INTERNATIONAL COKING COAL CONFERENCE. **Materiais avançados para componentes de êmbolo.** 2021.
- INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION. **Parâmetros elétricos em máquinas desenfornadoras.** 2021.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Eficiência térmica em fornos industriais.** 2020.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. ISO 12100:2010: **Segurança de máquinas.** 2010.
- JOHNSON, M. et al. **Impacto da qualidade do coque na vida útil de componentes.** 2019.
- JOHNSON, M. **Aquecimento de componentes em sistemas elétricos industriais.** 2021.
- JOHNSON, M. **Modelos não-lineares para controle industrial.** 2023.
- LIMA, R. **Proteção diferencial em circuitos de potência.** 2023.
- MAXWELL TECHNOLOGIES. **Sistemas de armazenamento de energia cinética.** 2021.
- MCEWAN, T. **Operação de motores em máquinas desenfornadoras.** 2023.
- IMITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES. **Controle adaptativo para êmbolos.** 2022.
- MÜLLER, K. **Indicadores integrados de desempenho em coquerias.** 2023.
- MUNICH, S. **Análise de sistemas elétricos em desenfornamento.** 2023.
- NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION. **Normas de segurança para equipamentos em alta temperatura.** 2020.
- NATIONAL INSTRUMENTS. **Monitoramento de assinaturas elétricas.** 2021.
- OLIVEIRA, L. **Parâmetros operacionais em fornos de coqueria.** 2008.
- OLIVEIRA, L. **Máquinas desenfornadoras: funcionamento e manutenção.** 2021.
- OLIVEIRA, L. **Sistemas de monitoramento de corrente de alta resolução.** 2023.
- PARKER HANNIFIN. **Tecnologia hidráulica para sistemas de êmbolo.** 2020.
- PATEL, S.; GONÇALVES, G. **Eficiência energética em sistemas forno-desenfornador.** 2023.

- REIS, F. **Modelos estruturais de coquerias.** 2023.
- RIBEIRO, A. **Recuperação de energia em sistemas desenfornadores.** 2023.
- ROCHA, P. **Produção de coque em siderurgia.** 1993.
- ROCKWELL AUTOMATION. **Proteção elétrica para motores industriais.** 2020.
- ROCKWELL AUTOMATION. **Algoritmos de proteção elétrica avançada.** 2023.
- SANTOS, C. **Influência de parâmetros termoquímicos no coque.** 2023.
- SANTOS NETO, J. **Manutenção preditiva em processos industriais.** 2018.
- SCHNEIDER ELECTRIC. **Otimização energética em sistemas elétricos.** 2022.
- SIEMENS INDUSTRY. **Monitoramento em tempo real para êmbolos.** 2019.
- SIEMENS PROCESS INDUSTRY. **Carga elétrica em sistemas de extração de coque.** 2020.
- SKF ENGINEERING. **Técnicas de manutenção preditiva.** 2021.
- SOCIEDADE DE ENGENHEIROS DE POTÊNCIA. **Dissipação térmica em componentes elétricos.** 2022.
- SOUZA, L. **Sistemas de controle adaptativo baseados em IA.** 2023.
- STILLE, H. **Componentes críticos em máquinas desenfornadoras.** 2015.
- VERGARA, S. C. **Projetos e relatórios de pesquisa em administração.** 16. ed. São Paulo: Atlas, 2016.
- WEG ELECTRIC. **Conversores de frequência para eficiência energética.** 2021.
- WORLD STEEL ASSOCIATION. **Plasticidade do carvão durante a coqueificação.** 2022.