

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

**MODIFICAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE GÁS
NO FORNO DE RECOZIMENTO**

**DOUGLAS DE SOUSA ARAUJO COTA
ÉERICA NASCIMENTO SOUZA**

PINDAMONHANGABA - SP

2025

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

**MODIFICAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE GÁS
NO FORNO DE RECOZIMENTO**

**DOUGLAS DE SOUSA ARAUJO COTA
ÉERICA NASCIMENTO SOUZA**

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba para
graduação no Curso Superior de Tecnologia
em Manutenção Industrial.

Orientador: Prof. Me. Amir Rivaroli Júnior.

PINDAMONHANGABA – SP

2025

C843m Cota, Douglas de Sousa Araujo.
Modificação do sistema de alimentação de gás no forno de recozimento / Douglas de Sousa Araujo Cota; Érica Nascimento Souza / FATEC Pindamonhangaba, 2025.
50f.; il.

Orientador: Professor Me. Amir Rivaroli Junior
Monografia (Graduação) – FATEC – Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. 2025

1. Forno industrial. 2. Manutenção preventiva. 3. Confiabilidade operacional. 4. Eficiência energética. 5. Segurança industrial. I. Cota, Douglas de Sousa Araujo. II. Souza, Érica Nascimento. III. Rivaroli Junior, Amir. IV. Título.

CDD 662

FACULDADE DE TECNOLOGIA DE PINDAMONHANGABA

MODIFICAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE GÁS NO FORNO DE RECOZIMENTO

Douglas de Sousa Araujo Cota
Erica Nascimento Souza

Monografia apresentada à Faculdade de
Tecnologia de Pindamonhangaba, para
graduação no Curso Superior de
Tecnologia em Manutenção Industrial.

Comissão Examinadora



Orientador – Prof. Me. Amir Rivaroli Junior



Membro – Prof. Me. Marcelo Bergamini de Carvalho



Membro – Eng. João Florentino Meira de Vasconcellos Neto

Pindamonhangaba, 11 de dezembro de 2025.

DEDICATÓRIA

Douglas de Sousa Araujo Cota

Dedico este trabalho à minha esposa Gislaíne de Jesus Araujo Cota, seu apoio foi essencial para que eu mantivesse a fé e a determinação ao longo desta jornada.

Aos meus filhos, Gabriel de Jesus e Isabely de Jesus que são a razão do meu maior empenho e a inspiração diária para buscar sempre o melhor. Que este trabalho sirva como exemplo de que o esforço e a dedicação são caminhos certos para a realização dos nossos sonhos.

E aos meus pais Joao Araujo Cota e Maria Julia de Sousa Cota, por todo amor, ensinamentos e valores transmitidos, que moldaram o ser humano e o profissional que hoje me tornei. Este êxito também pertence a vocês.

E por fim ao Professor Amir Rivaroli Junior, que ao longo dessa jornada, sempre esteve comigo, me orientando e mostrando os caminhos para o sucesso desse trabalho.

Erica Nascimento Souza

A Deus, pela força, sabedoria e perseverança concedidas durante toda esta caminhada acadêmica.

Aos meus pais, Cícero Soares do Nascimento e Ricardo Nério de Sousa, pelo amor incondicional, pelos ensinamentos e por todo o apoio em cada etapa desta jornada. Vocês sempre acreditaram em mim e me inspiraram a seguir em frente, mesmo diante das dificuldades.

A todos os meus colegas de curso, pela parceria, amizade e colaboração ao longo desses anos. Cada troca de experiência, cada incentivo e cada momento compartilhado contribuiu de forma significativa para o meu crescimento pessoal e profissional.

E, por fim, ao Professor Amir Rivaroli Junior, meu orientador, pela dedicação, paciência e valiosa orientação durante o desenvolvimento deste trabalho. Seu apoio, conhecimento e incentivo foram fundamentais para a conclusão e o sucesso deste projeto.

AGRADECIMENTOS

Douglas de Sousa Araujo Cota

Agradeço primeiramente a Deus, pela oportunidade de chegar até aqui com saúde, sabedoria e coragem para enfrentar cada desafio desta jornada.

À minha família, pelo apoio incondicional, paciência e compreensão durante os períodos de ausência dedicados aos estudos. Sem esse alicerce, este trabalho não seria possível.

Aos professores, pela dedicação e por compartilharem seus conhecimentos de forma inspiradora, contribuindo significativamente para o meu crescimento pessoal e profissional.

Erica Nascimento Souza

Agradeço aos meus amigos, pelo companheirismo, apoio e pelas palavras de incentivo nos momentos de desafio e superação ao longo desta caminhada acadêmica.

Ao professor Amir Rivaroli Junior, pela orientação, dedicação e contribuição essencial para o desenvolvimento deste trabalho. Sua experiência, paciência e comprometimento foram fundamentais para a construção deste aprendizado.

*“Cada melhoria em um processo é uma
faísca que acende o motor da inovação.”
— Peter Drucker (adaptado)”*

COTA, D. S. A.; SOUZA, E. N. Modificação no sistema de alimentação de Gás Forno de Recozimento visando a melhoria no desempenho operacional 2024. 50p. Trabalho de Graduação (Curso de Manutenção Industrial). Faculdade de Tecnologia de Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2025.

RESUMO

Este estudo apresenta a análise técnica e operacional das modificações realizadas no sistema de alimentação de gás de um forno industrial de recozimento, com o objetivo de elevar a confiabilidade, segurança e eficiência energética do equipamento. A pesquisa partiu da identificação de falhas recorrentes, como vazamentos na linha de gás, desgaste das mantas refratárias e ineficiência dos sistemas de purga e vedação. A metodologia adotada baseou-se em diagnósticos técnicos prévios, inspeções visuais e registros gráficos, que orientaram a execução de intervenções planejadas durante uma parada técnica programada de dez dias. As ações incluíram a substituição da tubulação interna por uma nova linha externa flangeada, a reforma integral das mantas refratárias e a modernização dos sistemas de vedação e purga.

Os resultados obtidos evidenciaram ganhos expressivos em desempenho térmico, estabilidade estrutural e segurança operacional, além de redução de perdas energéticas e tempo de parada. A nova configuração da linha de gás eliminou vulnerabilidades associadas a vazamentos e simplificou as rotinas de manutenção, enquanto o novo isolamento refratário melhorou a uniformidade de temperatura e aumentou a durabilidade do conjunto. Conclui-se que a integração entre manutenção preventiva, engenharia de confiabilidade e segurança industrial constitui um fator decisivo para o desempenho sustentável de sistemas térmicos complexos. O estudo reforça a importância das intervenções planejadas como estratégia de modernização e gestão eficiente de ativos industriais.

Palavras-chave: Forno industrial; manutenção preventiva; confiabilidade operacional; eficiência energética; segurança industrial.

COTA, D. S. A.; SOUZA, E. N. Modification to the Annealing Furnace Gas Supply System to improve operational performance 2024. 50 pages. Undergraduate Thesis (Industrial Maintenance Program). Faculty of Technology of Pindamonhangaba. Pindamonhangaba. 2025.

ABSTRACT

This study presents a technical and operational analysis of the modifications implemented in the gas supply system of an industrial annealing furnace, aiming to improve the equipment's reliability, safety, and energy efficiency. The research began with the identification of recurrent failures, such as gas line leaks, refractory lining wear, and inefficiencies in the purging and sealing systems. The adopted methodology was based on technical diagnostics, visual inspections, and graphical records, which guided the execution of planned interventions during a ten-day scheduled maintenance shutdown. The actions included replacing the internal gas piping with a new external flanged line, performing a complete refurbishment of the refractory lining, and modernizing the sealing and purging systems. The results demonstrated significant improvements in thermal performance, structural stability, and operational safety, as well as a reduction in energy losses and downtime. The new gas line configuration eliminated vulnerabilities associated with leaks and simplified maintenance routines, while the renewed refractory insulation enhanced temperature uniformity and increased the durability of the system. It is concluded that the integration between preventive maintenance, reliability engineering, and industrial safety is decisive for achieving sustainable performance in complex thermal systems. The study reinforces the importance of planned interventions as a modernization strategy and an effective approach to industrial asset management.

Keywords: Industrial furnace; preventive maintenance; operational reliability; energy efficiency; industrial safety.

LISTA DE ABREVIATURAS DE SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

CA – Câmara de Aquecimento

MEG – Manutenção Eletromecânica Geral

NR – Norma Regulamentadora

OIT – Organização Internacional do Trabalho

PCP – Planejamento e Controle da Produção

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fatores técnicos que contribuem para eficiência energética em fornos industriais.....	22
Figura 2 - Fluxograma .do Sistema Integrado de Segurança Industrial.....	24
Figura 3 – Entrada antiga de gás no forno.....	29
Figura 4 – Local de purga (indicado por seta verde)	31
Figura 5 – Corte do interior do forno.....	33
Figura 6 – Gaxeta trançada.....	35
Figura 7 - Linha de gás.....	35
Figura 8 – Entrada antiga de gás no forno.....	36
Figura 9 – Tubulações Após modificação (visão 1)	38
Figura 10 – Tubulações Após modificação (visão 2)	39
Figura 11 – Manta para reforma – Forno sem teto	41
Figura 12 – Travas de fixação interna das mantas (visão 1 e 2)	43
Figura 13 – Travas de fixação interna das mantas (visão 3 e 4)	44

LISTA DE QUADRO

Quadro 1 – Fatores técnicos que influenciam a confiabilidade operacional em fornos industriais.....	20
Quadro 2 – Ações de manutenção preventiva e seus impactos no desempenho do forno industrial.....	26

SUMÁRIO

1 – INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Problema	155
1.2 Objetivos	155
1.2.1 - Objetivos Geral.....	155
1.2.2 Objetivos Específicos.....	15
1.3 Justificativa.....	15
2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Confiabilidade operacional.....	18
2.2 Eficiência energética.....	20
2.3 Segurança industrial.....	22
2.4 Manutenção preventiva.....	25
3 - METODOLOGIA.....	27
3.1 Diagnóstico inicial.....	27
3.2 Planejamento e execução das operações.....	27
3.3 Avaliação após intervenção.....	27
3.4 Consolidação dos resultados.....	27
4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	28
4.1 Situação inicial antes da modificação.....	28
4.2 Sistema de purga.....	30
4.3 Visão interna do forno (versão revisada e final)	32
4.4 Visão Interna do forno (continuação revisada e aprimorada)	33
4.5 Sistema de vedação.....	34
4.6 Modificação da linha de gás – nova instalação.....	37
4.7 Parada programada.....	40
4.8 Reformas das mantas refratária.....	42
4.9 Discussões finais.....	45
5 - CONCLUSÃO.....	47
REFERENCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

A alimentação de gás em fornos de recozimento representa um ponto crítico para o desempenho térmico e a segurança operacional, pois influencia diretamente o controle da atmosfera interna e, conseqüentemente, a qualidade do produto. Modificações nesse sistema, quando fundamentadas em critérios técnicos, têm o potencial de elevar a confiabilidade da operação, reduzir riscos associados a vazamentos e aprimorar a eficiência energética do processo (GAMA, 2023). Nesse contexto, o estudo da modernização da infraestrutura de alimentação de gás em fornos industriais torna-se relevante, especialmente em ambientes produtivos de alta exigência.

Uma das soluções amplamente adotadas na literatura e na prática industrial consiste na substituição de linhas internas antigas por tubulações externas flangeadas. Essa alteração elimina pontos críticos de risco e amplia a segurança e a confiabilidade do sistema. Além disso, a configuração modular facilita inspeções e intervenções de manutenção, reduzindo o tempo de parada e contribuindo para ganhos de produtividade (FRAGOSO, 2019). Assim, a proposta vai além da simples troca de componentes, caracterizando-se como uma ação de engenharia que integra segurança, eficiência e modernização de processos.

No caso estudado, a modificação da alimentação de gás foi realizada durante uma parada técnica programada, planejada conforme os princípios da engenharia de confiabilidade. As intervenções incluíram o redesenho completo do trajeto das tubulações, agora instaladas de forma externa e flangeada, bem como o aprimoramento dos sistemas de vedação, essenciais para prevenir vazamentos.

Adicionalmente, a integração entre os sistemas de alimentação e purga possibilitou otimizar a expulsão de gases residuais, diminuindo os riscos de combustão indesejada em situações de manutenção ou partida do forno (PINHO, 2019; BASTOS, 2023). Essas medidas evidenciam como ações estruturadas e baseadas em diagnóstico técnico contribuem para aumentar a estabilidade e a segurança do equipamento.

De forma mais ampla, observa-se que intervenções planejadas em sistemas térmicos, quando fundamentadas em análises consistentes, resultam em benefícios que extrapolam a simples prevenção de falhas. Entre os principais ganhos destacam-se a redução das perdas energéticas, a maior previsibilidade do desempenho operacional e o fortalecimento da segurança de trabalhadores e ativos

industriais (RESCH, 2021; CARVALHO, 2022). Nesse sentido, a engenharia de manutenção assume papel estratégico na gestão de processos industriais complexos, consolidando-se como instrumento essencial para a longevidade dos equipamentos e a competitividade das operações.

1.1 Problema

O sistema de alimentação de gás do forno de recozimento apresentava falhas recorrentes, como vazamentos, baixa eficiência térmica e desgaste prematuro de componentes, comprometendo a segurança e a estabilidade operacional do processo. Essas limitações evidenciaram a necessidade de intervenções estruturais e de modernização do sistema.

Diante disso, surge a seguinte questão: de que forma as modificações na linha de alimentação de gás e nos sistemas de vedação e purga podem contribuir para o aumento da confiabilidade, da segurança e da eficiência operacional do forno industrial?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar os impactos operacionais, técnicos e estruturais das intervenções realizadas em um forno industrial, evidenciando os ganhos de confiabilidade, eficiência energética, segurança e manutenção após as modificações implementadas.

1.2.2 Objetivos Específicos

- a) Identificar os principais problemas estruturais e operacionais do forno antes das intervenções.
- b) Descrever as modificações técnicas aplicadas, incluindo a reforma das mantas refratárias, reconfiguração da linha de gás e melhorias no sistema de vedação.
- c) Avaliar, com base em dados comparativos, os resultados pós-manutenção, considerando os ganhos em desempenho, segurança e durabilidade.

1.3 Justificativa

O estudo proposto se justifica pela necessidade de aprimorar a confiabilidade e

a eficiência de equipamentos industriais de alta criticidade. O forno analisado apresentava falhas recorrentes em sua configuração original, como vazamentos na linha de gás, desgaste das mantas refratárias e ineficiência nos sistemas de vedação e purga, fatores que comprometiam a segurança operacional e elevavam os custos de manutenção. As intervenções realizadas, incluindo a substituição da linha de gás por uma configuração mais segura, a reforma das mantas refratárias e a melhoria dos sistemas de vedação e purga, proporcionaram ganhos técnicos e operacionais expressivos, como maior estabilidade térmica, redução de riscos de acidentes e aumento da eficiência energética.

Dessa forma, o trabalho mostra-se relevante por demonstrar que intervenções técnicas planejadas podem não apenas solucionar falhas imediatas, mas também ampliar a vida útil do sistema, reduzir custos futuros e fortalecer a confiabilidade do processo produtivo. Além disso, os resultados obtidos contribuem para o aprimoramento das estratégias de manutenção e para a consolidação de uma cultura de melhoria contínua na gestão de ativos industriais, tornando este estudo aplicável a diferentes contextos produtivos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A presente pesquisa aborda as intervenções técnicas realizadas em um forno industrial, com o objetivo de otimizar seu desempenho, aumentar a segurança operacional e reduzir falhas recorrentes. As ações executadas foram fundamentadas em premissas amplamente reconhecidas na engenharia industrial, assegurando uma abordagem estruturada, eficiente e alinhada às boas práticas de manutenção e confiabilidade. A seguir, são apresentados os principais conceitos que sustentam teoricamente este estudo.

A fundamentação teórica desta pesquisa está ancorada em quatro premissas interdependentes e essenciais à gestão e ao desempenho de sistemas industriais: confiabilidade operacional, eficiência energética, segurança industrial e manutenção preventiva.

A confiabilidade operacional refere-se à capacidade dos equipamentos de manterem o desempenho estável e previsível, minimizando a ocorrência de falhas e interrupções inesperadas. Segundo o National Research Council (1992), a confiabilidade está diretamente relacionada à disponibilidade dos ativos e à capacidade de prever e mitigar falhas, constituindo um dos pilares da engenharia de manutenção moderna.

A eficiência energética, por sua vez, está associada à redução de desperdícios e à otimização do consumo de energia durante os processos produtivos. Estudos recentes, como o de Alsyouf (2019), apontam que estratégias de manutenção orientadas à eficiência energética podem gerar ganhos significativos de desempenho, ao integrar práticas de inspeção e controle de consumo aos sistemas de gestão industrial.

A segurança industrial representa outro eixo essencial do desempenho organizacional, pois visa à integridade física dos trabalhadores e à preservação dos equipamentos e do meio ambiente. De acordo com a Organização Internacional do Trabalho (OIT, 2020), a gestão preventiva de riscos e a implementação de medidas de segurança são fundamentais para a sustentabilidade operacional e para a redução de acidentes em ambientes industriais.

Por fim, a manutenção preventiva baseia-se na antecipação de falhas por meio de inspeções sistemáticas, diagnósticos técnicos e ações programadas, conforme reforça Mobley (2002). Essa prática possibilita a redução de custos não planejados,

o aumento da vida útil dos equipamentos e a melhora da disponibilidade operacional dos ativos industriais.

Esses quatro pilares, confiabilidade, eficiência energética, segurança e manutenção preventiva atuam de forma integrada, fornecendo o embasamento conceitual das decisões adotadas neste estudo. Assim, a pesquisa se fundamenta em princípios técnicos consolidados e voltados à melhoria contínua, sustentabilidade e desempenho global dos sistemas industriais.

2.1 Confiabilidade operacional

A confiabilidade operacional, enquanto atributo essencial da engenharia industrial constitui um dos pilares da eficiência produtiva e da segurança técnica em sistemas térmicos complexos, como os fornos industriais. Sua relevância vai além da simples continuidade do funcionamento, abrangendo aspectos como mitigação de riscos, redução de falhas recorrentes e previsibilidade das operações. Intervenções planejadas e tecnicamente fundamentadas, como as analisadas neste estudo, demonstram que a confiabilidade é construída a partir da eliminação de vulnerabilidades estruturais e da padronização de processos operacionais (BASTOS, 2023).

No contexto do presente estudo, a substituição da antiga linha de gás representou uma ação decisiva para o aumento da confiabilidade do sistema térmico. A configuração anterior apresentava trincas e vazamentos que comprometiam a integridade do equipamento e representavam riscos constantes à segurança dos operadores. Além disso, as manutenções exigiam longos períodos de parada e purgas demoradas, elevando os custos operacionais e reduzindo a disponibilidade do forno.

Com a adoção da nova tubulação externa e flangeada, essas limitações foram eliminadas, permitindo intervenções mais rápidas, seguras e com menor impacto produtivo. Essa reconfiguração exemplifica como a confiabilidade operacional se fortalece não apenas pela redução de falhas, mas também pela otimização dos tempos de resposta e da estabilidade térmica e funcional. Segundo Fernandes (2020), ações voltadas à integridade de linhas de condução de gás e ao controle de atmosferas inflamáveis têm efeito direto sobre a confiabilidade, sobretudo em sistemas cuja disponibilidade produtiva é fator crítico de desempenho.

Outro elemento determinante está na reforma das mantas refratárias,

responsáveis pelo isolamento térmico do forno. O desgaste natural desses materiais, típico em ambientes de alta temperatura, gera perda de eficiência energética, risco de sobreaquecimento e degradação da estrutura metálica. A substituição integral das mantas, aliada à utilização de travas metálicas de fixação e ao preparo adequado da superfície, aumentou significativamente o desempenho térmico e reforçou a confiabilidade estrutural do equipamento. Carvalho (2022) destaca que o comprometimento do isolamento refratário em fornos de reaquecimento pode afetar não apenas a eficiência energética, mas também a qualidade do produto. Assim, intervenções completas e planejadas restabelecem a integridade do sistema de isolamento e asseguram estabilidade térmica e operacional em longo prazo, consolidando a confiabilidade como resultado direto da manutenção preventiva.

Além das melhorias estruturais, o replanejamento dos sistemas de purga e vedação trouxe ganhos expressivos em segurança e desempenho confiável. A remoção dos antigos pontos de purga e a instalação de novas gaxetas trançadas de maior resistência térmica reduziram significativamente o risco de vazamentos e melhoraram o controle da atmosfera interna. Ávila (2021) observa que a confiabilidade em sistemas que operam com gases combustíveis depende de vedação hermética e de eliminação segura de resíduos inflamáveis antes de qualquer intervenção. Essa visão é corroborada por Bastos (2023), que defende a necessidade de soluções integradas entre vedação, segurança e manutenção preditiva, visando maximizar a disponibilidade e reduzir falhas.

Portanto, a confiabilidade operacional não deve ser entendida como um atributo isolado, mas como resultado sistêmico de múltiplas ações técnicas e gerenciais coordenadas. A substituição da linha de gás, a reforma das mantas refratárias e a reconfiguração dos sistemas de purga e vedação demonstram que a confiabilidade é obtida quando decisões de engenharia são embasadas em critérios técnicos sólidos e integradas às estratégias de manutenção preventiva. Conforme Carvalhido (2019), a confiabilidade deve ser encarada simultaneamente como um objetivo de projeto e um indicador de desempenho contínuo, principalmente em ambientes industriais de alta criticidade, onde a estabilidade operacional define a competitividade do processo produtivo.

A análise teórica realizada permitiu identificar os principais fatores que influenciam a confiabilidade operacional em sistemas térmicos industriais. Esses fatores estão diretamente relacionados à integridade estrutural, à eficiência

energética, à segurança operacional e às práticas de manutenção preventiva. A integração entre esses elementos constitui a base para a estabilidade e o desempenho sustentável dos fornos industriais.

O Quadro 1 apresenta uma síntese dos fatores determinantes da confiabilidade, suas descrições técnicas, ações recomendadas e os resultados esperados a partir da aplicação de práticas de engenharia adequadas.

Quadro 1 – Fatores técnicos que influenciam a confiabilidade operacional em fornos industriais

Fator determinante	Descrição técnica	Ação recomendada	Resultados esperados
Integridade das linhas de gás	A integridade das linhas é essencial para evitar vazamentos e instabilidades na alimentação do sistema de queima, garantindo o fluxo contínuo e seguro do combustível.	Realizar inspeções periódicas, testes de estanqueidade e substituir linhas internas por tubulações externas flangeadas e de fácil manutenção.	Redução de vazamentos, maior segurança operacional e aumento da confiabilidade do fornecimento de gás.
Isolamento refratário	Responsável por reter o calor no interior da câmara e proteger a estrutura metálica contra sobreaquecimento. Seu desgaste compromete a eficiência energética e a durabilidade do forno.	Efetuar substituição integral das mantas refratárias deterioradas, com fixação mecânica por travas metálicas e preparo adequado da superfície antes da instalação.	Melhoria na estabilidade térmica, aumento da eficiência energética e prolongamento da vida útil do equipamento.
Sistema de purga e vedação	Controla a presença de gases residuais e evita vazamentos durante as operações de aquecimento e manutenção. Uma vedação inadequada eleva o risco de explosão e falhas térmicas.	Reorganizar as rotas de purga e substituir gaxetas trançadas antigas por modelos de maior resistência térmica e vedação hermética.	Redução de riscos de combustão acidental, melhoria no controle da atmosfera interna e aumento da segurança operacional.
Planejamento de manutenção	O planejamento das ações preventivas e preditivas é decisivo para antecipar falhas e garantir a disponibilidade operacional do sistema.	Implementar rotinas de manutenção preventiva, acompanhamento por indicadores de desempenho e uso de técnicas de confiabilidade (RCA, FMEA, RCM).	Aumento da confiabilidade global, redução de paradas não programadas e otimização dos custos de manutenção.

Fonte: Adaptado de CARVALHIDO (2019), ÁVILA (2021) e BASTOS (2023).

2.2 – Eficiência Energética

A eficiência energética, no contexto industrial, constitui um dos principais indicadores de desempenho e sustentabilidade em processos térmicos. Representa a capacidade de um sistema executar suas operações com o menor consumo possível de energia, sem comprometer a qualidade, a estabilidade ou a segurança do processo produtivo. A busca por essa eficiência envolve a eliminação de desperdícios, a otimização dos recursos energéticos e o aproveitamento máximo do calor gerado durante o ciclo operacional. No presente estudo, as intervenções

implementadas foram direcionadas à redução de perdas térmicas e vazamentos, promovendo o uso racional do gás combustível e contribuindo para um processo mais estável e econômico (GANDRA, 2019).

A reforma das mantas refratárias destacou-se como um dos principais elementos responsáveis pela elevação da eficiência energética do forno analisado. Essas mantas exercem função essencial no isolamento térmico, evitando a dissipação de calor para o ambiente externo e mantendo o equilíbrio térmico interno. Com o passar do tempo, o desgaste natural das mantas compromete o isolamento, levando a um aumento do consumo energético necessário para atingir e manter as temperaturas de operação.

A substituição integral das mantas, realizada com materiais de maior resistência térmica e técnica de fixação adequada, melhorou a retenção de calor e reduziu significativamente a demanda energética. De acordo com Fujita (2019), a eficiência térmica de sistemas industriais depende diretamente da integridade dos materiais isolantes, cuja manutenção adequada prolonga a vida útil do equipamento e aumenta a estabilidade operacional.

Outro fator determinante foi a substituição da antiga linha de gás por uma nova tubulação externa e isenta de vazamentos. Vazamentos de combustível, além de representarem riscos à segurança, configuram perdas energéticas diretas, comprometendo o desempenho do sistema. A antiga configuração apresentava falhas de vedação, trincas e conexões deterioradas, que resultavam em desperdício de gás e redução da eficiência da queima. Com a nova instalação, redesenhada para operar externamente, utilizando materiais de alta resistência e flanges de fácil manutenção, foi possível eliminar os pontos críticos e estabilizar o fluxo de gás combustível. Segundo Lima (2022), o controle rigoroso do fornecimento energético, especialmente em fornos de alta temperatura, é um dos vetores mais influentes na eficiência do processo térmico. A nova configuração também otimizou o tempo de manutenção, reduziu as paradas não programadas e garantiu o desempenho energético ideal do equipamento.

A melhoria do sistema de vedação também exerceu papel decisivo no ganho de eficiência energética. Vedações desgastadas permitem a entrada de ar frio e o escape de calor, alterando o equilíbrio térmico e aumentando o consumo de energia. A substituição da antiga gaxeta trançada por novos componentes de vedação de maior resistência térmica e estanqueidade resultou em um sistema mais hermético e

eficiente. De acordo com Gama (2023), a estanqueidade é um dos fatores mais críticos para a eficiência de sistemas térmicos, pois vazamentos, ainda que mínimos, exigem compensações energéticas e afetam o controle da atmosfera interna. Além disso, Fragoso (2019) destaca que o controle do ambiente reacional em processos de combustão é essencial para o aproveitamento térmico e para o desempenho de combustíveis alternativos, reforçando a importância de uma vedação eficiente.

Em síntese, a eficiência energética em sistemas térmicos complexos depende da integração de múltiplas ações técnicas, voltadas à redução de perdas e ao uso racional de insumos energéticos. As medidas implementadas como reforma das mantas refratárias, substituição da linha de gás e modernização das vedações demonstra como a aplicação de critérios técnicos adequados pode gerar ganhos expressivos de desempenho e economia de energia. Conforme reforça Gandra (2019), a eficiência energética é o resultado mensurável da integração entre engenharia, manutenção e operação, consolidando-se como um indicador de maturidade industrial e de sustentabilidade produtiva. A Figura 1 demonstra os fatores técnicos que contribuem para a eficiência energética em fornos industriais

Figura 1 – Fatores técnicos que contribuem para eficiência energética em fornos industriais



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

2.3 – Segurança Industrial

A segurança industrial constitui um dos pilares fundamentais da gestão de processos produtivos, especialmente em ambientes de alto risco, como os que envolvem operações térmicas com gases combustíveis. Trata-se de um conjunto de medidas técnicas, organizacionais e comportamentais voltadas à prevenção de acidentes, à proteção de vidas humanas e à preservação das instalações industriais. No presente estudo, as intervenções executadas tiveram como foco não apenas a

melhoria da performance operacional, mas também a mitigação de riscos associados ao acúmulo e vazamento de gases, assegurando a integridade dos trabalhadores e dos equipamentos (PINHO, 2019).

Um dos principais avanços obtidos foi a remoção da linha de gás instalada no interior da estrutura do forno. A antiga configuração representava um risco significativo de ignição acidental, uma vez que qualquer vazamento em área confinada poderia resultar no acúmulo de gases inflamáveis e gerar explosões em zonas quentes de difícil acesso. A substituição por uma nova linha externa e acessível, construída com materiais resistentes à corrosão e ao calor, proporcionou maior confiabilidade operacional e segurança nas intervenções de manutenção. Segundo Resch (2021), a disposição física dos sistemas que transportam combustíveis deve priorizar a acessibilidade, a estanqueidade e o controle automatizado, reduzindo a exposição humana a riscos e erros operacionais. Essa adequação evidencia a importância da integração entre engenharia e segurança na concepção e modernização de equipamentos industriais.

Outro aspecto de destaque foi a reconfiguração do sistema de purga, cuja eficiência é determinante para a segurança em fornos industriais. O sistema anterior apresentava baixa capacidade de exaustão, o que favorecia a formação de zonas de estagnação com gases inflamáveis, principalmente após paradas não programadas.

Com a nova configuração, foi implantado um sistema de purga mais potente e distribuído, capaz de realizar a renovação completa da atmosfera interna em tempo reduzido, eliminando concentrações perigosas antes do reinício das operações. De acordo com Molina (2020), processos industriais que envolvem combustão exigem estratégias ativas de ventilação e exaustão, especialmente durante partidas e desligamentos, quando o risco de explosão é mais acentuado. Assim, o novo sistema de purga atua como elemento central de segurança operacional, reduzindo drasticamente a probabilidade de acidentes e garantindo condições seguras de trabalho.

A modernização do sistema de vedação também desempenhou papel decisivo na mitigação de riscos. As antigas vedações apresentavam pequenas perdas contínuas de gás combustíveis, muitas vezes imperceptíveis, mas potencialmente perigosas em ambientes de ventilação limitada. A adoção de novos componentes de vedação, produzidos com materiais mais duráveis e sistemas de compressão reforçados, assegurou o confinamento hermético dos gases utilizados no processo

térmico. Segundo Magalhães Sobrinho (2024), a contenção adequada de substâncias voláteis é um dos fatores determinantes para a prevenção de acidentes em processos de alta temperatura. Neuberger (2020) complementa que a identificação e eliminação de fontes ocultas de emissão devem ser parte integrante das políticas de segurança e gestão ambiental. Dessa forma, a segurança foi aprimorada não apenas por medidas corretivas, mas por intervenções de engenharia preventiva, alinhadas a uma visão sistêmica de gestão de risco.

Conclui-se que a segurança industrial deve ser compreendida como elemento central no planejamento e operação de sistemas térmicos. A ação executada de remoções da linha de gás interna, aprimoramento do sistema de purga e modernização das vedações, exemplifica como decisões técnicas fundamentadas em princípios de engenharia e prevenção podem reduzir significativamente os riscos operacionais.

Conforme destacam Pinho (2019) e Molina (2020), uma gestão de segurança eficaz é resultado da integração entre prevenção, acessibilidade e controle operacional, assegurando ambientes produtivos mais seguros, sustentáveis e confiáveis.

Para melhor compreensão das interações entre os elementos que compõem o sistema de segurança do forno industrial, foi criado um fluxograma conforme demonstrado na figura 2, representando a integração entre a linha de gás, o sistema de purga e o sistema de vedação.

Figura 2 - Fluxograma do Sistema Integrado de Segurança Industrial



Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em Resch (2021), Molina (2020) e Magalhães Sobrinho (2024).

2.4 – Manutenção preventiva

A manutenção preventiva e a engenharia de confiabilidade constituem abordagens essenciais para assegurar a longevidade, segurança e eficiência de equipamentos industriais. Fundamentadas na antecipação de falhas e na análise técnica contínua, essas práticas evitam que os sistemas operem em condições críticas ou atinjam estados de falha. No caso analisado, a adoção de ações planejadas, como inspeções prévias, substituições programadas e reformas estruturais baseadas em diagnósticos técnicos, demonstra uma gestão orientada à prevenção e ao aprimoramento do desempenho operacional (ROCCA, 2022).

A reforma da manta refratária, realizada durante uma parada técnica programada de dez dias, exemplifica uma intervenção pautada em indicadores de desgaste observados ao longo do uso contínuo do forno. Essa decisão estratégica, respaldada por inspeções anteriores e análises de perdas térmicas, permitiu o restabelecimento do isolamento térmico sem comprometer a integridade estrutural do equipamento.

Como destaca Silva (2024), a previsibilidade dos pontos de falha e a execução de paradas programadas são pilares da manutenção preventiva eficaz, pois evitam danos colaterais, paradas emergenciais e riscos à segurança operacional. Assim, a substituição da manta não apenas restaurou a eficiência térmica, mas também evitou a degradação de componentes adjacentes, evidenciando que decisões preventivas reduzem custos e aumentam a confiabilidade no médio e longo prazo.

A engenharia de confiabilidade também foi aplicada na inspeção interna do forno, conduzida com base em cortes técnicos planejados que revelaram áreas críticas de desgaste antes invisíveis a uma análise superficial. O uso de métodos estruturados para mapear a degradação e identificar pontos de falha iminente reflete uma maturidade na gestão de ativos industriais. Conforme afirma Tiba (2021), a confiabilidade deve ser construída a partir de dados concretos, testes periódicos e avaliações sistemáticas, permitindo uma abordagem proativa e baseada em evidências. Essa prática possibilitou ações corretivas pontuais, evitando intervenções emergenciais e assegurando o cumprimento dos prazos produtivos.

Outro exemplo de ação preventiva foi a substituição programada da gaxeta trançada, componente essencial para a vedação térmica e mecânica em regiões sujeitas a expansão e vibração. A troca não ocorreu por falha iminente, mas a partir de monitoramentos anteriores que indicaram queda gradual de desempenho e risco

potencial de comprometimento da vedação. Essa atitude preventiva reflete maturidade técnica e foco em confiabilidade, evitando que falhas pequenas evoluam para problemas sistêmicos. Segundo Resende (2023), componentes de vedação e isolamento térmico devem ser prioritários nas estratégias de manutenção preventiva, pois seu desgaste progressivo pode gerar falhas em cadeia e elevação dos custos operacionais. Complementarmente, Vieira Júnior (2021) ressalta que a atenção aos detalhes e aos pequenos elementos estruturais é determinante para a confiabilidade global dos sistemas industriais. Dessa forma, a substituição antecipada da gaxeta reforça o compromisso com a performance sustentável e a prevenção de incidentes operacionais.

Em síntese, a aplicação consistente de práticas de manutenção preventiva e engenharia de confiabilidade fortalece a resiliência dos sistemas industriais, promovendo continuidade operacional, segurança e economia de recursos. No caso analisado, a antecipação de falhas, as reformas planejadas e as substituições programadas comprovam que prevenir é mais eficiente e seguro do que corrigir. Conforme defendem Silva (2024) e Rocca (2022), investir em confiabilidade é investir em produtividade, segurança e previsibilidade operacional. O Quadro 2 apresenta uma síntese das principais intervenções preventivas aplicadas, seus objetivos técnicos, os procedimentos executados e os benefícios observados

Quadro 2 – Ações de manutenção preventiva e seus impactos no desempenho do forno industrial.

Ação preventiva	Objetivo técnico	Procedimento adotado	Benefícios observados
Reforma das mantas refratárias	Restaurar o isolamento térmico e evitar perdas de calor	Substituição integral das mantas durante parada programada, com inspeção e fixação por travas metálicas	Melhoria da eficiência energética, aumento da vida útil e redução de paradas corretivas
Inspeção interna com cortes técnicos	Identificar pontos de desgaste e falhas ocultas	Análise visual detalhada e mapeamento das áreas críticas antes da retomada da operação	Intervenções localizadas e redução de custos com manutenção emergencial
Substituição preventiva da gaxeta trançada	Garantir a estanqueidade e a vedação térmica	Troca programada do componente antes de falha, com uso de materiais de maior durabilidade	Eliminação de vazamentos, aumento da confiabilidade e prevenção de incidentes
Planejamento de paradas técnicas	Minimizar riscos e otimizar o tempo de manutenção	Programação antecipada de intervenções com base em indicadores de desgaste	Maior previsibilidade operacional e redução do impacto na produção
Aplicação de engenharia de confiabilidade	Antecipar falhas e otimizar o desempenho global	Monitoramento técnico e diagnóstico contínuo com base em dados reais	Aumento da disponibilidade do forno e consolidação da cultura de manutenção preventiva

Fonte: Elaborado pelo autor (2025), com base em ROCCA (2022), SILVA (2024), RESENDE (2023), TIBA (2021) e VIEIRA JÚNIOR (2021).

3 METODOLOGIA

O presente estudo caracteriza-se como estudo de caso de natureza qualitativa e descritiva, voltado à análise técnica das intervenções realizadas em um forno industrial. A metodologia adotada estruturou-se em etapas sequenciais, permitindo avaliar de forma sistemática os impactos operacionais, técnicos e estruturais decorrentes das modificações implementadas.

3.1- Diagnóstico inicial: a condição original do forno foi caracterizada por meio de inspeções visuais, registros gráficos e análise documental. Nessa etapa, identificaram-se os principais problemas do sistema, como tubulação de gás obsoleta, desgaste das mantas refratárias, deficiências nos sistemas de purga e falhas de vedação.

3.2 - Planejamento e execução das intervenções: com base no diagnóstico, definiu-se um conjunto de modificações estruturais, executadas em parada técnica programada de 10 dias. As principais ações incluíram:

- substituição da linha de gás por tubulação externa flangeada, visando maior segurança e facilidade de manutenção;
- reforma completa das mantas refratárias, realizada após a retirada do teto do forno, para restabelecer o isolamento térmico;
- aprimoramento dos sistemas de purga e vedação, reduzindo riscos de vazamentos e falhas operacionais.

3.3 - Avaliação pós-intervenção: após a conclusão das atividades, realizaram-se análises comparativas entre as condições pré e pós-manutenção. Foram utilizados indicadores técnicos e operacionais, como estabilidade térmica, confiabilidade estrutural, redução de perdas energéticas e melhoria das condições de segurança. Essa avaliação foi baseada em registros documentais, observação direta e análise das condições de operação do forno após o retorno à atividade.

3.4 - Consolidação dos resultados: os dados obtidos foram sistematizados e interpretados de forma a comprovar os benefícios das modificações realizadas, evidenciando ganhos em confiabilidade, eficiência energética e segurança operacional.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O estudo teve como objetivo apresentar, de forma estruturada, a análise das intervenções realizadas no sistema, destacando as etapas envolvidas e os resultados obtidos. A sequência adotada permitiu compreender a evolução do processo, desde a condição original até os efeitos observados após a manutenção, evidenciando os ganhos operacionais e técnicos decorrentes das modificações implantadas.

A análise dos dados foi organizada de maneira clara e sequencial, com o propósito de demonstrar, de forma objetiva, os impactos das intervenções executadas. Inicialmente, apresentou-se a Situação Inicial Antes da Modificação, descrevendo as condições operacionais e os principais pontos críticos identificados. Em seguida, o Sistema de Purga foi abordado, com ênfase em sua configuração anterior e nos ajustes implementados. A Visão Interna do Forno possibilitou compreender as condições que motivaram as alterações estruturais.

Na sequência, o Sistema de Vedação foi analisado sob a ótica da eficiência energética e da segurança operacional. A seção referente à Modificação da Linha de Gás, Nova Instalação evidenciou as melhorias introduzidas no controle e na distribuição do combustível. Também foram apresentados os resultados obtidos com a Reforma das Mantas Refratárias, destacando os ganhos térmicos e estruturais. Por fim, a etapa de Pós-Manutenção consolidou os dados comparativos e os principais indicadores de desempenho, permitindo uma avaliação precisa dos benefícios alcançados com as modificações executadas

4.1 Situação inicial antes da modificação

A Figura 3, analisada a seguir, evidenciou uma configuração obsoleta da tubulação de gás, originalmente projetada para atender a um sistema de injeção instalado na parte interna do forno industrial. Essa tubulação se conectava à região inferior do equipamento e integrava um processo cuja função principal era alimentar os queimadores responsáveis pelo aquecimento interno, além de auxiliar, em conjunto com o ar comprimido, na aceleração da purga e na redução do tempo de rampa de aquecimento, especialmente em ciclos destinados a determinados tipos de materiais.

Verificou-se, entretanto, que a injeção de gás no interior do forno apresentava

perdas significativas decorrentes de pequenos vazamentos provocados pelo desgaste da tubulação. Essa condição exigia intervenções frequentes da equipe de manutenção, geralmente envolvendo reparos por soldagem e serviços de caldeiraria. A principal dificuldade estava associada aos riscos de segurança, pois o acúmulo de gás na parte inferior do forno aumentava o potencial de explosões. Além disso, o tempo de parada do equipamento era elevado, uma vez que qualquer atividade de manutenção a quente demandava um período mínimo de doze horas para a purga completa, necessária à eliminação dos gases residuais do interior do forno.

Figura 3 – Entrada antiga de gás no forno.



Fonte: Autores (2025).

A manutenção dessa estrutura, além de tecnicamente injustificável, acarretou uma série de problemas recorrentes que comprometeram a segurança e a eficiência do sistema. Entre os principais problemas identificados estiveram os vazamentos provocados por trincas e fissuras na tubulação, situação que representava risco elevado em ambientes com presença de gases combustíveis. A integridade do sistema também foi comprometida em diversas ocasiões pela quebra da gaxeta e de seu suporte, componentes essenciais para garantir o fechamento hermético e o isolamento seguro da linha de gás.

Outro problema observado relacionava-se à queda da manta refratária,

elemento vital para o isolamento térmico do forno. A perda dessa manta comprometeu tanto a eficiência energética quanto a integridade física do equipamento, aumentando os custos operacionais e elevando os riscos de acidentes. Nas situações em que se tornava necessária a intervenção para reparos, houve ainda um agravante operacional significativo: a necessidade de parada completa do forno, com processo de purga utilizando ar comprimido por um período mínimo de oito horas. Essa exigência assegurava a segurança para se evitar explosões, porém resultava em perda considerável de tempo produtivo e incremento de custos, tanto pelo consumo adicional de energia quanto pela paralisação da linha de produção.

Diante desse cenário, a manutenção da tubulação antiga revelou-se contraproducente. Além de não exercer mais sua função original, sua permanência acarretou riscos técnicos e operacionais que poderiam ter sido evitados com uma remoção planejada e definitiva da estrutura. A substituição por um sistema mais simples e adequado à atual demanda do forno eliminou as vulnerabilidades mencionadas e reduziu significativamente a necessidade de paradas para manutenção corretiva. Essa intervenção racionalizou o sistema e proporcionou ganhos expressivos em segurança, eficiência e confiabilidade operacional, justificando plenamente a decisão técnica adotada.

4.2 Sistema de purga

Na Figura 4, observa-se a indicação, por meio de uma seta verde, do ponto exato onde era realizada a purga do forno, procedimento destinado à eliminação de resíduos de gás acumulados no interior do sistema. Essa operação constituía uma etapa indispensável para garantir a segurança durante intervenções com solda e outros serviços de manutenção a quente, especialmente em situações nas quais havia risco de inflamabilidade devido à presença de gases residuais.

Durante as etapas de preparação para manutenção, a purga era executado com o auxílio de ar comprimido, assegurando a renovação completa da atmosfera interna antes do início das atividades. Esse processo exigia atenção rigorosa da equipe de operação, uma vez que qualquer volume remanescente de gás poderia comprometer a integridade do equipamento e colocar em risco a segurança dos profissionais envolvidos. A eficácia da operação dependia do bom funcionamento

das válvulas de controle e da vedação adequada das linhas, de modo a impedir o retorno ou a retenção de gás no sistema principal.

Sob o ponto de vista operacional, o procedimento de purga representava não apenas uma exigência de segurança, mas também um fator determinante para a confiabilidade e continuidade produtiva do forno. Quando realizada de forma inadequada, resultava em maior tempo de parada, aumento do consumo de ar comprimido e risco de combustão acidental durante o reaquecimento. Dessa forma, a purga se configurava como uma prática preventiva essencial para a preservação da integridade estrutural do equipamento e a segurança das operações industriais.

Figura 4 – Local de purga (indicado por seta verde).



Fonte: Autores (2025).

A purga consistia basicamente na substituição da atmosfera interna do forno, saturada por gases potencialmente inflamáveis, por ar comprimido ou por um gás inerte, como o nitrogênio. Esse procedimento tinha como finalidade eliminar qualquer concentração de substâncias combustíveis em níveis que pudessem provocar reações perigosas durante o uso de ferramentas de corte térmico ou soldagem. O ponto indicado na Figura 2, portanto, representava mais do que um componente

físico do sistema: tratava-se de uma interface de segurança operacional, cuja função era mitigar riscos associados à manutenção corretiva e à execução de ajustes estruturais no forno.

Com o passar do tempo, mudanças na configuração do processo produtivo, na composição dos materiais trabalhados e no próprio regime de uso do forno tornaram esse ponto de purga menos utilizado e, em alguns casos, praticamente obsoleto. Ainda assim, a presença desse dispositivo, mesmo que eventualmente desativado, refletia uma preocupação legítima com as boas práticas de segurança industrial, demonstrando que a operação mantinha diretrizes voltadas à prevenção de riscos e à integridade estrutural do equipamento.

A ausência de um ponto seguro de purga comprometia diretamente a capacidade de realizar reparos imediatos, uma vez que qualquer atividade de soldagem em áreas com histórico de presença de gás exigia a eliminação prévia de resíduos gasosos. Essa limitação poderia resultar em paralisações prolongadas e, em situações críticas, acarretar acidentes com consequências severas. Por esse motivo, considerou-se essencial manter um ponto funcional de purga no sistema, seja por meio da recuperação da linha existente ou pela instalação de um novo dispositivo que garantisse a eficiência do processo e a segurança das operações.

Em síntese, o ponto de purga constituía um elemento fundamental na lógica de segurança do forno. Sua preservação ou realocação foi tratada como uma prioridade técnica, uma vez que a inexistência desse recurso poderia comprometer a integridade operacional do sistema e colocar em risco os profissionais envolvidos na manutenção industrial.

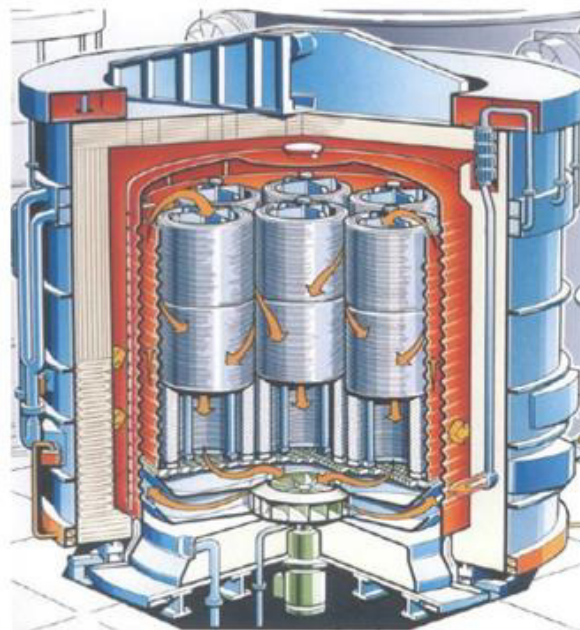
4.3 – Visão Interna do forno (versão revisada e final)

A análise da estrutura interna do forno permitiu uma avaliação detalhada de seus componentes e do arranjo dos sistemas de queima e isolamento térmico. Essa observação proporcionou subsídios importantes para compreender o funcionamento do equipamento e apoiou decisões voltadas à manutenção, aprimoramentos e substituição de partes críticas do sistema. A Figura 5 apresenta um corte interno do forno, que auxiliou na identificação da disposição dos elementos estruturais e na verificação da integridade dos conjuntos refratários e metálicos.

A partir dessa visualização, foi possível constatar como os componentes internos se interligavam para garantir a eficiência da transferência térmica e o

controle da combustão. A análise também permitiu identificar pontos potenciais de perda de calor, falhas de vedação e regiões suscetíveis ao desgaste, fatores que influenciavam diretamente o desempenho térmico do equipamento. As informações obtidas serviram de base para a definição das intervenções corretivas e para o redesenho de partes específicas do sistema, resultando em ganhos de confiabilidade e estabilidade operacional.

Figura 5 – Corte do interior do forno.



Fonte: Autores (2025).

4.4 – Visão Interna do forno (continuação revisada e aprimorada)

No contexto industrial, os fornos de alta temperatura operavam com princípios bem definidos de transferência de calor e controle de atmosferas internas. A disposição dos queimadores, a forma de distribuição do calor e o tipo de isolamento térmico adotado influenciavam diretamente a eficiência energética e a qualidade do processo. O corte interno analisado permitiu verificar a integridade das paredes refratárias, a espessura dos materiais isolantes, o posicionamento dos elementos de aquecimento e o trajeto dos gases durante a queima. Esses aspectos se mostraram essenciais não apenas para o desempenho do forno, mas também para a segurança e o controle operacional da unidade.

O sistema de isolamento térmico, em particular, foi identificado como uma das áreas mais críticas do conjunto. Sua principal função consistia em reter o calor

gerado internamente, reduzindo as perdas térmicas para o ambiente externo e protegendo a carcaça metálica contra deformações ou falhas estruturais causadas pelas altas temperaturas. Quando o isolamento se encontrava comprometido, ocorria aumento expressivo do consumo de energia, além de riscos à integridade do equipamento e à segurança dos operadores. A observação interna possibilitou identificar danos como trincas, descolamentos e áreas com perda de espessura nos materiais refratários, os quais demandaram intervenções corretivas imediatas.

Além disso, o sistema de queima, responsável pela geração de calor no interior do forno, pôde ser avaliado com maior precisão a partir dessa exposição. O alinhamento dos queimadores, sua distribuição espacial e o estado dos bicos injetores de gás foram analisados quanto à uniformidade da temperatura e à eficiência do processo térmico. Um sistema de queima mal ajustado resultava em zonas frias ou superaquecidas, comprometendo a qualidade do produto final e elevando o consumo de combustível.

Dessa forma, o corte interno do forno representou muito mais do que uma simples ilustração técnica: serviu como ferramenta essencial para a análise crítica do sistema. Essa abordagem permitiu identificar pontos de melhoria, prevenir falhas, otimizar o desempenho térmico e aumentar a confiabilidade operacional do equipamento. Considerando a complexidade e a importância dos componentes internos, a análise visual se mostrou indispensável para uma gestão técnica eficiente e segura de equipamentos térmicos industriais.

4.5 – Sistema de vedação

As Figuras 6 e 7 apresentam detalhes construtivos do sistema de vedação e da linha de gás do forno, evidenciando o conjunto responsável pela vedação inferior da câmara de queima e pela condução controlada do combustível. Na Figura 6, observa-se a gaxeta trançada, componente essencial de isolamento térmico e contenção de gases. Esse elemento, com diâmetro aproximado de duas polegadas, era fixado por meio de um suporte confeccionado em barra chata de aço carbono, com uma polegada de largura e um quarto de polegada de espessura, soldado diretamente à base inferior do forno. Já a Figura 7 ilustra a linha de gás associada ao sistema de vedação, destacando o ponto de acoplamento entre o suprimento de combustível e a câmara de combustão, área crítica para o controle de vazamentos e manutenção da pressão interna.

O conjunto formado pela gaxeta e pela linha de gás tinha como função essencial garantir o fechamento hermético da câmara de queima, impedindo a fuga de gases e assegurando a estabilidade térmica do processo. Essa vedação permitia que o calor gerado pelos queimadores fosse mantido no interior do forno, evitando perdas energéticas significativas e melhorando a eficiência global do sistema.

Quando em boas condições, o sistema de vedação proporcionava não apenas desempenho térmico superior, mas também reduzia os riscos de contaminação do ambiente e minimizava a exposição dos operadores a gases residuais. Além disso, protegia os componentes internos do forno contra o desgaste prematuro, prolongando sua vida útil e diminuindo a necessidade de manutenções corretivas.

Durante as inspeções, foi constatado que o estado da gaxeta e do suporte metálico influenciava diretamente a uniformidade da queima e a eficiência da transferência térmica. Pequenas falhas de vedação resultavam em perdas de calor, aumento do consumo de gás e variações indesejadas de temperatura dentro da câmara, comprometendo a estabilidade operacional. Assim, a integridade do sistema de vedação se mostrou fundamental para o desempenho seguro e eficiente do forno, configurando-se como um dos elementos mais críticos para a confiabilidade do processo.

Figura 6 – Gaxeta trançada.



Figura 7 - Linha de gás.



Fonte: Os Autores (2025).

A gaxeta trançada atua como elemento de vedação flexível, suportando variações térmicas e absorvendo pequenas deformações estruturais que ocorrem

durante os ciclos de aquecimento e resfriamento do forno. Por ser um componente exposto a condições severas, está sujeita a desgaste contínuo, resultante da exposição prolongada a altas temperaturas, da abrasão e da pressão exercida durante a operação. Em função disso, sua substituição é realizada periodicamente nas manutenções preventivas, garantindo a integridade do sistema e evitando vazamentos que podem comprometer o desempenho térmico ou a segurança operacional.

A Figura 8 apresenta a linha de gás antiga, identificada por um círculo, responsável por alimentar os queimadores do forno. Trata-se de um componente crítico do sistema de queima, cuja integridade tinha que ser monitorada continuamente. Vazamentos nessa linha representavam riscos significativos, incluindo incêndios, explosões e perdas de eficiência energética. A proximidade entre a linha de gás e a gaxeta reforçava a necessidade de inspeções rigorosas e intervenções técnicas precisas, uma vez que qualquer falha em um desses elementos poderia impactar diretamente o funcionamento seguro e eficiente do equipamento.

Em conjunto, a gaxeta trançada e a linha de gás compunham um subsistema essencial do forno, garantindo o confinamento adequado dos gases, a estabilidade térmica e a segurança operacional. A manutenção rigorosa desses componentes era determinante para a confiabilidade do processo e para a preservação da integridade estrutural do equipamento ao longo de seu ciclo produtivo.

Figura 8 – Entrada antiga de gás no forno.



Fonte: Autores (2025).

Os queimadores, indicados por uma seta na Figura 6, indicavam os dispositivos

finais da linha de gás, responsáveis pela liberação controlada do combustível e pela ignição dentro da câmara do forno. O correto funcionamento desses componentes dependia diretamente da vedação eficiente proporcionada pela gaxeta trançada e da alimentação estável fornecida pela linha de gás. Há uma interdependência técnica entre esses elementos, o que exige uma abordagem integrada durante as inspeções e intervenções de manutenção, de modo a garantir a continuidade e a segurança operacional do sistema.

O sistema de vedação, era composto pela gaxeta trançada, pelo suporte metálico de fixação, pela linha de gás e pelos queimadores, formava um conjunto essencial para o desempenho térmico e a confiabilidade do forno. A manutenção periódica desses componentes, especialmente a substituição preventiva da gaxeta, era indispensável para preservar a eficiência energética, assegurar a estabilidade operacional e prolongar a vida útil do equipamento.

A análise visual detalhada dessas partes permitiu identificar falhas potenciais, como pequenos vazamentos, deformações mecânicas ou desgaste térmico, orientando intervenções corretivas e preventivas de forma precisa e eficaz. Essa abordagem integrada garante não apenas a segurança do processo, mas também a uniformidade da queima e a manutenção das condições ideais de operação do forno industrial.

4.6 – Modificação da linha de gás – nova instalação

As Figuras 9 e 10 apresentam as modificações implementadas na linha de gás do forno após a execução do novo projeto de reconfiguração. A principal intervenção consistiu na remoção da antiga linha de gás, que anteriormente se encontrava instalada no interior da estrutura do forno, sendo substituída por uma nova tubulação externa, projetada para facilitar o acesso, reduzir riscos e otimizar a eficiência do sistema.

A nova linha é composta por tubos flangeados de 2 polegadas de diâmetro, organizados em quatro seções de 4 metros cada, totalizando oito seções por forno. Essa configuração proporciona maior modularidade ao conjunto, facilitando intervenções de manutenção, substituição de trechos e inspeções preventivas sem a necessidade de paradas prolongadas. Além disso, o uso de flanges elimina a dependência de soldas internas, reduzindo significativamente o risco de vazamentos e melhorando as condições de segurança durante o funcionamento e as

manutenções corretivas.

A relocação da linha de gás para a parte externa representou uma mudança estrutural de grande impacto, tanto do ponto de vista técnico quanto operacional. O novo arranjo ampliou a segurança do sistema ao afastar os pontos de condução de gás das áreas de maior temperatura, diminuindo a exposição dos componentes às tensões térmicas e à degradação por oxidação. Do ponto de vista energético, a redistribuição do fluxo resultou em um controle mais uniforme da pressão e na redução das perdas por restrição, otimizando o consumo de combustível e melhorando a eficiência térmica geral do forno.

Outro aspecto relevante foi o aumento da confiabilidade operacional, decorrente da simplificação do circuito e da facilidade de inspeção visual dos componentes externos. Essa nova configuração possibilitou a detecção rápida de anomalias, reduzindo o tempo de resposta das equipes de manutenção e minimizando paradas não programadas.

De forma geral, a modificação da linha de gás se consolidou como uma solução técnica eficiente, integrando segurança, eficiência energética e manutenção inteligente em um único projeto. Essa reconfiguração elevou o nível de desempenho do sistema, prolongou a vida útil dos componentes e contribuiu para a padronização das práticas de engenharia aplicadas ao conjunto de fornos da planta.

Figura 9 – Tubulações Após modificação (visão 1).



Fonte: Autores (2025).

Figura 10 – Tubulações Após modificação (visão 2).



Fonte: Autores (2025).

A decisão de relocar a tubulação de gás para a parte externa do forno teve como principal fundamento a mitigação de riscos associados às operações de manutenção e intervenções com solda. No arranjo anterior, qualquer reparo exigia a purga completa do forno, processo que demandava no mínimo oito horas apenas para garantir a eliminação total de gases inflamáveis do interior da câmara. Com a nova configuração externa, esse risco foi eliminado, uma vez que as intervenções podem ser executadas com segurança sem a necessidade de expelir os gases residuais do sistema. Essa alteração representou um avanço significativo em segurança operacional, ao eliminar a exposição dos operadores a atmosferas potencialmente explosivas e reduzir o tempo total de intervenção.

Além da segurança, a modificação proporcionou ganhos expressivos em agilidade e disponibilidade operacional. Com a eliminação da obrigatoriedade da purga prolongada, os tempos de parada foram substancialmente reduzidos, permitindo que as manutenções preventivas e corretivas fossem realizadas de forma mais rápida e eficiente. Esse aprimoramento refletiu-se diretamente na produtividade, com aumento da disponibilidade dos fornos e melhor alinhamento à programação de produção. Em ambientes industriais de alta demanda, a redução do tempo de inatividade também representa economia de recursos, maior previsibilidade dos processos e otimização da eficiência global da planta.

Outro benefício relevante decorreu da melhoria na eficiência energética e funcional do sistema de queima. A nova tubulação externa eliminou pontos críticos de vazamento anteriormente identificados na linha interna, comprometida pelo desgaste térmico e pelo tempo de operação. A nova rede, mais robusta e tecnicamente dimensionada, assegurou uma alimentação estável e uniforme dos queimadores, resultando em queima mais eficiente, melhor distribuição térmica e redução do consumo de combustível. Essa configuração contribuiu para um processo mais controlado e confiável, com desempenho térmico mais previsível e menor impacto ambiental.

De forma geral, a modificação da linha de gás se consolidou como uma solução estratégica, atendendo simultaneamente a critérios de segurança, eficiência energética e produtividade. Trata-se de uma intervenção que modernizou o sistema sem comprometer sua funcionalidade, reduzindo significativamente os riscos operacionais e os custos de manutenção. Além de elevar o nível de confiabilidade do forno, a nova configuração demonstrou alinhamento com as práticas modernas de engenharia industrial, priorizando a integridade dos equipamentos, a proteção dos operadores e o desempenho contínuo das operações.

4.7 – Parada programada

Durante uma parada programada de 10 dias, foi realizada a remoção completa do teto do forno, com o objetivo de executar a reforma das mantas refratárias. A intervenção constituiu uma medida técnica essencial para assegurar o desempenho térmico adequado do equipamento e preservar sua integridade estrutural, garantindo condições seguras de operação ao longo dos ciclos de aquecimento e resfriamento.

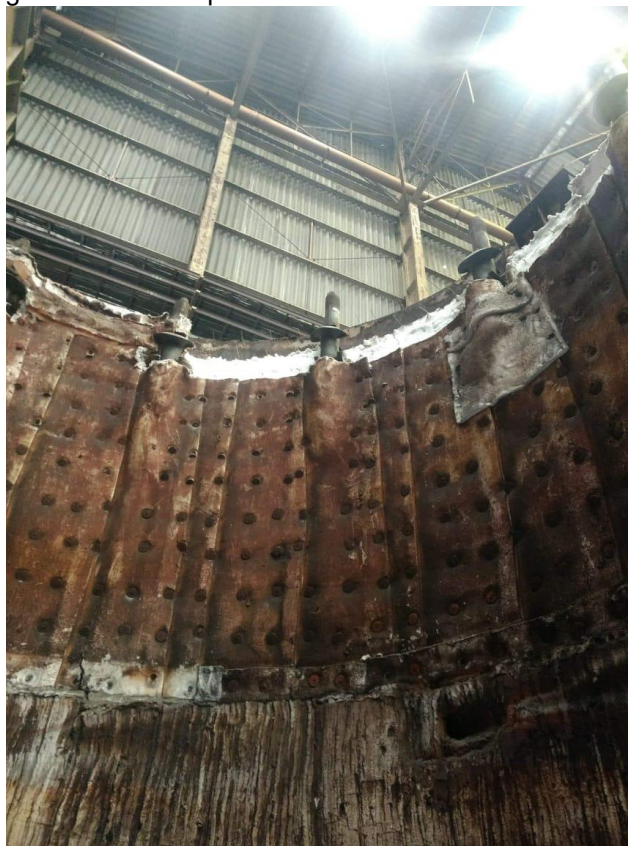
A Figura 11, descreve a manta para reforma e o forno sem teto, descrevendo o forno em processo de manutenção, com a estrutura superior aberta e as mantas refratárias expostas. Essa configuração permitiu acesso direto às áreas críticas do isolamento, possibilitando a substituição dos materiais deteriorados e a aplicação de novas camadas de proteção térmica. A visualização da estrutura interna evidenciou o desgaste das mantas originais, que apresentavam trincas, desagregações e perda de espessura em diversas regiões, comprometendo o confinamento do calor e aumentando o consumo energético do sistema.

A substituição das mantas restaurou a eficiência térmica do forno, melhorando a retenção de calor e reduzindo as perdas para o ambiente externo. Além disso, a

nova configuração de isolamento proporcionou maior uniformidade de temperatura na câmara de queima, protegendo as estruturas metálicas externas contra deformações causadas pela exposição prolongada a altas temperaturas. O uso de materiais refratários de última geração, com maior resistência térmica e estabilidade dimensional, aumentou a durabilidade do isolamento e reduziu a necessidade de intervenções corretivas futuras.

A reforma das mantas refratárias representou uma ação estratégica para prolongar a vida útil do forno, otimizar o consumo energético e garantir a segurança operacional. Essa etapa complementou as demais melhorias implementadas, consolidando a modernização do sistema térmico e contribuindo para a confiabilidade e eficiência global do equipamento.

Figura 11 – Manta para reforma – Forno sem teto.



Fonte: Autores (2025).

A decisão de remover o teto do forno, embora tenha envolvido uma operação complexa e de grande porte, justificou-se plenamente diante do papel crítico das mantas refratárias no desempenho do equipamento. Com o passar do tempo, esses materiais sofrem desgaste progressivo, decorrente da exposição contínua a ciclos

térmicos intensos, vibrações mecânicas, partículas abrasivas e variações de pressão interna. A degradação natural das mantas compromete a eficiência energética do sistema, aumenta o consumo de combustível e pode provocar o superaquecimento de partes estruturais, elevando o risco de falhas operacionais e acidentes.

A reforma executada com acesso total, proporcionado pela retirada do teto, permitiu uma inspeção minuciosa e a substituição completa dos segmentos comprometidos. Essa abordagem garantiu a aplicação adequada do novo material isolante, seguindo rigorosamente os critérios técnicos de instalação, espessura e densidade especificados para o sistema. Diferentemente das substituições parciais realizadas com o teto fixo, esse método possibilitou o tratamento integral das áreas danificadas, eliminando zonas críticas e evitando falhas prematuras que poderiam exigir novas paradas não programadas.

Além dos ganhos imediatos de eficiência, a intervenção contribuiu diretamente para a extensão da vida útil do forno. Ao restabelecer as condições ideais de isolamento térmico, o sistema passou a operar com menor estresse térmico sobre os demais componentes, como queimadores, tubulações e estruturas metálicas. Essa melhoria reduziu a frequência de manutenções corretivas e aumentou a confiabilidade operacional, assegurando maior estabilidade térmica e qualidade no processo produtivo.

Assim, a remoção do teto e a reforma integral das mantas refratárias, executadas durante a parada programada de 10 dias, representaram uma estratégia de manutenção planejada, criteriosa e tecnicamente fundamentada. Embora demandante em termos logísticos, essa medida resultou em ganhos significativos de desempenho, segurança e durabilidade, consolidando o forno como um equipamento mais eficiente, confiável e alinhado às exigências da produção industrial moderna.

4.8 – Reforma das mantas refratárias

Após a conclusão da reforma, o forno passou por um conjunto de intervenções complementares voltadas ao restabelecimento e aprimoramento de sua integridade térmica e estrutural. As mantas refratárias, componentes fundamentais para o isolamento térmico, foram integralmente substituídas, garantindo o confinamento adequado do calor e a proteção das superfícies metálicas externas contra as elevadas temperaturas do processo.

As Figuras 12 e 13, travas de fixação interna das mantas. ilustram o sistema de ancoragem utilizado na nova instalação. As imagens evidenciam as travas metálicas internas responsáveis pela fixação segura das mantas refratárias à carcaça do forno. Esse sistema proporciona melhor aderência e estabilidade dimensional, reduzindo o risco de deslocamento ou descolamento das mantas durante os ciclos térmicos de aquecimento e resfriamento. Além disso, a distribuição uniforme das travas ao longo da superfície interna favorece a dissipação equilibrada das tensões térmicas, aumentando a vida útil do revestimento e garantindo maior uniformidade de temperatura dentro da câmara de queima.

A estrutura traseira do forno também recebeu reforços estruturais por meio de soldas, que restauraram a rigidez do conjunto e minimizaram a ocorrência de deformações decorrentes de ciclos térmicos repetitivos. Essa etapa contribuiu diretamente para o aumento da durabilidade e da segurança operacional, reduzindo a possibilidade de falhas em pontos críticos de sustentação e melhorando a estanqueidade térmica do sistema.

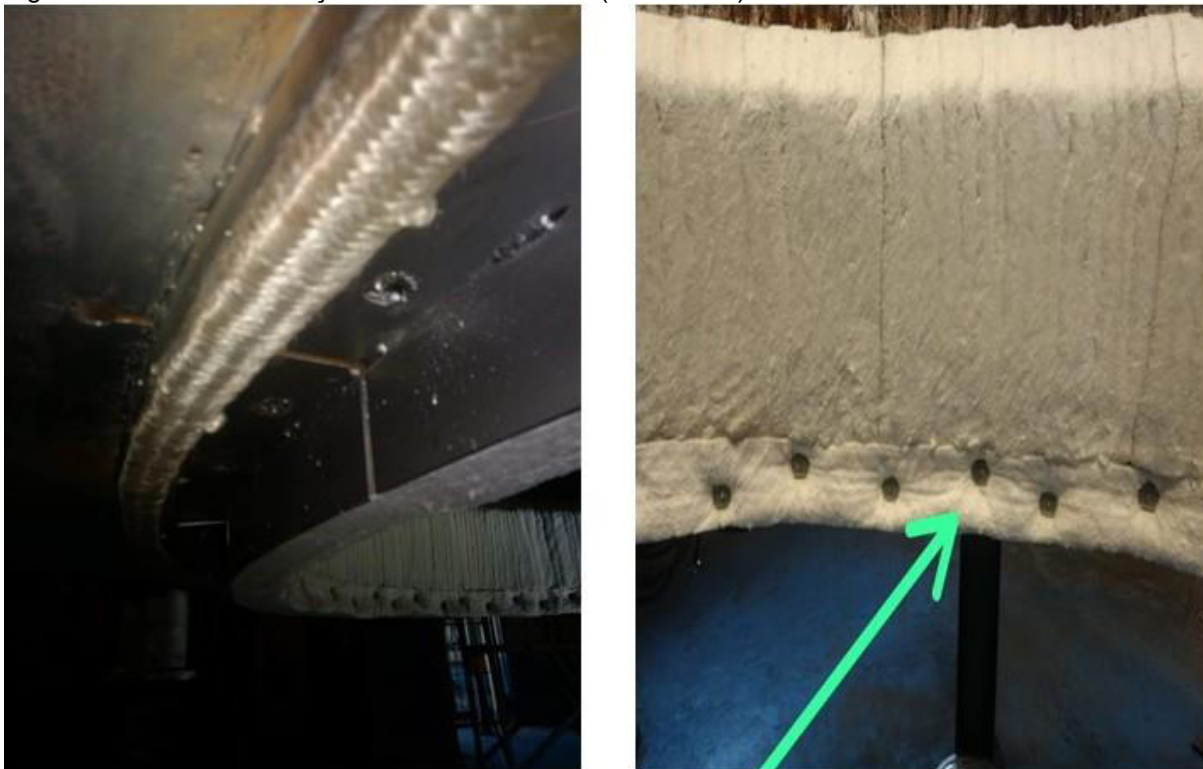
Com essas melhorias, o forno passou a operar de forma mais estável e eficiente, apresentando maior controle sobre o gradiente térmico interno e redução significativa de perdas energéticas. A combinação entre o novo isolamento, as travas de fixação e o reforço estrutural resultou em um conjunto mais robusto, confiável e seguro, plenamente alinhado aos requisitos modernos de desempenho e manutenção industrial.

Figura 12 – Travas de fixação interna das mantas (visão 1 e 2).



Fonte: Autores (2025).

Figura 13 – Travas de fixação interna das mantas (visão 3 e 4).



Fonte: Autores (2025).

A fixação das novas mantas refratárias, conforme documentado nas etapas de instalação, demandou procedimentos técnicos rigorosos para assegurar a aderência e a durabilidade do isolamento. Para garantir uma fixação segura, foram utilizadas travas metálicas soldadas diretamente à estrutura interna do forno, conforme ilustrado nas etapas de montagem. Antes da soldagem, a superfície interna foi devidamente preparada com o uso de lixadeira, procedimento necessário para remover impurezas, oxidações e resíduos metálicos, assegurando uma solda limpa e resistente.

Esse método de ancoragem proporcionou elevada estabilidade dimensional às mantas, permitindo que mantivessem sua posição original mesmo sob altas temperaturas e ciclos térmicos repetitivos. Dessa forma, evitaram-se deslocamentos, desprendimentos e falhas no isolamento, que poderiam gerar perdas de calor ou danificar componentes internos do sistema.

Além da reforma física, a reconfiguração do sistema de alimentação de gás nos fornos de recozimento representou um avanço significativo em termos de segurança, desempenho térmico e confiabilidade operacional. A nova configuração, com

tubulação deslocada para o exterior do forno e composta por seções flangeadas modulares, eliminou os principais problemas associados à antiga linha interna, especialmente os riscos de vazamento e a necessidade de longos períodos de purga antes das intervenções de soldagem. Com isso, reduziu-se drasticamente o risco de explosões e otimizou-se a rotina de manutenção, garantindo condições de trabalho mais seguras e operações mais ágeis.

A instalação da nova linha também contribuiu para ganhos expressivos de eficiência energética. A eliminação dos vazamentos anteriormente detectados na tubulação antiga resultou em melhor aproveitamento do gás combustível, melhorando a performance dos queimadores e aumentando a uniformidade térmica dentro da câmara de queima. Essa melhoria reduziu o consumo de combustível e elevou a estabilidade térmica do processo, refletindo diretamente na redução dos custos operacionais e no aumento da confiabilidade do sistema.

Outro impacto relevante foi observado na agilidade das manutenções programadas. Com a supressão da necessidade de purgas prolongadas que anteriormente exigiam cerca de oito horas de parada, o tempo de inatividade do forno foi significativamente reduzido, aumentando sua disponibilidade produtiva e permitindo retomadas mais rápidas do processo de recozimento. Essa mudança fortaleceu o desempenho global do equipamento, tornando-o mais seguro, econômico e eficiente. Em síntese, as ações executadas desde a substituição das mantas e reforços estruturais até a reconfiguração completa da linha de gás caracterizaram uma modernização integral do sistema térmico do forno. Os resultados alcançados comprovaram ganhos concretos em desempenho, confiabilidade e eficiência energética, consolidando o projeto como um exemplo de intervenção técnica bem-sucedida no contexto industrial.

4.9 - Discussões finais

As intervenções realizadas no forno industrial resultaram em melhorias substanciais nos aspectos operacionais, técnicos e estruturais, promovendo maior confiabilidade, segurança e eficiência do sistema. As ações implementadas corrigiram vulnerabilidades históricas, reduziram riscos de falhas e otimizaram o desempenho térmico e funcional do equipamento. Como consequência, o forno passou a operar de forma mais estável e segura, com menor demanda por manutenções corretivas e maior durabilidade dos componentes, evidenciando o

impacto positivo das modificações para a continuidade e qualidade do processo produtivo.

A análise técnica da tubulação de gás original revelou uma configuração obsoleta e operacionalmente arriscada, cuja manutenção não atendia mais aos critérios de segurança e eficiência. A substituição pela nova linha de gás externa, modular e flangeada, eliminou pontos críticos de vazamento, simplificou o circuito de alimentação e facilitou o acesso durante manutenções preventivas. Essa modernização reduziu significativamente o tempo de parada, aumentou a confiabilidade operacional e melhorou a eficiência energética do sistema de queima.

O sistema de purga também passou por reavaliação e ajustes técnicos, garantindo a eliminação segura de gases residuais antes de intervenções com solda. Essa adequação minimizou riscos de combustão acidental, preservou a integridade estrutural do equipamento e reforçou a segurança dos operadores. De modo complementar, a análise da estrutura interna do forno por meio de cortes técnicos permitiu identificar regiões críticas e orientou ações corretivas precisas, contribuindo para a uniformidade térmica e a estabilidade do processo.

O sistema de vedação, formado pela gaxeta trançada, suportes metálicos e linha de gás, foi submetido a manutenção programada e substituição estratégica. A manutenção adequada desses elementos garantiu estanqueidade, estabilidade térmica e segurança operacional, reduzindo perdas energéticas e prolongando a vida útil do forno. A reforma das mantas refratárias, realizada durante uma parada de dez dias, restabeleceu as propriedades de isolamento térmico, reduziu as perdas de calor e protegeu as estruturas metálicas externas contra o superaquecimento, assegurando melhor desempenho energético e segurança nas operações.

A etapa pós-manutenção confirmou os resultados esperados, comprovando melhorias estruturais e térmicas que resultaram em um forno mais eficiente, estável e confiável. O conjunto das intervenções representou uma modernização integral do sistema térmico, integrando segurança, eficiência energética e desempenho operacional em um mesmo projeto de reengenharia industrial.

5. CONCLUSÃO

As modificações implementadas no forno industrial foram decisivas para elevar seu nível de confiabilidade, segurança e eficiência operacional. Os resultados obtidos demonstram a eficácia das ações planejadas e confirmam a importância da manutenção estratégica como ferramenta essencial para a longevidade dos equipamentos e a sustentabilidade dos processos produtivos.

A realocação da linha de gás para o exterior, a modernização do sistema de vedação, a readequação do sistema de purga e a reforma completa das mantas refratárias constituíram um conjunto de medidas integradas que alcançaram ganhos expressivos em desempenho, produtividade e economia de recursos. O forno passou a operar com maior estabilidade térmica, menor risco de falhas e redução de custos energéticos e de manutenção.

De forma ampla, as intervenções refletem uma abordagem técnica robusta e alinhada às boas práticas da engenharia industrial moderna, evidenciando a importância da integração entre manutenção, confiabilidade e segurança. A modernização do forno representa um avanço significativo na gestão de ativos industriais, consolidando um modelo de operação sustentável, seguro e tecnicamente eficiente, capaz de atender com excelência às exigências atuais e futuras do setor produtivo.

REFERÊNCIAS

ALSYOUF, Imad. *Maintenance for Energy Efficiency: A Review*. Journal of Quality in Maintenance Engineering, v. 25, n. 4, p. 647-667, 2019. DOI: 10.1108/JQME-06-2018-0049. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/334468034_Maintenance_for_Energy_efficiency_A_Review. Acesso em: 30 out. 2025.

ÁVILA, Paulo Henrique de. *Segurança operacional em sistemas industriais de gás e combustão: fundamentos e práticas*. Rio de Janeiro: Interciência, 2021.

BASTOS, Fernando Almeida. *Gestão da confiabilidade em sistemas térmicos industriais: análise de falhas e estratégias de manutenção*. São Paulo: Edgard Blücher, 2023.

BASTOS, R. F. *Sistemas de purga e segurança em fornos industriais a gás natural*. Rio de Janeiro: Interciência, 2023.

CARVALHIDO, Luís Fernando. *Engenharia de confiabilidade aplicada à indústria de processos contínuos*. Lisboa: Lidel, 2019.

CARVALHO, M. L. *Engenharia de manutenção aplicada à eficiência energética: estudos de caso em plantas térmicas industriais*. São Paulo: Blucher, 2022.

CARVALHO, Tiago de Moura. *Isolamento térmico e durabilidade de materiais refratários em fornos industriais de reaquecimento*. Belo Horizonte: UFMG, 2022.

FERNANDES, Ricardo José. *Integridade estrutural e confiabilidade de linhas de condução de gás em sistemas de combustão industrial*. Campinas: Unicamp, 2020.

FRAGOSO, A. C. *Tubulações industriais: projeto, montagem e inspeção segundo normas ASME e API*. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019.

FRAGOSO, C. P. *Gestão energética e otimização de processos térmicos industriais*. Rio de Janeiro: Interciência, 2019.

FUJITA, R. M. *Materiais refratários e desempenho térmico em equipamentos industriais*. São Paulo: Blucher, 2019.

GAMA, F. R. *Segurança e eficiência em sistemas de combustão industrial*. Belo Horizonte: UFMG, 2023.

GAMA, J. P. *Atmosferas controladas em processos de recozimento: fundamentos e aplicações industriais*. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2023.

GANDRA, L. P. *Eficiência energética e sustentabilidade na indústria de transformação*. Porto Alegre: Bookman, 2019.

LIMA, V. A. *Reconfiguração de sistemas térmicos e controle energético em fornos industriais*. Recife: UFPE, 2022.

MAGALHÃES SOBRINHO, J. R. *Gestão de segurança e contenção de substâncias voláteis em ambientes industriais*. São Paulo: Senai-SP Editora, 2024.

MOBLEY, R. Keith. *An Introduction to Predictive Maintenance*. 2. ed. Burlington: Butterworth-Heinemann, 2002.

MOLINA, A. P. *Sistemas de exaustão e purga em processos térmicos industriais*. Belo Horizonte: UFMG, 2020.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL (U.S.). *Reliability Growth: Enhancing Defense System Reliability*. Washington, D.C.: National Academies Press, 1992. Disponível em: <https://nap.nationalacademies.org/read/1618/chapter/5>. Acesso em: 30 out. 2025.

NEUBERGER, F. H. *Gestão de riscos ambientais e ocupacionais em plantas industriais*. Rio de Janeiro: Interciência, 2020.

ORGANIZAÇÃO INTERNACIONAL DO TRABALHO (OIT). *Relatório mundial sobre segurança e saúde no trabalho: o futuro do trabalho seguro e saudável*. Genebra: OIT, 2020.

PINHO, L. C. *Prevenção e controle de riscos em sistemas térmicos e combustão industrial*. Salvador: EDUFBA, 2019.

PINHO, L. R. *Confiabilidade e integridade em sistemas de combustão industrial: análise de risco e inspeção de tubulações*. São Paulo: Érica, 2019.

RESCH, C. E. *Eficiência energética e confiabilidade em sistemas térmicos industriais*. Porto Alegre: Bookman, 2021.

RESCH, C. V. *Diretrizes para integridade e segurança de sistemas de transporte de gás combustível*. Recife: UFPE, 2021.

RESENDE, P. L. *Gestão técnica de vedações e isolamentos térmicos em equipamentos industriais*. São Paulo: Senai-SP Editora, 2023.

ROCCA, E. A. *Manutenção centrada em confiabilidade: fundamentos e práticas industriais*. Rio de Janeiro: Interciência, 2022.

SILVA, M. A. *Planejamento de paradas e gestão da manutenção preventiva em plantas térmicas industriais*. Belo Horizonte: UFMG, 2024.

TIBA, M. F. *Engenharia de confiabilidade aplicada à manutenção industrial*. São Paulo: Blucher, 2021.

VIEIRA JÚNIOR, C. E. *Análise preditiva e confiabilidade em sistemas de produção contínua*. Curitiba: UFPR, 2021.