

ARTIGO

ELETRIFICAÇÃO DE SISTEMAS DE FLUIDO TÉRMICO: ANÁLISE DE VIABILIDADE E IMPACTOS NA MANUTENÇÃO INDUSTRIAL EM UMA INDÚSTRIA TÊXTIL

Sergio Mitsuo Matsubara
Paulo Sérgio Pádua de Lacerda
Rafaela da Silva Pinto

RESUMO

Os sistemas de aquecimento de fluido térmico a combustão é amplamente utilizada na indústria têxtil, porém apresentam elevada complexidade estrutural, recorrência de falhas e custos significativos de manutenção e operação. Este artigo tem como objetivo avaliar a viabilidade da eletrificação desses sistemas, com foco na confiabilidade operacional, na manutenção industrial, na eficiência do processo e nos impactos econômicos e ambientais. A pesquisa caracteriza-se como estudo de caso, com abordagem qualitativa e quantitativa, fundamentada em revisão bibliográfica, análise documental e exame comparativo de dados energéticos, operacionais e financeiros de uma planta têxtil. Os resultados indicam que o sistema a combustão apresenta superdimensionamento estrutural, elevado inventário de fluido térmico e recorrência de vazamentos, enquanto o cenário eletrificado tende a reduzir a complexidade do sistema, aumentar a confiabilidade e diminuir emissões diretas, embora implique maior custo energético direto no contexto tarifário analisado. Conclui-se que a decisão pela eletrificação não deve se apoiar apenas no preço da energia, mas em uma abordagem sistêmica que considere custo do ciclo de vida, criticidade operacional, manutenção, segurança e sustentabilidade.

Palavras-chave: fluido térmico; manutenção industrial; eletrificação.

ABSTRACT

Combustion-based thermal fluid heating systems are widely used in the textile industry; however, they present high structural complexity, recurring failures, and significant maintenance and operating costs. This article aims to evaluate the feasibility of electrifying such systems, focusing on operational reliability, industrial maintenance, process efficiency, and economic and environmental impacts. The research is characterized as a case study with qualitative and quantitative approaches, grounded in literature review, document analysis, and comparative assessment of energy, operational, and financial data from a textile plant. The results indicate that the combustion-based system is structurally oversized, requires a large thermal fluid inventory, and suffers from recurring leaks, whereas the electrified scenario tends to reduce system complexity, increase reliability, and lower direct emissions, although it implies a higher direct energy cost under the tariff conditions analyzed. It is concluded that electrification should not be assessed just on the basis of energy price, but rather through a systemic approach that considers life-cycle cost, operational criticality, maintenance, safety, and sustainability.

Keywords: thermal fluid; industrial maintenance; electrification.

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Os sistemas de aquecimento por fluido térmico ocupam posição estratégica em plantas industriais que demandam transferência contínua de calor em níveis elevados de temperatura, especialmente quando a operação sob pressões moderadas constitui requisito de segurança e estabilidade de processo. Na indústria têxtil, tais sistemas alimentam equipamentos e etapas produtivas que dependem de aquecimento uniforme, resposta rápida e controle térmico rigoroso. Nesse cenário, a confiabilidade do sistema

térmico não é apenas um requisito operacional, mas um fator diretamente associado à qualidade do produto, à disponibilidade da produção e à competitividade industrial.

1.2 Problematização

Tradicionalmente, muitos desses sistemas operam com aquecimento a combustão, tecnologia consolidada tecnicamente, mas associada a uma infraestrutura extensa e de elevada complexidade. Queimadores, linhas de combustível, exaustão, dispositivos de segurança, válvulas, juntas, vedações e malhas extensas de tubulação ampliam o número de interfaces sujeitas a falhas e aumentam a necessidade de intervenções corretivas e preventivas. Em plantas com operação contínua, tal configuração pode provocar vazamentos recorrentes, perdas térmicas, indisponibilidade do sistema e custos elevados de manutenção.

A eletrificação surge, nesse contexto, como uma alternativa de reconfiguração tecnológica capaz de simplificar a arquitetura do sistema, reduzir o número de componentes sujeitos a desgaste, melhorar o controle de temperatura e diminuir emissões diretas decorrentes da combustão. Contudo, a substituição de um sistema a combustão por um sistema elétrico não pode ser analisada apenas sob a ótica energética imediata, pois envolve impactos sobre a confiabilidade operacional, o custo do ciclo de vida, a ocupação física da planta, a gestão de ativos e o desempenho ambiental.

Diante desse cenário, formula-se a seguinte questão de pesquisa: como a eletrificação de sistemas de aquecimento de fluido térmico pode contribuir para a redução de custos de manutenção, para o aumento da confiabilidade operacional e para a melhoria da eficiência e da sustentabilidade do processo industrial?

1.3 Justificativa

A relevância do tema decorre do crescente movimento de eletrificação de processos industriais, impulsionado pela busca por maior eficiência, menor emissão de poluentes e simplificação operacional. No caso específico dos sistemas de fluido térmico, a substituição do aquecimento a combustão por resistências elétricas pode eliminar

componentes tradicionalmente associados a falhas e desgaste, como queimadores, válvulas de combustível e dutos de exaustão. Essa simplificação tende a reduzir o volume de manutenção corretiva, diminuir o número de pontos críticos de falha e ampliar a previsibilidade das rotinas de inspeção.

Do ponto de vista acadêmico, o estudo contribui para a discussão sobre modernização energética e manutenção industrial, articulando fundamentos de transferência de calor, confiabilidade, gestão de ativos e viabilidade econômica. Do ponto de vista aplicado, oferece subsídios para decisões técnicas em plantas reais, especialmente em setores com elevada demanda térmica e operação contínua, como o têxtil. A pesquisa também se justifica por incorporar a variável ambiental à análise de viabilidade, uma vez que a eletrificação pode reduzir emissões diretas e alinhar o processo produtivo a práticas industriais mais sustentáveis.

1.4 Objetivos

Este estudo tem como objetivo geral avaliar a viabilidade e os benefícios da eletrificação de sistemas de aquecimento de fluido térmico, com foco na simplificação das rotinas de manutenção, no aumento da confiabilidade operacional e na melhoria da eficiência do processo.

Como objetivos específicos, busca-se:

- Descrever o funcionamento do sistema elétrico e suas diferenças em relação ao modelo a combustão;
- Analisar os impactos da eletrificação na segurança operacional e na confiabilidade do sistema;
- Comparar os custos operacionais e de manutenção entre o sistema a combustão e o sistema eletrificado;
- Examinar os efeitos da eletrificação sobre a ocupação física da planta e sobre o capital imobilizado em fluido térmico;
- Discutir os impactos ambientais da conversão sob a perspectiva da redução de emissões e da sustentabilidade industrial.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Sistemas de aquecimento por fluido térmico na indústria

Os sistemas de aquecimento por fluido térmico são amplamente empregados em processos industriais que exigem transferência indireta de calor com estabilidade térmica e operação contínua. Diferentemente dos sistemas a vapor, o aquecimento por fluido térmico permite atingir altas temperaturas de processo em pressões relativamente mais baixas, o que representa vantagem operacional em aplicações nas quais a segurança, o controle térmico e a flexibilidade de operação são fatores críticos (INCROPERA et al., 2011). Nesses sistemas, o calor é transferido a partir de uma fonte térmica para um fluido circulante em circuito fechado, que posteriormente entrega energia a reatores, trocadores de calor, secadores, colunas e outros equipamentos de processo.

Do ponto de vista da engenharia térmica, o desempenho do sistema depende não apenas das propriedades do fluido, mas também da configuração geométrica da planta, da qualidade do isolamento térmico, da estabilidade do controle de temperatura e da integridade mecânica das linhas e componentes auxiliares. Incropera et al. (2011) destacam que perdas de calor, gradientes térmicos indesejáveis e redução da eficiência global podem estar associados a longas redes de tubulação, a deficiências de projeto e ao envelhecimento dos materiais.

A seleção do fluido térmico, por sua vez, requer análise de propriedades como calor específico, estabilidade química, viscosidade, pressão de vapor e compatibilidade com os materiais da instalação. Fluidos sintéticos de alto desempenho, como o Therminol VP-1, são indicados para aplicações com temperaturas elevadas e operação contínua, justamente por apresentarem estabilidade térmica consistente em condições severas (EASTMAN, 2022). Contudo, mesmo quando o fluido é tecnicamente adequado, a confiabilidade do sistema pode ser comprometida por vazamentos, degradação térmica, formação de contaminantes e falhas em dispositivos de vedação, evidenciando que a performance do ativo resulta da interação entre projeto, operação e manutenção.

2.2 Sistemas de aquecimento a combustão e implicações na manutenção industrial

Os sistemas de aquecimento a combustão utilizam queimadores alimentados por combustíveis fósseis, convertendo a energia química do combustível em energia térmica transferida ao fluido de processo. Durante décadas, essa solução foi amplamente adotada devido à elevada capacidade de aquecimento e à flexibilidade para diferentes faixas de carga térmica. Todavia, esse tipo de sistema exige infraestrutura robusta e multiplicidade de componentes, incluindo queimadores, linhas de combustível, exaustão, sistemas de ignição, válvulas de bloqueio, dispositivos de segurança e malhas extensas de distribuição térmica.

Segundo Bloch e Geitner (2012), quanto maior a complexidade estrutural de um sistema industrial, maior a probabilidade acumulada de falhas, sobretudo em contextos de operação severa, com altas temperaturas e longos períodos de funcionamento contínuo. Em sistemas a combustão, componentes de vedação, juntas, gaxetas e conexões estão submetidos a solicitações térmicas intensas, o que favorece degradação, vazamentos e intervenções frequentes.

Sob a ótica da engenharia de manutenção, Kardec e Nascif (2013) apontam que ativos com grande número de interfaces, dispositivos auxiliares e componentes sujeitos a desgaste apresentam maior demanda por ações preventivas e corretivas, o que compromete disponibilidade e eleva custos operacionais. Em plantas industriais contínuas, essa condição pode se agravar quando o aquecimento constitui subsistema crítico para o processo produtivo, pois paradas não programadas em sistemas térmicos afetam não apenas o custo de manutenção, mas também perdas de produção, consumo energético e qualidade do produto final. Assim, embora os sistemas a combustão permaneçam tecnicamente viáveis, suas limitações tornam-se mais evidentes em contextos que exigem elevada confiabilidade e menor complexidade operacional.

2.3 Eletrificação de sistemas de fluido térmico: fundamentos e aplicações industriais

A eletrificação de sistemas de aquecimento industrial vem ganhando espaço na literatura técnica e na prática fabril como alternativa coerente com a modernização energética e com a busca por maior controle de processo. Em sistemas elétricos por resistência, a energia elétrica é convertida diretamente em calor por efeito Joule, eliminando a necessidade de combustão, exaustão de gases e alimentação de combustível. Essa configuração reduz perdas associadas a etapas intermediárias e tende a oferecer resposta térmica mais rápida, maior estabilidade de controle e melhor modularidade operacional (SMITH, 2016).

Smith (2016) destaca que sistemas eletrificados podem apresentar menor inércia térmica e melhor capacidade de modulação, especialmente quando associados a sistemas automáticos de controle. Isso favorece o atendimento mais preciso às variações de carga do processo e reduz oscilações térmicas indesejáveis. Em ambientes industriais, tais características podem se traduzir em maior uniformidade de aquecimento, menor risco de degradação do produto e aumento da eficiência operacional.

Na perspectiva da manutenção, a eletrificação também altera a arquitetura do ativo. Ao eliminar queimadores, linhas de combustível e sistemas de exaustão, o sistema passa a operar com menor quantidade de componentes mecânicos expostos a desgaste, reduzindo potenciais pontos de falha. Kardec e Nascif (2013) ressaltam que a redução da complexidade estrutural é um fator importante para o aumento da confiabilidade. Em sistemas descentralizados com reboilers elétricos, a menor extensão de tubulações e o menor inventário de fluido térmico tendem a contribuir para redução de vazamentos, simplificação das rotinas de inspeção e maior previsibilidade das intervenções de manutenção.

2.4 Manutenção industrial, confiabilidade e viabilidade de sistemas térmicos

A manutenção industrial moderna ultrapassa a lógica corretiva tradicional e se orienta pela gestão do ciclo de vida dos ativos, buscando maximizar disponibilidade,

confiabilidade, segurança e desempenho econômico. Kardec e Nascif (2013) afirmam que a confiabilidade de um sistema industrial está diretamente associada à forma como as atividades de manutenção são planejadas, executadas e integradas à operação. Nesse sentido, a escolha de determinada arquitetura tecnológica influencia o comportamento do ativo ao longo do tempo.

Bloch e Geitner (2012) observam que sistemas mais complexos e submetidos a condições severas de operação possuem maior suscetibilidade a falhas recorrentes, o que eleva o custo da manutenção corretiva e reduz a disponibilidade. Em sistemas térmicos, isso é particularmente relevante porque falhas em tubulações, conexões, dispositivos de vedação e componentes auxiliares podem desencadear perdas de energia, vazamentos de fluido e paradas de processo.

Do ponto de vista econômico, a literatura de manutenção demonstra que a análise da viabilidade de um sistema não deve se restringir ao custo direto de operação. Deve-se considerar o custo do ciclo de vida, que inclui manutenção corretiva e preventiva, perdas de produção, reposição de componentes, custos ambientais e capital imobilizado em infraestrutura e insumos. Nessa perspectiva, sistemas eletrificados podem apresentar custo energético direto superior em determinados contextos tarifários, mas simultaneamente oferecer ganhos estruturais e operacionais capazes de alterar a decisão de investimento quando se adota uma visão sistêmica de longo prazo.

2.5 Sustentabilidade, eficiência energética e transição tecnológica na indústria

A discussão sobre eletrificação de sistemas térmicos também se insere no debate mais amplo sobre transição energética e sustentabilidade industrial. A substituição de sistemas a combustão por sistemas elétricos tende a reduzir emissões diretas de gases de efeito estufa na planta, além de eliminar aspectos operacionais ligados ao controle de combustão e à exaustão. Em países com matriz elétrica relativamente limpa, esse movimento pode representar redução expressiva da pegada de carbono operacional.

Por outro lado, a viabilidade ambiental e econômica da eletrificação depende das características da matriz elétrica, da estrutura tarifária e do perfil de carga da instalação.

Isso significa que a decisão tecnológica deve ser ancorada em análise integrada, contemplando não apenas o consumo energético, mas também confiabilidade, uso do espaço físico, simplificação da manutenção e redução de riscos. Em plantas industriais consolidadas, a liberação de área antes ocupada por infraestrutura térmica extensa pode ainda representar ganho estratégico adicional, permitindo reconfiguração de layout e expansão produtiva.

Assim, a eletrificação de sistemas de fluido térmico deve ser compreendida menos como simples troca de fonte energética e mais como reconfiguração arquitetural do sistema térmico industrial, com impactos multidimensionais sobre manutenção, gestão de ativos, segurança operacional e sustentabilidade.

2.6 Segurança operacional e implicações da transição para sistemas eletrificados

A conversão de sistemas térmicos a combustão para arranjos elétricos exige análise cuidadosa de segurança operacional e de adequação da infraestrutura elétrica da planta. Embora a eletrificação elimine riscos associados à queima de combustível, à exaustão e ao manuseio de gases combustíveis, ela introduz novas exigências relacionadas à proteção elétrica, à qualidade de energia, ao dimensionamento de cabos, ao seccionamento, ao aterramento e à seletividade das proteções. Em outras palavras, a simplificação mecânica do sistema térmico não elimina a necessidade de projeto robusto; apenas desloca o foco da criticidade para uma arquitetura de potência e automação que deve ser adequadamente especificada.

Em plantas industriais contínuas, a confiabilidade do aquecimento eletrificado depende da integração entre resistências, instrumentos de temperatura, controladores, painéis, dispositivos de proteção e lógica de intertravamento. Falhas nesses elementos podem gerar sobreaquecimento, interrupção de processo e degradação prematura de componentes. Assim, a viabilidade da eletrificação está condicionada não só ao balanço energético e econômico, mas também à capacidade da planta de absorver a nova demanda elétrica sem comprometer estabilidade operacional.

Do ponto de vista da manutenção, entretanto, sistemas eletrificados tendem a oferecer maior rastreabilidade das variáveis de operação e melhor integração com

sistemas de automação e supervisão. Isso amplia a possibilidade de manutenção baseada em condição e de estratégias preditivas apoiadas em monitoramento contínuo, favorecendo a redução de falhas inesperadas e a elevação da disponibilidade do sistema.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O estudo evidenciou que a eletrificação de sistemas de aquecimento por fluido térmico, analisada em uma indústria têxtil, representa alternativa tecnicamente consistente sob a perspectiva da manutenção industrial, da confiabilidade operacional e da sustentabilidade. Embora a comparação puramente tarifária indique aumento do custo energético direto no cenário totalmente eletrificado, a análise sistêmica demonstrou que o modelo atual a combustão carrega limitações estruturais severas, expressas pelo superdimensionamento do ativo, pelo elevado capital imobilizado em fluido térmico, pela recorrência de vazamentos e pelos custos anuais de reposição e manutenção.

Os dados analisados indicam que o sistema a combustão opera com baixa aderência à demanda real da planta, mantendo infraestrutura complexa e onerosa para atendimento de carga relativamente pequena. Em contrapartida, a arquitetura elétrica tende a reduzir o número de componentes sujeitos a desgaste, diminuir interfaces críticas, simplificar as rotinas de manutenção e reduzir emissões diretas de gases de efeito estufa. A eletrificação, nesse sentido, deve ser compreendida como reconfiguração arquitetural do sistema térmico, e não apenas como substituição de fonte energética.

Conclui-se, portanto, que a decisão de conversão não deve ser fundamentada exclusivamente no custo direto da energia, mas em abordagem integrada que considere confiabilidade, custo do ciclo de vida, disponibilidade operacional, segurança, desempenho ambiental e uso estratégico do espaço industrial. Como encaminhamento para estudos futuros, recomenda-se aprofundar a modelagem do fator de carga dos *reboilers*, incorporar análises de *Life Cycle Cost*, cenários tarifários e precificação de carbono, além de avaliar arranjos intermediários de eletrificação parcial otimizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BLOCH, Heinz P.; GEITNER, Fred K. **Machinery failure analysis and troubleshooting**. 4. ed. Houston: Gulf Professional Publishing, 2012.
- EASTMAN CHEMICAL COMPANY. Therminol® VP-1 **Heat Transfer Fluid**: product technical data. Kingsport, 2022.
- INCROPERA, Frank P. et al. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- KARDEC, Allan; NASCIF, Júlio. **Manutenção: função estratégica**. 3. ed. Rio de Janeiro: Qualitymark, 2013.
- SMITH, Robin. **Chemical process design and integration**. 2. ed. Chichester: John Wiley & Sons, 2016.