



EFICIÊNCIA ENERGÉTICA DE TROCADORES DE CALOR NA INDÚSTRIA DO PETRÓLEO – REVISÃO DE LITERATURA

Mateus Alexandre de Deus Ferreira¹, Aline Takaoka Alves Baptista¹, Angela Maria Gozzo¹, Claudete Bernardo Henriques², Erika Tomie Koroishi Blini¹

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campo Mourão, Brasil
(mateus.alexandre2503@gmail.com)

² Profissional Autônomo (Aposentado – Petrobras), Campinas, Brasil

Resumo: A incrustação em trocadores de calor representa um desafio crítico na indústria do petróleo, reduzindo a eficiência térmica e elevando custos operacionais e emissões de CO₂. Este trabalho aborda uma revisão sistemática da literatura sobre a eficiência energética de trocadores de calor, com ênfase na relevância desses equipamentos, no impacto da incrustação e nas perspectivas para minimizar seus efeitos. A metodologia empregou busca estruturada nas bases *ScienceDirect* e *Web of Science*. Os resultados indicam que a incrustação é responsável por significativas perdas econômicas e ambientais, sendo a manutenção baseada em desempenho real uma abordagem promissora para otimizar a operação e reduzir impactos.

Palavras-chave: Eficiência energética; incrustação; trocador de calor; indústria do petróleo; revisão sistemática.

INTRODUÇÃO

A sustentabilidade e a redução de custos operacionais são pilares na indústria global, com a diminuição das emissões de CO₂ sendo um desafio premente para o setor petrolífero. Neste contexto, os trocadores de calor são equipamentos fundamentais, sendo a incrustação (*fouling*) um dos principais fatores que degradam seu desempenho. A incrustação, definida como o acúmulo indesejado de sólidos como asfaltenos e coque nas superfícies de troca térmica, reduz a transferência de calor e aumenta a queda de pressão, exigindo maior consumo energético e elevando os custos operacionais (Agwu *et al.*, 2025).

O estudo sobre a eficiência energética de um trocador de calor na indústria do petróleo é relevante porque pode proporcionar uma análise aprofundada sobre os prejuízos que as incrustações causam durante o processo produtivo e os impactos que podem causar à atmosfera, implicitamente. Ao compreender esse fenômeno, é possível gerar informações estratégicas para a tomada de decisão dentro do setor industrial, contribuindo tanto para a redução de custos operacionais e gerenciamento energético quanto para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa.

Para Kansha *et al.* (2022), a incrustação por petróleo bruto é um dos problemas mais graves em refinarias, pois reduz a transferência de calor ou bloqueia os tubos, exigindo mais combustível no forno após os trocadores. Nesse sentido, as incrustações – o acúmulo de depósitos sólidos na superfície de troca térmica,

comum em derivados de petróleo – interferem na eficiência dos equipamentos, pois podem afetar a transferência de calor e de massa. Com isso, a demanda por energia cresce, exigindo mais energia fóssil e agravando as emissões de CO₂.

Do ponto de vista do avanço científico, a literatura atual apresenta modelos preditivos de incrustação geralmente direcionados para água ou derivados leves de petróleo, o que deixa uma lacuna significativa para frações pesadas e óleos viscosos. Diferente dos estudos que se limitam a descrever o fenômeno, é fundamental investigar a relação entre a incrustação e a perda de eficiência térmica em um trocador de calor operando com os derivados de petróleo.

Diante do exposto, o objetivo do trabalho é realizar uma revisão de literatura com vistas à eficiência energética de trocadores de calor na indústria do petróleo, com ênfase na relevância dos trocadores de calor na indústria de petróleo, no impacto da incrustação na eficiência energética de trocadores de calor e por fim, nas perspectivas para minimizar a incrustação e otimizar a eficiência energética.

MATERIAL E MÉTODOS

Para o desenvolvimento da pesquisa, foi realizada uma revisão sistemática da literatura. Conforme Augustin *et al.* (2025), a revisão sistemática consiste em um processo estruturado de busca, seleção e análise crítica de estudos sobre um tema específico, utilizando métodos explícitos e reproduzíveis. A busca foi

conduzida nas bases *ScienceDirect* e *Web of Science*, com palavras-chave como "*heat exchanger*", "*fouling*", "*crude oil*" e "*energy efficiency*". Foram incluídos artigos revisados por pares que abordem experimental ou numericamente a incrustação em trocadores de calor de refinarias.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A relevância dos trocadores de calor na indústria do petróleo

De acordo com Cui *et al.* (2025), a síntese de redes de trocadores de calor e o projeto adequado desses equipamentos são considerados tópicos críticos no campo da engenharia química, pois o desempenho desses equipamentos impacta diretamente a eficiência, o custo e o impacto ambiental das operações. Segundo Agwu *et al.* (2025), os trocadores de calor são suscetíveis a um fenômeno que degrada seu desempenho ao longo do tempo: a incrustação, também conhecida pelo termo em inglês *fouling*. A incrustação é definida como o acúmulo indesejado de materiais sólidos — como asfaltenos, coque, sais, areia e outros contaminantes — sobre as superfícies de transferência de calor (Bergman, 2019). Este fenômeno é amplamente reconhecido na literatura como uma das principais causas de perda de eficiência em sistemas térmicos industriais, gerando prejuízos bilionários anuais para o setor de petróleo e gás.

Nadar *et al.* (2025) destacam que as refinarias de petróleo estão entre as instalações industriais que mais consomem energia no mundo, processando milhões de barris diariamente, sendo que grande parte desse consumo está associada aos processos de aquecimento, resfriamento e separação de fases. Segundo os autores, os trocadores de calor desempenham um papel vital nesse contexto, pois permitem recuperar o calor de correntes quentes e reduzir a demanda por aquecimento externo. Ademais, essa integração térmica não apenas diminui os custos operacionais, mas também contribui significativamente para a redução de emissões e para o alcance de metas de sustentabilidade energética.

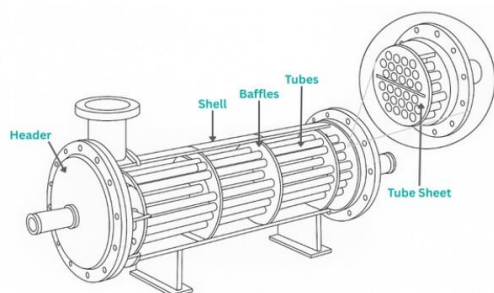


Figura 1. Componentes principais de um trocador de calor do tipo casco e tubo. Da esquerda para a direita:

cabeçote, casco, defletores, tubos e placa tubular
Fonte: Adaptado de Schilthorn Precision (2025).

A Figura 1 apresenta um diagrama esquemático de um trocador de calor casco e tubo, ilustrando seus principais componentes. Conforme Schilthorn Precision (2025), o casco (*shell*) é o corpo externo que atua como vaso de pressão, suportando temperaturas e pressões extremas. No interior, os defletores (*baffles*) criam turbulência no fluxo do fluido, aumentando a eficiência da transferência de calor e servindo como suporte para os tubos. Os tubos (*tubes*) são os principais canais de troca térmica, dispostos em feixes para maximizar a área superficial. A placa tubular (*tube sheet*) fixa as extremidades dos tubos com precisão, impedindo a mistura dos fluidos e garantindo a integridade estrutural. Por fim, os cabeçotes (*headers*) distribuem o fluido nos tubos e o coletam após a troca de calor, controlando a direção do fluxo, a queda de pressão e a vedação do sistema (Schilthorn Precision, 2025).

Impacto da incrustação na eficiência energética de trocadores de calor

Segundo Agwu *et al.* (2025), a incrustação (*fouling*) permanece como um desafio inerente aos trocadores de calor. O fenômeno, caracterizado pela deposição indesejada de substâncias nas superfícies de troca térmica, reduz a transferência de calor e eleva a queda de pressão. Consequentemente, observa-se um aumento no consumo energético, resultando em significativos impactos econômicos e operacionais, além de comprometer diretamente a eficiência de processo e a integridade operacional.

Especificamente na indústria do petróleo, Kamalifar *et al.* (2023) definem o *fouling* de óleo cru como a deposição de impurezas — como resíduos de corrosão, sais, asfaltenos e compostos termicamente decompostos — sobre as superfícies de transferência de calor. Em síntese, para esses autores, essa deposição aumenta a resistência térmica e reduz a eficiência de transferência de calor, sendo uma das principais causas de perda energética em trocadores de pré-aquecimento de refinarias e unidades de dessalinização.

De acordo com Agwu *et al.* (2025), a extensão da incrustação é fortemente influenciada por variáveis de processo e propriedades do fluido, tais como pH, condutividade, oxigênio dissolvido, turbidez e temperatura. Nesse sentido, Aminian e Shahhosseini (*apud* Agwu *et al.*, 2025) constataram que temperaturas de parede elevadas, diâmetros de tubulação maiores e baixas velocidades de escoamento favorecem a formação de depósitos.

A incrustação nos trens de pré-aquecimento de petróleo bruto representa cerca de 20 por cento de todos os casos de incrustação em trocadores de calor,



com um custo anual aproximado de 4,5 milhões de dólares americanos. Ainda, a limpeza de um único trocador incrustado pode custar entre 40 mil e 50 mil dólares por evento. Esses números revelam a necessidade urgente de previsão precisa e gestão eficaz da incrustação para garantir a confiabilidade do processo e a sustentabilidade econômica (Agwu *et al.*, 2025).

Kamalifar *et al.* (2023) apontam um dado ainda mais alarmante: para cada dia em que uma unidade produtora de 80 mil barris por dia (BPD) fica paralisada devido à incrustação, ocorre uma perda econômica de aproximadamente 6,4 milhões de dólares (assumindo 80 dólares por barril). Isso ocorre porque, conforme os autores explicam, quando o petróleo bruto não atinge a temperatura desejada nos trocadores, os fornos auxiliares precisam queimar combustível adicional para compensar a deficiência térmica.

Sob a perspectiva ambiental, os impactos são igualmente preocupantes. Enquanto Kamalifar *et al.* (2023) focam nos prejuízos diretos da paralisação, Abdulhussein *et al.* (2023) ampliam a análise para o âmbito global. Eles quantificam que a incrustação por petróleo bruto é responsável por aproximadamente 10 por cento da pegada total de dióxido de carbono das refinarias, o que corresponde a cerca de 88 milhões de toneladas de dióxido de carbono emitidas anualmente no mundo exclusivamente para compensar as perdas causadas pela sujeira nos trocadores de calor (Abdulhussein *et al.*, 2023). Portanto, otimizar a limpeza e a operação dos trocadores são fundamentais tanto do ponto de vista econômico como ambiental.

Nesse contexto, diante da magnitude dos impactos econômicos e ambientais associados à incrustação, a comunidade científica tem se dedicado a desenvolver modelos capazes de prever sua evolução ao longo do tempo, conforme amplamente discutido por Agwu *et al.* (2025). O objetivo desses modelos é permitir a antecipação das perdas de eficiência e o planejamento racional das intervenções de limpeza, evitando tanto a degradação excessiva do desempenho quanto a realização de manutenções desnecessárias e antieconômicas.

Infelizmente, Kamalifar *et al.* (2023) reconhecem que atualmente não existe uma solução global ou específica para reduzir a incrustação de petróleo cru. Isso se deve ao fato de que o óleo cru se comporta de maneira diferente de país para país, de região para região e de reservatório para reservatório, de modo que os métodos que funcionam para um tipo de petróleo podem ser ineficazes para outro (Kamalifar *et al.*, 2023).

Perspectivas para minimizar a incrustação e otimizar a eficiência energética

Como observado por Markowski *et al.* (2025), ao serem compreendidos os mecanismos e os modelos de previsão da incrustação, o passo seguinte consiste em estabelecer estratégias eficazes para mitigar seus efeitos ou, idealmente, evitar que ocorra a perda excessiva de desempenho. Nesse sentido, a literatura recente aponta para um consenso emergente: a manutenção baseada exclusivamente em intervalos fixos de tempo é ineficiente e frequentemente antieconômica, propondo-se, em seu lugar, a adoção de critérios baseados em desempenho real que pode ser monitorado continuamente.

Diante desse cenário desafiador, a comunidade científica tem buscado alternativas para mitigar os efeitos da incrustação e melhorar a eficiência energética. Markowski *et al.* (2025) destacam que a eficiência energética é crucial tanto para a indústria quanto para a economia, pois reduz custos, aumenta a competitividade e contribui para o desenvolvimento sustentável. Para esses autores, a redução do consumo de energia leva a menores emissões de gases de efeito estufa e reduz a exploração de recursos naturais como carvão, petróleo e gás natural.

Nadar *et al.* (2025) apontam que, para lidar com os desafios da incrustação, a pesquisa tem se concentrado em duas frentes principais. No aspecto dos materiais, segundo eles, ligas resistentes à corrosão, revestimentos protetores e modificações de superfície estão sendo explorados. Do ponto de vista da eficiência térmica, o uso de nanofluidos — especialmente aqueles com nanopartículas de óxido de cobre (CuO) — tem ganhado atenção devido à sua condutividade térmica melhorada e características *antifouling* (Nadar *et al.*, 2025). Ainda, os mesmos autores destacam que a adoção de sistemas de monitoramento digital, diagnóstico em tempo real e manutenção preditiva baseada em aprendizado de máquina podem detectar sinais antecipativos de incrustação, corrosão ou má distribuição de fluxo, permitindo intervenção oportuna e redução do tempo de inatividade.

Por sua vez, Markowski *et al.* (2025) complementam que diversas abordagens têm demonstrado eficácia na redução dos impactos da incrustação. Para esses autores, gerenciar cuidadosamente as condições operacionais (temperatura, pressão e fluxo) — por exemplo, aumentando a velocidade do fluxo para remover depósitos — pode reduzir as taxas de incrustação. Os revestimentos *antifouling* e aditivos químicos (inibidores, surfactantes) também se mostram promissores (Markowski *et al.*, 2025).

Segundo Markowski *et al.* (2025), protocolos regulares de limpeza, sejam mecânicos ou químicos, continuam sendo procedimentos essenciais para prevenir a ocorrência de incrustações. Todavia, os mesmos autores ressaltam que soluções avançadas de



monitoramento e modelagem preditiva oferecem o potencial para intervenções baseadas na condição, otimizando cronogramas de manutenção e evitando episódios significativos de incrustação.

Enquanto Markowski *et al.* (2025) e Nadar *et al.* (2025) focam em estratégias reativas e preditivas, Azam *et al.* (2026) trazem uma perspectiva complementar sobre o aprimoramento da transferência de calor como um desafio central. Os autores explicam que dois fatores aumentam o desempenho de um trocador de calor: o aumento da taxa de transferência de calor e a diminuição da taxa de circulação. Na produção e gestão de energia, os trocadores são usados para transportar aproximadamente 90 por cento da energia térmica, o que torna sua otimização uma questão estratégica (Azam *et al.*, 2026).

Azam *et al.* (2026) afirmam que os trocadores de calor modernos são projetados com recursos avançados — áreas de superfície aprimoradas, projetos compactos e materiais resistentes à corrosão — o que ajuda a reduzir dimensões, peso e custo. Segundo os autores, sua vida útil pode ser aumentada com o uso de aço inoxidável, cobre, alumínio, cerâmica e revestimentos à base de silício. Em síntese, a incrustação e a corrosão podem ser mitigadas por meio de limpeza e inspeção rotineiras, bem como pelo emprego de tintas e revestimentos protetores (Azam *et al.*, 2026).

Por fim, Nadar *et al.* (2025) concluem que os trocadores de calor em refinarias de petróleo enfrentam desafios operacionais complexos devido a ambientes químicos agressivos e altas cargas térmicas. A literatura aponta a corrosão, a incrustação e a erosão como os principais mecanismos de degradação, e enfatiza a importância de materiais duráveis e de cronogramas de manutenção otimizados para mitigar falhas (Nadar *et al.*, 2025). Para esses autores, a modernização com projetos avançados de trocadores, monitoramento em tempo real da incrustação e otimização automatizada do cronograma de limpeza pode melhorar diretamente a confiabilidade operacional e a relação custo-benefício.

CONCLUSÃO

Reduzir custos operacionais e adotar práticas sustentáveis tornaram-se prioridades globais para a indústria. No que se refere à redução da quantidade de CO₂, a indústria do petróleo tem buscado por esse caminho com veemência, visto que se trata de um grande desafio a ser enfrentado. Conforme Bergman (2019), à medida em que mais CO₂ é lançado na atmosfera, os mecanismos de transferência de calor radiante são modificados, o que pode resultar em mudanças nas temperaturas globais.

No contexto petrolífero, trocadores de calor são equipamentos essenciais para manter o fluido aquecido antes de ser inserido na coluna de destilação,

consoante a Abdulhussein *et al.* (2023), que também destacam que as redes de trocadores de calor das unidades de destilação de petróleo bruto afetam significativamente a eficiência energética geral e as emissões de CO₂ das refinarias.

A revisão de literatura baseada nos desafios da eficiência energética de trocadores de calor na indústria do petróleo proporcionou uma análise aprofundada sobre os prejuízos que as incrustações causam durante o processo produtivo e os impactos que podem causar à atmosfera, implicitamente. Ao compreender esse fenômeno, é possível gerar informações estratégicas para a tomada de decisão dentro do setor industrial, contribuindo tanto para a redução de custos operacionais e gerenciamento energético quanto para a diminuição das emissões de gases de efeito estufa.

Do ponto de vista do avanço científico, a literatura atual apresenta modelos preditivos de incrustação geralmente direcionados para água ou derivados leves de petróleo, o que deixa uma lacuna significativa para frações pesadas e óleos viscosos.

Verificou-se importantes desdobramentos relacionados à otimização da eficiência energética que correlacione o tempo de operação do trocador de calor com a queda do coeficiente global de transferência de calor, proporcionando ideias como critérios de limpeza baseados em desempenho real. De acordo com a literatura, nota-se que os estudos de Markowski *et al.* (2025) e Nadar *et al.* (2025) indicam que a manutenção da eficiência energética pode ser otimizada por meio de critérios de limpeza baseados em desempenho real, permitindo que se mantenha igual ou superior a 70% ao longo de um ano operacional, diferentemente de abordagens tradicionais baseadas em intervalos fixos de tempo ou em manutenção meramente corretiva.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à UTFPR Campus Campo Mourão e também ao Departamento Acadêmico de Alimentos e Engenharia Química (DAAEQ) pelo suporte para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- ABDULHUSSEIN, Zainab A.; AL-SHARIFY, Zainab T.; ALZURAJI, Mushtaq; ONYEAKA, Helen. Environmental impact of fouling for crude oil flow in preheat pipes according to oil blends. *Heliyon*, v. 9, n. 11, e21999, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844023092071>.
- AGWU, Okorie Ekwe; ALATEFI, Saad; ALKOUH, Ahmad. Explainable artificial intelligence model for predicting fouling factor in heat exchangers during crude oil refining. *Case Studies in Thermal*



- Engineering, v. 76, 107459, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214157X25017198>.
- AUGUSTIN, Wolfgang; MELO, Luis F.; WILSON, D. Ian. Towards a common taxonomy for heat exchanger fouling. *Heat and Mass Transfer*, v. 61, article 72, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00231-025-03595-z>.
- AZAM, Muhammad Waheed; SAJJAD, Uzair; MAQBOOL, Faisal; SEMPRINI, Giovanni. Enhancing Heat Exchanger Performance through Passive Techniques: A Comprehensive Review. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, v. 24, n. 1, 2026. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2151862926000010>.
- BERGMAN, Theodore L. Incropera - Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2019. Disponível em: <https://app.minhabiblioteca.com.br/reader/books/9788521636656/>.
- CUI, Yi; CUI, Ziyuan; WANG, Yufei. Heat exchanger network synthesis considering detailed heat exchanger design under fouling. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 218, p. 525-538, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0263876225002606>.
- KAMALIFAR, Somayeh; PEYGHAMBARZADEH, S. M.; AZIZI, Shima; JAMALI-SHEINI, Farid. Experimental study on crude oil fouling in preheat exchangers at different operating conditions. *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 48, 103095, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2451904923000951>.
- KANSHA, Yasuki; HORIKOSHI, Satoko; KIYOMOTO, Hikaru; KATO, Shoma; MEI, Xutao. Fouling Management in Crude Oil Heat Exchangers using Plant Data. *Chemical Engineering Transactions*, v. 94, p. 937-942, 2022. Disponível em: <https://www.cetjournal.it/cet/22/94/156.pdf>.
- MARKOWSKI, Mariusz; ALABRUDZINSKI, Slawomir; TRAFCHYNSKI, Marian. The influence of process parameters on the heat and mass exchanger (HME) operation under fouling. *Applied Thermal Engineering*, v. 279, 127543, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431125021350>.
- NADAR, Krishnavel Velandi; MULLAYOUSEF, Naser; MEQWAR, Saleh Naser. A comprehensive review on heat exchangers in crude oil refineries: Classification, degradation mechanisms, and performance optimization strategies. *Next Energy*, v. 9, 100443, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2949821X25002066>.
- SCHILTHORN PRECISION ENGINEERING. What is a Heat Exchanger? Everything You Need to Know. 2025. Disponível em: <https://www.schilthornprecision.com/blog/what-is-a-heat-exchanger-everything-you-need-to-know/>.