

# CAPÍTULO 9

## INTEGRAÇÃO ENERGÉTICA EM PROCESSOS INDUSTRIAS: REVISÃO SOBRE REDES DE TROCADORES DE CALOR, CICLO RANKINE ORGÂNICO E MÉTODOS META-HEURÍSTICOS



<https://doi.org/10.22533/at.ed.135162517039>

*Data de aceite: 05/09/2025*

### **Victor Hugo Correa**

Doutorando, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil

### **Emerson Barrios Mogollón**

Doutorando, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil

### **Deise Molinari**

Pós-Doutoranda, Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil

### **Bruna Clara Romansina**

Doutoranda, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil

### **Lucas Silva Figueiredo**

Engenheiro Químico, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo – Paraná, Brasil

### **Daiane Marques De Oliveira**

Professora, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil

### **Eyme Gabriele De Mattos**

Mestranda, Departamento de Engenharia Química, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Apucarana – Paraná, Brasil

### **Ana Caroline Raimundini Aranha**

Professora, Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Maringá – Paraná, Brasil

**RESUMO:** A integração energética em processos industriais constitui uma estratégia essencial para a redução do consumo de utilidades e a promoção da sustentabilidade. Este artigo de revisão apresenta um panorama abrangente sobre a síntese de redes de trocadores de calor (RTCs), o emprego do Ciclo Rankine Orgânico (CRO) para aproveitamento de calor residual em baixas temperaturas e o uso de métodos meta-heurísticos na otimização energética. São discutidas abordagens sequenciais e simultâneas de síntese de RTCs, a aplicação da Análise Pinch e as diferentes configurações do CRO (sem sangria, com regenerador e com sangria). Além disso, destaca-se a relevância de algoritmos como a Otimização

por Enxame de Partículas na resolução de problemas complexos. A revisão evidencia o potencial da integração dessas tecnologias para aumentar a eficiência energética, reduz custos e minimizar impactos ambientais, apontando ainda desafios e perspectivas para pesquisas futuras.

**PALAVRAS-CHAVE:** Integração energética; Redes de trocadores de calor; Métodos metaheurísticos.

## ENERGY INTEGRATION IN INDUSTRIAL PROCESSES: A REVIEW ON HEAT EXCHANGER NETWORKS, ORGANIC RANKINE CYCLE, AND METAHEURISTIC METHODS

**ABSTRACT:** Energy integration in industrial processes is a key strategy to reduce utility consumption and promote sustainability. This review paper provides a comprehensive overview of heat exchanger network (HEN) synthesis, the application of the Organic Rankine Cycle (ORC) for low-temperature waste heat recovery, and the role of metaheuristic methods in energy optimization. Sequential and simultaneous approaches for HEN synthesis are discussed, along with Pinch Analysis and different ORC configurations (basic, regenerative, and with turbine bleeding). Furthermore, the relevance of algorithms such as Particle Swarm Optimization is emphasized for solving complex optimization problems. The review highlights the potential of integrating these technologies to enhance energy efficiency, reduce costs, and minimize environmental impacts, while also identifying challenges and future research directions.

**KEYWORDS:** Energy integration; Heat exchanger networks; Metaheuristic methods.

## INTRODUÇÃO

A integração energética em processos industriais constitui uma estratégia fundamental para otimizar a utilização de recursos térmicos, reduzindo a dependência de utilidades externas e promovendo benefícios econômicos e ambientais (Linnhoff; Hindmarsh, 1983). Com o aumento da demanda por sustentabilidade e eficiência energética, métodos como a síntese de redes de trocadores de calor (RTCs) e a aplicação de ciclos Rankine orgânicos (CROs) têm se destacado como soluções eficazes para a recuperação de calor residual em fontes de baixa temperatura (Bao; Zhao, 2013). Este artigo revisa os fundamentos teóricos e as aplicações práticas dessas abordagens, explorando sua evolução histórica e relevância para a engenharia de processos. A análise abrange desde o desenvolvimento de conceitos como a tecnologia Pinch até a utilização de métodos meta-heurísticos para resolver problemas complexos de otimização energética (Ravagnani; Caballero, 2012; Santos et al., 2020).

O interesse pela síntese de RTCs teve início em meados do século XX, com os primeiros registros de estudos sistemáticos datando de Broeck (1944). A partir da década de 1960, avanços significativos foram realizados, como os trabalhos de Westbrook (1961), que utilizou programação dinâmica, e de Hwa (1965), que tratou a síntese de RTCs como um

problema independente, empregando programação separável. Esses esforços culminaram em contribuições pioneiras de pesquisadores como Rudd e colaboradores (Lee; Masso; Rudd, 1969), que estabeleceram bases para métodos modernos de integração energética. A introdução da tecnologia Pinch na década de 1980, conforme consolidada por Linnhoff e Hindmarsh (1983), revolucionou o campo ao permitir a identificação de pontos críticos de troca térmica, minimizando o consumo energético em plantas industriais.

Os ciclos Rankine orgânicos emergem como uma alternativa promissora para aproveitar fontes de calor de baixa temperatura, diferenciando-se dos ciclos Rankine tradicionais por utilizarem fluidos orgânicos com pontos de ebulição reduzidos (Bao; Zhao, 2013). Esses ciclos, que podem operar com configurações variadas, como sem sangria, com regenerador ou com sangria na turbina, permitem a conversão eficiente de calor residual em trabalho mecânico. A integração de CROs com RTCs, conforme explorado por Pavão et al. (2023), possibilita otimizar sistemas industriais sem a necessidade de alocação detalhada de trocadores, utilizando estimativas de custo total anualizado (CTA) como função objetivo. Essa abordagem híbrida combina princípios termodinâmicos com ferramentas computacionais avançadas, destacando-se como uma solução versátil para desafios energéticos.

A metodologia Pinch desempenha um papel central na integração energética, fornecendo estimativas de custos operacionais e de capital por meio da construção de curvas compostas e da identificação do ponto Pinch (Ahmad, Linnhoff; Smith, 1990). Complementarmente, métodos meta-heurísticos, como a Otimização por Enxame de Partículas (PSO), têm se mostrado eficazes na resolução de problemas complexos de otimização estocástica, superando abordagens determinísticas em cenários de aproveitamento de calor residual (Kennedy; Eberhart, 1995; Santos et al., 2020). Esta revisão busca mapear o estado da arte dessas tecnologias, destacando suas interconexões e identificando oportunidades para inovações futuras, como a aplicação de inteligência artificial na seleção de fluidos ou simulações em tempo real.

Por meio da síntese de literatura relevante, este artigo visa consolidar o conhecimento sobre integração energética, enfatizando a importância de abordagens interdisciplinares para enfrentar os desafios da sustentabilidade energética. Os avanços discutidos reforçam o potencial de RTCs, CROs, análise Pinch e métodos meta-heurísticos para promover eficiência e reduzir impactos ambientais em processos industriais, apontando direções para pesquisas futuras.

## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será realizada uma revisão da literatura acerca da integração energética e da síntese de redes de trocadores de calor (RTCs), além da aplicação dos ciclos Rankine orgânicos (CROs) e das abordagens encontradas na literatura relacionadas a parâmetros, configurações e análises. Também serão discutidos a Análise Pinch e o emprego de métodos meta-heurísticos na solução de problemas ligados à integração energética.

## Integração energética de processos e projeto de RTCs

A integração energética constitui um campo da engenharia de processos voltado ao aproveitamento máximo da energia em plantas industriais, tendo como meta a redução do consumo de utilidades e, consequentemente, a diminuição de custos operacionais.

O interesse inicial pela síntese de redes de trocadores de calor remonta a Broeck (1944), mas somente a partir da década de 1960 esse tema passou a ser investigado com maior profundidade. Westbrook (1961) empregou a programação dinâmica em seus estudos, enquanto Hwa (1965) foi pioneiro ao considerar a síntese de RTCs como um problema em si, e não apenas uma modificação de processo, utilizando a programação separável como abordagem.

Pesquisadores da Universidade de Wisconsin, como Rudd e colaboradores, foram responsáveis por alguns dos primeiros trabalhos relevantes sobre o tema (Lee; Masso; Rudd, 1969). Posteriormente, Hohmann e Lockhart desenvolveram estudos que culminaram na tese de doutorado de Hohmann (1971). Embora pouco reconhecido na época, esse trabalho introduziu conceitos que se tornaram fundamentais para a formulação da chamada Tecnologia Pinch.

Foi na década de 1980 que o conceito de ponto de Pinch e a Tecnologia Pinch se consolidaram, principalmente pelos estudos de Linnhoff e Hindmarsh (1983). Desde então, diferenciam-se claramente os métodos baseados em programação matemática daqueles fundamentados em heurísticas e princípios termodinâmicos. Diversos autores também buscaram integrar conceitos termodinâmicos com técnicas de otimização mais avançadas.

Atualmente, a síntese de RTCs pode ser conduzida por diferentes estratégias, geralmente classificadas em duas grandes categorias: métodos sequenciais e métodos simultâneos (Ravagnani; Caballero, 2012). Dentro dessa classificação, a Análise Pinch é considerada um método sequencial.

### Abordagens sequenciais

Com o intuito de diminuir a complexidade computacional associada ao problema de síntese de RTCs, os métodos sequenciais realizam a divisão do problema em subetapas. Essa estratégia garante a obtenção de uma rede viável (embora não necessariamente ótima).

1. De modo geral, o procedimento é dividido em três etapas principais:
2. Determinação do mínimo consumo de utilidades;
3. Definição da rede com o menor número possível de trocadores de calor;
4. Cálculo dos custos de investimento mais baixos.

A Tecnologia Pinch, proposta por Linnhoff e Hindmarsh (1983), é um exemplo notável dessa abordagem. Por meio de conceitos termodinâmicos e da construção da chamada cascata de energia, é possível estimar a quantidade mínima de utilidades, calcular as cargas térmicas e identificar excedentes, estabelecendo assim a demanda mínima de utilidades do sistema (Leeson et al., 2017).

Um estudo representativo é o de Floudas et al. (1986), que buscou não apenas a geração de redes considerando as metas mínimas de utilidades, mas também a redução no número de unidades de troca térmica e a obtenção de custos mínimos.

## Abordagens simultâneas

Diferentemente dos métodos sequenciais, as abordagens simultâneas não realizam a decomposição do problema em subproblemas. Em vez disso, consideram de forma conjunta os aspectos operacionais e de custos para a obtenção direta da rede de trocadores de calor.

Uma característica central dessa classe de métodos é a formulação de superestruturas, que servem como base para a construção de modelos matemáticos. Geralmente, esses modelos assumem a forma de programação não linear inteira mista (PNLIM), fundamentados em princípios termodinâmicos, balanços de massa e de energia.

Entre os trabalhos de maior destaque está o modelo desenvolvido por Yee e Grossmann (1990), baseado em uma superestrutura composta por estágios. Nesse modelo, são representadas as trocas de calor possíveis entre os pares de correntes do sistema, partindo da suposição de que a mistura de correntes ocorre de maneira isotérmica.

## Aplicação da Análise Pinch

A Análise Pinch é uma ferramenta capaz de fornecer uma “solução implícita” para problemas de integração energética a partir de um conjunto definido de correntes de processo. Nesse tipo de abordagem, obtém-se uma estimativa dos custos de capital e de operação, conforme o método proposto por Ahmad, Linnhoff e Smith (1990). Já a chamada “solução explícita” corresponde ao detalhamento completo da integração energética, incluindo a configuração da rede de trocadores de calor, os pares de correntes, as cargas térmicas e as áreas de troca necessárias.

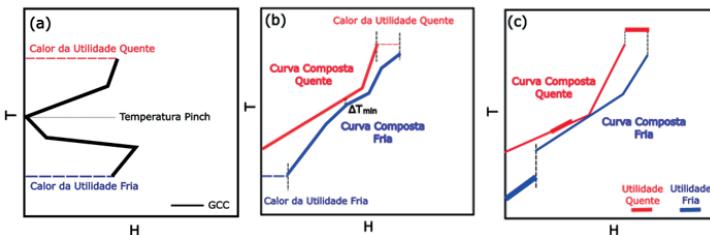
No contexto deste trabalho, considera-se o possível acoplamento entre RTC e CRO. No ciclo básico, uma corrente é aquecida no evaporador e outra é resfriada no condensador, permitindo a otimização do CRO de acordo com as demandas energéticas da planta. Nessa etapa, não é necessário alocar fisicamente os trocadores de calor no processo, bastando utilizar uma estimativa do custo total anualizado (CTA) como função objetivo.

Segundo Pavão et al. (2023), a aplicação do método exige inicialmente uma tabela contendo os principais dados das correntes, como: capacidade térmica ( $C_p$ ), temperaturas de entrada ( $T_e$ ) e saída ( $T_s$ ), além do coeficiente convectivo de transferência de calor ( $h$ ). Outro parâmetro essencial é a temperatura mínima de aproximação de recuperação de calor ( $\Delta T_{min}$ ), definida como a menor distância vertical entre as curvas compostas quente e fria.

A partir desses parâmetros, é possível representar graficamente o comportamento energético das correntes por meio da grande curva composta (Figura 1a). Em seguida, são construídas as curvas compostas quente e fria (Figura 1b), que revelam lacunas horizontais correspondentes às demandas energéticas. Por fim, com a alocação adequada de utilidades, essas curvas são ajustadas até se tornarem curvas compostas balanceadas (Figura 1c).

Essas curvas permitem estimar a área mínima total de troca térmica da rede hipotética. A análise é realizada a partir da divisão em intervalos de entalpia, cada qual suficiente para viabilizar as trocas de calor de forma vertical (Pavão et al., 2023).

Assim, diante de uma configuração específica de CRO e de processos, é possível calcular os custos aproximados de uma RTC/CRO a partir do valor de  $\Delta T_{min}$  e das cargas térmicas associadas às utilidades. Nesse caso, as variáveis de decisão passam a englobar simultaneamente os parâmetros do CRO e aqueles definidos pelo operador Pinch.



**Figura 1** – (a) Grande Curva Composta (CCG), (b) Curvas Compostas Quente e Fria (CCQ e CCF) Não Balanceadas e (c) CCQ e CCF Balanceadas.

## Ciclo Rankine Orgânico

Entre as tecnologias mais promissoras para o aproveitamento de energia residual de correntes em baixas temperaturas encontra-se o Ciclo Rankine Orgânico (CRO).

De maneira simplificada, o CRO segue os mesmos princípios do ciclo Rankine convencional, no qual a água é utilizada como fluido de trabalho. A diferença essencial está no fato de que, no CRO, são empregados fluidos orgânicos, que apresentam temperaturas de mudança de fase inferiores, possibilitando a operação eficiente em condições de menor temperatura.

No ciclo Rankine tradicional, o vapor d'água gerado na caldeira sob alta pressão e temperatura é expandido em uma turbina, resultando na produção de trabalho. Em seguida, o vapor passa por um condensador operando em baixa pressão, onde ocorre a condensação. O fluido condensado é então pressurizado por uma bomba de alimentação, retornando à caldeira, onde novamente é aquecido até a vaporização, completando o ciclo.

No CRO, esse processo é adaptado: a fonte de calor utilizada no evaporador para promover a vaporização do fluido de trabalho é substituída por calor residual proveniente de correntes de processo a temperaturas mais baixas.

Segundo Bao e Zhao (2013), diversos parâmetros influenciam diretamente o desempenho do CRO, entre eles:

- O dimensionamento dos equipamentos (como a turbina ou outros dispositivos de expansão);
- Os aspectos econômicos e ambientais;
- A seleção do fluido de trabalho, que afeta tanto a eficiência quanto a estabilidade do ciclo.

Além disso, diferentes configurações do CRO podem ser estudadas, como a introdução de sangria na turbina, que modifica sua operação e eficiência.

### *Ciclo Rankine Orgânico sem sangria*

O ciclo Rankine orgânico na configuração sem sangria é composto por quatro equipamentos principais: bomba, condensador, turbina e evaporador.

Na Figura 2 é apresentado o diagrama temperatura–entropia (TxS) do ciclo e a sua representação esquemática. Os estados do fluido ao longo do processo são numerados para facilitar a compreensão.

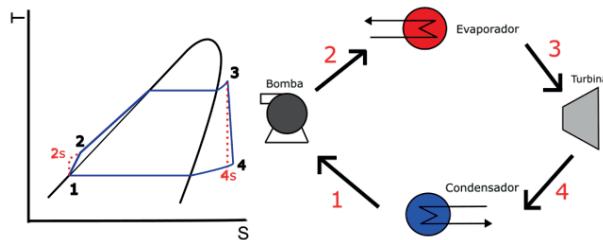


Figura 2 – Diagrama Temperatura-Entropia e representação esquemática do CRO.

No estado (1), o fluido é comprimido pela bomba até atingir o estado (2), no qual sua pressão é elevada. Em seguida, ao entrar no evaporador, passa do estado (2) para o (3), sendo aquecido até sofrer mudança de fase do líquido para o vapor, sob pressão constante. O fluido então se expande na turbina, reduzindo sua pressão até o estado (4). Por fim, ocorre o resfriamento no condensador, promovendo a condensação e retornando ao estado (1), novamente em fase líquida.

Os estados acompanhados da letra “s” indicam as condições isentrópicas do processo.

Nessa configuração, é possível o acoplamento de uma RTC às correntes que demandam adição ou remoção de calor, especificamente no evaporador e no condensador.

### Ciclo Rankine Orgânico com regenerador

Na configuração com regenerador, o ciclo Rankine orgânico é constituído pelos seguintes equipamentos: bomba, condensador, turbina, evaporador e regenerador.

A Figura 3 apresenta diagrama temperatura–entropia e o esquema do ciclo, com numeração que identifica os estados do fluido ao longo do processo.

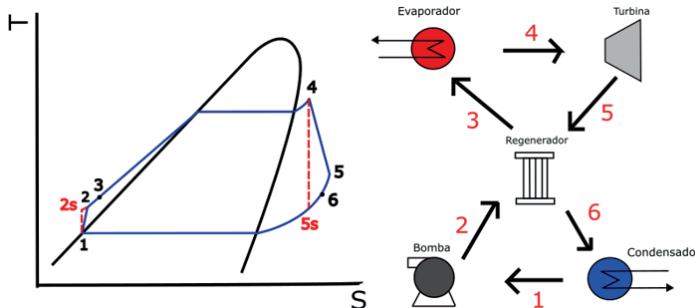


Figura 3 – Diagrama Temperatura-Entropia e representação esquemática do CRO com regenerador.

Do estado (1) para o (2), o fluido é comprimido pela bomba, aumentando sua pressão. Em seguida, ao passar do estado (2) para o (3), atravessa o regenerador, onde ocorre uma troca de calor entre a corrente comprimida e a corrente de saída da turbina, ainda aquecida. Posteriormente, o fluido segue para o evaporador, sendo aquecido e vaporizado a pressão constante, alcançando o estado (4). No passo seguinte, ocorre a expansão na turbina, levando o fluido ao estado (5). A corrente então retorna ao regenerador, iniciando o processo de resfriamento (estado (6)), e segue para o condensador, onde passa para a fase líquida e retorna ao estado (1).

Assim como na configuração anterior, todos os estados indicados com a letra “s” representam condições isentrópicas.

O uso do regenerador proporciona maior eficiência ao ciclo, aproveitando parte do calor que seria descartado. Além disso, tal configuração também possibilita o acoplamento de uma RTC nas correntes que exigem troca térmica, ou seja, no evaporador e no condensador.

### Ciclo Rankine Orgânico com sangria

No CRO com sangria, ocorre uma modificação relevante em relação às configurações anteriores: uma fração do vapor é extraída da turbina antes da expansão completa. Para viabilizar essa operação, além dos equipamentos básicos (bomba, condensador, turbina e evaporador), são adicionados um condensador extra e uma bomba específica para a corrente sangrada, como ilustrado na Figura 4, juntamente com o diagrama temperatura–entropia correspondente.

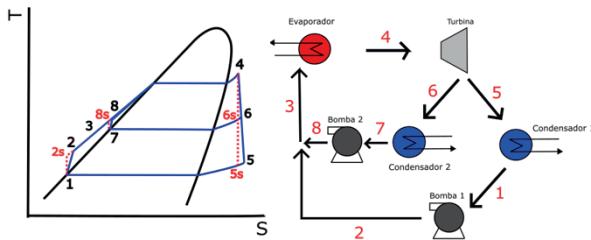


Figura 4 – Diagrama Temperatura-Entropia e representação esquemática do CRO com sangria.

O processo pode ser descrito da seguinte forma: A corrente de fluido no estado (1) passa pela bomba, elevando sua pressão até o estado (2), correspondente à fração não sangrada da turbina. A fração de vapor extraída percorre os estados (7) a (8), onde é comprimida por outra bomba. As duas correntes são então reunidas, atingindo o estado (3), antes de ingressar no evaporador. No evaporador, ocorre a vaporização, levando o fluido ao estado (4). Em seguida, o fluido é expandido na turbina, resultando nas correntes de saída em estado (5) (expansão total) e estado (6) (fração sangrada). Ambas as correntes passam por condensação: do estado (5) ao (1) para a fração expandida totalmente e do estado (6) ao (7) para a fração sangrada.

Essa configuração apresenta três pontos principais de troca térmica que podem ser acoplados a uma RTC: o evaporador, o condensador 1 e o condensador 2.

### Resolução de Modelos por Métodos Meta-Heurísticos

Os métodos meta-heurísticos constituem estratégias de otimização estocástica, caracterizadas pelo uso de algum grau de aleatoriedade para buscar soluções viáveis em problemas complexos (Luke, 2009). Diferentemente das técnicas determinísticas tradicionais, essas abordagens têm se mostrado especialmente promissoras na maximização do aproveitamento de calor residual, conforme apontam resultados recentes da literatura (Santos et al., 2020).

Um exemplo amplamente utilizado é a Otimização por Enxame de Partículas (Particle Swarm Optimization – PSO). Originalmente concebida para resolver problemas de otimização contínuos e não lineares, essa técnica tem encontrado aplicações em diversos contextos práticos.

No PSO, cada partícula representa uma solução candidata, análoga a um indivíduo dentro de um enxame. A dinâmica de busca pode ser comparada ao movimento de aves em um bando: quando uma partícula encontra uma rota mais promissora para alcançar seu objetivo, as demais tendem a se deslocar em direção semelhante, explorando o espaço de busca até que uma solução ótima seja identificada (Kennedy; Eberhart, 1995).

A formulação matemática do PSO considera tanto a posição atual de cada partícula no espaço de busca quanto sua velocidade de deslocamento. As equações propostas por Kennedy e Eberhart (1995) e posteriormente aprimoradas por Shi e Eberhart (1998) são apresentadas a seguir:

$$(v_{i+1})_j = \omega_i * (v_i)_j + c_1 * r_1 * \\ [(p_i)_j - (x_i)_j] + c_2 * r_2 * \\ [(p_i)_g - (x_i)_j] \quad (1)$$

$$(x_{i+1})_j = (x_i)_j + (v_{i+1})_j \quad (2)$$

$$\omega_i = \omega_{\max} - \frac{\omega_{\max} - \omega_{\min}}{I} (i) \quad (3)$$

Em que: j representa a partícula; i é a iteração atual; i+1 representa a nova iteração;  $\omega$  é um parâmetro referente à inércia, que leva em conta a influência das velocidades atual e nova; v é a velocidade;  $c_1$  e  $c_2$  são parâmetros referentes à melhor solução e à melhor solução global, respectivamente;  $r_1$  e  $r_2$  são valores randômicos; p é a melhor posição encontrada; g diz respeito ao melhor encontrado no enxame até o momento.

## CONCLUSÃO

A análise da literatura evidencia que a integração energética de processos industriais, aliada à síntese de redes de trocadores de calor e à utilização de ciclos Rankine Orgânicos, representa uma estratégia eficiente para reduzir o consumo de utilidades e aumentar a sustentabilidade operacional. A aplicação da Análise Pinch e de métodos sequenciais ou simultâneos na síntese de RTCs permite estimar requisitos energéticos, otimizar a alocação de trocadores e reduzir custos de investimento, mostrando-se uma ferramenta consolidada na engenharia de processos.

O Ciclo Rankine Orgânico se apresenta como uma tecnologia promissora para o aproveitamento de calor residual em temperaturas mais baixas, sendo capaz de converter energia térmica em trabalho mecânico de forma eficiente. As diferentes configurações do ciclo — sem sangria, com regenerador e com sangria na turbina — ampliam as possibilidades de integração energética, permitindo o acoplamento com RTCs para maximizar a recuperação de calor e melhorar o desempenho global do sistema.

Adicionalmente, a incorporação de métodos meta-heurísticos, como a Otimização por Enxame de Partículas, oferece uma abordagem moderna e eficiente para a resolução de problemas complexos de otimização energética, conciliando critérios técnicos e econômicos e superando limitações de métodos determinísticos tradicionais.

Dessa forma, a combinação das abordagens estudadas neste artigo — integração energética, síntese de RTCs, CRO e algoritmos meta-heurísticos — fornece uma base sólida para o desenvolvimento de estratégias que promovam maior eficiência energética em processos industriais. Os resultados da literatura apontam para avanços significativos na redução de custos e impactos ambientais, ao mesmo tempo em que destacam desafios futuros relacionados à modelagem, otimização e implementação prática dessas tecnologias.

## AGRADECIMENTOS OU FINACIAMENTO

Os autores gostariam de agradecer pelo apoio financeiro da CAPES – Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

## REFERÊNCIAS

AHMAD, S.; LINNHOFF, B.; SMITH, R. Cost optimum heat exchanger networks—2. Targets and design for detailed capital cost models. *Computers & Chemical Engineering*, v. 14, n. 7, p. 751-767, jul. 1990.

BAO, J.; ZHAO, L. A review of working fluid and expander selections for organic Rankine cycle. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 24, p. 325-342, ago. 2013.

BROECK, T. Economic selection of exchanger sizes. *Industrial & Engineering Chemistry*, v. 36, n. 1, p. 64-67, 1944.

FLOUDAS, C. A.; CIRIC, A. R.; GROSSMANN, I. E. Automatic synthesis of optimum heat exchanger network configurations. *AIChE Journal*, v. 32, n. 2, p. 276–290, fev. 1986.

HOHMANN, E. C. Optimum networks for heat exchange. *Tese (Doutorado em Engenharia Química – Filosofia) – University of Southern, Los Angeles, 1971.*

HWA, C. S. Mathematical formulation and optimization of heat exchanger network using separable programming. *AIChE International Chemical Engineering Symposium Series*, 1965.

KENNEDY, J.; EBERHART, R. Particle swarm optimization. In: *IEEE INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS (ICNN), 1995. Proceedings.... [S. I.]: IEEE, 1995. p. 1942-1948.*

LEE, K. F.; MASSO, A. H.; RUDD, D. F. Branch and bound synthesis of integrated process design. *Industrial & Engineering Chemical Fundamentals*, v. 9, p. 48-58, 1970.

LEESON, D. et al. Simultaneous design of separation sequences and whole process energy integration. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 125, p. 166–180, set. 2017.

LINNHOFF, B.; HINDMARSH, E. The pinch design method for heat exchanger networks. *Chemical Engineering Science*, v. 38, n. 5, p. 754-763, 1983.

LUKE, S. *Essentials of Metaheuristics*. 2. ed. Virgínia: Lulu, 2013.

PAVÃO, L. V. et al. Multiple utilities targeting in energy integration considering rigorous temperature-enthalpy relations. *Chemical Engineering Science*, v. 276, jul. 2023.

RAVAGNANI, M. A. S. S.; CABALLERO, J. A. *Redes de trocadores de calor*. Maringá: Eduem, 2012.

SANTOS, M. N. P. et al. Optimal integration of an Organic Rankine Cycle to a process using a heuristic approach. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 38, n. 4, p. 653-667, dez. 2020.

SHI, Y.; EBERHART, R. A modified particle swarm optimizer. In: *Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on Evolutionary Computation*, 1998. Publisher: IEEE.

WESTBROOK, G. T. Use this method to size each stage for best operation. *Hydrocarbon Processing Petroleum Refining*, v. 40, p. 201-206, 1961.

YEE, T. F.; GROSSMANN, I. E. Simultaneous optimization models for heat integration-II. Heat exchanger network synthesis. *Computers & Chemical Engineering*, v. 14, n. 10, p. 1165–1184, out. 1990.