

OTIMIZAÇÃO BASEADA EM SIMULAÇÃO DE REDES DE TROCADORES DE CALOR INTEGRADAS A CICLOS RANKINE ORGÂNICOS

L. S. I. Omori¹, L. V. Pavão¹

¹Universidade Estadual de Maringá (UEM), Maringá, Brasil (pg406364@uem.br)

Este trabalho propõe uma metodologia para a síntese e otimização simultânea de redes de trocadores de calor integradas a Ciclos Rankine Orgânicos (ORC). Utilizando o Aspen Plus V15, o modelo parte de cálculos rigorosos de propriedades termodinâmicas para superar a premissa de capacidades caloríficas constantes. Aplicado a um estudo de caso clássico, o algoritmo avaliou os trade-offs da integração do ciclo na rede, adaptando-o ao problema para minimizar os custos.

Palavras-chave: Integração Energética; Rede de Trocadores de Calor; Ciclo Rankine Orgânico; Simulador de Processos.

INTRODUÇÃO

A crescente demanda global por energia, aliada à necessidade da mitigação de impactos ambientais relacionados à sua geração, tem impulsionado o desenvolvimento de processos industriais intrinsecamente mais eficientes e sustentáveis. Neste contexto, a integração energética assume um papel fundamental na síntese de processos. O aproveitamento térmico das correntes quentes de processo para aquecer as correntes frias reduz, simultaneamente, a demanda por utilidades externas, tanto de aquecimento quanto de resfriamento. Consequentemente, minimizam-se os custos operacionais referentes a essas utilidades, como também as possíveis emissões de poluentes inerentes à sua geração (Yang et al., 2025).

O problema de síntese de rede de trocadores de calor (RTC) consiste, portanto, em encontrar a melhor configuração das trocas térmicas da rede, dadas as condições de entrada e saída das correntes quentes e frias e das utilidades disponíveis. Devido à sua natureza altamente combinatória, esse problema é classificado como de complexidade *NP-hard*.

Estudos nesta área datam da década de 1940. Os métodos desenvolvidos podem ser agrupados em duas grandes abordagens: a termodinâmica e a de programação matemática. A primeira caracteriza-se pela decomposição do problema em procedimentos algorítmicos que, por meio de heurísticas baseadas nos conceitos termodinâmicos, como a metodologia Pinch, que guiam a síntese da rede de trocas térmicas. Já os métodos de programação matemática envolvem a formulação de um problema de otimização, cuja

resolução determina a melhor configuração da rede (Lira-Barragán et al., 2014).

Os métodos desenvolvidos inicialmente adotavam diversas simplificações em seus modelos, devido às limitações de capacidade computacional da época. No entanto, o expressivo avanço do poder computacional e o desenvolvimento de outras técnicas de resolução de problemas de otimização baseadas em meta-heurísticas permitiram a adoção de modelos significativamente mais rigorosos. Dessa forma, simplificações históricas, como a premissa de capacidade calorífica constante, passam a ser desconsideradas, o que leva a modelos mais realistas e possibilita a representação de casos como fluidos em condições críticas ou mudanças de fase de forma muito mais precisa (L. V. Pavão et al., 2023).

Em paralelo ao desenvolvimento desses modelos mais rigorosos, estudos passaram a integrar ciclos de potência às redes de trocadores de calor (Desai e Bandyopadhyay, 2009). Assim, a energia excedente das correntes de processo não seria aproveitada apenas na forma de calor para o aquecimento de outras correntes, mas também convertida em trabalho, permitindo uma ainda maior eficiência termodinâmica global do processo.

Dentre esses ciclos, para a integração na rede de trocadores de calor, destaca-se o Ciclo Rankine Orgânico (ORC). Assim como o Ciclo Rankine convencional a vapor, o ORC consiste em quatro equipamentos principais: bomba, evaporador, turbina e condensador. A geração de trabalho ocorre na turbina, onde um vapor em alta pressão e temperatura é expandido para uma condição de menor pressão,

gerando trabalho de eixo. Esse vapor a baixa pressão é condensado antes de ser bombeado para a elevação de sua pressão e encaminhado ao evaporador, retornando à condição termodinâmica inicial de alta pressão e temperatura. No entanto, a principal distinção entre os ciclos reside no fluido de trabalho utilizado. Enquanto o Ciclo Rankine a vapor utiliza a água, o ORC emprega fluidos orgânicos, os quais, por possuírem menores pontos de ebulição, permitem aproveitar no evaporador um calor de menor qualidade, ou seja, de fontes a menor temperatura (Hipólito-Valencia et al., 2013).

Trabalhos iniciais sobre a integração de ciclos termodinâmicos em redes de trocadores de calor apenas verificaram a melhor posição dos trocadores do ciclo após a síntese da rede, permitindo exclusivamente o aproveitamento do calor residual. A fim de obter uma configuração ótima global, capaz de balancear melhor os custos operacionais, de capital e o trabalho gerado no ciclo, estudos mais recentes desenvolveram métodos capazes de otimizar ambos os sistemas de forma simultânea. Neste contexto, o ciclo passou a integrar as superestruturas dos modelos, com seus parâmetros otimizados em conjunto com a definição das trocas térmicas (Chen et al., 2014).

Apesar desses avanços recentes, muitos dos estudos que abordam as RTCs integradas a ciclos termodinâmicos ainda adotam diversas simplificações no modelo. Diante disso, o objetivo deste trabalho é resolver um problema de síntese de rede de trocadores de calor integrada a um Ciclo Rankine Orgânico, considerando cálculos rigorosos de propriedades baseados no simulador de processos Aspen Plus V15 e eliminando a premissa de capacidades caloríficas constantes. O modelo proposto visa otimizar os parâmetros do ciclo de maneira conjunta com a síntese da rede, de forma a minimizar o Custo Total Anualizado (TAC) de ambos os sistemas para um dado problema.

MATERIAL E MÉTODOS

Modelagem e Otimização via Operador Pinch

A metodologia proposta baseia-se no algoritmo denominado Operador Pinch, desenvolvido em Python, que opera de forma acoplada a uma simulação no software Aspen Plus V15 visando à minimização dos custos totais anualizados (TAC) da RTC integrada ao ORC. A modelagem termodinâmica no simulador é estruturada previamente à execução do algoritmo. Nela, utiliza-se o bloco *Heater* para representar tanto o aquecimento quanto o resfriamento de todas as correntes que integram a rede de trocadores de calor, incluindo as utilidades, simulando a variação de suas temperaturas entre as condições de entrada e saída.

Nessa simulação, o ciclo ORC é incorporado ao modelo, com seus respectivos evaporador e condensador também modelados por blocos *Heater*, uma vez que integram a rede de trocadores de calor. Como fluido de trabalho foi utilizado o 1,1,3,3-pentafluoropropano com o pacote termodinâmico SRK. Os valores de vazão do fluido de trabalho e as pressões de operação da turbina e da bomba constituem as variáveis de decisão do problema e são otimizados iterativamente durante a execução do algoritmo.

Na etapa de otimização, o Operador Pinch emprega a meta-heurística *Particle Swarm Optimization* (PSO) com o intuito de minimizar o TAC. Os parâmetros cognitivo e social (c_1 e c_2) foram definidos com o valor de 1,1, e um fator de inércia com decaimento linear entre 0,75 e 0,1 foi adotado ao longo das iterações. Além disso, foi utilizado um enxame de 50 partículas e um critério de parada de 50 iterações.

Para cada partícula do enxame, o algoritmo atribui valores para as pressões da bomba e da turbina, para as temperaturas de saída do evaporador e do condensador e a vazão do ciclo Rankine Orgânico, executando a simulação com a configuração proposta. As frações de cada tipo de utilidade quente e fria com relação às utilidades requeridas, assim como a temperatura mínima de aproximação (EMAT), também constituem variáveis de decisão e têm seus valores atribuídos para cada partícula.

A partir dos resultados do simulador, extraem-se os perfis de entalpia em função da temperatura para cada *Heater* da simulação, o que permite determinar, por meio das Curvas Compostas, a demanda de utilidades e a estimativa de área mínima da rede de trocadores de calor. Adicionalmente, quantificam-se os trabalhos consumidos e gerados pela bomba e pela turbina, respectivamente. Esses dados são aplicados na função objetivo do problema, que consiste na minimização do Custo Total Anualizado (TAC), formulada matematicamente na Equação 1:

$$TAC = CC_{RTC} + OC_{RTC} + CC_{P,ORC} + OC_{P,ORC} + CC_{T,ORC} + OC_{T,ORC} \quad (1)$$

Em que CC se refere aos custos de capital e OC aos custos operacionais, com os subscritos P e T referentes à bomba e à turbina do ORC, respectivamente. As correlações utilizadas para a avaliação econômica desses equipamentos e da rede de trocadores de calor, bem como os parâmetros financeiros adotados, foram baseados no trabalho de Corrêa et al. (2025) Destaca-se que o trabalho gerado pela turbina é contabilizado como receita da venda de energia, sendo deduzido dos custos totais, ou seja, o custo operacional deste equipamento assume um valor negativo, representando essa receita. Ressalta-

se, ainda, que o evaporador e o condensador do ciclo Rankine Orgânico já estão computados no custo da rede de trocadores de calor (CC_{RTC} e OC_{RTC}) e não são somados separadamente na formulação do TAC para evitar dupla contagem.

Para a síntese da topologia da rede, utiliza-se o SA-RFO, um código desenvolvido em C++ por L. V. Pavão et al., (2017). Esse algoritmo baseia-se na superestrutura de estágios (SWS) de Yee e Gnossmann (1990), mas dispensa as considerações de mistura isotérmica e de capacidades caloríficas constantes. Utilizando a meta-heurística *Simulated Annealing* (SA) para a otimização do nível combinatório em conjunto com o algoritmo *Rocket Fireworks Optimization* (RFO) para as variáveis contínuas, minimiza-se o TAC da topologia da rede, definindo-se, assim, as configurações de cada troca térmica.

Tabela 1. Dados das correntes do estudo de caso.

Corrente	P (bar)	T _{entrada} (K)	T _{saída} (K)	Composto	Vazão (kmol/s)
H1	38,00	500,0	400,0	n-butano	0,09
H2	33,90	500,0	400,0	i-pentano	0,07
C1	33,70	390,0	490,0	n-pentano	0,10

Como neste problema não há uma descrição prévia de utilidades, foram adotados dois tipos de vapor saturado como utilidades quentes (operando a 32,04 bar e a 11,36 bar), ambos resfriados até o estado de líquido saturado. Para as utilidades frias, são empregados dois tipos de água de refrigeração (ambos a 1 bar), operando nas faixas de temperatura de 277,6 K a 292,6 K e de 305,4 K a 320,4 K.

Um aspecto fundamental neste problema é que as três correntes de processo se encontram em suas respectivas pressões críticas. Devido a essa condição supercrítica, a consideração de capacidades caloríficas constantes diverge consideravelmente do comportamento termodinâmico real, justificando o uso do simulador. O objetivo nesse estudo de caso é, portanto, determinar a rede de trocadores de calor com o menor Custo Total Anualizado (TAC), avaliando-se a viabilidade técnico-econômica da integração com o ciclo termodinâmico ORC.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao implementar as correntes do estudo de caso no simulador Aspen Plus V15, obtêm-se os perfis de temperatura em função da entalpia para cada corrente. Esses dados são extraídos pelo Operador Pinch e servem de base para a síntese da rede, permitindo a consideração de cálculos rigorosos para esses perfis. A Figura 1 apresenta os perfis extraídos da simulação:

Desse modo, com os valores das variáveis de decisão da melhor solução do Operador Pinch, a simulação é executada mais uma vez. Os resultados dos perfis de temperatura e entalpia são extraídos e transmitidos para o SA-RFO, juntamente com os valores das variáveis de decisão referentes à RTC. Com esses parâmetros, o algoritmo determina as trocas térmicas minimizando o custo, e retorna os resultados ao Operador Pinch, que, por sua vez, exporta os dados estruturados para planilhas do Microsoft Excel.

Estudo de Caso

Para validar a metodologia proposta, selecionou-se um problema clássico da literatura de integração energética, correspondente ao Exemplo 2 do artigo de Castier e Queiroz (2002). As especificações das condições das correntes de processo nesse estudo de caso estão representadas na Tabela 1:

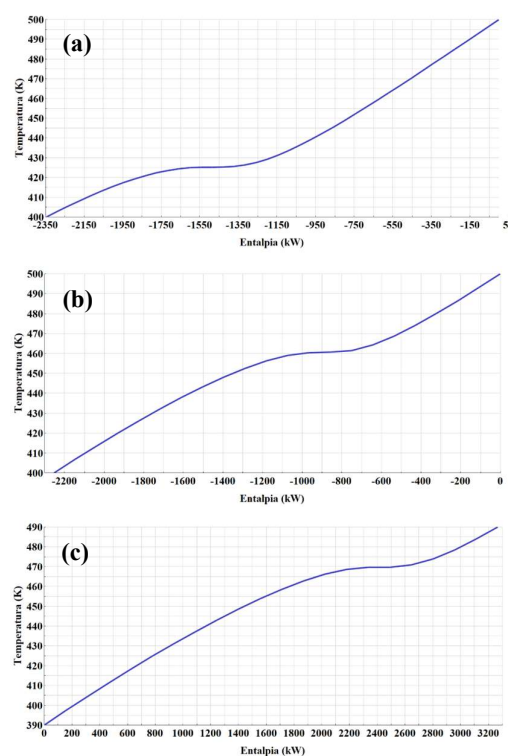


Figura 1. Representação dos perfis de temperatura em função da entalpia extraídos da simulação no Aspen Plus para as correntes (a) H1, (b) H2, (c) C1.

Observa-se na Figura 1 que os perfis apresentam comportamento não linear, exibindo regiões com significativas variações na inclinação. Como a inclinação dessas curvas é inversamente proporcional à capacidade calorífica, fica evidente a considerável variação dessa propriedade termodinâmica para os fluidos avaliados em condição supercrítica. Dessa forma, considerar capacidades caloríficas constantes introduziria desvios significativos nos resultados, o que corrobora a necessidade dos cálculos rigorosos adotados neste trabalho.

Ao executar o Operador Pinch, as variáveis de decisão foram otimizadas para minimizar o TAC. Os valores ótimos obtidos para esses parâmetros operacionais e de síntese da RTC são apresentados na Tabela 2:

Tabela 2. Valores ótimos das variáveis de decisão para o estudo de caso.

Variável de Decisão	Valor ótimo
Pressão Bomba (bar)	18,60
Pressão Turbina (bar)	1,70
Temperatura Evaporador (K)	460,93
Temperatura Condensador (K)	324,86
F_{HU1} (%)	100
F_{HU2} (%)	0
F_{CU1} (%)	0
F_{CU2} (%)	100
EMAT (K)	1,48

A partir dos resultados apresentados na Tabela 2, constata-se que o algoritmo de otimização convergiu para o uso exclusivo da utilidade quente de maior nível térmico (HU1) e da utilidade fria de temperatura mais elevada (CU2), suprimindo a demanda das demais. Adicionalmente, ressalta-se o valor reduzido obtido para o EMAT (1,48 K), o qual indica o favorecimento da recuperação térmica em contrapartida à penalização da área de troca térmica.

A Figura 2 apresenta o fluxograma da simulação do Ciclo Rankine Orgânico, operando com o fluido 1,1,3,3,3-pentafluoropropano, com os parâmetros otimizados para sua integração à rede de trocadores de calor do estudo de caso. No diagrama, estão indicadas as temperaturas em Kelvin e as pressões em bar referentes a cada corrente do ciclo:

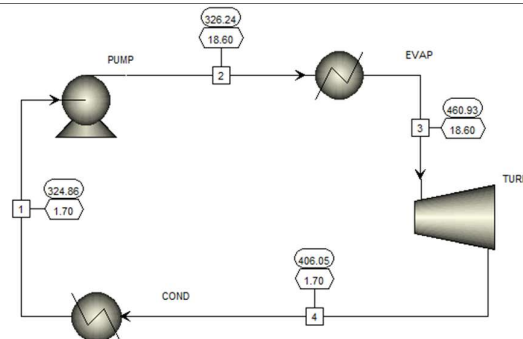


Figura 2. Fluxograma do Ciclo Rankine Orgânico implementado no Aspen Plus V15.

A partir dessa configuração, a Tabela 3 detalha os trabalhos termodinâmicos, bem como os custos de capital (CC) e de operação (OC) referentes à bomba e à turbina do ciclo:

Tabela 3. Resultados termodinâmicos e econômicos referentes à bomba e à turbina do ORC.

	Trabalho (kW)	CC (\$/ano)	OC (\$/ano)
Bomba	6,08	209,71	3403,96
Turbina	-116,05	3470,02	-64990,36

Ressalta-se novamente que os sinais negativos do trabalho e do custo operacional da turbina indicam, respectivamente, que o trabalho é gerado pelo sistema e que essa quantia representa uma receita da venda de energia. Verifica-se, ainda, que a ordem de grandeza dessa receita é consideravelmente maior do que a dos custos da bomba e da turbina, evidenciando o forte potencial econômico da implementação do ciclo. Por sua vez, os custos de capital e de operação do evaporador e do condensador são integrados diretamente à síntese da rede de trocadores de calor.

A Figura 3 apresenta as Curvas Compostas balanceadas, obtidas a partir das variáveis ótimas de decisão utilizadas para determinar as demandas mínimas de utilidades e a estimativa de área mínima:

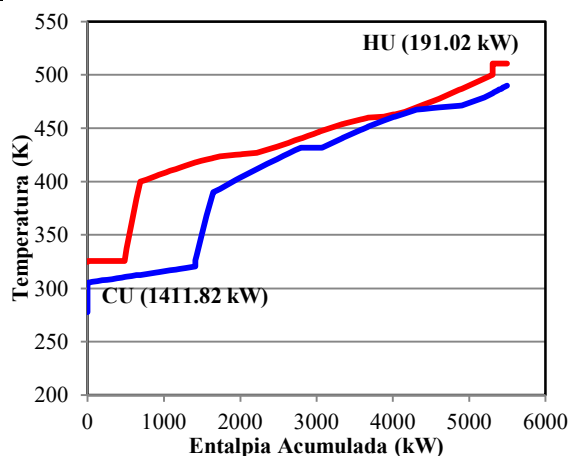


Figura 3. Curvas Compostas Balanceadas do Estudo de Caso para as variáveis de decisão ótimas.

A partir dessas Curvas Compostas, observa-se que os intervalos apresentam comportamento não linear, diferentemente dos perfis característicos de estudos em que as capacidades caloríficas são consideradas constantes. Outro ponto de destaque é a acentuada proximidade entre as curvas quente e fria, comportamento decorrente do baixo valor ótimo de EMAT (1,48 K) definido pelo modelo, o que maximiza a recuperação térmica.

A Tabela 4 apresenta as áreas, as demandas de utilidades quente e fria e os custos totais anualizados da rede de trocadores estimados pelo Operador Pinch, por meio das metas térmicas, e da rede final sintetizada pelo algoritmo SA-RFO:

Tabela 4. Resultados econômicos das RTCs estimada pelo Operador Pinch e sintetizada pelo SA-RFO.

	Operador Pinch	SA-RFO
HU (kW)	191,02	216,95
CU (kW)	1411,82	1437,75
TAC (\$/ano)	128867,76	138603,56
Área Total (m ²)	1553,16	1575,08

Comparando ambas as abordagens, percebe-se uma grande proximidade entre os valores. A rede final sintetizada apresentou maior área e maior demanda de utilidades, o que elevou o seu custo anualizado. Esse ligeiro acréscimo é termodinamicamente esperado, uma vez que o SA-RFO projeta uma topologia física real com restrições estruturais de troca térmica, enquanto o Operador Pinch calcula apenas metas de demandas mínimas de área e energia.

Apesar dessa diferença inerente, a alta concordância entre os resultados valida a robustez da metodologia

proposta. A utilização de metas energéticas, provenientes das Curvas Compostas, para a otimização do ciclo ORC prova-se altamente vantajosa. Essa abordagem permite ajustar os parâmetros operacionais do ciclo simultaneamente à avaliação das demandas do processo, garantindo que o ORC seja flexibilizado e configurado especificamente para o perfil térmico da rede. Ademais, por dispensar a síntese da topologia da rede a cada iteração do algoritmo, essa estratégia diminui drasticamente o esforço computacional sem comprometer a precisão na estimativa dos custos da rede. Dessa forma, somente após a convergência desse processo iterativo e a definição dos parâmetros ótimos do ciclo, procede-se à determinação das trocas térmicas de cada corrente e à síntese final da rede de trocadores de calor.

Por fim, a partir da avaliação técnico-econômica do estudo de caso, verifica-se que o Custo Total Anualizado (TAC) definitivo da rede de trocadores de calor com o ciclo Rankine Orgânico integrado foi de 80.696,89 \$/ano. A obtenção desse custo mínimo demonstra a capacidade da abordagem do algoritmo em otimizar o ciclo ORC simultaneamente à síntese da rede de trocadores de calor, aproveitando a receita da geração de energia para atenuar os custos globais do sistema. A metodologia também se mostrou robusta ao lidar com as variações nas capacidades caloríficas dos fluidos de trabalho em condições supercríticas, garantindo uma representação termodinâmica rigorosa e realista do processo.

CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma metodologia computacional robusta para a resolução de problemas de integração energética, propondo um modelo para a síntese e otimização simultânea da rede de trocadores de calor integrada a ciclos Rankine Orgânicos. Essa síntese conjunta permite uma melhor avaliação dos *trade-offs* entre os custos de capital, os custos operacionais e a receita da geração de trabalho no ciclo, garantindo a síntese de um ciclo ORC adaptado especificamente ao problema a ser resolvido.

O algoritmo, por atuar em conjunto com o simulador de processo Aspen Plus V15, permite a obtenção das propriedades das correntes via cálculos rigorosos, o que garante uma fiel representação do comportamento termodinâmico real do fluido. Dessa forma, a abordagem proposta permite a superação da premissa de capacidades caloríficas constantes. O estudo de caso demonstrou o comportamento não linear dos perfis térmicos das correntes nas condições supercríticas, ressaltando a importância desses cálculos rigorosos.

Do ponto de vista quantitativo, o método evidenciou uma expressiva concordância entre as metas energéticas e de áreas do Operador Pinch e a topologia final da rede sintetizada pelo SA-RFO. Para o estudo de caso, o algoritmo convergiu para uma configuração cujo valor reduzido de EMAT permitiu uma alta recuperação térmica, a qual, aliada à receita obtida pela geração de energia no ciclo ORC, atenuou significativamente os custos do sistema.

Conclui-se, portanto, que o algoritmo desenvolvido foi capaz de gerar uma configuração ótima para o estudo de caso mesmo considerando capacidades caloríficas não constantes. A ferramenta, dessa forma, provou-se altamente eficaz em integrar o ciclo ORC de maneira otimizada à rede de trocadores de calor.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES pelo apoio financeiro e pela concessão da bolsa de estudos. Agradecem também à Universidade Estadual de Maringá (UEM) e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química (PEQ) pela estrutura fornecida para a realização da pesquisa. Por fim, estendem os agradecimentos ao grupo de pesquisa LSCP pelo suporte técnico e científico fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

REFERÊNCIAS

- Castier, M., & Queiroz, E. M. (2002). Energy targeting in heat exchanger network synthesis using rigorous physical property calculations. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 41(6), 1511–1515. <https://doi.org/10.1021/ie000981o>
- Chen, C.-L., Chang, F.-Y., Chao, T.-H., Chen, H.-C., & Lee, J.-Y. (2014). Heat-exchanger network synthesis involving organic rankine cycle for waste heat recovery. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 53(44), 16924–16936.
- Corrêa, V. H., Vassoler, C. H., Costa, C. B. B., Ravagnani, M. A. da S. S., & Pavão, L. V. (2025). Optimization of Heat Integration Systems Considering Multiple Utilities, Organic Rankine Cycles, and Rigorous Thermodynamic Property Calculations. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 64(34), 16820–16832. <https://doi.org/10.1021/acs.iecr.5c02120>
- Desai, N. B., & Bandyopadhyay, S. (2009). Process integration of organic Rankine cycle. *Energy*, 34(10), 1674–1686. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2009.04.037>
- Hipólito-Valencia, B. J., Rubio-Castro, E., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., Nápoles-Rivera, F., & El-Halwagi, M. M. (2013). Optimal integration of organic Rankine cycles with industrial processes. *Energy Conversion and Management*, 73, 285–302. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2013.04.036>
- Lira-Barragán, L. F., Ponce-Ortega, J. M., Serna-González, M., & El-Halwagi, M. M. (2014). Sustainable integration of trigeneration systems with heat exchanger networks. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 53(7), 2732–2750. <https://doi.org/10.1021/ie4021232>
- Pavão, L. V., Costa, C. B. B., Ravagnani, M. A. da S. S., & Jiménez, L. (2017). Large-scale heat exchanger networks synthesis using simulated annealing and the novel rocket fireworks optimization. *AIChE Journal*, 63(5), 1582–1601. <https://doi.org/10.1002/aic.15524>
- Pavão, L. V., Costa, C. B. B., & Ravagnani, M. A. S. S. (2023). Multiple utilities targeting in energy integration considering rigorous temperature-enthalpy relations. *Chemical Engineering Science*, 276. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2023.118763>
- Yang, Z., Pan, T., Zhang, N., & Smith, R. (2025). Heat exchanger network synthesis with optimal waste heat recovery and multiple hot utilities. *Energy*, 324. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136011>
- Yee, T. F., & Grossmann, I. E. (1990). SIMULTANEOUS OPTIMIZATION MODELS FOR HEAT INTEGRATION-II. HEAT EXCHANGER NETWORK SYNTHESIS. In *Computers & Chem. Engng* (Vol. 14, Number 10).