

INCORPORAÇÃO DE FERRAMENTAS META-HEURÍSTICAS NO SOFTWARE MPINCH PARA A EVOLUÇÃO DE REDES DE TROCADORES DE CALOR

Carlos Henrique Vassoler (PIBIC/FA), Victor Hugo Lopes Benedito, Camila de Brito Miranda, Leandro Vitor Pavão (Coorientador), Mauro Antonio da Silva Sá Ravagnani (Orientador). E-mail: ra112364@uem.br.

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Tecnologia, Maringá, PR.

Engenharia Química, Operações industriais e equipamentos para engenharia química.

Palavras-chave: Redes de Trocadores de Calor, Otimização de Processos, Linguagem Python.

RESUMO

Em processos industriais, os equipamentos mais utilizados para transferência de energia entre diferentes fluidos são os trocadores de calor. Um dos temas mais discutidos na integração energética de processos é o dimensionamento destes equipamentos, bem como a síntese de redes de trocadores de calor (RTC). Objetiva-se a redução dos custos com utilidades de aquecimento e resfriamento, além dos impactos ambientais. Visando alcançar configurações ótimas com custo mínimo para RTC sintetizadas utilizando Análise Pinch, foi desenvolvido um programa em linguagem Python para a aplicação da meta-heurística *Particle Swarm Optimization* (PSO) durante a etapa de evolução da rede. Foram realizados testes com base em casos de estudo propostos na literatura, que comprovaram a eficiência dos métodos de integração energética, uma vez que os custos das redes evoluídas se mostraram inferiores aos da rede original. Os objetivos previamente estipulados foram atingidos de maneira satisfatória, de modo que o *software* desenvolvido tem potencial para ser disponibilizado ao público para uso livre e, devido à pequena quantidade de ferramentas gratuitas para a aplicação da Análise Pinch na síntese de RTC, os resultados obtidos mostraram-se amplamente satisfatórios.

INTRODUÇÃO

Fluidos de processos industriais frequentemente necessitam de aquecimento (correntes frias) ou resfriamento (correntes quentes). Para executar essa tarefa, utilizam-se equipamentos chamados trocadores de calor, que promovem a troca térmica entre elas. O uso de trocadores de calor possibilita diminuir consideravelmente os custos de processo com utilidades, como vapor saturado e água de resfriamento, uma vez bem dimensionados os equipamentos e bem arrançadas as correntes de processo em uma rede de trocadores de calor (RTC). O dimensionamento destes equipamentos, bem como a síntese de RTCs são os

assuntos mais abordados na integração energética de processos (Ravagnani e Caballero, 2012).

Diversos trabalhos foram propostos sobre esse assunto, devido à grande importância no custo global de processos, como o publicado por Linnhoff e Flower (1978), que levou ao desenvolvimento da Tecnologia Pinch, metodologia utilizada em diversos trabalhos subsequentes, como os de Linnhoff e Hindmarsh (1983), Smith (2005) e Ravagnani e Caballero (2012). A Análise Pinch consiste em regras heurísticas e abordagens termodinâmicas para a síntese de RTCs, abrangendo a definição das metas de projeto e ferramentas para atingir o que foi proposto.

Após a síntese de uma RTC utilizando a Análise Pinch, pode-se fazer a evolução da rede, visando eliminar redundâncias entre trocadores de calor. Ravagnani e Caballero (2012) propuseram um algoritmo para a evolução de RTCs, por meio de uma matriz de incidências. Nesse algoritmo, são identificados e suprimidos os laços de troca térmica, por meio da remoção de um de seus trocadores e remanejamento das cargas térmicas entre os equipamentos restantes.

A maneira convencional de se fazer esse remanejamento não leva em conta os custos da rede, podendo levar a um processo mais caro, do ponto de vista econômico. Existe a possibilidade de melhorar a etapa de evolução da RTC utilizando meta-heurísticas, visando minimizar os custos de instalação e operação, que foi o objetivo deste trabalho. Uma meta-heurística é uma abordagem computacional para encontrar soluções aproximadas para problemas de otimização complexos, que não garantem a solução ótima, mas fornecem bons resultados em um tempo razoável.

Uma das meta-heurísticas mais conhecidas é *Particle Swarm Optimization* (PSO), a qual simula o comportamento de um enxame de partículas que se movimentam no espaço de busca objetivando uma solução ótima. No presente trabalho, optou-se pelo uso da linguagem Python, que é de uso livre, para a criação de um algoritmo que usa PSO para evolução de redes de trocadores de calor, visando a minimização dos custos do processo.

MATERIAIS E MÉTODOS

Inicialmente, foi feita uma revisão da literatura, tendo como base os trabalhos de Smith (2005), Ravagnani e Caballero (2012) e Pavão et al. (2017), na qual buscou-se conceitos e casos de estudo sobre a Análise Pinch. Por fim, focou-se no aprendizado sobre a meta-heurística *Particle Swarm Optimization* (PSO) e maneiras de implementá-la em linguagem Python.

A função objetivo para a otimização em questão consiste na soma dos custos fixos relacionados aos trocadores de calor da rede e dos custos das utilidades. Para os custos fixos, utiliza-se as áreas dos equipamentos, calculada a partir da equação de projeto de trocadores de calor, que leva em consideração a carga térmica do equipamento, temperatura das correntes nos terminais do trocador e propriedades físicas dos fluidos.

As partículas são geradas de maneira pseudoaleatória, com posições baseadas em uma rede criada a partir da Análise Pinch. Essas posições são atualizadas por meio do cálculo das velocidades seguindo a meta-heurística PSO. Durante a execução do algoritmo, assegura-se que não ocorram violações termodinâmicas, garantindo a viabilidade dos resultados obtidos. Uma vez que as partículas converjam para uma distribuição ótima de cargas térmicas, tem-se o resultado final.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para testar a aplicabilidade da metodologia desenvolvida, selecionou-se um caso de estudo proposto por Ravagnani e Caballero (2012), além dos dados de custo do processo propostos por Pavão et al. (2017), representados na Tabela 1. Nesta, os dados referentes às correntes são: temperaturas ($T_{entrada}$ e $T_{saída}$), capacitâncias térmicas (CP) e coeficientes de película (h). Já os dados referentes aos trocadores de calor são: área de troca térmica (A), menor diferença de temperatura permitida nos terminais dos equipamentos (ΔT_{min}) e cargas térmicas utilizadas para utilidades quentes e frias (Q_H e Q_C , respectivamente).

Tabela 1 – Dados referentes ao caso de estudo.

Corrente	$T_{entrada}$ (°C)	$T_{saída}$ (°C)	CP (kW/K)	h (kW/m ² K)
1	159,0	77,0	22,85	0,30
2	267,0	88,0	2,04	0,50
3	343,0	90,0	5,35	0,40
4	26,0	127,0	9,33	0,20
5	118,0	265,0	19,61	0,40
Refrigerante	10,0	20,0	103,36	0,30
Aquecimento	300,0	300,0	1266,14	0,24
Custos trocador de calor (\$/ano)			8000 + 800 $A^{0,8}$	
Custo com utilidades (\$/ano)			70 Q_H + 10 Q_C	
ΔT_{min} (°C)			20	

A rede proposta pelos autores do caso de estudo, bem como as informações mais importantes é apresentada na Figura 1. A Figura 2 apresenta a rede obtida ao aplicar o método proposto neste trabalho.

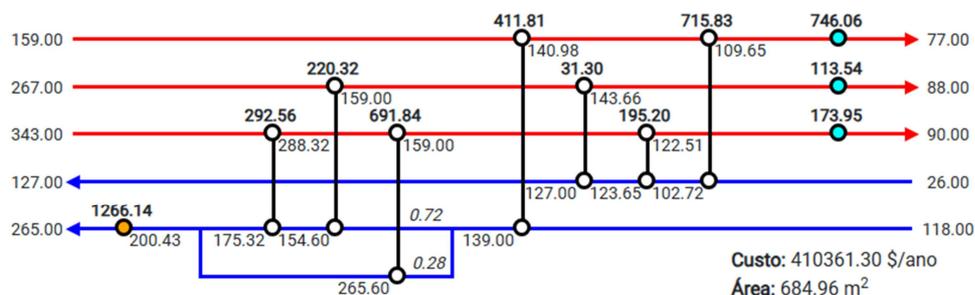


Figura 1 – RTC antes da otimização.

Comparando as Figuras 1 e 2, nota-se que houve uma diminuição no custo, de 57.326,45 \$/ano (cerca de 13,97% do valor original), atingindo o objetivo proposto. Além disso, sendo o número mínimo de unidades de troca térmica do caso de estudo igual a $N_{quentes} + N_{frias} + N_{utilidades} - 1 = 6$, chega-se a 7 equipamentos, aproximando-se deste valor de maneira satisfatória. O tempo de convergência do algoritmo é de menos 3 segundos em um computador com CPU Intel Core i5 10ª geração e com 8 GB de memória RAM.

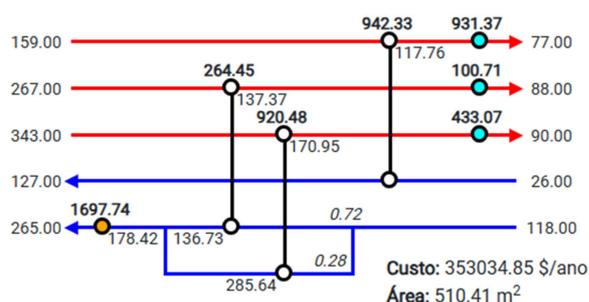


Figura 2 – RTC após a otimização.

CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um algoritmo para a evolução de redes de trocadores de calor de maneira otimizada, visando a minimização dos custos anualizados de processo. A linguagem Python e a meta-heurística *Particle Swarm Optimization* foram utilizadas. Os resultados obtidos a partir do caso de estudo selecionado provaram a eficiência do método, levando a uma redução de cerca de 13,97% no custo da rede. O número de unidades de troca térmica obtido aproximou-se ao mínimo proposto pela Análise Pinch (6 unidades), pois foram obtidos 7 equipamentos. Conclui-se que a metodologia proposta tem potencial de ser utilizada em problemas reais e de maneira gratuita.

AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos pelo apoio financeiro da Fundação Araucária, processo 1065/2022.

REFERÊNCIAS

- LINHOFF, B.; FLOWER, J. R. (1978). **Synthesis of Heat Exchanger Networks: I** Systematic generation of optimal networks. *AIChE Journal*, 24(4), 633-642.
- LINHOFF, B.; HINDMARSH, E. (1983). **The pinch design method for heat exchanger networks**. *Chemical Engineering Science*, 38(5), 734-763.

PAVÃO, L. V.; COSTA, C. B. B.; RAVAGNANI, M. A. S. S. (2017). **Large-scale heat exchanger networks synthesis using simulated annealing and the novel rocket fireworks optimization.** AIChE Journal, 63(5), 1582-1601.

RAVAGNANI, M. A. S. S.; CABABALLERO, J. A. (2012). **Rede de Trocadores de Calor.** Editora da UEM.

Smith, R. **Chemical Process Design and Integration.** Editora Wiley, 2005.