

ANÁLISE E DESENVOLVIMENTO DE CÓDIGO EM SCILab PARA PRÉ-DIMENSIONAMENTO DE REGENERADORES DE CALOR

Claudio Vinicius Barbosa Monteiro¹, Yukiko Sakomoto Belém², Flávio Clareth Colman³, Monica Ronobo Coutinho⁴, Luís Fernando Cusioli⁵, Oswaldo Curty da Motta Lima⁶

¹Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil (pg56492@uem.br)

²Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil (pg56499@uem.br)

³Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil (fcolmann@uem.br)

⁴Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil (mrcoutinho@uem.br)

⁵Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil (lfcusioli@uem.br)

⁶Universidade Estadual de Maringá, Maringá, Brasil (ocmlima@uem.br)

Resumo: Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um código em Scilab para o pré-dimensionamento de regeneradores de calor em sistemas térmicos industriais. O modelo baseia-se em fundamentos clássicos, incluindo LMTD com fator F. O trabalho considera a variação de propriedades dos fluidos em função de uma temperatura média e diferentes condições operacionais. Os resultados indicam boa precisão, sendo eficiente para estimativas preliminares e apoio ao projeto.

Palavras-chave: SCILab; troca térmica; calor sensível; trocador casco-tubo; LMTD

INTRODUÇÃO

A necessidade de utilização consciente de energia nos processos produtivos gera a demanda por projetos de equipamentos mais eficientes e sustentáveis, como regeneradores de calor em sistemas térmicos industriais que possibilitem integração energética. Em um cenário global marcado pela crescente pressão por redução de emissões e otimização do uso de recursos, a recuperação de calor residual se destaca como uma das estratégias mais eficazes para aumento da eficiência energética em processos industriais.

Tal integração contribui para o alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) 7 (Energia Acessível e Limpa) e ao 12 (Consumo e Produção Responsáveis), pois promove eficiência energética e redução de desperdícios industriais. Além de contribuir para o ODS 9 (Indústria, Inovação e Infraestrutura), ao modernizar processos produtivos (BRASIL, 2024). Nesse contexto, o uso de trocadores de calor torna-se essencial, uma vez que esses equipamentos permitem a transferência controlada de energia térmica entre correntes de processo, reduzindo a necessidade de consumo energético externo.

Dentre os diversos tipos de trocadores de calor, os do tipo casco e tubo destacam-se pela sua robustez, versatilidade e ampla aplicação industrial, sendo utilizados em setores como geração de energia, indústrias químicas, petroquímicas e de biocombustíveis (BURMANA et al., 2024). Esses equipamentos são compostos por um casco cilíndrico contendo um feixe de tubos, no qual dois fluidos a diferentes temperaturas escoam separadamente,

promovendo a troca térmica. A eficiência desse processo está diretamente relacionada a fatores como geometria do feixe tubular, configuração de passes, propriedades dos fluidos e regime de escoamento, os quais influenciam significativamente os coeficientes de transferência de calor (KHAN et al., 2023).

Além disso, estudos recentes têm demonstrado que modificações geométricas e operacionais podem intensificar a transferência de calor nesses equipamentos. Conforme discutido por MARZOUK et al. (2023), técnicas como o uso de defletores com geometrias diferenciadas, arranjos avançados de tubos e aplicação de nanofluidos têm potencial para aumentar a eficiência térmica e reduzir o tamanho dos equipamentos. No entanto, essas estratégias também aumentam a complexidade do projeto, uma vez que introduzem múltiplas variáveis interdependentes que dificultam a análise puramente analítica do sistema.

Nesse contexto, o dimensionamento de trocadores de calor passa a exigir o uso de ferramentas computacionais capazes de integrar modelos térmicos, geométricos e hidrodinâmicos, permitindo a avaliação de diferentes configurações de forma rápida e confiável. Métodos clássicos, como o da diferença de temperatura média logarítmica (LMTD) associado a fatores de correção, continuam sendo amplamente utilizados devido à sua simplicidade e eficiência, especialmente em etapas iniciais de projeto. No entanto, sua aplicação isolada pode não ser suficiente para capturar todas as nuances do comportamento real dos sistemas, especialmente quando há variações

significativas de propriedades ou geometrias não convencionais.

Dessa forma, surge a necessidade de desenvolver ferramentas que conciliem a robustez dos métodos clássicos com a flexibilidade de ambientes computacionais modernos. Nesse cenário, o uso de softwares de código aberto, como o SCILab, apresenta-se como uma alternativa promissora, permitindo a implementação de algoritmos personalizados e adaptáveis às necessidades específicas de cada aplicação, além de facilitar a reprodutibilidade e o acesso ao conhecimento.

Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um código em SCILab para o pré-dimensionamento de regeneradores de calor, estabelecendo um fluxo de cálculo capaz de integrar diferentes correlações térmicas e geométricas. Para validação do modelo, os resultados obtidos foram comparados com dados experimentais extraídos da literatura, permitindo avaliar a precisão do código e identificar suas principais limitações, bem como seu potencial de aplicação em projetos de engenharia térmica.

MATERIAIS E MÉTODOS

No contexto do dimensionamento de trocadores de calor casco e tubo, observa-se que o desempenho térmico desses equipamentos depende de uma combinação complexa de variáveis geométricas, operacionais e propriedades dos fluidos. Conforme discutido por MARZOUK et al. (2023), estratégias de intensificação da transferência de calor — como modificações no arranjo de defletores, uso de geometrias diferenciadas e aplicação de fluidos avançados — podem melhorar significativamente a eficiência térmica, porém aumentam a complexidade do processo de projeto, exigindo abordagens mais robustas para avaliação de desempenho.

Diante dessa complexidade, torna-se fundamental a utilização de ferramentas computacionais capazes de integrar múltiplos parâmetros e realizar iterações sucessivas de cálculo, permitindo a análise de diferentes configurações operacionais e geométricas. Nesse sentido, o desenvolvimento do código em Scilab proposto neste trabalho busca sistematizar o pré-dimensionamento de regeneradores de calor, incorporando correlações clássicas e critérios de projeto amplamente utilizados na literatura, de modo a fornecer uma ferramenta ágil e confiável para estimativas preliminares e apoio à tomada de decisão em projetos térmicos.

Para a realização desse trabalho foi desenvolvido um código em Scilab 2026, seguindo o Fluxograma descrito na Figura 1.



Figura 1. Fluxograma do código do Pré-dimensionador para Regeneradores de calor.

O fluxograma da Figura 01 indica que o referido código, parte de um banco de 45 fluidos previamente construído, com propriedades físicas que foram obtidas de bases consolidadas da literatura, como NIST (2026), API (2005), GREEN et al (2019), RUMBLE (2023), ASHRAE (2021), RAO et al (2014) e SHARQAWY et al (2010). Tendo em vista que esses dados são tabulados em uma temperatura de referência, o código propõe uma correção das propriedades a partir da temperatura média em que ocorre a troca de calor, no tubo e no casco, a partir de correlações lineares e exponenciais. O diâmetro do casco foi estimado por correlações empíricas baseadas na geometria do feixe tubular, conforme metodologias clássicas de projeto de trocadores casco-tubo (KERN, 1950; HEWITT et al., 1994). Ainda nesse contexto, o trabalho de SELBAS et al. (2006) aplica coeficientes de estimativa do diâmetro do casco a partir de variáveis como o número de passes e foi utilizado como referência para estrutura geral de otimização do projeto, em especial na escolha dos coeficientes para o cálculo da correlação empírica.

De posse desses dados, calculou-se o calor sensível envolvido na troca térmica do feixe de tubos e para estimar a temperatura de saída, considerou-se que seja o mesmo valor de calor trocado no casco ($Q_{\text{tubo}} = Q_{\text{casco}}$).

Já com as temperaturas definidas, foi possível calcular o LMTD do regenerador, e o fator de correção F, utilizado para definir qual melhor configuração de passes, variando de 1-1, 1-2, 1-4 e 1-8 passes.

Para estimar os coeficientes de convecção, utilizou-se as correlações de Dittus-Boelter, para a parte interna do tubo, a partir do cálculo da velocidade dentro dos tubos, e para o casco, o usuário poderia escolher entre utilizar correlações simplificadas de Kern, ou mais elaboradas de Bell-Delaware, onde os Js poderiam ser definidos manualmente ou utilizar valores industriais.

O código iterou esses valores recalculando o U, a partir das variações de velocidade provenientes das diferenças entre os dados geométricos e do balanço térmico, até chegar a um ótimo, para depois estimar as perdas de carga no tubo e no casco e retornar ao usuário, após a avaliação de scores, se o projeto é viável ou não.

Em caso positivo, retorna ao usuário, um relatório com os principais dados de projeto, e em caso negativo, solicita novas entradas do usuário, que se baseia nas indicações dadas pelo código para definir novos valores de projeto.

A adoção de propriedades termofísicas médias, embora amplamente utilizada em metodologias clássicas de dimensionamento, representa uma simplificação do comportamento real dos fluidos, especialmente em condições de grande variação de temperatura. Nesse sentido, o uso de correlações para

ajuste dessas propriedades em função da temperatura média busca reduzir erros associados a essa aproximação, mantendo, ao mesmo tempo, a simplicidade computacional necessária para aplicações de pré-dimensionamento. Tal abordagem é particularmente relevante em ferramentas computacionais voltadas à fase inicial de projeto, onde a rapidez de resposta e a facilidade de implementação são fatores determinantes.

A escolha das correlações de Dittus-Boelter para o escoamento interno e dos métodos de Kern e Bell-Delaware para o lado do casco se justifica por sua ampla validação na literatura e aplicabilidade em regimes turbulentos, frequentemente encontrados em operações industriais. Enquanto o método de Kern fornece uma abordagem mais simplificada e de fácil implementação, o método de Bell-Delaware incorpora fatores de correção que consideram efeitos como bypass, vazamentos e distribuição não uniforme do escoamento, permitindo uma análise mais realista do desempenho térmico do trocador.

O processo iterativo implementado no código tem como objetivo garantir a consistência entre os parâmetros térmicos e geométricos do equipamento, uma vez que grandezas como coeficiente global de transferência de calor, velocidade do fluido e área de troca são interdependentes. Dessa forma, a convergência do modelo é alcançada por meio da atualização sucessiva dessas variáveis até que as diferenças entre iterações consecutivas estejam dentro de uma tolerância previamente estabelecida, assegurando estabilidade numérica e confiabilidade nos resultados obtidos.

Na busca do processo de validação dos dados simulados, foi feita uma pesquisa bibliográfica em busca de artigos que trouxessem dados experimentais capazes de gerar os dados de entrada do código de pré-dimensionamento, e após uma leitura atenta de vários artigos, foi possível extrair os dados de entrada a seguir, para cada um deles visando a comparação com os resultados obtidos pelo código após a implementação desses valores e comparação com os valores experimentais obtidos, em todos os casos apresentados na Tabela 1, considerou-se fator de correção $F = 1$ e utilizou-se o método Bell-Delaware para o cálculo do casco, a partir de valores industriais típicos de correção para os fatores de J's ($J_c = 0.85$, $J_l = 0.80$, $J_b = 0.80$, $J_s = 0.90$ e $J_r = 0.95$), em todos os casos da Tabela 1 considerou-se um arranjo triangular dos tubos e espessura da parede do tubo igual a 1 milímetro:

Tabela 1. Dados de entrada do código extraídos dos artigos com dados experimentais.

	BURMANA et al. (2024)	LI et al. (2025)	IQBAL et al. (2024)
Fluido do tubo:	Água	Água	Água
Fluido do casco:	Biodiesel	Água	Água
Diâmetro interno do tubo (m):	0,02	0,017	0,012
Material do Tubo:	Inox 316	Inox 316	Cobre
Compr. do tubo (m):	3	1	0,30
Vazão mássica total nos tubos (kg/h):	11872,90	8500	360
Vazão mássica total no casco (kg/h):	8000	8500	360
Temp. de entrada nos tubos (°C):	20	25	45
Temp. de saída dos tubos (°C):	32	40	43
Temp. de entrada do casco (°C):	95	60	25

Ainda nesse processo, construímos a Tabela 02, com dados que servirão para avaliação dos resultados do código. Esses dados foram extraídos da leitura dos artigos e alguns dos valores como: carga térmica, LMTD e coeficiente global, que apesar de não serem explicitamente fornecidos, puderam ser obtidos a partir cálculos utilizando os dados experimentais

reportados, por meio de balanço de energia e uso de propriedades médias dos fluidos.

Tabela 2. Dados estimados/calculados de saída extraídos dos artigos.

	BURMANA et al. (2024)	LI et al. (2025)	IQBAL et al. (2024)
Carga Térmica (Q) (W)	165300	148000	1300
Temp. Saída Casco (°C)	60	45	27
LMTD (°C)	50,5	22,4	17
Coef. Global (U) (W/m ² . K)	254	750	423
Número de tubos (Nt)	62	37	19

Ao comparar os trabalhos da Tabela 01 observamos as maiores vazões e dimensões geométricas no artigo de BURMANA et al. (2024), isso ocorre pois os autores utilizaram dados experimentais extraídos de uma planta industrial de biodiesel, buscando maior desempenho no funcionamento e campanhas para o equipamento.

Já para os outros artigos, o interesse da pesquisa estava em avaliar a influência da geometria e como ela influencia no aumento das condições para troca térmica (LI et al. ,2025). Enquanto para IQBAL et al. (2024) o interesse foi avaliar como a modificação das características dos fluidos, com a inclusão de um sólido (Al₂O₃) modificaria o processo de transferência de calor. Em ambos os casos os testes foram feitos em trocadores de calor de bancada, que sofrem efeitos distintos dos verificados no cenário industrial.

Verificamos ainda na Tabela 02 que se excetuando o coeficiente global proposto por LI et al. (2025), todos os valores seguem uma tendência de

proporcionalidade, o que leva a crer que podemos atingir resultados interessantes ao aplicarmos essas simulações ao modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da Tabela 1, e considerando o exposto na seção anterior, foram geradas simulações para os três casos e comparados os resultados dessas com os valores experimentais, bem como com os calculados a partir desses valores. A divergência percentual entre as respostas do código e os valores dos artigos são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Comparativo percentual de divergência experimental x calculado SCILab

	BURMANA et al. (2024)	LI et al. (2025)	IQBAL et al. (2024)
Carga Térmica (Q) (W)	165640	149001	849,11
(%)	0,04%	0,67 %	34,68 %
Temp. Saída Casco (°C)	60,17	45,32	27,03
(%)	0,28%	0,71 %	0,11 %
LMTD (°C)	50,73	20,16	17,98
(%)	0,04%	10%	5,76 %
Coef. Global (U) (W/m². K)	263,64	83,21	121,54
(%)	0,09%	88,90 %	71,26 %
Número de tubos (Nt)	60	1488	30
(%)	3,33%	97,51 %	57,89 %

Ao observar a Tabela 03, fica clara a aderência do modelo a sistemas de troca térmica industrial, fato esse

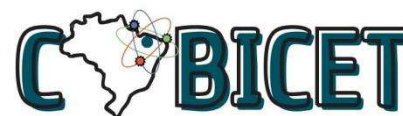
corroborado pelos baixos valores de desvios indicados pela comparação ao trabalho de BURNAMA et al (2024). Esses resultados orientam a equipe a ampliar a gama de representatividade do código, buscando inserir parcelas que envolvam troca térmica de calor latente, permitindo dessa forma uma maior robustez para atender também ao pré-dimensionamento de trocadores de calor em trabalhos futuros. O que nos leva a acreditar que a utilização de correlações produzidas para equipamentos de grandes dimensões favoreceu a modelagem de regeneradores com características mais industriais, em detrimento aqueles de bancada.

A análise dos resultados evidencia que o modelo desenvolvido apresenta comportamento distinto quando aplicado a diferentes escalas de operação, sendo mais aderente a sistemas industriais do que a unidades experimentais de bancada. Esse comportamento pode ser explicado pelo fato de que as correlações utilizadas no modelo foram originalmente desenvolvidas com base em dados experimentais obtidos em condições industriais, onde os efeitos de turbulência plenamente desenvolvida e distribuição de escoamento são mais representativos.

A discrepância na estimativa do número de tubos está diretamente relacionada às diferenças observadas no coeficiente global de transferência de calor, uma vez que essas variáveis são inversamente proporcionais no dimensionamento térmico. Assim, a subestimação ou superestimação do coeficiente global resulta em ajustes compensatórios na área de troca térmica, refletindo-se diretamente no número de tubos calculado. Esse efeito é particularmente evidente no caso de LI et al. (2025), onde a elevada divergência no coeficiente global levou a uma superestimação significativa do número de tubos.

Por outro lado, os baixos desvios observados no cálculo do LMTD indicam que o modelo é robusto na representação do balanço térmico global do sistema, uma vez que essa variável depende principalmente das temperaturas de entrada e saída dos fluidos. Isso demonstra que, apesar das limitações associadas à modelagem dos coeficientes convectivos, o código apresenta boa capacidade de prever o comportamento térmico macroscópico dos trocadores de calor.

Os resultados obtidos também estão alinhados com o que é discutido por Marzouk et al. (2023), no sentido de que modificações geométricas e operacionais podem alterar significativamente os coeficientes de transferência de calor, tornando sua predição um dos principais desafios no projeto de trocadores casco e tubo. Dessa forma, a variabilidade observada nos resultados reforça a necessidade de ferramentas computacionais capazes de incorporar diferentes níveis de complexidade, conforme o estágio de desenvolvimento do projeto.



De maneira geral, os resultados indicam que o modelo proposto é adequado para aplicações de pré-dimensionamento, especialmente em contextos industriais, onde estimativas iniciais confiáveis são essenciais para a tomada de decisão. No entanto, para aplicações que demandem maior precisão, como projetos detalhados ou estudos experimentais em pequena escala, recomenda-se a incorporação de modelos mais avançados ou a calibração do código com dados específicos do sistema analisado.

É válido observar ainda que, no que tange às estimativas de calor trocado e cálculo do LMTD, o código se comportou muito bem em todos os artigos avaliados, e as principais divergências surgiram no cálculo do coeficiente global e por consequência na estimativa da quantidade de tubos, variável diretamente proporcional a esse coeficiente.

CONCLUSÃO

Conclui-se que o código em Scilab para o pré-dimensionamento de regeneradores de calor mostrou-se eficiente, apresentando melhores resultados para dados experimentais industriais e uma divergência maior quando se tratava de dados experimentais de bancada, o que já era esperado, pois correlações utilizadas no modelo foram originalmente desenvolvidas com base em dados experimentais obtidos em condições industriais, onde os efeitos de turbulência plenamente desenvolvida e distribuição de escoamento são mais representativos.

Em relação aos números de tubos estimados, a subestimação ou superestimação do coeficiente global resulta em ajustes compensatórios na área de troca térmica, refletindo-se diretamente no número de tubos calculados.

Já em relação aos baixos desvios observados no cálculo do LMTD, indicaram um modelo robusto e uma boa capacidade do código de prever o comportamento térmico macroscópico dos trocadores de calor.

Dessa forma, os resultados indicam que o modelo proposto é adequado para aplicações de pré-dimensionamento, especialmente em contextos industriais, onde estimativas iniciais confiáveis são essenciais para a tomada de decisão. No entanto, para aplicações que demandem maior precisão, como projetos detalhados ou estudos experimentais em pequena escala, recomenda-se a incorporação de modelos mais avançados ou a calibração do código com dados específicos do sistema analisado.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Professor Wagner André dos Santos Conceição, por todo apoio dado no desenvolvimento do código estudado e aos Programas de Pós-Graduação de Engenharia Química e Engenharia

Mecânica da Universidade Estadual de Maringá por todo suporte.

REFERÊNCIAS

API – AMERICAN PETROLEUM INSTITUTE. *Technical Data Book – Petroleum Refining*. 8. Ed. Washington, DC: American Petroleum Institute, 2005.

ASHRAE. *ASHRAE Handbook – Fundamentals*. Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, 2021.

BRASIL. Secretaria-Geral da Presidência da República. *Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. Brasília: CNODS/SGPR, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/sgpr/agenda2030>. Acesso em: 06 abr. 2026.

BURMANA, ANGGARA DWITA; TAMBUN, RONDANG; HARYANTO, BODE; SARAH, MAYA; ALEXANDER, VIKRAM. *An investigation shell and tube heat exchanger for cooling system: A case study of biodiesel plants using lauric acid*. *Case Studies in Thermal Engineering*, v. 58, p. 104411, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.csite.2024.104411>.

GREEN, DON W.; SOUTHARD, MARYLEE Z. (ed.). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 9. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2019.

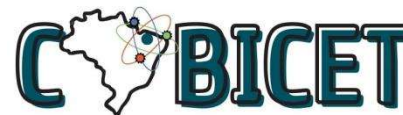
HEWITT, G. F.; SHIRES, G. L.; BOTT, T. R. *Process Heat Transfer*. Boca Raton: CRC Press, 1994.

IQBAL, S.; NAVEED, M.F.; MASUD, M.; TARIQ, A.; KAUSAR, T.; NASIR, Z.; BABAR, M.A. *Experimental Evaluation of Thermal Performance in Shell and Tube Heat Exchangers Using Al₂O₃- γ Nanofluids*. *Eng. Proc.* **2024**, 75, 13. <https://doi.org/10.3390/engproc2024075013>

KERN, DONALD Q. *Process Heat Transfer*. New York: McGraw-Hill, 1950.

KHAN, A.; SHAH, I.; GUL, W.; KHAN, T.A.; ALI, Y.; MASOOD, S.A. *Numerical and Experimental Analysis of Shell and Tube Heat Exchanger with Round and Hexagonal Tubes*. *Energies* **2023**, *16*, 880. <https://doi.org/10.3390/en16020880>

LI, YAZI; LEI, YONGGANG; LI, JIRONG; DU, BAOCUN; SONG, CHONGFANG; WANG, YONGHUI. *Experimental investigation on the thermo-hydraulic performance and entransy analysis of a shell-and-tube heat exchanger with louver baffles*. *Applied Thermal Engineering*, v. 269, parte A, **2025**, p. 125928. ISSN 1359-4311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2025.125928>.



MARZOUK, S.A., ABOU AL-SOOD, M.M., EL-SAID, E.M.S. ET AL. *A comprehensive review of methods of heat transfer enhancement in shell and tube heat exchangers.* J Therm Anal Calorim 148, 7539–7578 (2023). <https://doi.org/10.1007/s10973-023-12265-3>.

NATIONAL INSTITUTE OF STANDARDS AND TECHNOLOGY (NIST). *NIST Chemistry WebBook.* Gaithersburg, MD, USA. Disponível em: <https://webbook.nist.gov>. Acesso em: 06 abr. 2026.

RAO, M. A.; RIZVI, S. S. H.; DATTA, A. K. *Engineering Properties of Foods.* 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

RUMBLE, JOHN R. (ed.). *CRC Handbook of Chemistry and Physics.* 104. ed. Boca Raton: CRC Press, 2023.

SELBAŞ, REŞAT; KIZILKAN, ÖNDER; REPPICH, MARCUS. A new design approach for shell-and-tube heat exchangers using genetic algorithms from economic point of view. *Chemical Engineering and Processing: Process Intensification*, v. 45, n. 4, p. 268–275, 2006.

SHARQAWY, MOSTAFA H.; LIENHARD V, JOHN H.; ZUBAIR, SYED M. Thermophysical properties of seawater: a review. *Desalination and Water Treatment*, v. 16, p. 354–380, 2010.