

14º Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2023

INFLUÊNCIA DA CONDUÇÃO DE CALOR LONGITUDINAL NA MATRIZ DE UM REGENERADOR ROTATIVO SOBRE O DESEMPENHO TÉRMICO DO EQUIPAMENTO

Letícia de Souza Balbino¹, Paulo Cesar Mioralli², Elson Avallone³

¹ Graduando em Tecnologia de Engenharia de Controle e Automação, Bolsista PIBIFSP, IFSP, Câmpus Catanduva, l.balbino@aluno.ifsp.edu.br.

² Doutor em Engenharia Mecânica, Docente, IFSP, Câmpus Catanduva, mioralli@ifsp.edu.br.

³ Doutor em Engenharia Mecânica, Docente, IFSP, Câmpus Catanduva, elson.avallone@ifsp.edu.br.

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.05.02.03-9 Aproveitamento de Energia

RESUMO: O calor transferido em um regenerador rotativo pode ser obtido por meio da metodologia Efetividade-NUT específica para esse equipamento. Neste método, a condução de calor longitudinal na matriz do regenerador rotativo não é considerada por ser insignificante na maioria das aplicações. Contudo, o desempenho térmico deste trocador de calor pode sofrer influência significativa da condução de calor ao longo do comprimento da matriz, especialmente quando as condições operacionais apresentam elevado valor de efetividade e comprimento curto de fluxo das correntes gasosas. O presente trabalho analisa computacionalmente os efeitos da condução de calor longitudinal na matriz de um regenerador rotativo sobre o seu desempenho térmico. A efetividade e a troca térmica de um regenerador rotativo típico foram obtidas de duas maneiras distintas: desconsiderando a condução longitudinal, com o uso do método Efetividade-NUT e; considerando a condução longitudinal, a partir de uma extensão do método Efetividade-NUT para a inclusão desse parâmetro. Os resultados obtidos foram comparados entre os diferentes casos simulados e a sensibilidade do calor trocado no equipamento em função da variação do comprimento da matriz foi analisada. Os resultados mostraram que, dependendo das condições operacionais do regenerador, a influência da condução sobre a troca térmica pode ser significativa.

PALAVRAS-CHAVE: trocador de calor; análise computacional; condução de calor.

INFLUENCE OF LONGITUDINAL HEAT CONDUCTION IN THE MATRIX OF A ROTARY REGENERATOR ON THE THERMAL PERFORMANCE OF THE EQUIPMENT

ABSTRACT: The heat exchanged in a rotary regenerator can be obtained using the NTU-Effectiveness methodology specific to this equipment. In this method, longitudinal heat conduction in the rotary regenerator matrix is not considered as it is negligible in most applications. However, the thermal performance of this heat exchanger can be significantly influenced by heat conduction along the length of the matrix, especially when operating conditions have a high effectiveness value and short flow length of the gaseous streams. The present work computationally analyzes the effects of longitudinal heat conduction in the matrix of a rotary regenerator on its thermal performance. The effectiveness and thermal exchange of a typical rotary regenerator were obtained in two different ways: disregarding the longitudinal conduction, using the Effectiveness-NTU method and; considering longitudinal conduction, from an extension of the Effectiveness-NTU method to include this parameter. The results obtained were compared between the different simulated cases and the sensitivity of the heat exchanged in the equipment as a function of the matrix length variation was analyzed. The results showed that, depending on the operating conditions of the regenerator, the influence of conduction on the thermal exchange can be significant.

KEYWORDS: heat exchanger; computational analysis; heat conduction.

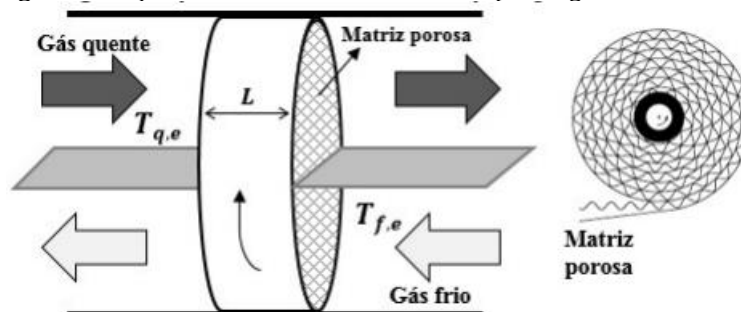
INTRODUÇÃO

Em um regenerador rotativo existe gradiente de temperatura ao longo das chapas que compõem sua matriz. Com o fluxo das correntes em sentidos opostos, uma das extremidades da matriz será sempre mais quente que a outra durante os períodos de escoamento dos gases quente e frio. Assim, a condução de calor longitudinal na parede da matriz ocorre na mesma direção pelos dois períodos. Shah e Sekulic (2003) afirmam que na maioria das aplicações de regeneradores rotativos, a condução de calor longitudinal na matriz é desprezível, porém passa a ser significativa em equipamentos com alta efetividade e comprimento de fluxo curto. Nestes casos, a condução longitudinal na matriz pode implicar em aumento considerável na efetividade do regenerador. Shah (1975) propôs uma extensão ao método Efetividade-NUT específico para este trocador de calor tipo regenerador rotativo. Assim, o presente trabalho averigua a influência da condução de calor longitudinal na matriz de um regenerador rotativo típico sobre a efetividade e a troca de calor do equipamento. Estes parâmetros são obtidos pelo método Efetividade-NUT desconsiderando e considerando a condução longitudinal na matriz, neste último caso a partir do uso da proposta de Shah (1975). Os resultados obtidos são comparados dentre as duas situações. A análise é feita por meio de simulação computacional, na qual valores de efetividade e de calor transferido no regenerador são obtidos a partir da variação do comprimento de sua matriz.

MATERIAL E MÉTODOS

No contexto de sistemas térmicos, o regenerador rotativo evidencia-se como uma das tecnologias amplamente utilizadas para a recuperação de energia térmica. De acordo com Filis, Kolarik e Smith (2021) e Melian, Klein e Thiben (2021), um regenerador rotativo é composto por uma matriz porosa que pode armazenar energia térmica. A matriz gira entre dois dutos paralelos, por onde fluem duas correntes de gases em sentidos opostos: uma quente e outra fria. Durante a rotação, a matriz absorve calor da corrente de gás quente e o transfere para a corrente de gás frio, movendo ciclicamente o calor absorvido de um lado (quente) para o lado oposto, onde se encontra o fluido a uma temperatura mais baixa. Dessa forma, a matriz realiza a absorção e transmissão periódicas de calor. A Figura 1 apresenta uma representação esquemática de um regenerador rotativo típico, sendo que $T_{q,e}$ e $T_{f,e}$ indicam as temperaturas de entrada dos gases quente e frio, respectivamente.

Figura 1. Esquema de funcionamento de um típico regenerador rotativo.



Fonte: Autoria própria.

Um código computacional foi escrito em linguagem C para simular o regenerador. Na simulação os parâmetros geométricos e as condições operacionais do equipamento foram preestabelecidos com base em valores típicos de um regenerador de pequeno porte. Tais informações foram usadas como dados de entrada no programa computacional e são apresentadas na Tabela 1, a qual mostra também a faixa de variação do comprimento L da matriz nas simulações para posterior comparação de resultados entre os casos que não contabilizam a condução longitudinal na matriz e aqueles que contabilizam esse efeito conforme proposta de Shah (1975). Essa proposta é constituída por uma formulação adimensional que incorpora um parâmetro adimensional λ , este desenvolvido por Bahnke e Howard (1964), o qual é representativo da condutividade longitudinal na matriz do regenerador.

A efetividade e a transferência de calor no regenerador rotativo foram obtidas por meio do método Efetividade-NUT (Kays; London, 1964), no qual um fator de correção desenvolvido por Buyukalaca e Yilmaz (2002) é utilizado para corrigir a efetividade de um trocador de calor convencional em contracorrente, levando em consideração a velocidade rotacional e a capacidade térmica da matriz. O fator de atrito de Darcy e o coeficiente convectivo de transferência de calor foram obtidos a partir de

correlações clássicas da literatura, sendo este último estimado a partir de correlações para o número de Nusselt. Foram simulados somente casos em que ambas as correntes do regenerador estavam em regime laminar de escoamento.

TABELA 1. Dados de entrada no programa computacional referente ao regenerador rotativo simulado.

PARÂMETRO	VALOR
Rotação da matriz n (rpm)	8
Espessura das chapas da matriz e (m)	0,00035
Diâmetro da matriz D (m)	0,7
Porosidade da matriz σ	0,83
Temperatura de entrada da corrente quente $T_{q,e}$ (°C)	50
Temperatura de entrada da corrente fria $T_{f,e}$ (°C)	20
Vazão mássica da corrente quente $\dot{m}_q$ (kg/s)	0,68
Vazão mássica da corrente fria $\dot{m}_f$ (kg/s)	0,86
Intervalo de variação do comprimento L (m) da matriz	0,05 a 0,7

As propriedades dos gases foram obtidas por meio de correlações, sendo a densidade pela equação de estado de gás ideal e a viscosidade dinâmica e a condutividade térmica ambas pelas aproximações de Sutherland (White; Majdalani, 2021). As propriedades referentes à matriz do regenerador rotativo, calor específico c_m e densidade ρ_m , necessárias para a simulação computacional, foram assumidas como sendo constantes para o alumínio, conforme Tabela 2, típicas de um regenerador de pequeno porte.

TABELA 2. Propriedades da matriz do regenerador rotativo.

Material	c_m (J/kg K)	ρ_m (kg/ m ³)
Liga de alumínio 2024-T6	875,0	2.770,0

Dado que as temperaturas de saída do regenerador não são conhecidas e as propriedades dos gases são calculadas com base em valores médios de temperatura em cada corrente, foi necessário utilizar um processo iterativo para resolver o problema.

Com o objetivo de assegurar a confiabilidade dos resultados obtidos pelo programa computacional, foi realizada a simulação de um regenerador rotativo em operação, utilizando dados fornecidos por uma refinaria de petróleo. Esses dados incluíam as dimensões geométricas e as condições operacionais do equipamento. A partir dessas informações, os resultados obtidos pela simulação do regenerador, considerando ambas as correntes em regime laminar, foram comparados com os dados de campo fornecidos pela refinaria. Os dados comparados da temperatura de saída da corrente fria apresentaram uma diferença próxima a 8%, já o da corrente quente demonstrou uma diferença de um pouco mais de 17%, como mostra a Tabela 3.

TABELA 3. Comparação dos resultados de temperatura de saída das correntes obtidos no presente trabalho com dados de campo.

Temperatura de saída (°C)	Presente Trabalho	Dados de campo	Diferença (%)
Corrente fria ($T_{f,s}$)	438,55	405,65	8,11
Corrente quente ($T_{q,s}$)	159,74	194,27	17,77

RESULTADOS E DISCUSSÃO

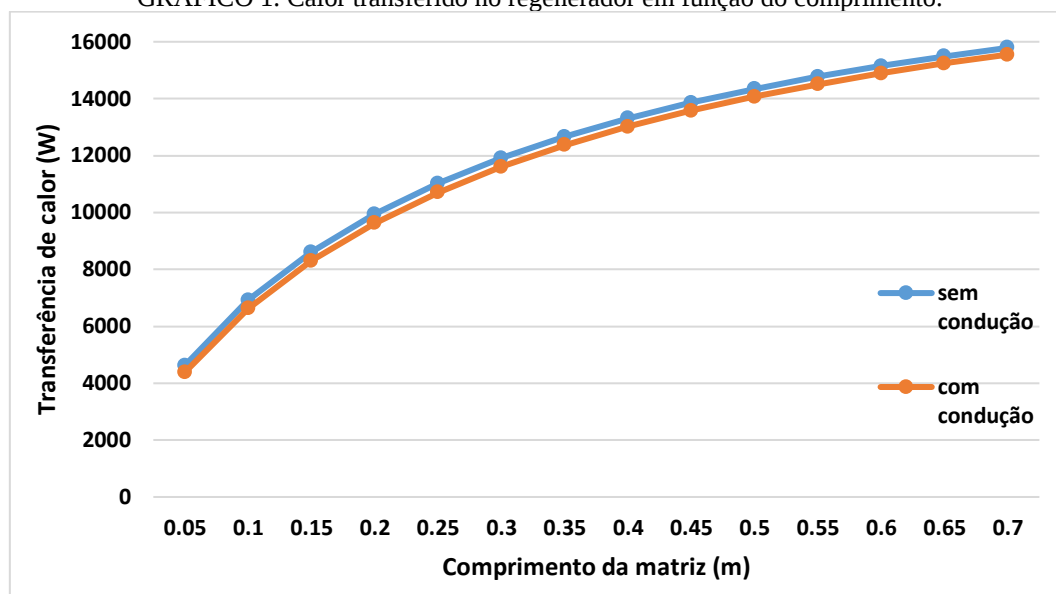
O regenerador rotativo foi simulado com as condições operacionais e geométricas apresentadas na Tabela 1. Essas condições juntamente com a faixa de variação do comprimento L da matriz resultaram em simulações nas quais as correntes gasosas do regenerador mantiveram-se em regime laminar de escoamento. Os resultados obtidos para o calor transferido e para a efetividade do equipamento são apresentados a seguir em função do comprimento da matriz.

O Gráfico 1 apresenta os valores de calor transferido Q no regenerador em função da variação do comprimento L da matriz, sendo o calor transferido obtido de duas maneiras diferentes: desconsiderando os efeitos da condução longitudinal na matriz e contabilizando esses efeitos. Observa-se no Gráfico 1 que a inclusão dos efeitos da condução longitudinal contribui para a redução da troca térmica no

equipamento. Nota-se ainda que, para os casos testados, a diferença entre os valores de calor transferido, obtidos com e sem o efeito da condução na matriz, é relativamente pequena para todos os casos simulados. Para o comprimento da matriz $L = 0,05\text{ m}$ essa diferença é em torno de 1,5% e, conforme aumenta o valor do comprimento L no gráfico, a diferença entre o calor transferido aumenta gradativamente chegando a cerca de 5% para $L = 0,7\text{ m}$.

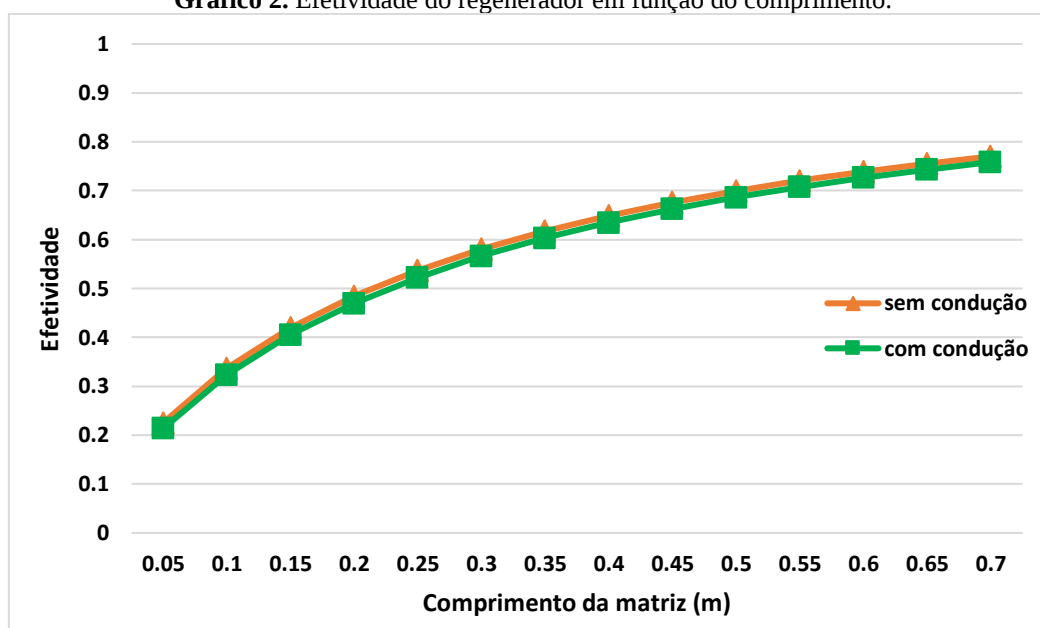
O mesmo comportamento observado no Gráfico 1 também pode ser notado no Gráfico 2, o qual mostra os valores de efetividade ε do regenerador em função da variação do comprimento L da matriz. O valor da efetividade do equipamento aumenta na medida em que se aumenta o comprimento da matriz. Tomando como referência os valores de $L = 0,05\text{ m}$ (com ε pouco maior que 0,2) e de $L = 0,7\text{ m}$ (com ε pouco menor que 0,8), houve um aumento no valor da efetividade em torno de 70% para ambos os casos (com e sem o efeito condução longitudinal).

GRÁFICO 1. Calor transferido no regenerador em função do comprimento.



Fonte: Autoria própria.

Gráfico 2. Efetividade do regenerador em função do comprimento.

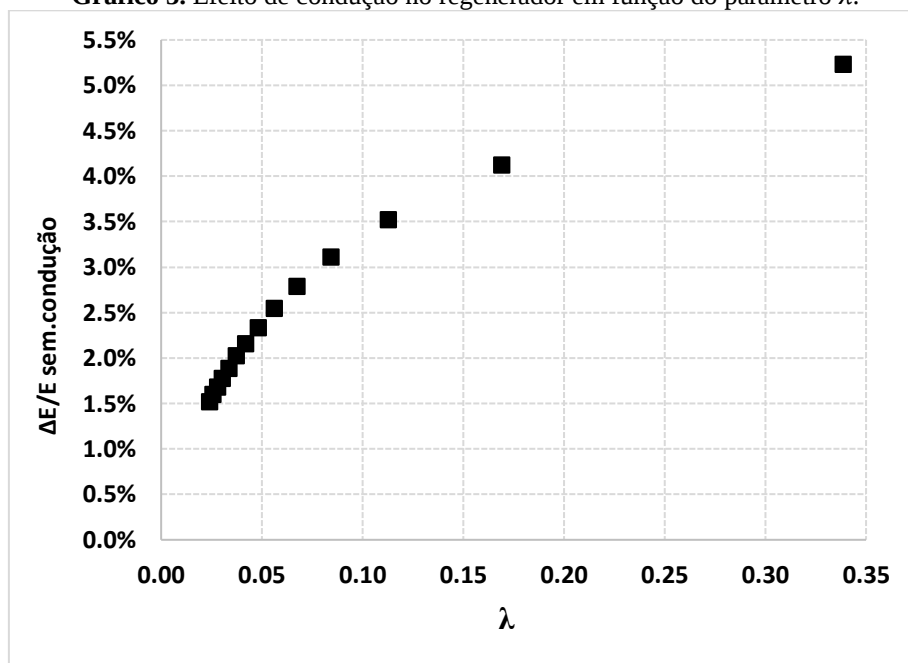


Fonte: Autoria própria.

É importante ressaltar que os valores de efetividade obtidos para o regenerador simulado não são valores elevados, isto é, $\varepsilon > 0,9$, sendo este um dos aspectos de condições operacionais em que comumente se espera uma diferença maior entre os valores de efetividade (e de calor transferido) entre os casos com e sem inclusão da condução longitudinal na matriz (Shah, 1975). A simulação do regenerador para valores de $L > 0,7\text{ m}$, em busca da obtenção de maiores valores de efetividade, corresponderia a situações não realísticas de operação e de características geométricas típicas de um regenerador de pequeno porte. Nestes casos, além do próprio comprimento da matriz ser elevado e não condizente com o porte do regenerador, a perda de carga nas correntes gasosas também poderia atingir valores elevados, o que manteria o regenerador operando distante de suas condições ótimas de funcionamento. Dessa forma, para a verificação de situações em que os efeitos da condução longitudinal na matriz implicam em diferenças significativas no montante de calor transferido e na efetividade do equipamento, outros tamanhos e condições operacionais típicas de regeneradores precisariam ser simulados.

Uma outra maneira de analisar os efeitos da condução longitudinal na matriz do regenerador é a partir do parâmetro λ , proposto por Bahnke e Howard (1964), que representa a condutividade térmica longitudinal na matriz em termos adimensionais. Nas simulações, o parâmetro λ foi calculado para cada valor do comprimento L da matriz. O Gráfico 3 apresenta a diferença percentual entre os valores de efetividade do regenerador obtidos com e sem a inclusão dos efeitos de condução longitudinal à medida em que se varia o valor do parâmetro λ . Essa diferença percentual entre os valores de efetividade é conhecida como “Efeito de Condução” (Bahnke; Howard, 1964) dado por $\Delta\varepsilon = (\varepsilon_{sc} - \varepsilon_{cc})/\varepsilon_{sc}$, onde ε_{sc} e ε_{cc} representam, respectivamente, as efetividades obtidas sem e com os efeitos de condução longitudinal. Observa-se no Gráfico 3 que há um aumento significativo do efeito de condução na medida em que se aumenta o parâmetro λ . Nota-se que a condutividade térmica longitudinal na matriz interfere no efeito de condução de uma forma não linear, aumentando este efeito cada vez mais significativamente na proporção em que há um aumento no valor do parâmetro λ . Assim, esse comportamento clarifica que pode haver situações operacionais do regenerador nas quais o efeito de condução seja significativo.

Gráfico 3. Efeito de condução no regenerador em função do parâmetro λ .



Fonte: Autoria própria.

CONCLUSÕES

Com este trabalho ficou evidenciado que a condução de calor longitudinal na matriz de um regenerador rotativo interfere na troca térmica e na efetividade do equipamento. Os resultados mostraram que a diferença na transferência de calor e na efetividade, considerando e desconsiderando os efeitos da condução longitudinal na matriz, aumenta conforme se aumenta o comprimento da matriz.

Para o regenerador simulado, foi constatado que o efeito de condução não interferiu de forma significativa na troca térmica e na efetividade do regenerador. Contudo, ficou demonstrado que tal efeito pode ser relevante, a depender das condições operacionais e geométricas do equipamento atreladas à obtenção do parâmetro λ representativo da condutividade térmica longitudinal na matriz. Nestas situações, a condução longitudinal da matriz deve ser contabilizada em análises de troca térmica no equipamento.

Como trabalhos futuros, outros regeneradores rotativos típicos com diferentes condições geométricas e operacionais podem ser simulados, buscando-se averiguar se, dentre estes casos, o efeito de condução pode ser mais significativo.

REFERÊNCIAS

- BUYUKALACA, O.; YILMAZ, T. Influence of rotational speed on effectiveness of rotary-type heat exchanger. **Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 38, p. 441-447, 2002.
- BAHNKE, G. D.; HOWARD, C. P. The effect of longitudinal heat conduction on periodic-flow heat exchanger performance. **ASME J. Eng. Power**, v. 86, p. 105-120, 1964.
- FILIS, V.; KOLARIK, J.; SMITH, K. M. The impact of wind pressure and stack effect on the performance of room ventilation units with heat recovery. **Energy & Buildings**, v. 234, 110689, 2021.
- KAYS, W. M.; LONDON, A. L. **Compact heat exchangers**. 3. ed. New York: McGraw-Hill, 1964. 14/02/2022.
- MELIAN, E.; KLEIN, H.; THIBEN, N. Improvement of a Nusselt-based simulation model for heat transfer in rotary heat exchangers. **Energies**, v. 14, 10, 2021.
- SHAH, R. K. A correlation for longitudinal heat conduction effects in periodic-flow heat exchangers. **ASME J. Eng. Power**, v. 97, p. 453–454, 1975.
- SHAH, R. K.; SEKULIC, D. P. **Fundamental of heat exchanger design**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2003.
- WHITE, F. M.; MAJDALANI, J. **Viscous fluid flow**. 4. ed. New York: McGraw-Hill, 2021.