

## SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL 3D DE UM TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBO

Mariana Vieira Silva, [mariana.silva@ufu.br](mailto:mariana.silva@ufu.br)  
Pedro Guilherme Resende Vaz de Melo, [pedroaero@ufu.br](mailto:pedroaero@ufu.br)  
Bernardo Aguiar de Souza Penha, [bernardo.penha@ufu.br](mailto:bernardo.penha@ufu.br)  
Cassius Ricardo Nascimento Ferreira, [cassiusferreira@ufu.br](mailto:cassiusferreira@ufu.br)  
Guilherme Queirós de Araújo Maciel, [guilherme.maciell@ufu.br](mailto:guilherme.maciell@ufu.br)  
Marcelo Braga dos Santos, [marcelo.bragadossantos@ufu.br](mailto:marcelo.bragadossantos@ufu.br)  
Solidônio Rodrigues de Carvalho, [solidonio@ufu.br](mailto:solidonio@ufu.br)

Universidade Federal de Uberlândia, Avenida João Naves de Ávila, 2121.

**Resumo.** Trocadores de calor tem a finalidade de aumentar a transferência de calor entre fluidos, podendo ou não ocorrer mistura entre eles, tornando processos térmicos mais eficientes e reduzindo a demanda energética. Este estudo tem como objetivo analisar a transferência de calor que ocorre dentro de trocadores de calor casco tubo (recuperadores) com chicanas, verificando sua eficiência por meio de modelos relacionados com a primeira lei da termodinâmica. Para isso, foi analisada a influência das chicanas, enquanto elementos de direcionamento do fluxo, na ampliação do tempo e da área de contato do fluido frio com o quente, permitindo assim um aumento na eficiência da troca. Para a realização deste estudo foram feitas simulações numéricas tridimensionais utilizando o software ANSYS® Fluent. O modelo de turbulência utilizado foi o  $k-\omega$  SST e a equação da energia foi considerada. O principal objetivo deste estudo consiste em compreender os fenômenos físicos, fluidodinâmicos e térmicos do trocador de calor, bem como avaliar as variáveis envolvidas.

**Palavras-chave:** Trocador de Calor. Simulação. Eficiência.

**Abstract.** Heat exchangers are intended to increase heat transfer between fluids, with or without mixture between them, making thermal processes more efficient and reducing energy demand. This study aims to analyze the heat transfer that occurs inside shell-and-tube heat exchangers (recuperators) with baffles, to verify their efficiency through models related to the first law of thermodynamics. For this, the influence of the baffles was analyzed, as elements to direct the flow, expanding time and the area of contact between cold fluid with the hot one, thus allowing an increase in the exchange efficiency. To carry out this study, three-dimensional numerical simulations were performed using the ANSYS® Fluent software. The turbulence model used was the  $k-\omega$  SST and the energy equation was considered. The main objective of this study is to understand the physical, fluid dynamic and thermal phenomena of the heat exchanger, as well as to evaluate the variables involved.

**Keywords:** Heat Exchanger, Simulation, Efficiency.

### 1. INTRODUÇÃO

A transferência de calor é a troca de energia térmica devido a uma diferença de temperaturas entre meios. Ou seja, sempre que houver diferença de temperatura entre dois ou mais meios, haverá a transferência de calor do mais quente ao menos quente, de forma natural, sem trabalho externo (Incropera et al., 2007).

De acordo com Incropera et al. (2007), a transferência de calor de um meio para outro se dá de forma eficiente através de dispositivos denominados trocadores de calor. Eles têm por finalidade realizar a troca de calor de um fluido para o outro, quando estes estiverem em temperaturas diferentes, da maneira o mais eficiente possível. Existem diversas aplicações para esse tipo de dispositivos, sendo amplamente utilizados em sistemas de aquecimento e refrigeração doméstica, além de sistemas de dissipação de calor e produção de potência em usinas termoquímicas ou mesmo nucleares.

Os meios podem ser separados por uma parede sólida ou podem estar em contato direto. Quando a troca de calor ocorre por intermédio de uma parede sólida com fluxo simultâneo de ambos os fluidos, os trocadores de calor são conhecidos como recuperadores. Quando há uma troca de calor de ambos os fluidos com uma superfície, de maneira alternada, os trocadores de calor são conhecidos como regeneradores. Já quando há contato direto entre fluidos, ocorrendo mistura total ou parcial, os trocadores são denominados de contato direto (Bejan, 2003).

A Fig. 1 representa um exemplo de trocador de calor recuperador, conhecido como casco tubo, objeto deste estudo. O equipamento consiste em uma série de tubos, por onde escoam um dos fluidos (quente ou frio), e pela parte externa (dos tubos), de modo que ocorre a transferência de calor entre os fluidos. Neste estudo, o escoamento no interior dos tubos é realizado pelo fluido quente, enquanto o fluido frio entra em contato com suas superfícies externas.

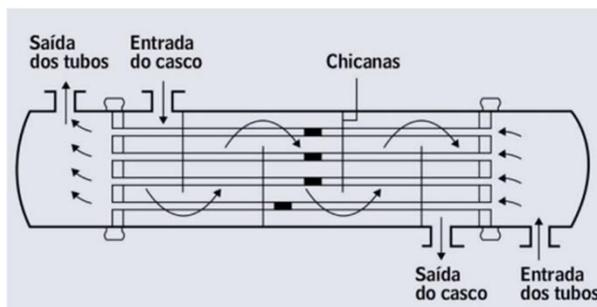


Figura 1: Esquema típico de um trocador de calor casco e tubo contracorrente com chicanas (Incropera, 2007)

Os modelos para análise de processos de transferência de calor em regime permanente, são normalmente construídos com base em balanços de massa e energia, de acordo com a primeira lei da termodinâmica, ou em outras palavras, toda a soma dos fluxos de massa que entram no volume de controle, é igual à mesma quantidade de massa que sai, e o mesmo acontece em termos de energia. Além disso, segundo Çengel (2002), nas transferências de calor que ocorrem nos trocadores em geral, as interações não envolvem produção nem gasto de energia na forma de trabalho, e por esse motivo, as variações de energia cinética e potencial são aproximadamente nulas, podendo ser desprezadas.

Em relação aos mecanismos de troca térmica que ocorrem em trocadores de calor, todos os tipos estão envolvidos, sendo que a convecção e a condução são os mais propriamente considerados. No trocador casco tubo, como dito anteriormente, o escoamento dos fluidos ocorre separado por uma parede. Desta maneira, primeiramente o calor é transferido do fluido para a parede por convecção, em seguida através da parede por condução, e por último da parede ao outro fluido novamente por convecção, sendo que os efeitos da radiação são incorporados no coeficiente convectivo.

Por fim, este estudo tem como finalidade observar numericamente os efeitos da fluidodinâmica no trocador de calor e a trocas térmicas, que dependem das condições de contornos, (temperatura, pressão e velocidade) de cada fluido dentro do sistema trocador de calor. Para esta análise variou-se a temperatura de superfície dos tubos em contato com o fluido “quente” analisando como resposta a temperatura de saída do fluido “frio”. Os dados foram levantados por meio de simulações computacionais no software ANSYS® Fluent.

## 2. METODOLOGIA

O modelo geométrico adotado é um trocador com 2,7985 m de largura, com entradas de 0,1524 m e tubos internos com 0,0635 [m]. Após a finalização geométrica (Fig. 2a), foi extraído o volume somente na parte fria (Fig. 2b). Para a superfície interna, denominada de quente, adotou-se uma temperatura na parede para efeitos de análise.

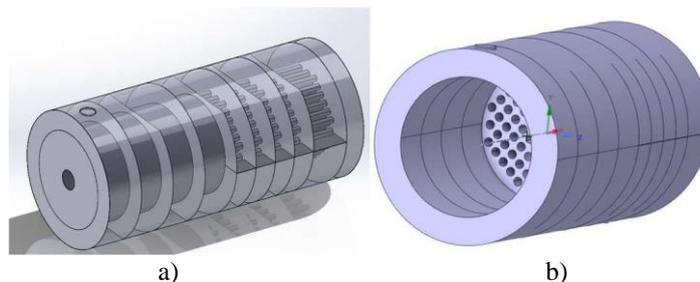


Figura 2: Análise da geometria e extração de volume da parte fria (Modelo CAD e volume para simulação em elementos finitos)

Neste estudo, foram utilizados dois tipos de refinamento para a malha, sendo uma mais grosseira com aproximadamente 2 milhões de elementos e uma mais refinada de aproximadamente 4 milhões, geradas de forma automática, alterando apenas a sua caracterização de linear para quadrática, representando melhor as geometrias de maior complexidade.

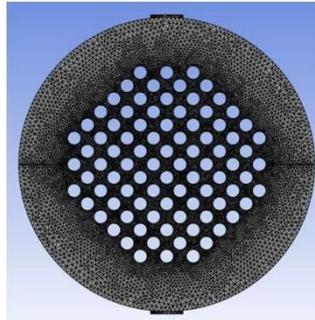


Figura 3: Corte feito para análise da malha mais refinada (ANSYS®, 2022)

Adotou-se convecção natural na parte externa, com coeficiente convectivo  $h = 5 \text{ W/m}^2\text{K}$  e temperatura ambiente ( $T_\infty$ ) de  $25 \text{ }^\circ\text{C}$ , como apresentado na Eq. (1).

$$Q = h \cdot A \cdot (T_s - T_\infty) \quad (1)$$

Sendo:

$Q$  = Taxa de transferência de calor [W]

$h$  = Coeficiente convectivo [ $\text{W/m}^2\text{K}$ ]

$A$  = Área da transferência de calor [ $\text{m}^2$ ]

$T_s$  = Temperatura de superfície [K]

$T_\infty$  = Temperatura do fluido [K]

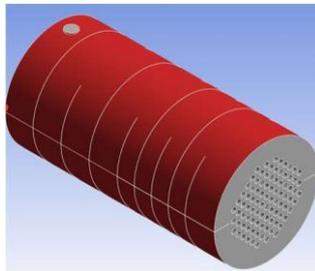


Figura 4: Parte nomeada como parede fria (ANSYS®, 2022)

Internamente, na superfície quente, as temperaturas na parede são prescritas e variam de  $400 \text{ }^\circ\text{C}$  à  $600 \text{ }^\circ\text{C}$ , onde foram analisados os resultados de temperatura de saída do fluido no trocador.

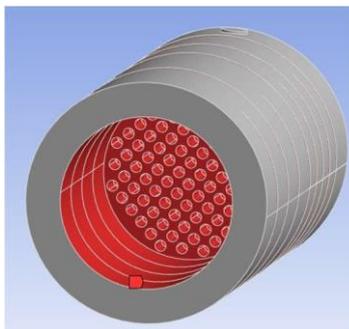


Figura 5: Parte nomeada como parede quente (ANSYS®, 2022)

No setup do ANSYS®, além das definições de convecção natural na parte de externa e temperatura na parte interna, são inseridas as equações tridimensionais de energia e de *Navier-Stokes* com o modelo de turbulência *k- $\omega$  SST* (Shear Stress Transport). O fluido de trabalho adotado foi o ar. Considerou-se no processo de simulação, variações da massa especificado ar com o aumento de temperatura no trocador de calor, sendo que a pressão manométrica de saída do ar foi de 0 Pa, e a velocidade do ar na entrada do trocador de calor de 6,5 m/s a temperatura de 25 °C.

### 3. RESULTADOS

A Figura 6 apresenta as linhas de corrente do fluido coloridas conforme a variação de temperatura, quando imposta a temperatura de 500 °C na superfície interna do trocador de calor. Em ambas as figuras é possível identificar o incremento da temperatura do ar à medida que este escoar no interior do trocador de calor, atingindo uma temperatura média máxima de 307,5 °C na saída, conforme indicado na Tab. 1.

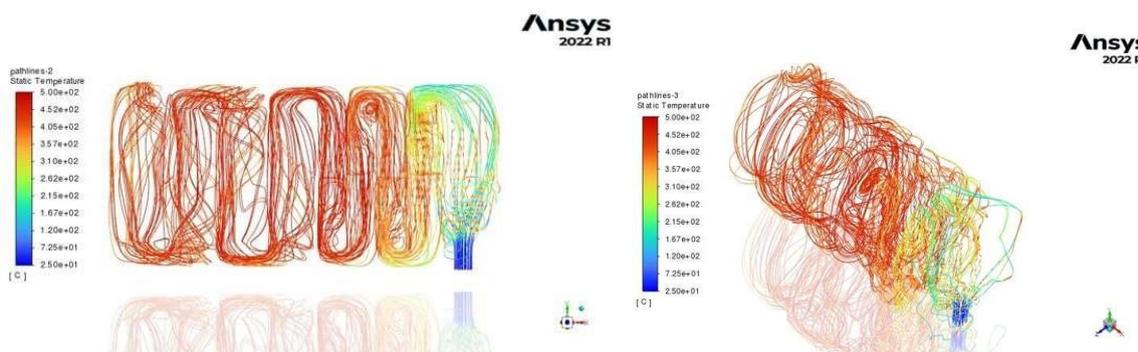


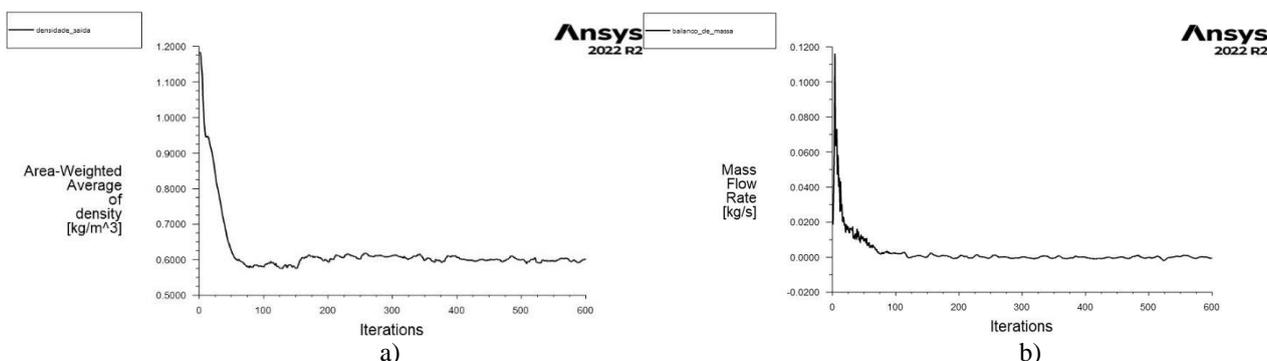
Figura 6: Linhas de corrente de fluido no interior do trocador de calor coloridas pela temperatura (ANSYS®, 2022)

A Tabela 1 apresenta as temperaturas impostas na superfície quente e a temperatura do ar na saída do trocador. Uma variação máxima de 4 °C (inferior a 1 %) foi observada com o refinamento da malha.

Tabela 1. Temperaturas impostas na superfície quente e temperaturas do ar calculadas na saída do trocador

Temperatura na superfície quente [°C]	Média na temperatura de saída fria – malha mais grosseira [°C]	Média na temperatura de saída fria – malha mais refinada [°C]
400	307	308
500	389	385
600	456	455

Na Figura 7 é possível identificar as variações de massa específica ao longo do processo de convergência do modelo computacional (Fig. 7a). A partir de 100 iterações, é possível constatar a conservação da massa e a temperatura do ar na saída do trocador de calor conforme as temperaturas adotadas na parede interna.



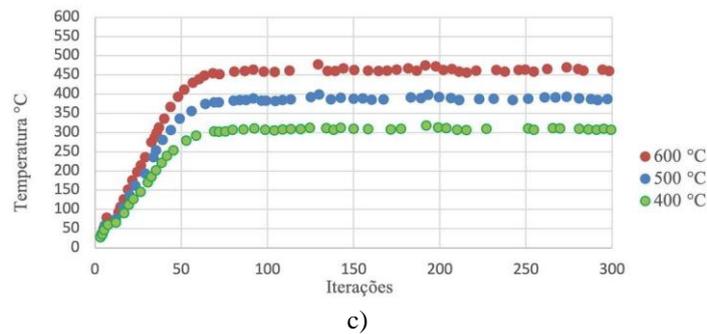


Figura 7: Análise de convergência do modelo computacional (ANSYS®, 2022): a) massa específica; b) conservação da massa e c) temperatura do ar na saída do trocador de calor

#### 4. CONCLUSÕES

Conforme esperado, os resultados obtidos demonstram que o ar injetado no trocador de calor a uma temperatura inicial de 25 °C tem um maior ganho de temperatura ao passar pelo feixe de tubos com chicanas e um ganho moderado na região do casco com chicanas.

Diante das análises realizadas, este projeto, servirá como referência para estudos posteriores, onde se poderá realizar comparações com estruturas diferentes de trocadores de calor, variando os números de chicanas e quantidades de tubos, visando uma melhor eficiência energética do sistema e um menor custo de instalação.

#### 5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Agência Financiadora de Estudos e Projetos (Finep), a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de nível superior (CAPES), ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e aos professores da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) que foram responsáveis pelo suporte na construção desse trabalho.

#### 6. REFERÊNCIAS

- ANSYS® Academic Research Fluent. Versão 22.2. [S. 1.]: ANSYS® Inc, 2023. Disponível em: <https://copyspider.com.br/main/pt-br/download>. Acesso em: 05 abr. 2023.
- Bejan, A., Kraus, A. D., 2003. *Heat Transfer Handbook*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, 1ª edição.
- Çengel, Y. A.; Boles, M. A., 2002. *Thermodynamics: an engineering approach*. Vol.1, p.8862.
- Incropera, F.; Bergman, T.; Lavine, A.; Dewitt, D., 2007 *Introduction to Heat Transfer*, New York, 6ª edição.