

## DESENVOLVIMENTO DE UMA FERRAMENTA COMPUTACIONAL PARA CALCULAR A EFETIVIDADE DE TROCADORES DE CALOR

Maria Gabriela Lira Rangel, maria.lrangeli@hotmail.com<sup>1,2</sup>

Kamila Fernanda Ferreira da Cunha Queiroz, kamilaferreira@gmail.com<sup>1,3</sup>

Olga Pinheiro Garcia, olgapinheirogarcia@gmail.com<sup>1</sup>

José Claudino de Lira Junior, lira.jr@gmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Acadêmico Hélio Ramos, S/N, 50740-530, Recife, PE, Brasil.

<sup>2</sup> Instituto Federal de Alagoas, Maceió, Alagoas, Brasil. Rua Mizael Domingues, 75, Centro, 57020-600, Maceió, AL, Brasil.

<sup>3</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Ceará-Mirim, Rio Grande do Norte, Brasil. Br 406, km 145, Planalto, 59570-000, Ceará-Mirim, RN, Brasil.

**Resumo:** Ao longo dos últimos anos, o setor de engenharia tem demandado projetos e processos mais detalhados e com prazos cada vez menores. Para auxiliar o engenheiro nesta tarefa, diversos softwares e ferramentas foram criados buscando dar maior agilidade e confiabilidade nas decisões do corpo técnico. Na área de engenharia térmica, a modelagem dos processos de transferência de calor tem desempenhado um papel de grande importância na concepção e avaliação de equipamentos térmicos. Levando em conta estes fatores, este artigo trata do desenvolvimento de uma ferramenta computacional para cálculo da efetividade de trocadores de calor, cujo objetivo é auxiliar nas avaliações expeditas de sistemas de trocas de calor. O programa interativo permitirá ao usuário selecionar a natureza dos fluidos quente e frio entre água, óleo do motor, glicerina, álcool etílico e amônia. Também serão definidas pelo usuário as condições do sistema de troca de calor, como a área do trocador, as vazões e as temperaturas de entrada dos fluidos. A interface retornará parâmetros de análise dos trocadores, tais como temperaturas de saída dos fluidos, efetividade e fluxo de calor que atravessa o equipamento.

**Palavras-chave:** Trocadores de calor, Transferência de calor, Dimensionamento, Interface gráfica.

### 1. INTRODUÇÃO

Em diversas situações da engenharia é possível encontrar fluidos que necessitam realizar uma troca térmica para alterar suas condições de temperatura. Os processos que contam com sistemas de integração energéticas são mais eficientes pois trabalham com a combinação otimizada de correntes cuja temperatura precisa ser elevada (recebendo calor) e correntes cuja temperatura deve ser reduzida (fornecendo calor) através de equipamentos chamados trocadores de calor. Estes dispositivos - amplamente utilizados nas indústrias - permitem o processo de trocas de calor entre fluidos que estão a diferentes temperaturas. A depender da posição desejada, podem possuir inúmeros arranjos.

Os trocadores mais simples são conhecidos como trocadores de tubo duplo. Estes são constituídos de dois tubos concêntricos com diâmetros diferentes. Um dos fluidos escoar pelo tubo interno, enquanto o outro escoar pelo tubo externo, de forma que a troca de calor acontece através da parede do tubo de menor diâmetro. Há também arranjos que permitem uma maior área de superfície por volume de equipamento, ideal para locais onde o espaço é reduzido, podendo alcançar uma razão entre a área de superfície e o volume do fluido maior que  $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$  (Incropera, 2008). Estes trocadores de calor são ditos compactos ou de placas e não são indicados para casos em que os fluidos circulam a elevada pressão. Os mais utilizados em aplicações industriais são os trocadores de calor casco-tubo, que possuem uma série de tubos internos a uma carcaça. Nesse modelo, a troca de calor pode ser incrementada com o uso de chicanas – obstáculos ao escoamento que fazem com que o fluido externo aos tubos percorra uma área maior.

Portanto, uma vez estabelecidas as condições de funcionamento, é possível selecionar os trocadores mais indicados para a aplicação. A determinação da efetividade, do fluxo de calor trocado entre os fluidos e as temperaturas de saída dos fluidos pode ser realizada em função de balanços de massa e energia.

Uma interface gráfica de usuário (GUI - *Graphical User Interface*) torna os programas mais fáceis de usar por fornecer uma aparência consistente e com controles intuitivos. A aplicação e solução do programa associado a uma GUI devem ser realizadas de forma que o usuário saiba o que esperar ao executar qualquer ação relacionada ao algoritmo (Chapman, 2003).

O ambiente da GUI contém botões, listas, menus e caixas de texto que são familiares ao usuário. Dessa forma, ele pode se concentrar na utilização do aplicativo sem se preocupar com a parte mecânica envolvida no desenvolvimento do programa propriamente dito. É o programador que assume este papel mais difícil, principalmente pelo fato de que um programa baseado em GUI precisa ser preparado para os botões do *mouse* ou para alguma entrada pelo teclado, para qualquer elemento da GUI e em qualquer momento (Queiroz, 2016).

Uma das principais vantagens de criar uma GUI é tornar o programa desenvolvido acessível para uma pessoa sem conhecimento prévio da linguagem de programação (Queiroz, 2016). A GUI mais conhecida atualmente é a do *software* Matlab®.

O presente trabalho apresenta a proposta de uma ferramenta computacional para calcular a efetividade de trocadores de calor, onde o usuário fornecerá como entrada as características básicas do sistema tais como a natureza dos fluidos quente e frio, as temperaturas de entrada, o arranjo desejado, a superfície de troca, entre outros.

## 2. PROCEDIMENTO COMPUTACIONAL

Para construir o código, se fez necessário considerar algumas hipóteses, entre elas:

- Os calores específicos dos fluidos de trabalho foram considerados constantes e iguais ao valor correspondente à temperatura de 25°C, à 1 atm;
- Os fluidos de trabalho considerados foram água, óleo do motor, glicerina, álcool etílico e amônia;
- Os trocadores de calor podem escolhidos entre tubo duplo, casco-tubo, escoamento cruzado e um trocador de calor genérico cuja razão entre a capacidade calorífica mínima e máxima seja aproximadamente zero.

O objetivo central do código é determinar a efetividade, as temperaturas de saída dos fluidos e a taxa de troca térmica no sistema. Para tanto, os cálculos utilizaram balanços de massa, balanços de energia e as correlações de efetividade dos trocadores. Os dados de entrada, que devem ser fornecidos pelo usuário, e os dados de saída podem ser vistos na Figura 1.

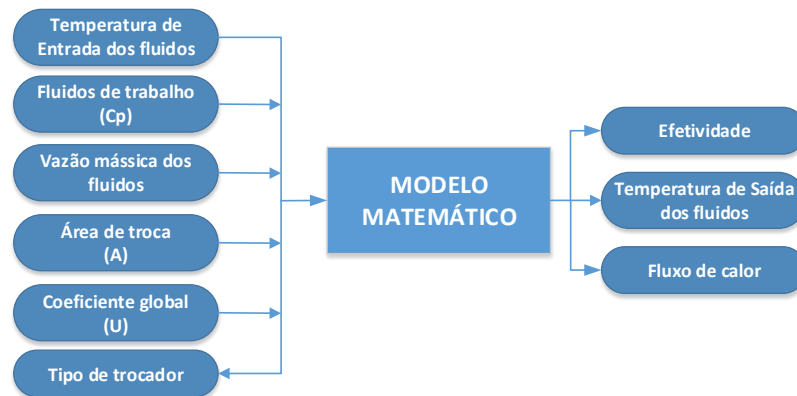


Figura 1. Sistemática dos dados de entrada e saída do modelo.

Uma vez que todos os valores de entrada sejam fornecidos, o primeiro passo é calcular as capacidades caloríficas do fluido frio e do fluido quente. Em seguida, é determinado o valor da capacidade calorífica mínima, máxima e a razão entre elas por meio das equações (1), (2), (3), (4):

$$C_f = \dot{m}_f \cdot C_{p,f} \quad (1)$$

Onde:

$C_f$  é a capacidade calorífica para o fluido frio ( $J \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$ );

$\dot{m}_f$  é a vazão mássica do fluido frio ( $kg \cdot s^{-1}$ );

$C_{p,f}$  é o calor específico do fluido frio ( $J \cdot s \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ).

$$C_q = \dot{m}_q \cdot C_{p,q} \quad (2)$$

Onde:

$C_q$  é a capacidade calorífica para o fluido quente ( $J \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$ );

$\dot{m}_q$  é a vazão mássica do fluido quente ( $kg \cdot s^{-1}$ );

$C_{p,q}$  é o calor específico do fluido quente ( $J \cdot s \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$ ).

$$C_r = \frac{C_{MÍN}}{C_{MÁX}} \quad (3)$$

Onde:

$C_{MÍN}$  é a capacidade calorífica mínima ( $J \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$ );

$C_{MÁX}$  é a capacidade calorífica máxima ( $J \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$ );

$C_r$  é a razão entre as capacidades caloríficas mínimas e máximas.

O cálculo do número de unidade de transferência (NUT), que é um número adimensional bastante utilizado nos projetos de construção de trocadores de calor, se dá através da equação (4):

$$NUT = \frac{U \cdot A}{C_{MÍN}} \quad (4)$$

Onde:

$U$  é o coeficiente global de transferência de calor ( $W \cdot m^{-2} \cdot K^{-1}$ );

$A$  é a área de transferência de calor ( $m^2$ );

$C_{MÍN}$  é a capacidade calorífica mínima ( $J \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$ );

Por meio dos balanços de massa e energia da equação (5), temos que:

$$Q_{CEDIDO} = Q_{RECEBIDO} = q \quad (5)$$

E para cada um dos fluidos, valem as relações presentes nas equações (6) e (7):

$$q = C_f \cdot (T_{F,S} - T_{F,E}) \quad (6)$$

Onde:

$q$  é a taxa de transferência de calor do sistema ( $W \cdot m^{-2}$ );

$C_f$  é a capacidade calorífica para o fluido frio ( $J \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$ );

$T_{F,E}$  é a temperatura de entrada do fluido frio (K);

$T_{F,S}$  é a temperatura de saída do fluido frio (K);

$$q = C_q \cdot (T_{Q,E} - T_{Q,S}) \quad (7)$$

Onde:

$q$  é a taxa de transferência de calor do sistema ( $W \cdot m^{-2}$ );

$C_q$  é a capacidade calorífica para o fluido quente ( $J \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$ );

$T_{Q,E}$  é a temperatura de entrada do fluido quente (K);

$T_{Q,S}$  é a temperatura de saída do fluido quente (K);

A taxa de transferência de calor máxima alcançada neste trocador é proporcional à máxima diferença de temperatura e à capacidade calorífica mínima, como mostra a equação (8):

$$q_{MÁX} = C_{MÍN} \cdot (T_{Q,E} - T_{F,E}) \quad (8)$$

Onde:

$q_{MÁX}$  é a taxa de transferência de calor máxima alcançada pelo sistema ( $W \cdot m^{-2}$ );

$C_{MÍN}$  é a capacidade calorífica mínima ( $J \cdot s^{-1} \cdot K^{-1}$ );

$T_{Q,E}$  é a temperatura de entrada do fluido quente (K);

$T_{F,E}$  é a temperatura de entrada do fluido frio (K);

O cálculo da efetividade é dado pelas correlações disponíveis na Tabela 1 (adaptado Incropera, 2008):

**Tabela 1. Relações de efetividade segundo o tipo de trocador de calor.**

| Configuração do escoamento       | Relação |
|----------------------------------|---------|
| Tubos concêntricos (bitubulares) |         |

|                                                       |                                                                                                                    |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Escoamento paralelo                                   | $NUT = -\frac{\ln(1 - \varepsilon(1 + C_r))}{1 + C_r}$                                                             |
| Escoamento contracorrente                             | $NUT = \frac{1}{C_r - 1} \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon * C_r - 1}\right)$ para $C_R < 1$             |
|                                                       | $NUT = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon}$ para $C_R = 1$                                                         |
| <b>Casco e tubo</b>                                   |                                                                                                                    |
| Um passe no casco (2,4, ... passes no tubo)           | $(NTU)_1 = -(1 + C_r^2)^{-1/2} \ln\left(\frac{E - 1}{E + 1}\right)$                                                |
|                                                       | $E = \frac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}}$                                                        |
| Usar as correlações acima para um passe no casco com: |                                                                                                                    |
| n passes no casco (2n, 4n, ... passes no tubo)        | $\varepsilon_1 = \frac{F - 1}{F - C_r} \quad F = \left(\frac{\varepsilon * C_r - 1}{\varepsilon - 1}\right)^{1/n}$ |
| <b>Escoamento cruzado (passe único)</b>               |                                                                                                                    |
| $C_{MÁX}$ (misturado), $C_{MÍN}$ (não misturado)      | $NTU = -\ln\left[1 + \left(\frac{1}{C_r}\right) \ln(1 - \varepsilon C_r)\right]$                                   |
| $C_{MÍN}$ (misturado), $C_{MÁX}$ (não misturado)      | $NTU = -\left(\frac{1}{C_r}\right) \ln[C_r \ln(1 - \varepsilon) + 1]$                                              |
| Todos os trocadores ( $C_R = 0$ )                     | $NTU = -\ln(1 - \varepsilon)$                                                                                      |

Com o valor da efetividade,  $\xi$ , é possível encontrar o fluxo real de calor do sistema, por meio da equação (9):

$$q = q_{MÁX} \cdot \varepsilon \quad (9)$$

Finalmente, substituindo o valor da taxa de transferência de calor real do sistema nos balanços de energia das equações (6) e (7), é possível isolar e calcular o valor das temperaturas de saída do fluido frio e quente, respectivamente.

O fluxograma que ilustra o processo está descrito na Figura 2:

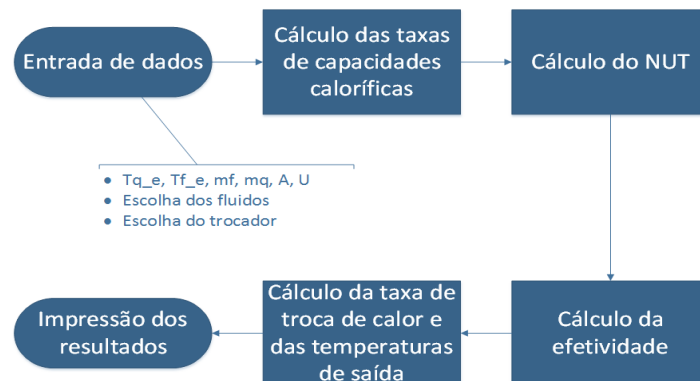


Figura 2. Fluxograma do algoritmo implementado na linguagem MATLAB®.

### 3. RESULTADOS

A interface da ferramenta computacional é de simples manipulação e foi pensada para o usuário fornecer como entrada os parâmetros necessários para a avaliação da efetividade e receber uma resposta expedita que o auxiliará na análise do sistema de troca térmica. Na Figura 3 pode-se ver a interface gráfica de usuário e os parâmetros pedidos e fornecidos pelo sistema:

**Figura 3. Interface gráfica Desempenho\_TC**

Visando verificar o funcionamento do código, dois estudos de caso foram realizados: a avaliação de um trocador de calor de tubo duplo e a comparação entre distintos trocadores de calor com respeito à efetividade apresentada a uma determinada condição de trabalho.

#### A) Caso 1 - Troca de calor em um tubo duplo

Foi desenvolvido um estudo de caso para comparar os resultados de um trocador de calor de tubo duplo, cujo escoamento podia ser paralelo ou contracorrente. Todos os parâmetros de entrada foram idênticos, exceto precisamente a definição para o sentido dos fluxos dos fluidos de trabalho, como exposto abaixo:

- Dados:
  - Fluido quente: água,  $m_Q = 42 \text{ kg/h}$ ,  $T_{Q,E} = 200 \text{ °C}$ ;
  - Fluido frio: água,  $m_F = 84 \text{ kg/h}$ ,  $T_{F,E} = 35 \text{ °C}$ ;
  - Coeficiente global:  $U = 180 \text{ W/m}^2.\text{K}$ ;
  - Área de troca:  $A = 0,33 \text{ m}^2$ .
- Determinar:
  - Taxa de transferência de calor máxima ( $q_{MÁX}$ );
  - Temperaturas de saída dos fluidos quente e frio
  - Efetividade

Os resultados para cada caso podem ser vistos na Figura 4:

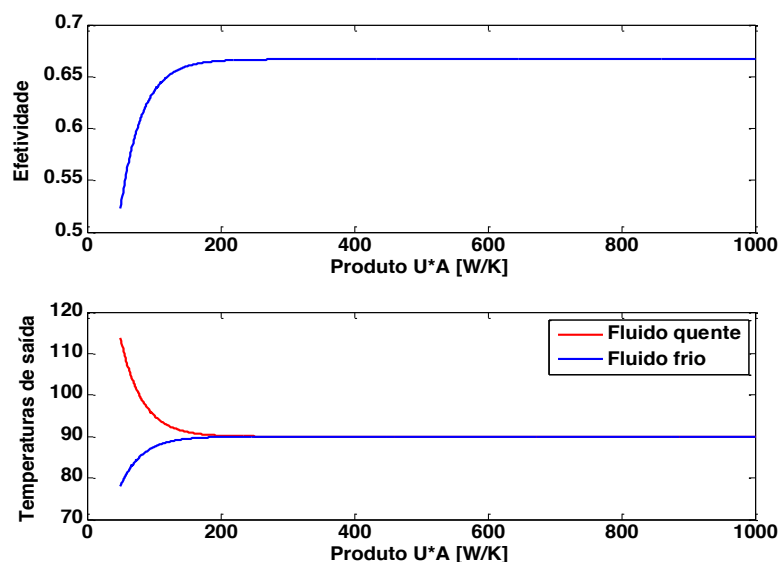
|                                                                                                                                                                              |                                                                                    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| --- Trocador de calor de Tubo Duplo ---                                                                                                                                      |                                                                                    |
| Digite o tipo de escoamento<br>1. Escoamento paralelo<br>2. Escoamento contracorrente<br>Tipo de escoamento = 1                                                              | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">A</div> |
| -----RESULTADOS-----                                                                                                                                                         |                                                                                    |
| Cmin = 48.98J/kg.°C<br>Cmax = 97.95J/kg.°C<br>Efetividade = 0.56<br>q [kW] = 4.51<br>Temperatura de saída (quente) [°C] = 107.84<br>Temperatura de saída (frio) [°C] = 81.08 |                                                                                    |
| --- Trocador de calor de Tubo Duplo ---                                                                                                                                      |                                                                                    |
| Digite o tipo de escoamento<br>1. Escoamento paralelo<br>2. Escoamento contracorrente<br>Tipo de escoamento = 2                                                              | <div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">B</div> |
| -----RESULTADOS-----                                                                                                                                                         |                                                                                    |
| Cmin = 48.98J/kg.°C<br>Cmax = 97.95J/kg.°C<br>Efetividade = 0.63<br>q [kW] = 5.05<br>Temperatura de saída (quente) [°C] = 96.85<br>Temperatura de saída (frio) [°C] = 86.57  |                                                                                    |

**Figura 4. Comparação entre os resultados – Estudo de caso nº 01, A: Escoamento paralelo, B: Escoamento contra-corrente.**

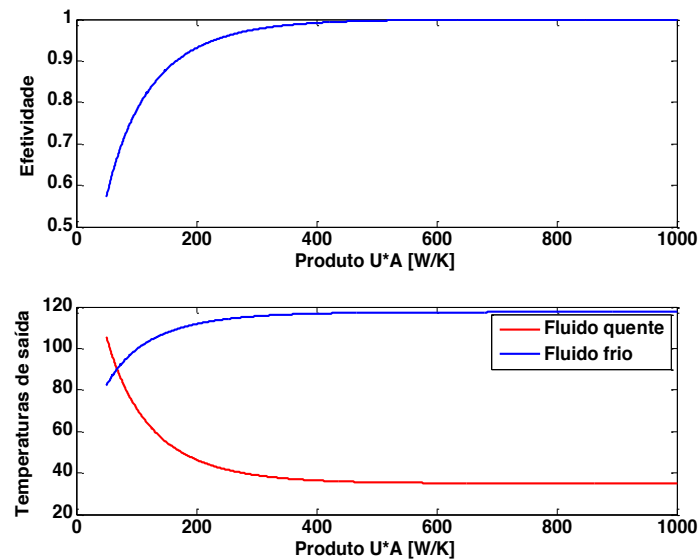
Para o escoamento paralelo, a potência ( $q$ , kW) foi inferior ao valor para escoamento contracorrente, isso porque a diferença de temperatura entre os fluidos quente e o frio é menor ao longo do escoamento do primeiro tipo. Sendo esta diferença de temperatura a força motriz do sistema, é natural encontrar valores de potência inferiores para paralelo, quando comparados aos contracorrente.

Também é possível observar que o fluido quente sai do trocador de calor com arranjo paralelo com uma temperatura de mais de 10°C acima que a temperatura do fluido quente de saída do trocador com arranjo contracorrente. Pois uma vez que as taxas de transferência de calor são inferiores para paralelo, elas provocarão resfriamentos e aquecimentos menos efetivos com respeito às temperaturas iniciais.

Para cada o escoamento paralelo a efetividade varia consideravelmente com o produto  $U \cdot A$  até que este valor chegue a 200 W/K. Para valores maiores que 200 W/K, a efetividade se comporta de maneira aproximadamente constante (Fig. 5). O mesmo comportamento é visto para a temperatura de saída do fluido quente e frio (Fig. 5), indicando que há um valor ótimo para  $U \cdot A$  que proporciona uma efetividade ótima. Portanto, a partir deste valor, um possível aumento na área do trocador não seria economicamente vantajoso, pois levaria a uma efetividade semelhante e a custos maiores de implantação e operação.



**Figura 5. Efetividade e temperaturas de saída em função do parâmetro  $U \cdot A$  para trocador de tubo duplo com correntes paralelas.**

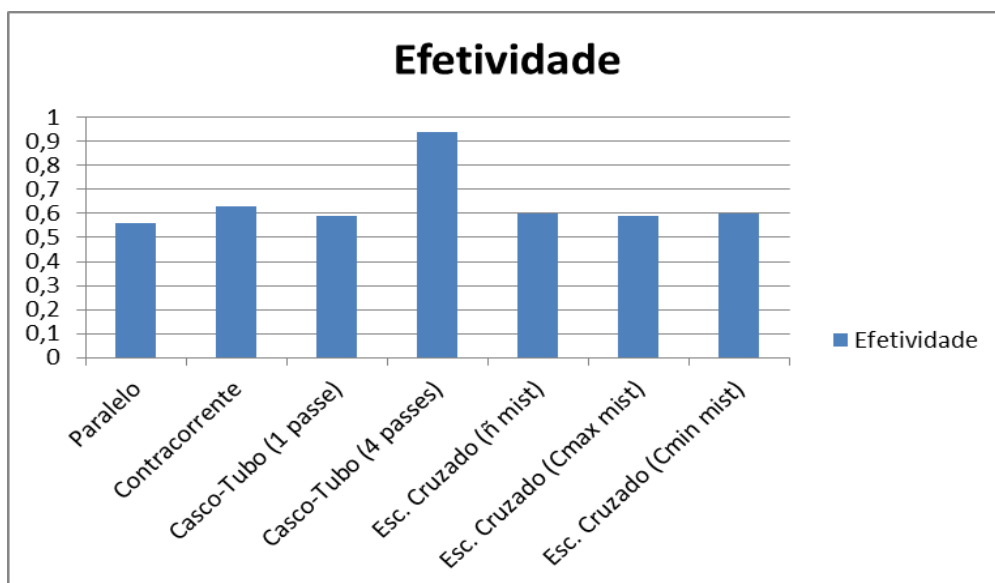


**Figura 6. Efetividade e temperaturas de saída em função do parâmetro  $U \cdot A$  para trocador de tubo duplo contracorrente.**

O mesmo comportamento da efetividade (Fig. 6) é observado para o escoamento em contracorrente, apenas que a amplitude com a qual a efetividade varia é superior que contemplada pelo arranjo paralelo das correntes, podendo alcançar valores próximos a unidade. O comportamento das temperaturas assume um perfil de variação até que se alcança o  $U \cdot A$  adequado de 400 W/K, valor para o qual um aumento no coeficiente global ou na área não é capaz de alterar as temperaturas de saída do sistema (Fig. 6).

#### B) Caso 2 - Efetividade em função do trocador de calor

Neste estudo avaliou-se apenas a influência do tipo de trocador de calor no cálculo da efetividade. Para o exemplo visto, o trocador de calor que obteve a menor efetividade foi o de correntes paralelas e com maior efetividade foi o casco-tubo com 4 passes. Estas diferenças estão intimamente ligadas à taxa de transferência de calor que o equipamento proporciona, sendo o modelo de casco-tubo com 4 passes o arranjo que garante melhor transferência dos tipos estudados (Figura 7):



**Figura 7. Cálculo da efetividade em função do tipo de trocador de calor.**

#### 4. CONCLUSÃO

A metodologia imposta neste trabalho se mostrou satisfatória para projeto de trocadores de calor, sendo obtido um código em linguagem MATLAB® capaz de calcular as efetividades do trocador de calor, bem como as temperaturas de saída dos fluidos quente e frio. Algumas considerações precisaram ser feitas para a construção do algoritmo, tais como: os calores específicos dos fluidos de trabalho eram constantes e iguais ao valor correspondente à temperatura de 25°C e pressão de 1 atm; os fluidos de trabalho considerados foram água, óleo do motor, glicerina, álcool etílico e amônia; os trocadores de calor podiam ser: tubo duplo, casco-tubo, escoamento cruzado e um trocador de calor genérico cuja razão entre a capacidade calorífica mínima e máxima seja aproximadamente zero.

No primeiro estudo de caso foram consideradas as mesmas condições iniciais para dois trocadores de tubo duplo com arranjos paralelo e contracorrente. A efetividade foi maior no trocador de contracorrente pois a diferença de temperatura ao longo do escoamento era maior, o que proporcionava uma maior taxa de transferência de calor entre os fluidos quentes e frio.

No segundo caso foi visto a influência do tipo de equipamento no cálculo da efetividade, sendo o trocador de casco-tubo com 4 passes o que apresentou maior efetividade, enquanto o de correntes paralelas foi trocador de menor efetividade.

#### 5. AGRADECIMENTOS

O primeiro e o terceiro autor gostariam de agradecer à CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pela bolsa de doutorado.

#### 6. REFERÊNCIAS

- Çengel, Y.; Ghajar, A., 2010. Transferência de Calor e Massa - Uma abordagem prática. Ed. McGraw-Hill, Bookman, 3° edição.
- Chapman, S. J., 2003. Programação em MATLAB® para engenheiros. Ed. Thomson, São Paulo.
- Holman, J.P., 1999. Transferência de Calor, Ed. McGraw Hill, 8°ed.
- Incropera, F. P.; De Witt, D. P.; Bergman, T., 2008. Fundamentos de transferência de calor e massa. Ed.LTC, 6° edição, Rio de Janeiro.
- Queiroz, K.F.F.C., 2016. Desenvolvimento e implementação de uma ferramenta computacional de uso médico para análise de imagens termográficas. p. 104, Master thesis, Universidade Federal de Pernambuco, Recife.

#### 7. RESPONSABILIDADE AUTORAL

“Os quatro autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho”.

### DEVELOPMENT OF A COMPUTATIONAL TOOL TO CALCULATE THE EFFECTIVENESS OF HEAT EXCHANGERS

Maria Gabriela Lira Rangel, maria.lrangeli@hotmail.com<sup>1,2</sup>

Kamila Fernanda Ferreira da Cunha Queiroz, kamilaferreira@gmail.com<sup>1,3</sup>

Olga Pinheiro Garcia, olgapinheirogarcia@gmail.com<sup>1</sup>

José Claudino de Lira Junior, lira.jr@gmail.com<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Pernambuco, Av. Acadêmico Hélio Ramos, S/N, 50740-530, Recife, PE, Brasil.

<sup>2</sup> Instituto Federal de Alagoas, Maceió, Alagoas, Brasil. Rua Mizaél Domingues, 75, Centro, 57020-600, Maceió, AL, Brasil.

<sup>3</sup> Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte, Ceará-Mirim, Rio Grande do Norte, Brasil. Br 406, km 145, Planalto, 59570-000, Ceará-Mirim, RN, Brasil.

**Abstract:** *Over the last few years, the engineering sector has demanded more detailed projects and processes with shorter deadlines. To assist the engineer in this task, several softwares and tools have been created to provide agility and reliability in the decisions of the technical staff. In the area of thermal engineering, the modeling of heat transfer processes has played a major role in the design and evaluation of thermal equipments. Taking into account these issues, this article presents the development of a computational tool to compute the effectiveness of heat exchangers, optimizing the evaluation of heat exchange systems. The interactive program will allow the user to select the nature of hot and cold fluids between water, engine oil, glycerin, ethyl alcohol and ammonia. The user will also define the conditions of the heat exchange system, such as the exchanger area, the flow rates and the ingoing temperatures of the fluids. The interface will return some parameters of the heat exchangers, including fluid outgoing temperatures, heat exchange effectiveness and the heat flow.*

**Keywords:** *Heat exchangers, Heat transfer, Heat exchanger design, Graphical user interface.*