

Artigo

Influência da tubulação na transferência de calor em um trocador de calor casco e tubo

Carlos Augusto de Carvalho ^[1], Victor Wagner Freire de Azevedo ^[2]

[1] UFERSA, Engenharia Mecânica; Carlos Augusto de Carvalho; carvalho199417@gmail.com

[2] UFERSA, Engenharia Mecânica; Victor Wagner Freire de Azevedo; victorwfreire@ufersa.edu.br

Data da defesa: 17 / 06 / 2022.

RESUMO: Trocadores de calor são bastantes utilizados na indústria e até em aplicações domésticas. Por serem equipamentos normalmente de grande porte, a análise experimental de tais dispositivos nem sempre é simples, o que abre espaço para o desenvolvimento de estudos numéricos. O presente trabalho realizou um estudo acerca do processo de transferência de calor, através da dinâmica de fluidos computacional (CFD), em que foi analisada a influência da tubulação sobre o mecanismo de transferência de energia sob a forma de calor. Para isso, dois trocadores de calor do tipo casco e tubos de pequeno porte foram analisados. Os resultados mostraram como os diferentes tipos de tubulação analisados influenciam na troca de calor entre fluidos de trabalho.

Palavras-Chave: CFD; Trocadores de calor; simulação numérica.

1-INTRODUÇÃO

Os trocadores de calor são equipamentos que proporcionam a troca de calor entre fluidos, dispersando, geralmente, a necessidade de haver uma mistura entre eles. A condição para que esse processo possa acontecer, é os fluidos estarem a diferentes temperaturas. O processo de transferência de energia em um trocador de calor envolve os mecanismos de convecção e de condução, sendo que a taxa de transferência depende da diferença de temperatura [1].

Em relação à aplicabilidade, os trocadores de calor podem ser encontrados tanto em usos domésticos como em setores industriais. No segmento industrial atende vários ramos, tais como: Fábrica de processamento químico, frigoríficos, usinas de energia a vapor, entre outros. Esse tipo de equipamento proporciona um alto rendimento, possui baixo custo de manutenção e apresenta-se para o mercado como uma excelente alternativa na solução de problemas de transferência térmica [2].

Uma vez que os desenvolvimentos de estudos experimentais para trocadores de calor são bastante caros, a simulação numérica vem se mostrando como uma excelente alternativa para a análise de tais dispositivos. De maneira eficiente, diferentes geometrias de trocadores de calor casco-e-tubo podem ser estudadas através de modelos numéricos. Zhang et. al. [3] analisaram a influência de chicanas helicoidais em um trocador de calor casco-e-tubo de tubos retos através de simulação numérica. No referido trabalho, o modelo foi capaz de analisar qual a geometria da chicana, incluindo angulação e formato, resultou em uma perda de carga menor no escoamento e proporcionou aumento na transferência de calor. Além das diferenças nas chicanas que podem ser encontradas na literatura, diferentes tipos de tubulação podem ser analisados, como no trabalho de Uosofvand et al. [4], que analisou a influência de tubos corrugados em um único passe no trocador de calor em relação à chicanas

helicoidais. O modelo numérico mostrou que tubos corrugados proporcionaram uma maior eficiência para o trocador de calor do que as chicanas helicoidais.

Com os modelos encontrados na literatura, o questionamento da real influência da tubulação em um único passe do trocador de calor ainda permaneceu. Assim, o presente trabalho desenvolveu um modelo numérico para analisar a influência geométrica da tubulação, na transferência de calor em um único passe de um trocador de calor casco-e-tubo, considerando tubos retos e helicoidais.

2- FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1- Descrição do modelo físico do problema

Neste estudo, dois tipos de trocadores de calor cascos e tubos foram analisados numericamente, através do software ANSYS CFX. Esses equipamentos apresentam processos de funcionamentos idênticos, no entanto a variação da geometria, de suas tubulações internas, pode influenciar no processo de transferência de calor. Dessa forma, a utilização de uma ferramenta computacional constitui uma boa alternativa para analisar essa influência, sem que seja necessário a construção de um aparato experimental com alto custo.

Os trocadores de calor casco e tubos se destacam em função da sua simplicidade em sua composição e aplicação. Tais dispositivos possuem ampla aplicação industrial, podendo ter dimensões muitas pequenas, como um trocador de calor para resfriamento de óleo hidráulico de um pequeno equipamento, ou tendo dimensões grandes, como aqueles utilizados na indústria petroquímica. Esses equipamentos podem operar com uma grande variedade de fluidos e apresentam um rendimento satisfatório para muitos processos industriais, sendo utilizados para geração e reaproveitamento de energia [5].

Os trocadores de calor casco e tubos helicoidais representam uma evolução dos trocadores de calor convencionais, mantendo a tradicional rigidez destes. No entanto, a descrição do comportamento de seu escoamento é mais complexa, sobretudo quando um regime de escoamento turbulento é considerado. Um escoamento secundário deve ser considerado na curvatura do tubo com geometria helicoidal, em razão do desenvolvimento de forças centrífugas. As forças centrífugas ocasionam um aumento nas taxas de transferências de calor [6].

2.2- Descrição do modelo matemático do problema

O modelo numérico foi desenvolvido considerando as seguintes hipóteses: Fluido newtoniano, escoamento laminar, e em regime permanente. Dessa forma, as equações diferenciais parciais da conservação da massa, quantidade de movimento e, conservação da energia que envolvem a problemática podem ser escritas [7]. As equações governantes descritas a seguir, foram discretizadas através do método de volumes finitos, com a utilização de um pacote comercial de CFD.

2.2.1- Equação da conservação da massa

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho \vec{U}) = 0 \quad (1)$$

Onde:

ρ : Densidade do fluido;

t : Tempo;

$\vec{\nabla}$: Vetor divergente;

$\vec{U}$: Vetor da velocidade de escoamento.

Em razão de estamos trabalhando com um fluido de trabalho incompressível e, o escoamento ser em regime permanente, a equação 1 pode ser simplificada (Equação 2).

$$\vec{\nabla}(\rho \vec{U}) = \rho \frac{\partial u}{\partial y} + \rho \frac{\partial v}{\partial y} + \rho \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (2)$$

2.2.2- Equação da quantidade de movimento

$$\vec{\nabla}(\rho u \vec{U}) = -\frac{\partial \rho}{\partial x} + \vec{\nabla} \cdot (\mu \text{ grad } u) \quad (3)$$

$$\vec{\nabla}(\rho v \vec{U}) = -\frac{\partial \rho}{\partial y} + \vec{\nabla} \cdot (\mu \text{ grad } v) \quad (4)$$

$$\vec{\nabla}(\rho w \vec{U}) = -\frac{\partial \rho}{\partial z} + \vec{\nabla} \cdot (\mu \text{ grad } w) \quad (5)$$

2.2.3- Equação da energia

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \vec{\nabla}(\rho h \vec{U}) = -P \vec{\nabla} \cdot \vec{U} + \vec{\nabla} \cdot (k \text{ grad } T) + \Phi + s_i \quad (6)$$

Onde:

h : Entalpia estática;

k : Condutividade térmica;

t : temperatura;

P : Pressão normal;

ρ : Densidade do fluido;

$\vec{\nabla}$: Vetor divergente;

$\vec{U}$: Vetor da velocidade de escoamento;

grad : Vetor gradiente;

Φ : Dissipação viscosa;

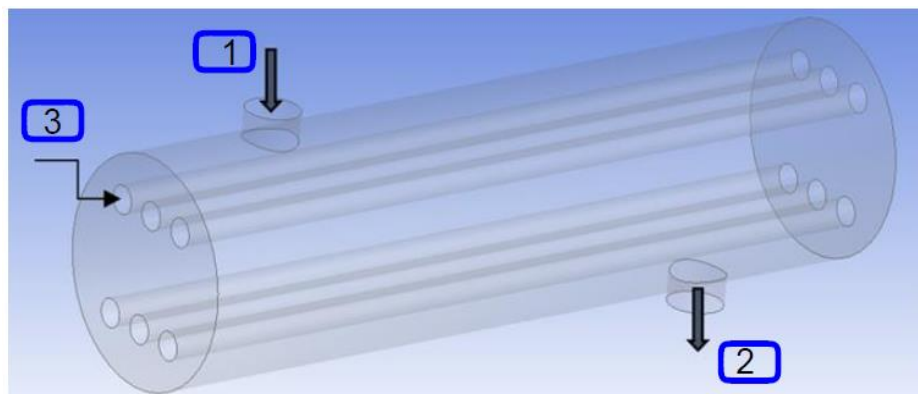
s_i : Fonte de fluxo de calor.

3- METODOLOGIA

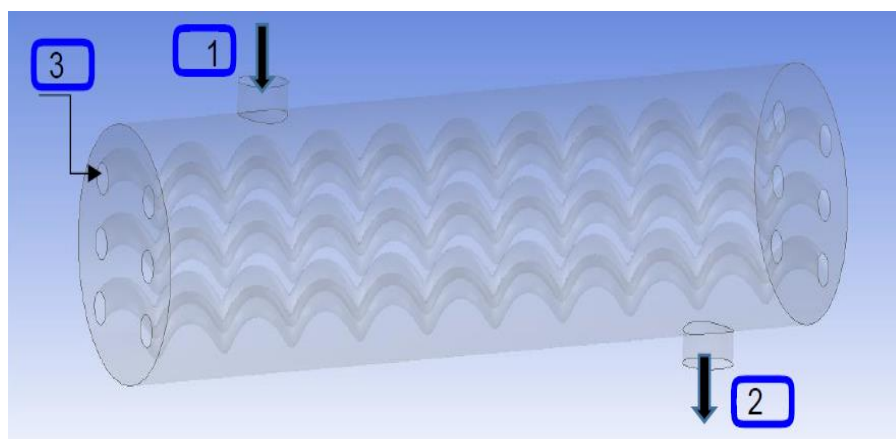
O modelo computacional foi desenvolvido com a utilização do software ANSYS, versão estudantil. Primeiramente, foram definidos os objetivos do estudo e, em seguida, foram criadas as geometrias de dois trocadores de calor do tipo casco e tubos. Dando continuidade, foram geradas duas malhas e aplicadas as condições de contorno no modelo. Por último, as equações governantes foram resolvidas com a utilização do CFX.

3.1- Desenvolvimento das geometrias

As geometrias criadas representam a parte fluida do trocador de calor, onde um único fluido de trabalho está sendo analisado. A Figura 1A mostra o domínio para o trocador de calor com tubo retos e a Figura 1B para o trocador de calor com tubos helicoidais, as regiões onde as condições de contorno estão sendo aplicadas estão destacadas. Na Tabela 1, são identificados os alguns componentes apresentados na Figura 1. O fluido de trabalho entra na seção 1 e, troca calor com a superfície externa dos tubos internos.



A) Modelo convencional



B) Modelo com tubos helicoidais.

Figura 1. Geometrias. A) Modelo convencional; B) Modelo com tubos helicoidais. (Fonte: autoria própria).

Tabela 1. Legenda dos componentes apresentados na Figura 1. (Fonte: autoria própria).

Bocal	Descrição
1	Entrada do fluido
2	Saída do fluido
3	Tubos internos

Na Tabela 2, as principais dimensões dos trocadores desenvolvidos são apresentadas. As dimensões foram baseadas em um modelo disponível no mercado, sendo reduzidas proporcionalmente para efeito de estudo [8]. A Tabela 3, apresenta as propriedades do fluido de trabalho.

Tabela 2. Dimensões do trocador de calor. (Fonte: autoria própria).

Variável	Dimensão (m)
Comprimento do trocador	0,150
Diâmetro do casco	0,040
Diâmetro dos tubos interno	0,005
Diâmetro da seção de entrada	0,01
Diâmetro da seção de saída	0,01

Tabela 3. Propriedades do fluido de trabalho. (Fonte: autoria própria).

Fluido de trabalho	água
Densidade [Kg/m^3]	997
Viscosidade dinâmica [$Kg (S * m)^{-1}$]	0,0008899
Calor específico [$J/(kg * K)$]	4181,7
Condutividade térmica [$W (m * K)^{-1}$]	0,6069

3.2- Geração das malhas computacionais

A geração da malha computacional constitui a fase da discretização do domínio geométrico, onde a estrutura é dividida em pequenos volumes com nós, os quais armazenam as variáveis primitivas para a solução do problema. O método dos volumes finitos baseado em elementos é aplicado na discretização das equações governantes do problema, o que respeita o caráter conservativo das mesmas em todo o domínio computacional. A Figura 2 mostra a malha gerada para o caso do trocador de tubulações retas, com a presença de elementos tetraédricos.

A etapa de geração da malha computacional é uma das mais importantes em uma simulação numérica. Dessa forma, é necessário averiguar a qualidade da malha. No caso em estudo, as malhas padrões geradas foram refinadas aos poucos e, ao final, uma análise foi efetuada.

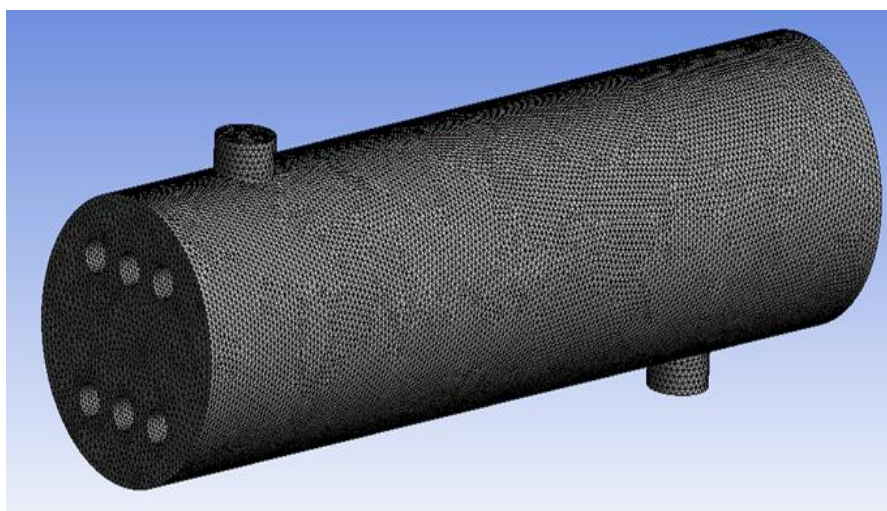


Figura 2. Malha computacional. (Fonte: autoria própria).

3.2.1- Testes de malhas

A qualidade da malha afeta tanto o processo de convergência de uma simulação, quanto seus resultados. Para observar se a malha influenciou nos resultados das simulações feitas, quatro malhas foram geradas com diferentes quantidades de elementos. Três refinamentos foram realizados em cada caso. As características das malhas geradas de acordo com esta metodologia estão mostradas nas Tabelas 4 e 5 para o trocador de calor de tubos retos e helicoidais, respectivamente. As diferentes malhas computacionais foram obtidas utilizando como referência o tamanho dos elementos no domínio: partiu-se de um tamanho “padrão” (apresentado na malha 1) e o mesmo foi sendo reduzido parametricamente de forma a gerar malhas computacionais mais refinadas (ver as malhas 2 – 4).

Tabela 4. Parâmetros das malhas da geometria com tubos retos (Fonte: autoria própria).

	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4
Nós	128569	142791	199141	357844
Número de elementos	732011	751097	1039768	1879400
Tamanho dos elementos (m)	0,008934	0,0017868	0,0009927	0,000687
Temperatura média (K)	328,200	327,910	327,863	327,679

Tabela 5. Parâmetros das malhas da geometria com tubos helicoidais (Fonte: autoria própria).

	Malha 1	Malha 2	Malha 3	Malha 4
Nós	207881	224835	279535	471788
Número de elementos	1121566	1154334	1485761	2511001
Tamanho dos elementos (m)	0,0081548	0,00163096	0,0009061	0,000627292
Temperatura média (K)	327,430	327,340	327,200	327,355

A variável escolhida para avaliar os resultados das malhas computacionais foi a temperatura média na seção de saída do trocador de calor. Analisando os Gráficos 1 e 2, percebe –se que as malhas obtidas foram bem próximas em relação ao parâmetro de temperatura e apresentaram uma variação pouco relevante em relação ao número de nós. Apesar das diferenças entre as quantidades de elementos nas Malhas 1 – 4, os resultados obtidos nos testes para a temperatura média ficaram relativamente próximos. Uma explicação para tal fato está na velocidade do escoamento, que está dentro do regime laminar. Baixos valores de coeficiente de troca de calor por convecção associados a este regime resultam em valores mais independentes da resolução da malha computacional. Diferenças certamente seriam observadas caso o escoamento estivesse sendo analisado no regime turbulento. Para o estudo, a malha 2 foi escolhida pela consistência apresentada nos resultados de teste.

Para avaliar a qualidade da malha 2, tomada como referência, alguns parâmetros são apresentados na Tabela 6. Os valores médios dos parâmetros Skewness e Orthogonal quality apresentaram uma proximidade com zero e um, respectivamente, indicando que a malha computacional 2 apresenta uma baixa deformação em seus elementos. Logo, os valores obtidos são aceitáveis e, a malha 2 apresenta uma boa qualidade.

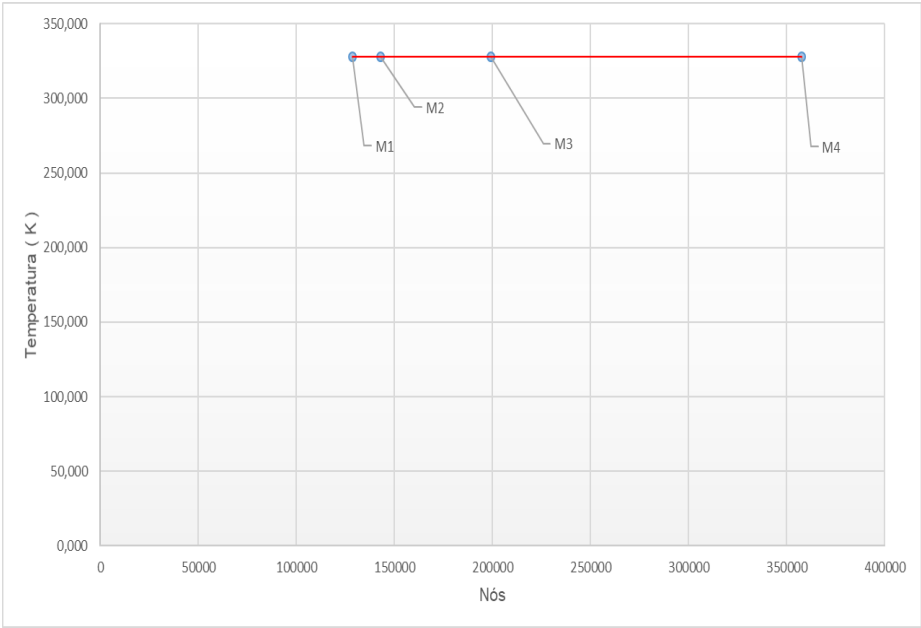


Gráfico 1. Variação da temperatura no modelo convencional. (Fonte: autoria própria).

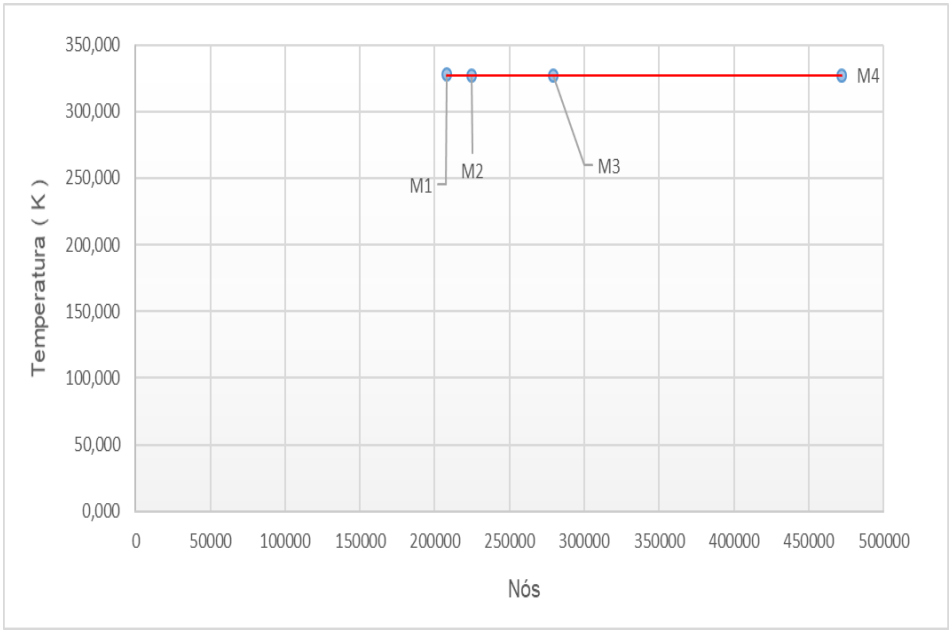


Gráfico 2. Variação da temperatura no modelo de tubos helicoidais. (Fonte: autoria própria).

Tabela 6. Parâmetro de qualidade da malha 2. (Fonte: autoria própria).

	Parâmetro	Skewness	Orthogonal quality
Tubos Retos	Média	0,23	0,76
	Desvio padrão	0,12	0,11
Tubos Helicoidais	Média	0,22	0,75
	Desvio padrão	0,11	0,11

3.3- Condições de contorno

Esta é a etapa onde as condições de contorno e, outros paramétricos precisam ser estabelecidos para que a simulação numérica possa ser realizada. No caso, foram definidos os parâmetros de entrada e saída do fluido de trabalho, a delimitação das paredes dos tubos vazados e da carcaça do trocador de calor. Considera-se que a superfície externa dos trocadores de calor não troca energia com o meio externo e, assim, a transferência de calor aconteceu apenas entre o fluido de trabalho e a superfície externa dos tubos. Entre as condições de contorno apresentadas na Tabela 7, pode ser observada a temperatura da superfície externa dos tubos e a temperatura na qual o fluido de trabalho entra nos equipamentos de troca térmica analisados.

Ao escolher alguns parâmetros, como a temperatura de entrada do fluido de trabalho, a velocidade do escoamento e a pressão, foi levado em consideração a recomendação do fabricante do equipamento e a aplicação almejada. Com as dimensões que foram apresentadas na Tabela 2, foi escolhido um número de Reynolds, de onde foi obtida a velocidade de entrada do fluido de trabalho, de forma que o mesmo estivesse na faixa do escoamento laminar.

Como as equações que descrevem o nosso objeto de estudo não são lineares, uma abordagem iterativa é necessária e quando o resultado se aproxima da solução exata, a solução converge. A solução obtida, portanto, consiste em uma aproximação. Os critérios de convergência permitem analisar o processo de convergência durante a realização de uma simulação numérica. O valor residual é um dos critérios mais importantes, quantificando o erro da solução do sistema de equações [9]. Quando menor o valor residual mais acurado é a solução numérica. Foi considerado, a convergência com valores residuais da ordem de 10^{-4} .

Tabela 7. Condições de contorno. (Fonte: autoria própria).

Parâmetro	Valor
Número de Reynolds	1120
Velocidade de entrada [m/s]	0,19994
Temperatura de entrada [°C]	60
Temperatura superficial dos tubos [°C]	10
Pressão de referência [Pa]	101325
Pressão de saída [Pa]	0
Critério de convergência (Residual)	$1 * 10^{-4}$

4- RESULTADOS

Após a convergência da solução, os resultados obtidos com a utilização da malha computacional 2 foram confrontados. Na Tabela 8, alguns parâmetros foram apresentados. Os valores de temperatura, pressão e velocidade, foram avaliados na seção de saída do trocador de calor. Pode ser observado, que ocorreu uma variação pequena de um caso para o outro. O modelo do trocador de calor de tubos helicoidais apresentou uma convergência mais lenta, em relação ao modelo convencional.

Na Tabela 9, temos a variação percentual de alguns parâmetros obtidos na seção de saída do trocador de calor. Observa-se que a variação obtida na pressão média foi mais significativa, em torno de 11%.

Tabela 8. Resultados da simulação com a malha 2. (Fonte: Autoria própria).

	Caso 1	Caso 2
Temperatura média (K)	327,910	327,340
Velocidade média (m/s)	0,1870	0,1867
Pressão média (Pa)	0,764	0,848
Tempo computacional (s)	4250,808	5746,456
Quantidade de iterações	1116	965

Tabela 9. Variação percentual. (Fonte: Autoria própria).

	Variação
Temperatura média (K)	0,17
Velocidade média (m/s)	0,16
Pressão média (Pa)	11

Nas Figuras 3 e 4 foram apresentados, sob a forma de planos de cortes, os contornos de temperaturas para os casos analisados. Os contornos de temperatura foram obtidos com a utilização da malha computacional 2.

Caso 01. Trocador de calor casco e tubos retos

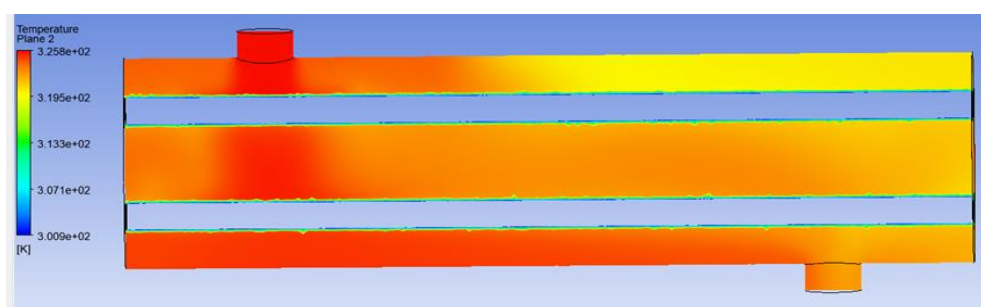


Figura 3. Plotagem do contorno de temperatura no plano YZ. (Fonte: autoria própria).

Caso 02. Trocador de calor casco e tubos helicoidais

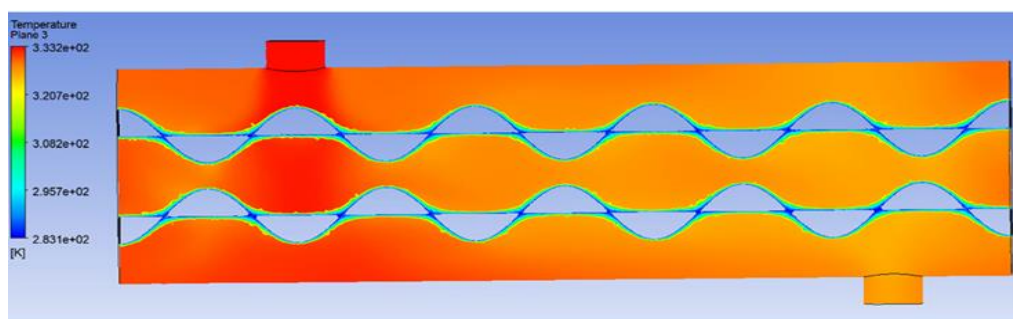


Figura 4. Plotagem do contorno de temperatura no plano YZ. (Fonte: autoria própria).

Comparando os resultados apresentados nas Figuras 3 e 4, observa-se que a transferência de calor apresentou uma diferença pequena de um caso para o outro. A temperatura do fluido de trabalho, inicialmente apresentou uma queda rápida e, em seguida, apresentou uma tendência de estabilização. A variação da temperatura

ocorreu com mais intensidade nas regiões com maior proximidade, ou contato direto, com a superfície externa dos tubos internos. Apesar das pequenas diferenças com relação à distribuição de temperatura, analisando a temperatura média nas Tabelas 4 e 5, observa-se que o trocador de calor de tubos helicoidais foi capaz de proporcionar uma maior transferência de calor entre o fluido de trabalho e os tubos, resultando em uma menor temperatura média na saída do domínio quando comparado com o de tubos retos.

Os trocadores de casco e tubos helicoidais apresentam uma melhor eficiência em relação ao modelo tradicional de casco e tubos retos [10]. No entanto, a perda de carga apresentada por esses equipamentos pode ser significativa, dependendo das condições de escoamento de seu fluido de trabalho. Após a realização da simulação numérica, foi observado que a perda de carga apresentou uma pequena variação de um caso para o outro. A perda de carga no trocador de calor com tubos helicoidais foi cerca de 2% maior do que no trocador de calor de tubos retos. Esse parâmetro é bastante importante na análise de trocadores de calor, porque levará em consideração o gasto de energia para manter o escoamento, fornecido por uma bomba, por exemplo.

5- CONCLUSÃO

O presente trabalho analisou a influência da tubulação em um trocador de calor casco-e-tubo no processo de transferência de calor através de um modelo numérico. Uma situação de escoamento laminar foi considerada e um pequeno aumento no resfriamento do fluido de trabalho foi notado no trocador de calor com tubos helicoidais em relação ao trocador de calor com tubos retos. Apesar dos resultados simplificados obtidos, o presente modelo se mostrou consistente numericamente e é capaz de prever situações de operação dos referidos trocadores de calor em uma situação de escoamento turbulento, em que maiores mudanças entre os modelos podem ser encontradas.

6-REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. Transferência de calor e massa, uma abordagem prática. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda 2012.
- [2] INCROPERA, Frank; DEWITT, David; BERGMAN, Theodore. Fundamentos de transferência de calor e massa. Rio de Janeiro: LTC, 2008.
- [3] ZHANG, Minhua; MENG, Fang; GENG, Zhongfeng. CFD simulation on shell-and-tube heat exchangers with small-angle helical baffles. *Frontiers of Chemical Science and Engineering*, v. 9, n. 2, p. 183-193, 2015.
- [4] UOSOFVAND, Hamed; ABBASIAN ARANI, Ali Akbar. Shell-and-tube heat exchangers performance improvement employing hybrid segmental–helical baffles and ribbed tubes combination. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, v. 43, n. 8, p. 1-15, 2021.
- [5] COELHO, João Carlos Martins. Energia e fluidos: mecânica dos fluidos. Editora Blucher, 2016.
- [6] FOUDA, A.; NADA, S. A.; ELATTAR, H. F.; REFAEY, H. A.; MAHFOUZ, A. S. B. Thermal performance modelling of turbulent flow in multi tube in tube helically coiled heat exchangers. *International Journal of Mechanical Sciences*, v. 135, p. 621-638, 2018.]. Acessado em 10/03/2022.
- [7] SOUZA, Caio; MINATO, Rafael. Estudo da variação do número de tubos em trocador de calor casco e tubos em CFD. Ponta Grossa: 2019.
- [8] <https://bermo.com.br/produtos/detalhes/trocadores-de-calor-casco-e-tubo-helicoidais-bcth/>. Acesso em 20/02/2022.
- [9] ALVES, Bruna. Simulação de um trocador de calor casco e tubos com fluido turbulento utilizando código CFD. Ponta Grossa: 2018.
- [10] COSTA, Mayse. Simulação e análise do efeito da variação de parâmetros sobre a perda de carga e transferência de calor em trocadores de calor casco e tubo. Recife:2016.



Ministério da Educação
Universidade Federal Rural do Semi-Árido
Centro de Engenharias
Departamento de Engenharia e Tecnologia

ATA DE DEFESA DE PROJETO FINAL DE CURSO

Às 08 horas do dia 17 de Junho de 2022, na Sala de Reuniões do Centro de Engenharias, sob a presidência do prof. Victor Wagner Freire de Azevedo, reuniu-se a banca examinadora da defesa do Projeto Final de Curso de autoria do aluno Carlos Augusto de Carvalho, do curso de Engenharia Mecânica desta universidade, com o título "Influência da tubulação em um trocador de calor casco-e-tubo". A banca examinadora ficou assim constituída: Victor Wagner Freire de Azevedo, Fernanda Alves Ribeiro e Daut de Jesus Nogueira Peixoto Couras, como membros. Foram registradas as seguintes ocorrências: **após a apresentação da aluna pelo presidente da banca, ocorreu a apresentação do trabalho seguido de questionamentos pelos membros da banca; finalizando, foram sugeridas algumas modificações e correções.** Concluída a defesa, procedeu-se o julgamento pelos membros da banca examinadora, em reunião fechada na mesma sala, tendo o aluno obtido **aprovação**, fazendo jus, portanto, ao título de engenheiro mecânico. E, para constar, eu, Victor Wagner Freire de Azevedo, lavrei a presente ata que, após lida e aprovada pelos membros da banca examinadora, será assinada por todos.

Mossoró, RN, 17 de Junho de 2022.

Assinatura dos membros da banca examinadora

Victor Wagner Freire de Azevedo
Presidente

FERNANDA ALVES RIBEIRO: 00880308494
2022.06.20 11:00:
00880308494 P13-03'00'

Fernanda Alves Ribeiro
Membro

DAUT DE JESUS NOGUEIRA PEIXOTO COURAS:87794624304
Assinado digitalmente por DAUT DE JESUS NOGUEIRA PEIXOTO COURAS:87794624304
DN: CN=DAUT DE JESUS NOGUEIRA PEIXOTO COURAS:87794624304, OU=UFERSA - Universidade Federal Rural do Semi-Árido, O=ICPEdu, C=BR
Razão: Eu estou aprovando este documento
Localização: sua localização de assinatura aqui
Data: 2022.06.20 11:22:45-03'00'
Foxit PDF Reader Versão: 11.2.2

Daut de Jesus Nogueira Peixoto Couras
Membro