

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

LEANDRO VANDERLEY DOS PASSOS ALVES

**ANÁLISE COMPUTACIONAL COMPARATIVA ENTRE TROCADORES DE
CALOR BITUBULARES COM E SEM MICROCANAIS DE PERFIL RETANGULAR**

Recife
2020

LEANDRO VANDERLEY DOS PASSOS ALVES

**ANÁLISE COMPUTACIONAL COMPARATIVA ENTRE TROCADORES DE
CALOR BITUBULARES COM E SEM MICROCANAIS DE PERFIL RETANGULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Curso de Graduação em
Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Pernambuco, como requisito
parcial para a obtenção do grau de
Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Costa de Araújo.

Recife

2020

Catálogo na fonte
Bibliotecária Margareth Malta, CRB-4 / 1198

A474a Alves, Leandro Vanderley dos Passos.
Análise computacional comparativa entre trocadores de calor bitubulares com e sem microcanais de perfil retangular / Leandro Vanderley dos Passos Alves. - 2020.
56 folhas, il., gráfs., tabs.

Orientador: Prof. Dr. Marcus Costa de Araújo.

TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Departamento de Engenharia Mecânica, 2020.
Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia mecânica. 2. Trocador de calor bitubular. 3. Microcanais. 4. Análise numérico-computacional. I. Araújo, Marcus Costa de (Orientador). II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2020- 250

LEANDRO VANDERLEY DOS PASSOS ALVES

**ANÁLISE COMPUTACIONAL COMPARATIVA ENTRE TROCADORES DE
CALOR BITUBULARES COM E SEM MICROCANAIS DE PERFIL RETANGULAR**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Aprovado em: 05 / 10 / 2020.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Marcus Costa de Araújo (Orientador)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. José Claudino de Lira Júnior (Examinador interno)

Universidade Federal de Pernambuco

Prof^a Dr^a Luciete Alves Bezerra (Examinadora interna)

Universidade Federal de Pernambuco

À professora Adriana Leandro,
in memoriam, por ter sido
agente do valor da educação

AGRADECIMENTOS

Sou muito grato ao professor Marcus, não apenas pela valiosa orientação no decorrer do caminho, mas também pela compreensão, paciência e humanidade.

Agradeço, de coração, à amiga e colega Marília Cavalcanti pelas sugestões, revisão e, sobretudo, pela escuta atenta em momentos de dificuldade.

Agradeço também ao colega Felipe Cardim pela inestimável ajuda com o *software*, pelas dicas para resolução de problemas e pela sempre tão generosa solicitude.

Deixo, por fim, meu muito obrigado a todos aqueles que colaboraram, direta ou indiretamente, no início, meio e fim deste ciclo que se encerra.

RESUMO

Trocadores de calor são equipamentos indispensáveis em vários processos industriais. O surgimento recente de trocadores de calor com microcanais tem atraído o interesse da academia, sobretudo no que diz respeito a avaliação de eficiência, bem como despertado a atenção da indústria para as mais variadas aplicações. Este trabalho propôs um estudo comparativo do processo de transferência de calor em trocadores de calor bitubulares com e sem microcanais retangulares incrustados na superfície interna do tubo interno, em contato com o fluido frio. Para tal, foi realizada análise numérico-computacional utilizando o *software* de fluidodinâmica ANSYS CFX. A validade da solução computacional foi garantida com o cálculo da solução analítica da configuração mais simples. Dimensionados os cenários, os resultados de temperatura de saída dos fluidos quentes foram coletados e submetidos a comparação. Verificou-se, em todos os cenários considerados, com menor ou maior refinamento da malha na região em torno da área de transferência de calor, que a presença de microcanais reduz a temperatura de saída do fluido quente.

Palavras-chave: Trocador de calor bitubular. Microcanais. Análise numérico-computacional.

ABSTRACT

Heat exchangers are essential devices for several industrial processes. The appearance of microchannel heat exchangers has increased the interest of the academy when it comes to efficiency evaluation and the attention of the industry towards a wide range of applications as well. This work has proposed a comparative study of the heat transfer process in concentric tube heat exchangers with and without rectangular microchannels embedded in the inner surface of the inner tube in direct contact with the cold fluid. For this purpose, a computational modeling has been performed by using the Computational Fluid Dynamics software ANSYS CFX. The reliability of the model was ensured by calculating the analytic solution applied to the simpler configuration. Once settled the scenarios, the outcomes of the outlet temperature of the hot fluids were collected and submitted to comparison. Thus, it was possible to verify that, regardless of larger or smaller mesh refinement in the region around the heat transfer area, the presence of microchannels reduces the outlet temperature of the hot fluid.

Keywords: Concentric tube heat exchanger. Microchannels. Computacional modelling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Classificações de trocadores de calor segundo alguns critérios	19
Figura 2 – Trocador de calor de casco e tubos	20
Figura 3 – Esquema de uma torre de resfriamento	21
Figura 4 – Configuração de escoamento de trocadores de calor	22
Figura 5 – Balanço geral de energia em um trocador de calor bitubular	23
Figura 6 – Distribuição de temperatura para trocador com fluxo paralelo	24
Figura 7 – Distribuição de temperatura em trocador em contrafluxo	25
Figura 8 – Componentes do ANSYS CFX.....	29
Figura 9 – Esquema geral do trocador bitubular genérico.....	30
Figura 10 – Etapas de um projeto CFD.....	31
Figura 11 – Criação de um cilindro no ANSYS DesignModeler.....	32
Figura 12 – Detalhes dos esboços e extrusões.....	33
Figura 13 – Geometria do trocador bitubular simples (sem microcanais)	34
Figura 14 – Perfil do microcanal incrustado no tubo interno	35
Figura 15 – Microcanais replicados em torno do tubo interno	35
Figura 16 – Geometria do trocador bitubular com microcanais.....	36
Figura 17 – Definição de nomes para faces da geometria	37
Figura 18 – Malha com menor refinamento para trocador simples	38
Figura 19 – Malha com maior refinamento para trocador simples.....	38
Figura 20 – Malha com menor refinamento para trocador com microcanais.....	39
Figura 21 – Malha com maior refinamento para trocador com microcanais.....	40
Figura 22 – Domínios e condições de contorno	42
Figura 23 – Contorno de temperaturas na entrada e saída dos fluidos.....	45
Figura 24 – Temperatura do fluido quente para cenários 1 e 2.....	47
Figura 25 – Temperatura do fluido quente para cenários 1 e 3.....	47

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de entrada das grandezas relacionadas	41
Tabela 2 – Coeficiente global de transmissão de calor	43
Tabela 3 – Cenários de simulação e seus respectivos resultados	46
Tabela 4 – Cenários de simulação e seus respectivos resultados (L = 10m)...	48

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
1.1	JUSTIFICATIVA.....	13
1.2	OBJETIVOS	13
1.2.1	Objetivo geral	13
1.2.2	Objetivos específicos	14
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
3.1	TROCADORES DE CALOR	18
3.1.1	Classificação de trocadores de calor	19
3.1.2	Análise de trocadores de calor	23
3.1.2.1	Média log das diferenças de temperatura.....	23
3.1.2.2	Método da efetividade-NUT	26
3.2	DINÂMICA COMPUTACIONAL DOS FLUIDOS.....	26
3.2.1	ANSYS CFX	28
4	METODOLOGIA	30
4.1	GEOMETRIA	31
4.1.1	Especificações geométricas de projeto	31
4.1.2	Trocador bitubular simples	32
4.1.3	Trocador bitubular com microcanais	34
4.2	MALHA	37
4.2.1	Malha do trocador bitubular simples	37
4.2.2	Malha do trocador bitubular com microcanais	38
4.3	SETUP.....	40
4.4	SOLVER	41
5	RESULTADOS	43
5.1	SOLUÇÃO ANALÍTICA PARA O TROCADOR DE CALOR BITUBULAR SIMPLES	43
5.2	ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS SIMULAÇÕES	44
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	49
	REFERÊNCIAS	51

APÊNDICE A – SCRIPT EM LIGUAGEM R PARA CÁLCULO ANALÍTICO	53
APÊNDICE B – SCRIPT EM LINGUAGEM R PARA GERAÇÃO DE GRÁFICOS.....	55

1 INTRODUÇÃO

Trocadores de calor são equipamentos essenciais em processos industriais que envolvem aquecimento ou resfriamento de substâncias quaisquer, indispensáveis no devido andamento desses processos. Embora se possa afirmar que os conceitos basilares de troca de calor estejam presentes na humanidade desde que se começou a dominar o manejo do fogo, quando pedras previamente aquecidas eram usadas para acalorar cabanas, foi a partir da Revolução Industrial, iniciada na segunda metade do século XVIII, que sistemas mais complexos passaram a ser desenvolvidos.

Como exemplos, pode-se citar um sistema central de aquecimento de água para auxiliar na incubação de ovos de galinha criado em 1777 pelo francês Jean Simon Nonnemain ou um trocador de calor criado em 1817 por outro francês chamado Marquis de Chabannes para ajudar no crescimento de uvas dentro de uma estufa. Em 1829 os irmãos Prince de Bristol, na Inglaterra, registraram uma patente de sistema de aquecimento residencial baseado em água quente e vapor, a partir da qual muitos engenheiros ao redor do mundo desenvolveram e aperfeiçoaram suas próprias soluções. Entrementes, também nos Estados Unidos, trocadores de calor ganhavam popularidade e muitas patentes eram registradas, como o radiador de ferro fundido em 1872 por Nelson H. Bundy (THE BEST HEAT EXCHANGER MANUFACTURERS, 2018).

No entanto, foi só a partir da década de 80 do século passado que, com o advento da microeletrônica, a tendência à miniaturização trouxe consigo problemas como o hiperaquecimento de circuitos, conforme Kakaç (2012) bem observa. Esse fenômeno foi o responsável pelo aumento direto da demanda por soluções de dissipação de calor que fossem mais eficientes, tanto em termos de ocupação de espaço como de performance, uma vez que a falta de eficiência nessa seara simplesmente comprometeria o funcionamento das novas tecnologias, que avançavam a passos largos.

Foi nesse contexto que surgiu o conceito de trocadores de calor com microcanais. Definidos por Mehendale S. S. como trocadores de calor cujos microcanais possuem diâmetro hidráulico inferior a 1mm, sua aplicação foi proposta pela primeira vez em 1981 em um estudo de Tuckerman e Pease acerca da

dissipação de calor de alta performance em circuitos integrados de larga escala (HAN ET AL, 2011).

Desde então, tem sido farta a pesquisa na área, o que tem ajudado a introduzir essa tecnologia em outras aplicações além daquela que motivou seu desenvolvimento, como condicionamento industrial e residencial de ar. Maiores detalhes a esse respeito serão discutidos adiante em uma revisão bibliográfica dos artigos mais relevantes dos últimos anos.

1.1 JUSTIFICATIVA

O grande avanço das soluções computacionais que se tem experimentado no decorrer dos últimos anos nas mais diferentes áreas do conhecimento impulsiona a necessidade de se dominar o manuseio dessas soluções, que podem se mostrar grandes aliadas no enfrentamento de problemas cuja análise seria muito dispendiosa se dependesse apenas de estudos experimentais.

Nesse contexto, o presente trabalho visa realizar estudo térmico comparativo entre configurações de trocadores de calor que possuem microcanais com trocadores que não têm.

1.2 OBJETIVOS

O objetivo geral, bem como os objetivos específicos almejados no desenvolvimento deste trabalho seguem abaixo.

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é realizar estudo, através de simulação numérica com o *software* comercial de fluidodinâmica computacional ANSYS CFX, sobre a influência, no processo de transferência de calor, da inserção de microcanais de perfil retangular na superfície interna do tubo interno (por onde escoava o fluido quente) de um trocador de calor bitubular.

1.2.2 Objetivos específicos

- a) Revisão bibliográfica dos estudos recentes concernentes à tecnologia de microcanais;
- b) Levantamento dos principais conceitos acerca de trocadores de calor, suas classificações, os métodos mais comumente utilizados para calculá-los, bem como explanação sobre a dinâmica computacional dos fluidos, ou fluidodinâmica computacional;
- c) Configuração da geometria, malha, materiais, condições de contorno, parâmetros de escoamento dos fluidos etc. para um trocador de calor bitubular sem microcanais e algumas configurações de trocadores bitubulares com microcanais;
- d) Realização da simulação com o *solver* do ANSYS CFX;
- e) Validação e comparação dos resultados obtidos;
- f) Proposta de trabalhos futuros complementares ao presente trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

As primeiras aplicações de trocadores de calor que fazem uso de microcanais datam da década de 80 do século passado quando a indústria de microeletrônicos ficou mais robusta e demandou aumento de eficiência na transferência de calor e redução do volume de instalação necessário, isto é, uma maior possibilidade de compactação em sistemas de resfriamento. Desde então, como Han, Liu, Li e Huang (2012) observam, trocadores de calor com microcanais vem sendo extensivamente pesquisados e utilizados. A melhoria no processo de fabricação desses tipos de trocadores, fruto também da intensa pesquisa que vem sendo realizada na área desde a primeira proposta de tais equipamentos, têm introduzido aos poucos a tecnologia em aplicações de condicionamento residencial de ar, bem como em sistemas de resfriamento para automóveis.

Na literatura recente concernente ao tema, são encontrados os mais variados tipos de trabalhos, especialmente simulações numéricas utilizando diferentes soluções computacionais (sobretudo o ANSYS Fluent) e estudos experimentais, como será visto adiante. Dada a quantidade de conhecimento disperso fruto de pesquisas congêneres, muitos desses trabalhos, levantados por grau de relevância nos últimos cinco anos, se detém à revisão da literatura, a fim de racionalizar a grande gama de conhecimento e facilitar a realização de pesquisas subsequentes.

Como exemplos de trabalhos de revisão pode-se citar Dixit e Ghosh (2015), que realizaram uma revisão de dissipadores de calor e trocadores de calor de micro e minicanais para fluidos de apenas uma fase, sumarizando métodos de fabricação atualmente utilizados, apresentando uma visão geral dos estudos termo-hidráulicos de fase única para dissipadores de calor com micro e minicanais, bem como trazendo a discussão a respeito da literatura no que tange as diversas possibilidades de configuração do escoamento em trocadores do tipo em questão e levantando lacunas que persistem no entendimento dessa tecnologia. Destaca-se também o trabalho de Kim e Mudawar (2017), responsável pelo *design* térmico de um dissipador de calor bifásico com microcanais, voltando a atenção para os seus limites operacionais, utilizando base de dados de variadas fontes, que englobam diferentes fluidos, velocidades mássicas, diâmetros hidráulicos, pressão de entrada etc. Outro trabalho digno de nota é o de Naqiuddin et al. (2018), em que foi desenvolvida pesquisa sobre o impacto do uso de diferentes geometrias de

microcanais (retos, triangulares, ondulados, de pinos etc.) para aplicações de alto fluxo de calor através de revisão da literatura com simulações numéricas e trabalhos experimentais para as várias possibilidades de geometrias de microcanais, variando também os fluidos (água, etilenoglicol, nanofluidos etc.).

Dentre os vários trabalhos recentes que se detém aos estudos numéricos sobre trocadores e dissipadores de calor com microcanais são passíveis de exposição, dentre muitos outros, o trabalho de Gong, Zhao e Huang (2015), em que foi realizado um estudo numérico sobre o leiaute de trocadores de microcanal para gerenciamento térmico de dispositivos eletrônicos através da modelagem de quatro tipos diferentes de configurações de microcanais, sendo investigado em cada uma dessas configurações o fluxo e transferência de calor através de métodos numéricos. Também pode ser citado Ram (2016), que realizou estudo sobre a melhoria da performance de um sistema móvel de condicionamento de ar utilizando um trocador de canal com microcanais de geometria variável com a intenção de melhorar a performance do condensador sem aumentar o seu tamanho, dada a necessidade de manter tais trocadores compactos, variando assim outros parâmetros, como a geometria dos microcanais. Outro estudo relevante é o de Harun-Or-Rashid e Jeong (2018), em que propuseram a substituição de um condensador convencional de refrigeradores residenciais, com serpentinas externas, por um condensador de microcanais, realizando então modelagem numérica de duas possibilidades de trocadores de microcanais, sendo verificada uma melhoria significativa na substituição, sobretudo em termos de volume ocupado pelo condensador.

Em muitos estudos é realizada uma combinação entre simulação numérico-computacional e estudo experimental para validação de resultados, como nos trabalhos de Borquist, Thapa e Weiss (2016), em que foi feito um estudo experimental e simulação de microcanal com o método computacional de Lattice-Boltzmann, ferramenta versátil como uma alternativa computacional eficiente para simulação de sistemas multi-fásicos, que costumam ser muito difíceis de simular, para um trocador de calor de cobre. Também vale trazer o trabalho de Deng et al. (2017), que trouxe a publicação do projeto, da simulação utilizando o ANSYS Fluent e dos testes em um novo trocador de calor com microcanais com dois dissipadores de calor para resfriamento de gás natural em aplicações automotivas, utilizando método de extrapolação para a queda de pressão, de modo a poupar

processamento computacional e, tal qual realizado nas simulações do presente trabalho, a simetria do modelo foi utilizada para o mesmo fim. Ademais, cita-se aqui também o trabalho de Kim, Shin, Sohn e Yoon (2019), em que foi analisada a distribuição de fluxo não-uniforme em microcanais paralelos, demonstrando tanto em teoria como experimentalmente – utilizando água como fluido de trabalho – uma má distribuição do fluxo pelos canais, gerando uma diferença de transferência de calor entre os canais, o que causa uma redução da eficiência do sistema.

Sendo assim, conforme percebe-se que o estudo de trocadores e dissipadores de calor com microcanais, em seus mais variados ângulos, é objeto de intensa pesquisa nos dias de hoje, dada a necessidade que se tem de tornar mais eficiente o processo de transferência de calor em áreas que passam a demandar uma maior compactação dos sistemas de resfriamento.

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Nesta seção que segue, serão apresentados conceitos importantes sobre trocadores de calor e dinâmica computacional dos fluidos.

3.1 TROCADORES DE CALOR

De acordo com Bejan e Klaus (2003), um trocador de calor pode ser definido como qualquer equipamento que transfere calor de um fluido para outro ou de um fluido para o ambiente. No mesmo sentido, Incropera et al (2007) salientam que trocadores de calor são equipamentos responsáveis por implementar uma troca de calor entre dois fluidos a temperaturas diferentes, separados por uma parede sólida.

Em contraponto, Shah e Sekulić (2003) observam que há alguns poucos trocadores cuja transferência de calor se dá por meio de fluidos em contato direto e define que um trocador de calor é um equipamento usado para transferência de energia térmica (entalpia) entre dois ou mais fluidos ou entre particulados sólidos e um fluido, a temperaturas diferentes e em contato térmico.

Ainda que as definições trazidas sejam abrangentes, elas não abarcam equipamentos como caldeiras, fornos, colunas de separação ou torres de resfriamento porque – ainda que estes também realizem troca de calor entre fluidos – possuem queima de combustível ou troca simultânea de calor e massa (SABINO, 2008 apud GEAQUINTO, 2007).

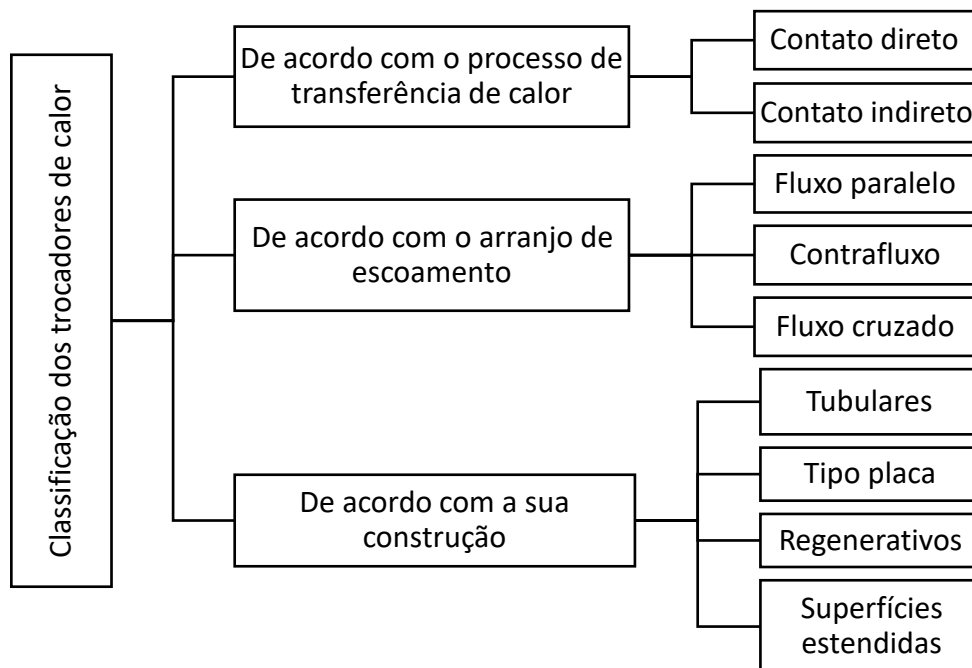
Assim, Sabino (2008) sintetiza, de maneira mais restritiva, que trocadores de calor são equipamentos não sujeitos a chamas, nos quais dois ou mais fluidos realizam troca de calor, sem que ocorra contato direto entre eles, em condições normais de operação.

Trocadores de calor podem ser encontrados nos mais diversos sistemas de troca de energia, incluindo o corpo humano, automóveis, computadores, usinas de energia etc. Incropera et al (2007) observam que os trocadores de calor ocorrem em muitas aplicações da engenharia, sendo eles utilizados tanto para aquecer como para resfriar ambientes, além de na produção de potência, recuperação de calor em processos e processamento químico. Kakaç (2012), por sua vez, acrescenta que eles podem ser encontrados em indústrias de alimentos e de equipamentos eletrônicos, engenharia ambiental, aplicações espaciais etc.

3.1.1 Classificação de trocadores de calor

Os trocadores de calor podem ser classificados de acordo com diferentes parâmetros. A Figura 1 mostra apenas algumas possibilidades, mas eles podem ser classificados de acordo com o tipo de construção, processo de transferência de calor, compactação da superfície, arranjo do escoamento, arranjo das pás, fases dos fluidos ou mecanismos de transferência de calor, entre outros.

Figura 1 – Classificações de trocadores de calor segundo alguns critérios



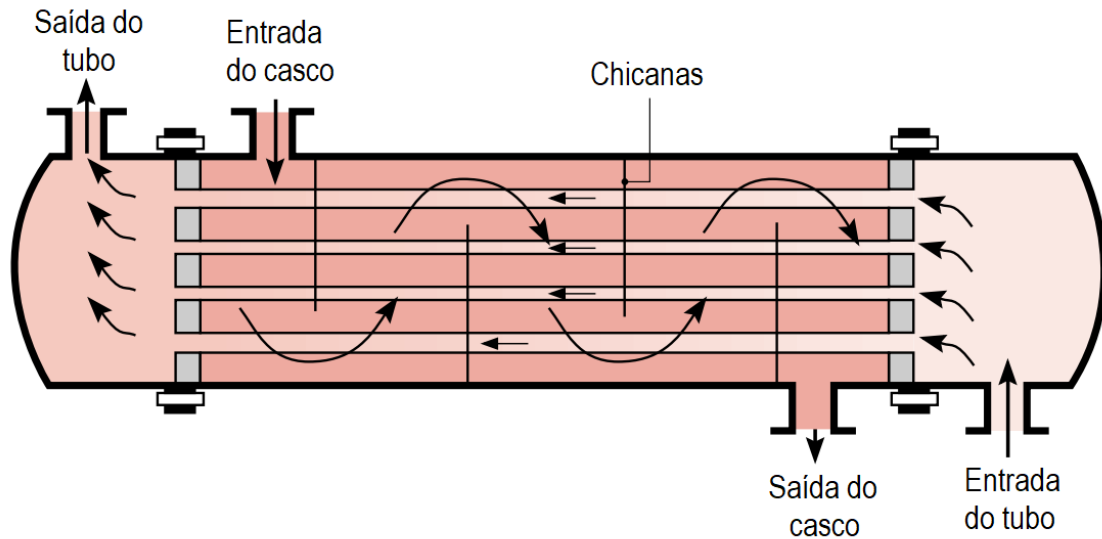
Fonte: Adaptado de López (2017).

Quando classificados de acordo com o processo de transferência de calor, Shah (2003) classifica os trocadores de calor de acordo com o contato direto ou indireto.

Em um trocador de contato indireto, o fluxo dos fluidos envolvidos permanece separado, sendo o calor transferido de maneira contínua por meio de uma parede impermeável. O tipo de transferência é dito indireto porque não há contato entre os fluidos que interagem termicamente. O exemplo mais comum desse tipo de trocador é o chamado trocador de calor recuperativo ou simplesmente recuperador. Em recuperadores, dois ou mais fluidos escoam sem se misturarem, uma vez que estão separados. Eles representam a grande maioria dos trocadores de calor, embora nem sempre se use esse termo para nomeá-los. Trocadores de casco e tubo – como o

mostrado na Figura 2 – e trocadores bitubulares, por exemplo, são trocadores de calor de contato indireto.

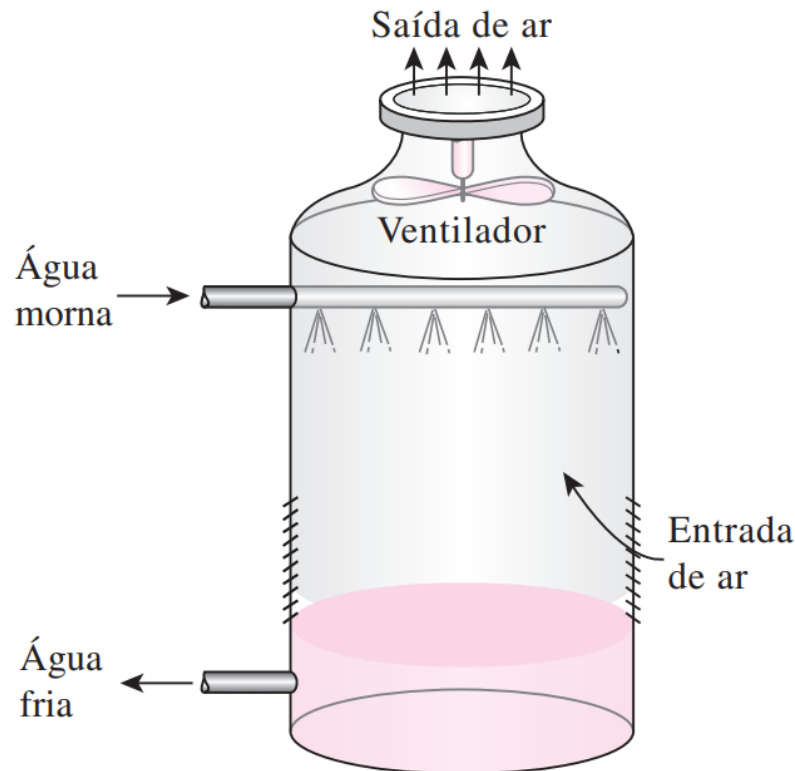
Figura 2 – Trocador de calor de casco e tubos



Fonte: Adaptado de Incropera *et al.* (2007).

Nos trocadores de contato direto, por sua vez, as correntes de fluidos entram, como sugere a nomenclatura, em contato direto, trocam calor e então são novamente separadas. Neles são possíveis altas taxas de transferência de calor. Sua construção é barata e há menos perda de energia, já que não há barreira entre os fluidos. No entanto, sua aplicação é limitada aos casos em que o contato entre os fluidos é possível. O exemplo mais comum desse tipo de trocador cujo contato dos fluidos é direto são as torres de resfriamento, comumente utilizadas no processo de resfriamento de água em indústrias para que ela possa ser descartada em rios ou ser reutilizada no processo. A Figura 3, por exemplo, ilustra um esquema de uma torre de resfriamento com corrente de ar induzido.

Figura 3 – Esquema de uma torre de resfriamento

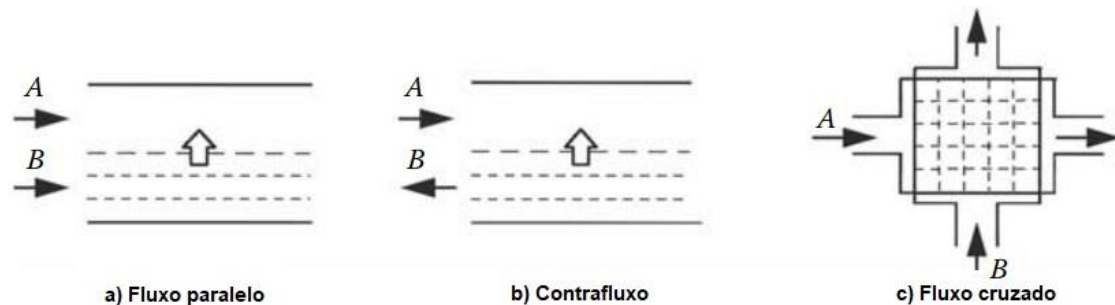


Fonte: Çengel; Boles (2013).

No que tange a classificação dos trocadores de calor em função da configuração de escoamento, Incropera et al (2007) observam que, quanto a sua configuração de escoamento, e conforme ilustrado na Figura 4, o trocador pode ser de:

- a) *Configuração paralela* ou *fluxo paralelo*: os fluidos do trocador de calor entram pela mesma extremidade, escoam no mesmo sentido e também deixam o trocador pela mesma extremidade;
- b) *Configuração contracorrente* ou *contrafluxo*: os fluidos do trocador de calor entram por extremidades opostas, escoam em sentidos opostos e deixam o equipamento por extremidades opostas;
- c) *Configuração de escoamento cruzado* ou *fluxo cruzado*: quando um fluido escoar perpendicularmente ao outro.

Figura 4 – Configuração de escoamento de trocadores de calor



Fonte: Adaptado de Kakaç, 2012.

Quando classificados de acordo com a construção, os trocadores de calor podem ser do tipo placa, regenerativos, de superfícies estendidas ou tubulares.

Os trocadores de calor do tipo placa são geralmente construídos, como a classificação indica, de placas finas. Geralmente não podem acomodar pressões, temperaturas ou diferenças de temperatura muito altas. Dada a sua constituição, podem ser facilmente separados em partes para manutenção, inspeção e limpeza. A área superficial de transferência de calor pode ser modificada ou rearranjada para uma tarefa diferente por causa da flexibilidade do tamanho das placas e arranjo de passes.

Por sua vez, trocadores de calor regenerativos são um tipo trocadores de armazenamento, em que ambos os fluidos percorrem alternativamente as mesmas passagens de troca de calor e cuja superfície de troca de calor costuma ser uma estrutura chama matriz. Para aquecimento, o fluido quente atravessa a superfície de transferência de calor e a energia térmica é armazenada na matriz. Posteriormente, quando o fluido frio passa pelas mesmas passagens, a matriz libera a energia térmica. Naturalmente, no processo de refrigeração, acontece o processo inverso. Trocadores do tipo regenerador são vantajosos por terem superfície compacta, baixo custo de fabricação, versatilidade de materiais, a depender da aplicação, alta efetividade, entre outras características.

Uma maneira comum de aumentar a área de superfície e compacidade de um trocador é adicionando superfícies estendidas (*fins*, em inglês), que podem aumentar a área superficial de cinco a doze vezes, dependendo do *design*. Daí surgem os trocadores com superfícies estendidas, que podem ser de placas ou tubos.

Por fim, os trocadores tubulares são geralmente construídos a partir de tubos circulares, ainda que algumas aplicações também usem tubos elípticos, retangulares ou redondos/achatados. Esse tipo de trocador tem grande flexibilidade de *design*, uma vez que é possível modificar vários parâmetros de projeto, como o diâmetro ou o comprimento do tubo, bem como o arranjo entre tubos. Eles podem ser projetados para pressões altas em relação ao ambiente externo e entre os fluidos e são usados primordialmente para com os dois ou mais fluidos em estado líquido ou em configuração líquido-fase (condensação ou evaporação). Dentre as subclassificações, podem ser citadas, além de outras, os trocadores de casco e tubos, os de tubos concêntricos e trocadores de tubos em espiral.]

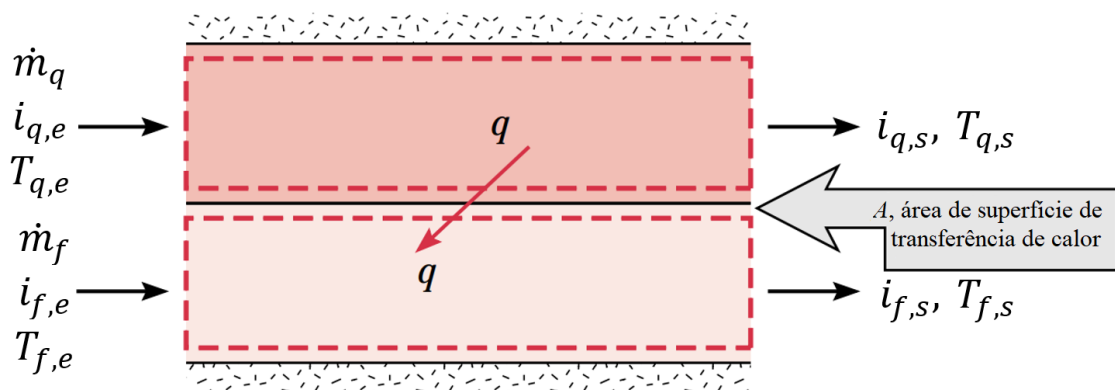
3.1.2 Análise de trocadores de calor

Incropera *et al.* (2007) listam dois métodos mais comuns para a análise numérica de trocadores de calor: o método da média log das diferenças de temperatura e o método da efetividade-NUT.

3.1.2.1 Média log das diferenças de temperatura

A Figura 5 ilustra o balanço geral de transferência de energia entre um fluido quente e um fluido frio em um trocador de calor bitubular simples.

Figura 5 – Balanço geral de energia em um trocador de calor bitubular



Fonte: Adaptado de Incropera *et al.* (2007).

O fluido quente escoa à vazão mássica \dot{m}_q , cujas entalpias de entrada e saída são $i_{q,e}$ e $i_{q,s}$ e que entra no trocador com a temperatura inicial $T_{q,e}$ e sai do

trocador com a temperatura final $T_{q,s}$. Enquanto isso, o fluido frio escoar à vazão mássica \dot{m}_f , cujas entalpias de entrada e saída são $i_{f,e}$ e $i_{f,s}$ e que entra no trocador com a temperatura inicial $T_{f,e}$ e sai do trocador com a temperatura final $T_{f,s}$. Feitas essas considerações, é possível escrever as seguintes equações para os balanços de energia globais para os fluidos quente e frio:

$$q = \dot{m}_q(i_{q,e} - i_{q,s}) \text{ e } q = \dot{m}_f(i_{f,s} - i_{f,e}).$$

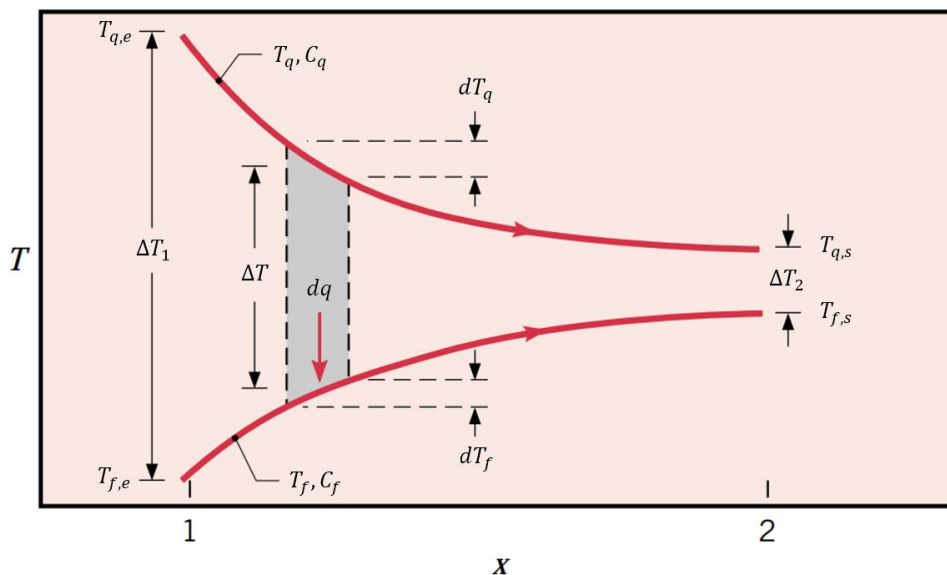
Admitindo que os fluidos não mudam de fase e calores específicos constantes, é possível simplificar as expressões acima:

$$q = \dot{m}_q c_{p,q}(T_{q,e} - T_{q,s}) \text{ e } q = \dot{m}_f c_{p,f}(T_{f,s} - T_{f,e}).$$

Além disso, é possível utilizar a expressão $q = UA\Delta T_m$, onde U é o coeficiente global de transferência de calor, A é a área e ΔT_m é a média apropriada das diferenças de temperatura, que é calculada de acordo com a configuração do trocador de calor.

Nos trocadores de calor de configuração paralela, conforme mostra a Figura 6, a diferença de temperatura dos fluidos frio e quente diminuem com o tempo.

Figura 6 – Distribuição de temperatura para trocador com fluxo paralelo



Fonte: Adaptado de Incropera *et al.* (2007).

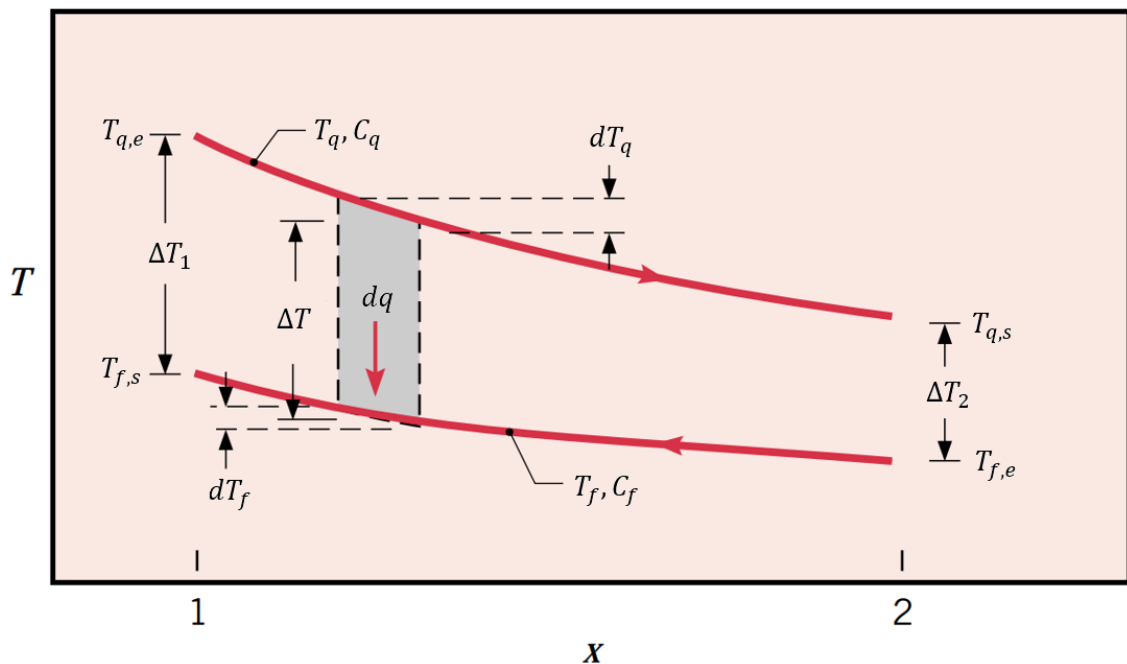
A temperatura de saída do fluido frio, no entanto, não pode ser superior a do fluido quente. Para essa configuração, a média das diferenças de temperatura ΔT_m é calculada como segue:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)}$$

onde $\Delta T_1 = T_{q,e} - T_{f,e}$ e $\Delta T_2 = T_{q,s} - T_{f,s}$.

Já nos trocadores de calor com configuração de escoamento contracorrente, como mostra a Figura 7, é proporcionada uma transferência de calor entre parcelas mais quentes dos dois fluidos em uma extremidade, bem como entre parcelas mais frias na outra.

Figura 7 – Distribuição de temperatura em trocador em contrafluxo



Fonte: Adaptado de Incropera *et al.* (2007).

Isso faz com que a temperatura de saída do fluido frio possa ser maior que a temperatura de saída do fluido quente. Para essa configuração, a média das diferenças de temperatura ΔT_m é calculada como segue:

$$\Delta T_m = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)}$$

onde $\Delta T_1 = T_{q,e} - T_{f,s}$ e $\Delta T_2 = T_{q,s} - T_{f,e}$.

3.1.2.2 Método da efetividade-NUT

Pode-se aplicar o método das diferenças de temperaturas quando as temperaturas dos fluidos são conhecidas ou podem ser determinadas com facilidade a partir do balanço de energia. Se isso não ocorre, contudo, sua aplicação exige um processo iterativo demasiadamente dispendioso. Nessas situações, é preferível utilizar o método da efetividade-NUT, ou método ε -NUT.

Considerando que a efetividade ε de um trocador de calor pode ser definida como a razão entre a transferência real de calor e a máxima transferência de calor, expressa pela expressão $q_{m\acute{a}x} = C_{m\acute{i}n}(T_{q,e} - T_{f,e})$, onde $C_{m\acute{i}n}$ é a menor capacidade térmica da configuração, que pode ser do fluido quente ou do fluido frio, é possível escrever as seguintes expressões:

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{m\acute{a}x}} = \frac{C_q(T_{q,i} - T_{q,s})}{C_{m\acute{i}n}(T_{q,e} - T_{f,e})} = \frac{C_f(T_{f,s} - T_{f,e})}{C_{m\acute{i}n}(T_{q,e} - T_{f,e})}$$

A análise de trocadores de calor pelo método ε -NUT pode ser muito útil, portanto, se forem conhecidas a efetividade do trocador e as temperaturas de entrada dos fluidos quente e frio, uma vez que é possível calcular a transferência de calor pela expressão que segue:

$$q = \varepsilon C_{m\acute{i}n}(T_{q,e} - T_{f,e})$$

Além disso, para qualquer trocador de calor, pode-se dizer que a efetividade é uma função da razão $C_{m\acute{i}n}/C_{m\acute{a}x}$ e do número de unidades de transferência (NUT), definido como segue:

$$NUT = \frac{UA}{C_{m\acute{i}n}}$$

3.2 DINÂMICA COMPUTACIONAL DOS FLUIDOS

A dinâmica computacional dos fluidos (sigla CFD para a expressão em inglês, *Computational Fluid Dynamics*) ou fluidodinâmica computacional pode ser definida, segundo Versteeg e Malalasekera (2007), como a análise de sistemas envolvendo fluxo de fluidos, transferência de calor, bem como fenômenos associados como reações químicas, fazendo uso de simulação computacional.

A fluidodinâmica computacional consiste, basicamente, em resolver as equações diferenciais parciais de Navier-Stokes que governam a dinâmica dos fluidos. Elas não possuem solução analítica geral, mas através do poder de cálculo dos computadores, podem ser discretizadas e resolvidas numericamente.

A origem da utilização da dinâmica computacional dos fluidos remonta a década de 1950, como Chung (2010) bem observa, com o advento do computador digital. Os estudos sobre seus principais métodos são anteriores: o método das diferenças finitas e o método dos elementos finitos têm seus primeiros artigos publicados nas décadas de 1910 e 1920. No entanto, a bem da verdade, é importante observar que até o surgimento de maior poder de processamento computacional a baixo custo, a ferramenta foi usada por muito tempo quase que exclusivamente para pesquisa.

A evolução dos processadores computacionais com o passar dos anos, bem como a pesquisa e desenvolvimento das áreas aeroespacial e aeronáutica, sobretudo a partir das décadas de 1960 e 1970, como explica López (2017), deu fôlego ao desenvolvimento pleno das técnicas computacionais para solução de problemas de dinâmica dos fluidos. Hoje, é uma técnica bem consolidada não só na academia, mas também na indústria, oferecendo soluções mais baratas e em período de tempo mais aceitável.

Hoje em dia estão disponíveis mais de 200 pacotes de *softwares* correlacionados com a dinâmica computacional dos fluidos (CFD Online, 2019). Resolved Analytics (2018) observa que existem disponíveis pacotes de código aberto, como o OpenFOAM, mantido pela OpenFOAM Foundation; pacotes de código aberto mais voltados para a experiência do usuário, como Visual-CFD, HELYX, simFlow e SimScale; pacotes que possuem CAD integrado, como o SolidWorks; e pacotes que são especializados em subáreas da fluidodinâmica computacional, como o CONVERGE, voltado para o mercado automotivo e de combustão interna, o FloTHERM, voltado para a indústria de eletrônicos, o ANSYS CFX, voltado para especialmente para modelos com turbomáquinas, dentre muitos outros.

O que os pacotes CFD possuem costumeiramente em comum, como Versteeg e Malalasekera (2007) bem observam, é a existência de três elementos: o pré-processador, o *solver* e o pós-processador, mais bem especificados a seguir.

- Pré-processador

O pré-processamento em uma simulação de dinâmica dos fluidos consiste, basicamente, em fornecer os *inputs* que serão utilizados pelo *solver* do *software* para calcular a solução discretizada do problema. O pré-processador recebe uma malha de uma etapa anterior, responsável por discretizar uma geometria contínua em pequenos elementos de malha. Em alguns casos, é no pré-processador que essa malha é gerada.

É nessa fase de pré-processamento em que se define as propriedades dos materiais envolvidos na simulação, bem como a física do escoamento, os domínios, as condições de contorno, os valores iniciais das grandezas em estudo etc.

- Solver

O *solver*, ou solucionador, é o elemento de um *software* CFD onde a solução numérica da simulação de fato acontece. Basicamente, o algoritmo numérico das soluções CFD consistem em: i) integração das equações governantes do fluido ao longo dos volumes de controle do domínio; ii) conversão das equações integrais em um sistema de equações algébricas; iii) solução dessas equações algébricas por um método iterativo (VERSTEEG, MALALASEKERA, 2007).

- Pós-processador

O pós-processador é o elemento do pacote CDF que costuma empregar técnicas de visualização de dados para facilitar não só a análise, mas também a apresentação dos resultados gerados no *solver*. Pós-processadores podem conter ferramentas para geração de relatórios e gráficos, *plots* de vetores e contornos, bem como visualização de superfícies em 2D e 3D. Comumente permitem manipulação do ângulo de visão da geometria e seus contornos através de rotação, translação, corte, escalas etc. Nos pacotes mais modernos, inclusive, como o Ansys CFX – que será introduzido a seguir – é possível também geração de animações.

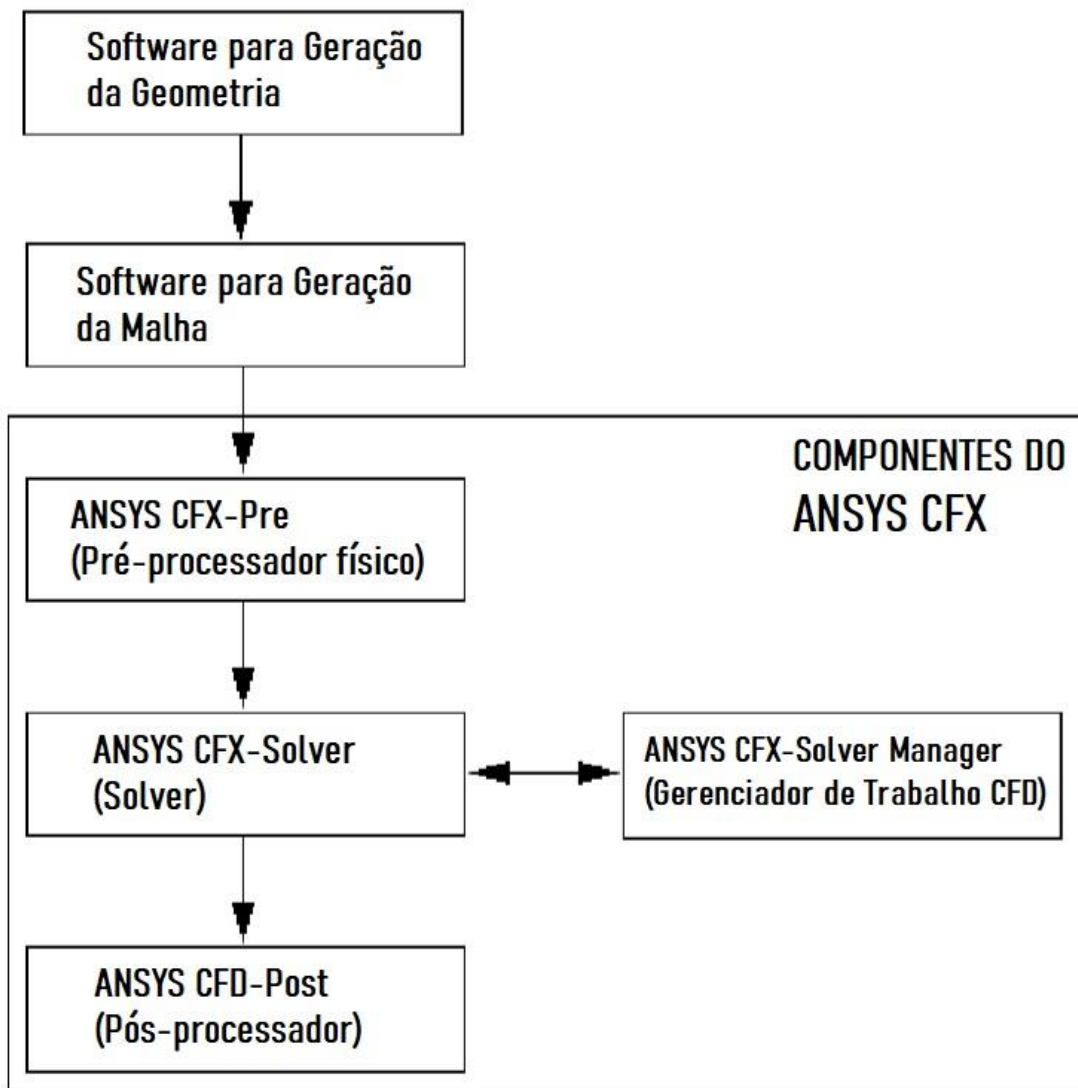
3.2.1 ANSYS CFX

O ANSYS CFX é um poderoso *software* CFD de objetivo geral, gerado da combinação de um *solver* avançado com poderosa capacidade de pré e pós-processamento. É capaz de modelar escoamentos em regime permanente ou

transiente, laminar ou turbulento, subsônico ou supersônico, bem como transferência de calor, radiação térmica, fluxos não-newtonianos e multifásicos, combustão e outros fenômenos (ANSYS, 2013).

Como mostra a Figura 8, consiste em quatro módulos: um pré-processador físico (ANSYS CFX-Pre), um solver e um gerenciador CFD (ANSYS CFX-Solver e ANSYS CFX-Solver Manager, respectivamente) e um pós-processador (ANSYS CFD-Post). Todos os módulos serão utilizados nas seções seguintes de Metodologia e Análise de Resultados.

Figura 8 – Componentes do ANSYS CFX

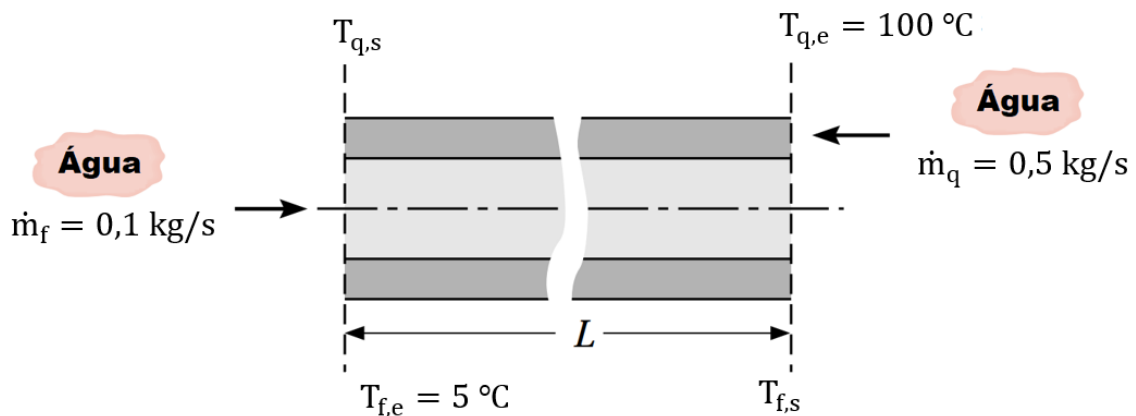


Fonte: Adaptado de Ansys (2013).

4 METODOLOGIA

No presente trabalho, será realizada uma análise comparativa no processo de transferência de calor em trocadores de calor bitubulares com e sem microcanais retangulares incrustados na superfície interna do tubo interno. A Figura 9 mostra o esquema geral, válido para todas as configurações do trabalho: o trocador genérico possui dois tubos de cobre com o escoamento em contracorrente de fluidos quente (água entrando a 100 °C) e frio (entrando a 5 °C), com vazão mássica de 0,5 e 0,1 kg/s, respectivamente, para os fluidos quente e frio.

Figura 9 – Esquema geral do trocador bitubular genérico

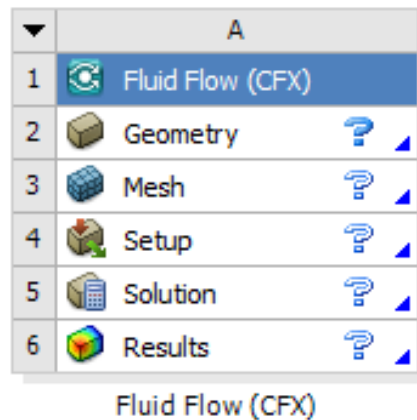


Fonte: Adaptado de Incropera *et al.* (2007).

Serão simulados trocadores de calor bitubulares com microcanais. Será realizado um estudo paramétrico por meio da variação da largura dos microcanais, bem como da variação do refinamento da malha em torno da área de transferência de calor. Os resultados obtidos serão comparados com os dados de simulação de um trocador de calor bitubular simples. Para tal, foi utilizado o *software* ANSYS Workbench, versão 18.2. Mais especificamente, o pacote ANSYS voltado para simulação computacional de fluidos (CFD da sigla em inglês), o ANSYS CFX.

A utilização do modelo CFD do ANSYS pressupõe que haja uma geometria criada, uma malha gerada para a geometria e a definição dos domínios e condições de contorno no *setup* para que o *solver* possa calcular a solução da simulação (Figura 10). Por fim, o resultado pode ser visualizado através de gráficos, contornos e outras ferramentas analíticas.

Figura 10 – Etapas de um projeto CFD.



Fonte: O Autor (2020).

Nas subseções seguintes será mostrado o passo a passo da criação dos dois modelos que serviram de base para todas as simulações calculadas.

4.1 GEOMETRIA

Para criação da geometria do projeto, isto é, do trocador de calor bitubular simples e dos trocadores bitubulares com microcanais, foi utilizado o *software* ANSYS DesingModeler do Pacote ANSYS, conforme especificações a seguir.

4.1.1 Especificações geométricas de projeto

A fim de realizar uma análise comparativa através de simulação computacional do desempenho de trocadores bitubulares com e sem microcanais, foram utilizadas as seguintes especificações, comuns aos dois modelos:

- a) Comprimento dos tubos (L): 5m;
- b) Diâmetro do tubo interno (d_i): 26mm;
- c) Espessura do tubo interno (t): 1mm;
- d) Diâmetro do tubo externo (d_e): 45mm.

Para o modelo com microcanais, além das especificações acima, foram usados os seguintes parâmetros para a geometria dos microcanais:

- a) Angulação entre microcanais: 11,25°;
- b) Largura dos microcanais: 0,8mm;

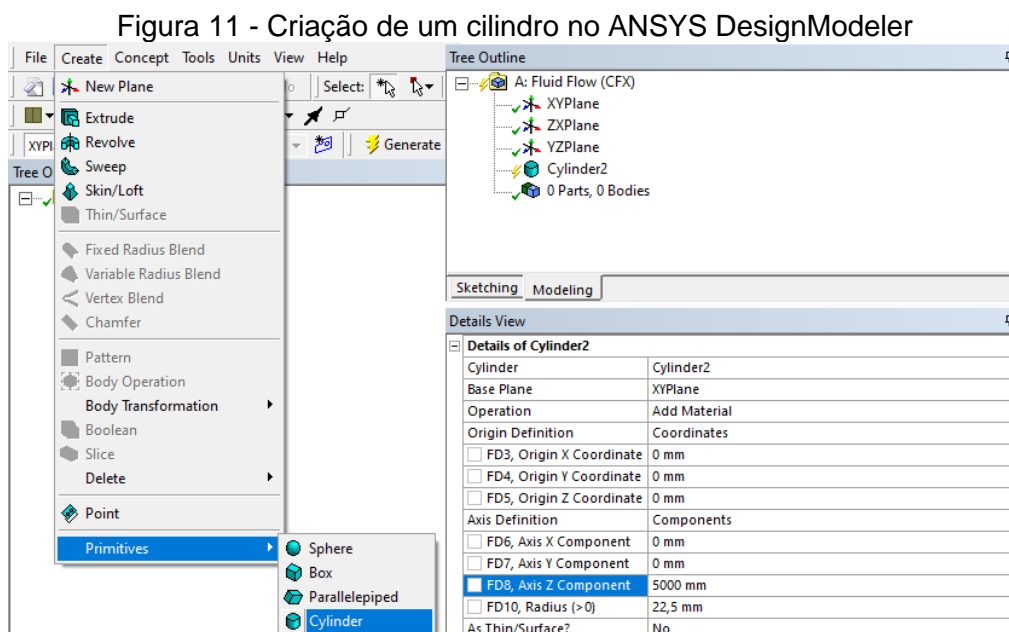
c) Profundidade dos microcanais: 0,65mm.

Vale salientar que durante os processos de simulação, foram realizadas iterações variando também largura entre microcanais, bem como o refinamento da malha, conforme será mostrado adiante.

4.1.2 Trocador bitubular simples

Para construção da geometria do trocador bitubular simples, é necessário criar um cilindro inicial como forma primitiva com 5m de comprimento e 22,5mm de raio, conforme indicado na Figura 11.

Após isso, é preciso realizar duas extrusões para que sejam gerados os três domínios necessários na simulação: o fluido quente, a parede do tubo interno e o fluido frio. Para realizar essas extrusões ao longo de todo o cilindro, é necessário criar um esboço bidimensional e, em seguida, aplicar a ferramenta *Extrude*. Como bem mostra a Figura 12, foram esboçados círculos de 26 e 24mm que foram extrudados separadamente para geração de domínios diferentes.



Fonte: O Autor (2020).

Figura 12 – Detalhes dos esboços e extrusões

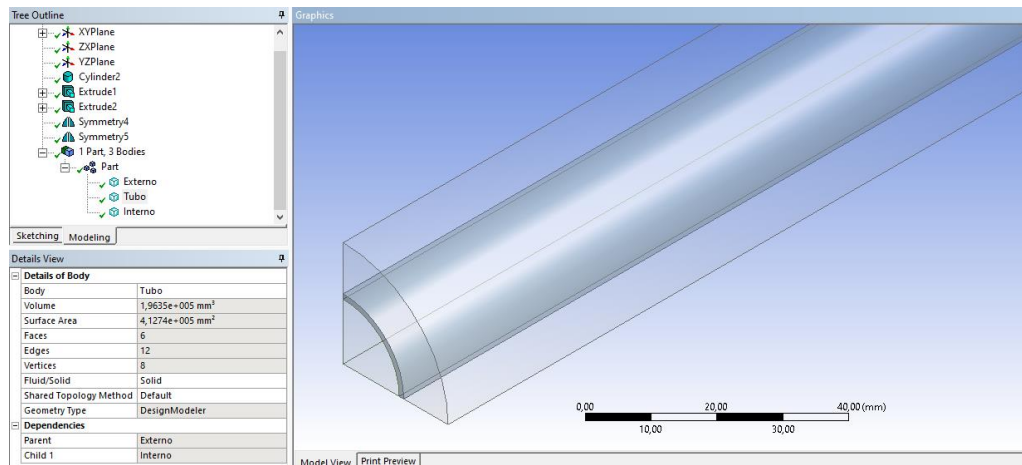
Details View		Details View	
[-] Details of Sketch1		[-] Details of Sketch2	
Sketch	Sketch1	Sketch	Sketch2
Sketch Visibility	Show Sketch	Sketch Visibility	Show Sketch
Show Constraints?	No	Show Constraints?	No
[-] Dimensions: 1		[-] Dimensions: 1	
<input type="checkbox"/> D1	26 mm	<input type="checkbox"/> D2	24 mm
[-] Edges: 1		[-] Edges: 1	
Full Circle	Cr7	Full Circle	Cr8
[-] References: 1		[-] References: 1	
Cr8	Sketch2	Cr7	Sketch1
Details View		Details View	
[-] Details of Extrude1		[-] Details of Extrude2	
Extrude	Extrude1	Extrude	Extrude2
Geometry	Sketch1	Geometry	Sketch2
Operation	Slice Material	Operation	Slice Material
Direction Vector	None (Normal)	Direction Vector	None (Normal)
Direction	Normal	Direction	Normal
Extent Type	Fixed	Extent Type	Through All
<input type="checkbox"/> FD1, Depth (>0)	5000 mm	As Thin/Surface?	No
As Thin/Surface?	No	Target Bodies	All Bodies
Target Bodies	All Bodies	Merge Topology?	Yes
Merge Topology?	Yes	[-] Geometry Selection: 1	
[-] Geometry Selection: 1		Sketch	Sketch2
Sketch	Sketch1		

Fonte: O Autor (2020).

Por fim, para finalização da geometria do trocador bitubular simples, foi aplicada simetria nos planos YZ e XZ para simplificação no momento de geração da malha e diminuição de esforço computacional durante o processamento do *solver*.

O resultado final da criação da geometria do trocador de calor bitubular simples pode ser verificado na Figura 13. Nela, à esquerda, pode-se verificar que há três partes independentes: “Externo”, “Interno”, e “Tubo”, que serão utilizados como domínios independentes na fase de *setup* da simulação.

Figura 13 – Geometria do trocador bitubular simples (sem microcanais)



Fonte: O Autor (2020).

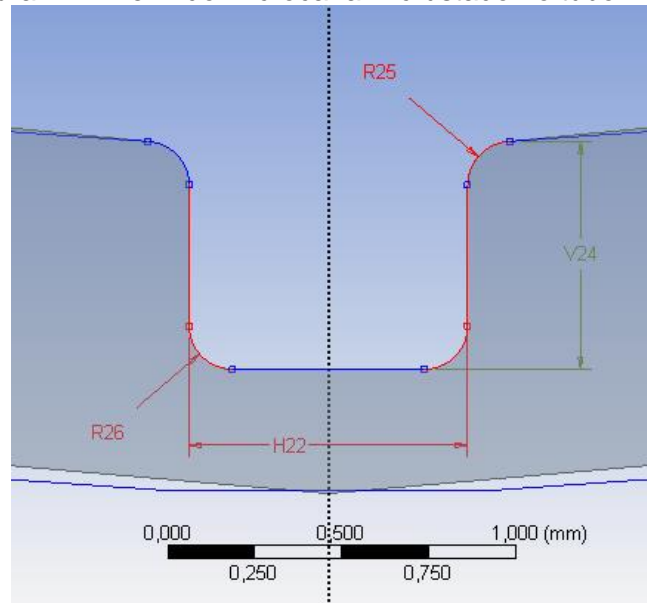
4.1.3 Trocador bitubular com microcanais

A geometria do trocador com microcanais aproveita praticamente todos os passos mostrados para o trocador simples. A mudança ocorre no segundo esboço, que deve conter os microcanais antes de ser aplicada a ferramenta de extrusão.

Figura 14 mostra um microcanal incrustado na geometria do tubo interno. Como já dito anteriormente, foi usada uma profundidade (V24 na Figura 14) de 0,65mm, uma largura (H22) de 0,8mm e arredondamentos (R25 e R26) de 0,125mm.

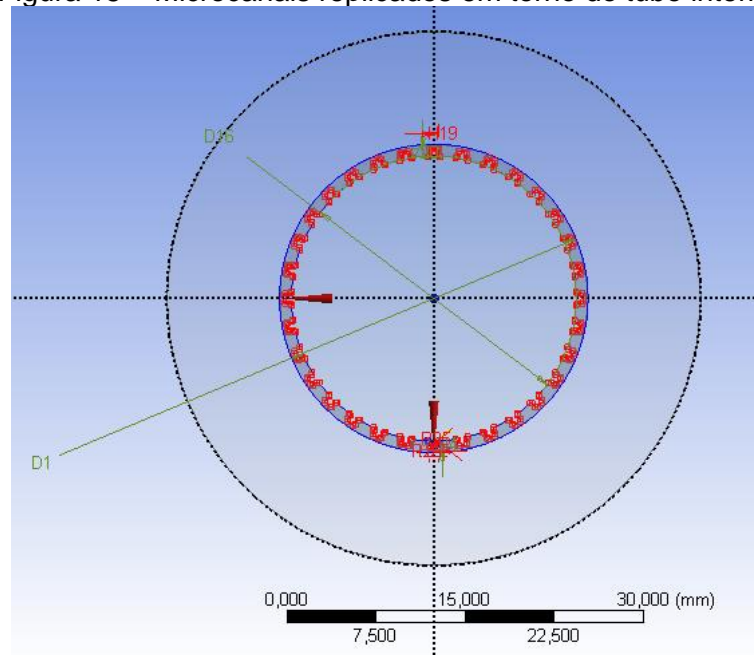
Após a construção do primeiro microcanal, sua estrutura foi replicada em torno de toda face interna do tubo, utilizando a ferramenta de modificação de esboço do DesignModeler *Replicate*. Isso foi feito mantendo a simetria da replicação para que, tal qual no modelo simples de trocador bitubular, a ferramenta de simetria pudesse ser aplicada para diminuir a quantidade de elementos na geração da malha e o esforço computacional do *solver*. Neste primeiro modelo, foram replicados trinta e dois microcanais, separados uns dos outros por um ângulo de 11,25°, conforme Figura 15.

Figura 14 – Perfil do microcanal incrustado no tubo interno



Fonte: O Autor (2020).

Figura 15 – Microcanais replicados em torno do tubo interno

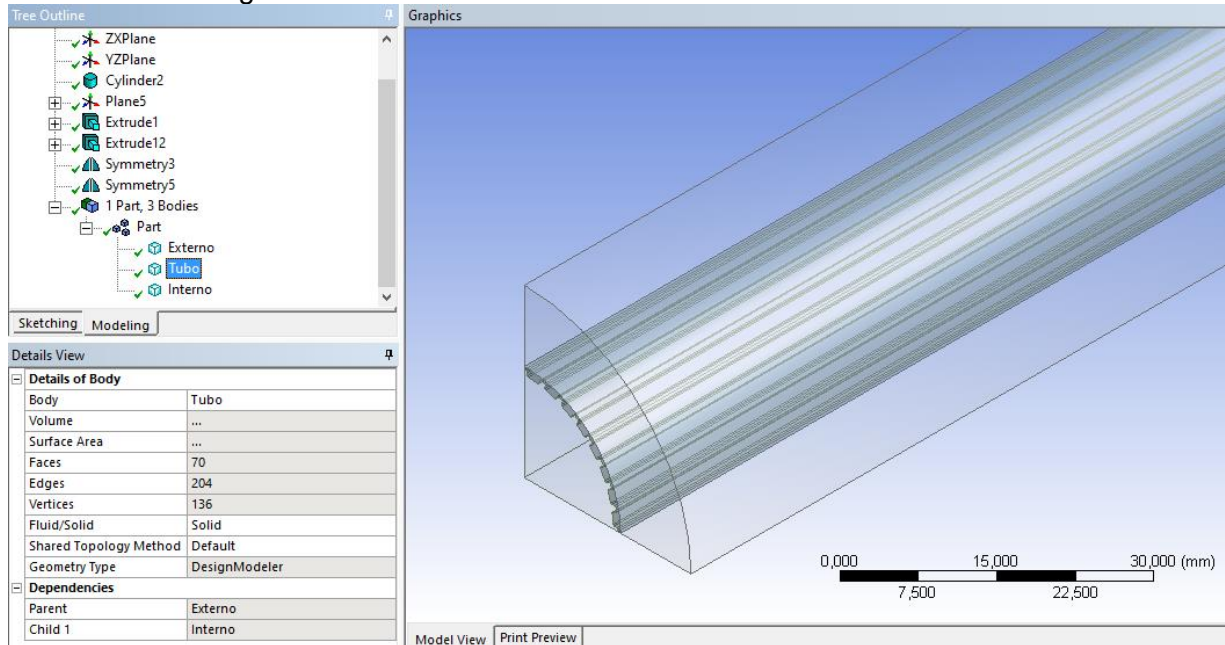


Fonte: O Autor (2020).

Após a devida replicação e ajustes adicionais, como aplicação de arredondamento nas arestas e aparação de arestas desnecessárias, foi aplicada a ferramenta de extrusão. Para finalizar, foi aplicada a ferramenta de simetria nos planos YZ e XZ, resultando em uma geometria como a Figura 16. Tal qual a geometria sem os microcanais, à esquerda, pode-se verificar que há três partes

independentes: “Externo”, “Interno”, e “Tubo”, que serão utilizados como domínios independentes na fase de *setup* da simulação.

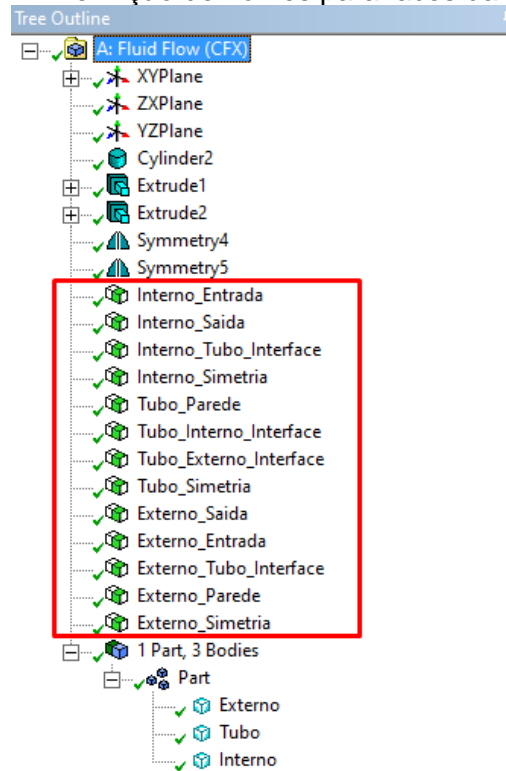
Figura 16 – Geometria do trocador bitubular com microcanais



Fonte: O Autor (2020).

Para facilitar as etapas vindouras, todas as regiões de interesse foram nomeadas, tanto na simulação com o trocador simples como também na simulação com o trocador com microcanais, conforme mostrado na Figura 17. Isso será útil na geração dos domínios e na aplicação das condições de contorno, que será realizada na etapa de *setup*. É importante ter todas as faces da geometria reunidas e nomeadas para evitar que alguma delas fique de fora da aplicação das condições de contorno, a fim de se precaver contra erros tanto no processo de *setup* quanto no *solver*. Isso é ainda mais importante no modelo com os microcanais porque nele está presente um número consideravelmente maior de faces (em decorrência da inclusão dos microcanais) que devem ser reunidas adequadamente.

Figura 17 – Definição de nomes para faces da geometria



Fonte: O Autor (2020).

4.2 MALHA

Assim como o ANSYS DesingModeler foi utilizado para desenvolvimento da geometria, para geração da malha foi usado o *software* agregado ao pacote chamado ANSYS Meshing.

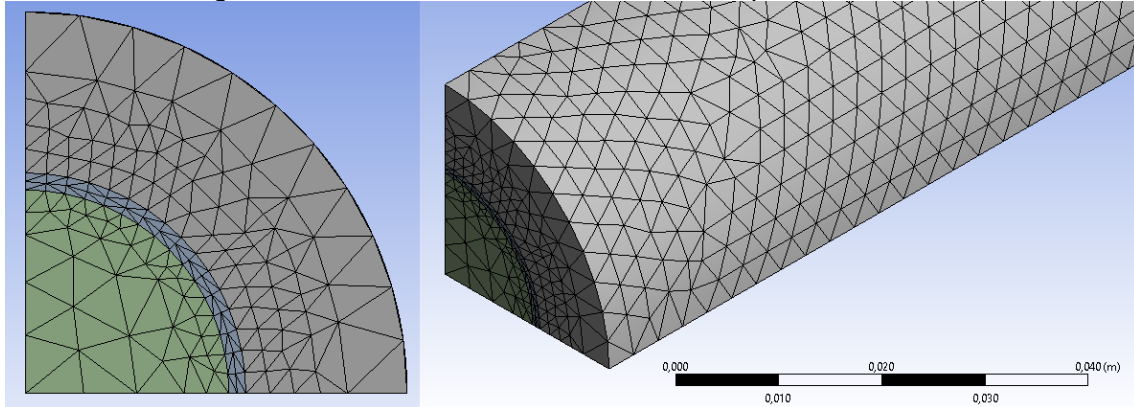
Em todas as simulações, em especial nos cenários em que foi realizado um maior refinamento de malha, optou-se por uma malha mais refinada em torno da região de troca de calor.

4.2.1 Malha do trocador bitubular simples

Durante a execução das simulações preliminares, após definidas as especificações do projeto e a geometria dos trocadores, foi constatado que o comportamento da simulação era melhor quando inserido um maior número de elementos na área de transferência de calor. Por esse motivo, foram utilizadas malhas menos e mais refinadas, a título de comparação, para cada uma das configurações geométricas estudadas.

A malha menos refinada foi gerada aplicando um método para geração de elementos tetraédricos e um refinamento de grau 1 na interface entre o tubo e o fluido quente. O resultado pode ser visto na Figura 18, contando com 3,5 milhões de elementos.

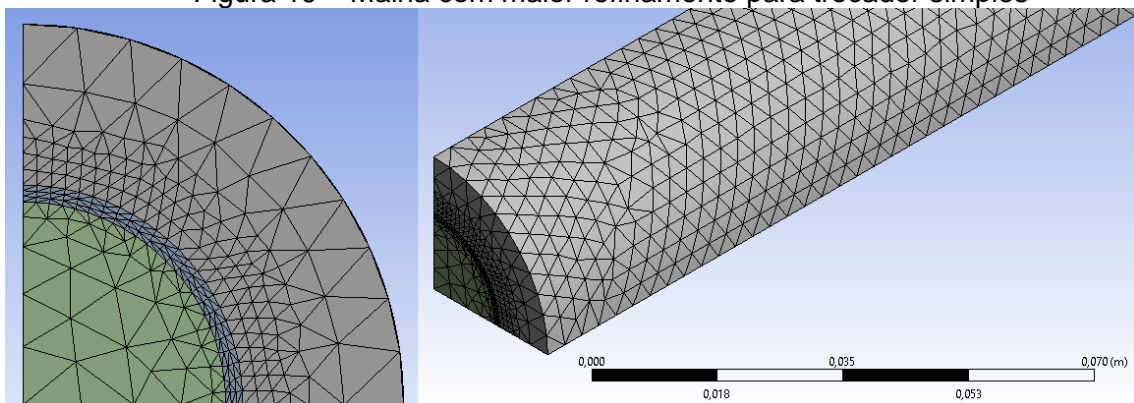
Figura 18 – Malha com menor refinamento para trocador simples



Fonte: O Autor (2020).

A malha mais refinada foi gerada com um refinamento de dois graus na interface entre o tubo e o fluido quente, gerando cerca de 8,4 milhões de elementos tetraédricos, com maior refinamento na área de troca de calor, conforme informado anteriormente e como pode ser visto na Figura 19.

Figura 19 – Malha com maior refinamento para trocador simples



Fonte: O Autor (2020).

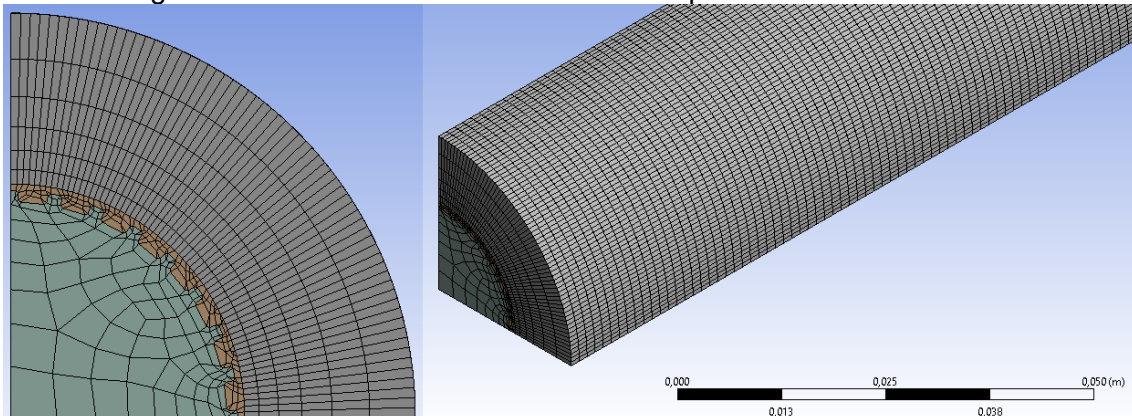
4.2.2 Malha do trocador bitubular com microcanais

Seguindo a mesma lógica utilizada na geração das malhas para o trocador bitubular sem os microcanais, foram gerados também dois tipos de malha, uma com menor refinamento e uma com maior. Dada a maior complexidade do modelo com microcanais, vale salientar que foi muito importante na fase de geração da geometria

definir que cada domínio do modelo fosse um objeto independente, com o propósito de que a malha se comportasse diferente para cada domínio, otimizando o processo.

Para geração das malhas menos refinadas, foi escolhido um centro de relevância bom, mas não foram aplicados métodos ou técnicas de refinamento, tentando utilizar a opção *default* de geração da malha. Ainda assim o programa inseriu mais elementos de malha, como pode ser visto na Figura 20, na região de troca de calor, dada a complexidade da geometria dela. Além disso, diferente das malhas geradas para o trocador bitubular simples, nas quais foram gerados elementos tetraédricos, na geração *default* desta malha não houve padrão único de geometria dos elementos. Ao todo, foram gerados cerca de 2,44 milhões de elementos para este caso de menor refinamento.

Figura 20 – Malha com menor refinamento para trocador com microcanais



Fonte: O Autor (2020).

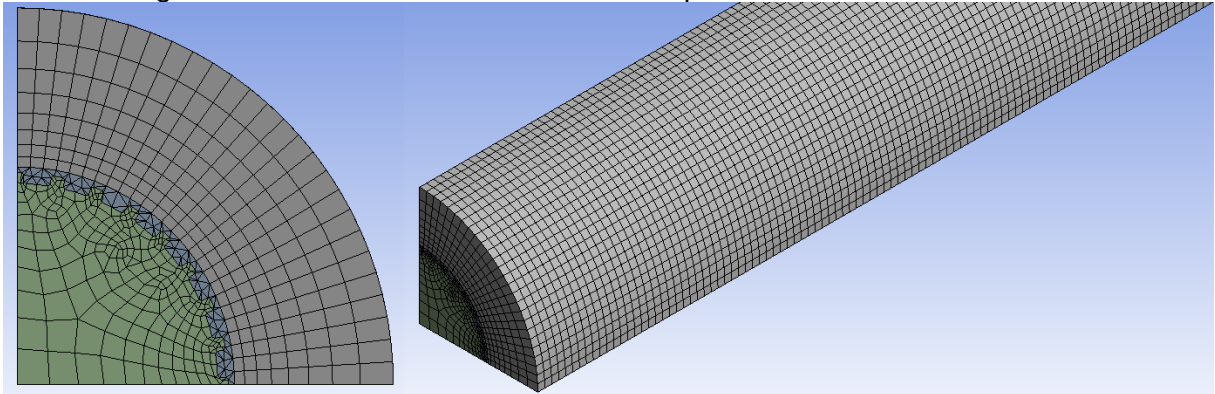
Para geração de malha mais refinada, foram estudadas 3 malhas diferentes com número crescente de elementos. Foram geradas as seguintes malhas:

- a) Malha com 4,1 milhões de elementos com elementos tetraédricos aplicados apenas na área de troca de calor;
- b) Malha com 7,7 milhões de elementos com elementos tetraédricos aplicados apenas na área de troca de calor;
- c) Malha com aplicação de elementos tetraédricos em todas as regiões, gerando mais de 11 milhões de elementos.

Foi verificado que o resultado mais eficiente, em termos de redução de

temperatura quando comparado com os cenários sem a inserção dos microcanais, foi apresentado pela malha com 7,7 milhões de elementos. A malha com 11 milhões de elementos se mostrou excessiva e contraproducente. Sendo assim, foram utilizados os resultados da malha com 7,7 milhões de elementos (ilustrada na Figura 21) na comparação que será realizada na seção de Resultados.

Figura 21 – Malha com maior refinamento para trocador com microcanais



Fonte: O Autor (2020).

Conforme será exposto adiante, o refinamento de malha para o trocador bitubular sem microcanais fez com que o resultado desta simulação ficasse mais próximo daquele que se obtém com a solução analítica do problema. Além disto, como dito anteriormente, foram realizadas variações na largura do microcanais, resultando em um total de dois cenários para os trocadores bitubulares com microcanais. Para todos estes cenários, foram criadas malhas menos e mais refinadas, seguindo o descrito nos últimos parágrafos.

4.3 SETUP

Na definição do *setup* foi utilizado o ANSYS CFX-Pre, *software* agregado ao pacote do ANSYS CFD, utilizado como pré-processador, isto é, para setar as configurações (definição de domínios, subdomínios, condições de contorno, propriedades térmicas dos materiais utilizados etc.) que precedem o cálculo da simulação.

Nessa etapa da modelagem, não há distinção entre as configurações das simulações, uma vez que a geometria e a malha já estão definidas. Para ambos os modelos, são definidos três domínios independentes entre si: o domínio pelo qual passa o fluido interno, chamado de “Interno”; o domínio no qual passa o fluido

externo, chamado de “Externo”; e o domínio de interface entre os fluidos, chamado “Tubo”.

A água foi selecionada como fluido de trabalho, tanto para o lado interno como para o lado externo do tubo, em configuração contracorrente.

Como definição inicial do problema, a temperatura de entrada do fluido quente foi especificada em 100 °C, enquanto que a temperatura de entrada do fluido frio foi definida em 5 °C. O material do tubo de interface, que funciona como área de troca de calor, é o cobre. A pressão de referência escolhida foi de 1 atm. As vazões mássicas para os fluidos frio e quente são, respectivamente, 0,1 e 0,5 kg/s. Os dados de entrada encontram-se sumarizados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de entrada das grandezas relacionadas

Dados de entrada	Valor
Temperatura de entrada do fluido quente [°C]	100
Temperatura de entrada do fluido frio [°C]	5
Material selecionado para o tubo	Cobre
Pressão de referência [atm]	1
Vazão mássica par o fluido quente [kg/s]	0,5
Vazão mássica par o fluido frio [kg/s]	0,1

Fonte: O Autor (2020).

A Figura 22 mostra a árvore da definição do setup no ANSYS CFX-Pre, com os domínios “Externo”, “Interno” e “Tubo” definidos, bem como suas condições de contorno, que incluem, além da entrada e saída do fluido, elementos como simetria, paredes e interfaces.

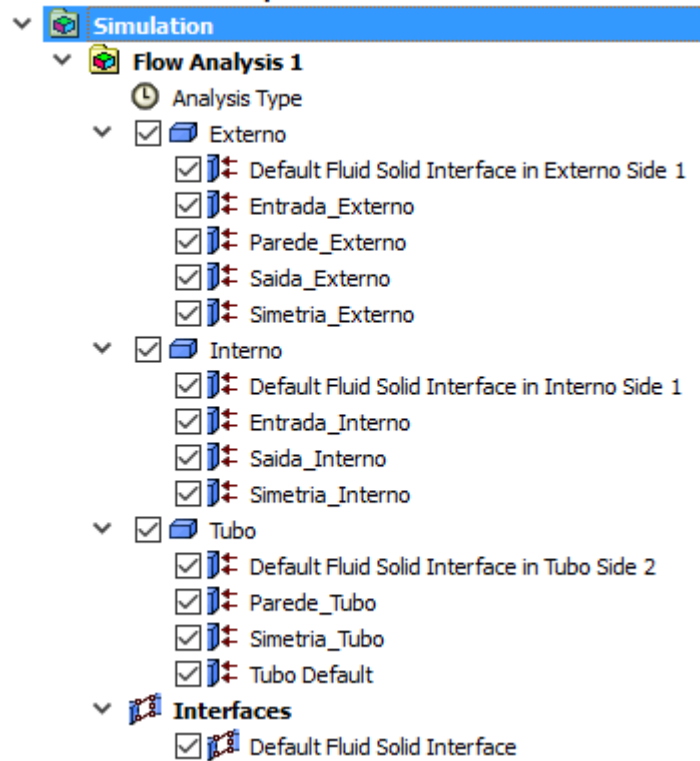
É também na etapa do *setup* que são pré-definidos os parâmetros do cálculo da simulação no passo seguinte. Basicamente, são definidas as unidades de solução, o controlador do solver (onde se determina o número de iterações, o tipo de resolução, entre outros parâmetros) e o controle dos outputs, onde se pode definir outros tipos de variáveis de interesse. Da mesma maneira como foi feito no processo de geração de malha, optou-se aqui por usar o *software* da maneira mais próxima possível do default.

4.4 SOLVER

A solução foi calculada no ANSYS CFX-Solver Manager, *software* agregado ao pacote do ANSYS CFD, conforme os dados do *solver control*, estabelecidos na

etapa anterior de *setup*. Nele foi definido um erro residual de 10^{-4} como critério de convergência.

Figura 22 – Domínios e condições de contorno



Fonte: O Autor (2020).

O processamento da solução foi limitado pela configuração do computador no qual a simulação foi rodada, que possuía um processador Intel Core i5 e 8 GB de memória RAM.

5 RESULTADOS

Nesta seção será apresentada a análise de resultados através da comparação i) da solução analítica do trocador bitubular simples com a solução equivalente calculada através da simulação no ANSYS CFX e ii) a comparação entre as simulações das diferentes configurações do problema proposto.

5.1 SOLUÇÃO ANALÍTICA PARA O TROCADOR DE CALOR BITUBULAR SIMPLES

Para fins comparativos, com o intuito de realizar uma validação da confiabilidade da solução advinda da simulação, foi realizado o cálculo analítico do trocador de calor bitubular mais simples. Decidiu-se fazer apenas com o trocador simples porque a solução analítica da configuração com os microcanais seria contraproducente.

Para a solução analítica, foi utilizado o método da efetividade-NUT – já explanado no capítulo de Fundamentação Teórica –, cuja aplicação é apropriada nos casos em que estão disponíveis as temperaturas iniciais dos fluidos quente e frio, mas não estão disponíveis nenhuma das temperaturas finais.

A título de simplificação, a área de transferência de calor (o tubo interno de cobre) foi considerada como sendo um tubo fino de 25 mm de diâmetro, com espessura negligenciável. Além disso, para aplicar o método da efetividade-NUT foi necessário setar um valor para o coeficiente global de transferência de calor, U , para a configuração água-cobre-água. A Tabela 2, adaptada de Engineering Toolbox (2003), fornece uma faixa de valores para o coeficiente global de transferência de calor para configurações com água como fluido quente e frio, variando o material de superfície de transferência de calor entre ferro fundido, aço e cobre.

Tabela 2 – Coeficiente global de transmissão de calor

Fluido	Material da superfície de transferência de calor	Fluido	Coeficiente global de transmissão de calor, U (W/m ² K)
Água	Ferro fundido	Água	230 – 280
Água	Aço	Água	340 – 400
Água	Cobre	Água	340 – 455

Fonte: Adaptado de Engineering Toolbox (2003).

Definidos esses pontos, um pequeno *script* computacional foi preparado em linguagem R, disponível no Apêndice A deste trabalho, para calcular a solução

analítica. Quando U foi considerado igual a $340 \text{ W/m}^2\text{K}$, a temperatura de saída do fluido quente foi de $95,40 \text{ }^\circ\text{C}$. Já quando U foi considerado igual a $455 \text{ W/m}^2\text{K}$, a temperatura de saída do fluido quente foi de $94,31 \text{ }^\circ\text{C}$, conforme pode ser verificado no Apêndice A.

Na simulação computacional da configuração sem os microcanais, conforme dados expostos na Tabela 5.2, a temperatura de saída do fluido quente foi de $93,85 \text{ }^\circ\text{C}$ no cenário em que a malha é mais refinada na região da troca de calor. Considerando as simplificações que foram realizadas para o cálculo analítico, as soluções se mostram muito próximas, com erro de $1,6\%$ para $U = 340\text{W/m}^2\text{K}$ e $0,5\%$ para $U = 455\text{W/m}^2\text{K}$. Portanto, o modelo computacional pode ser considerado validado.

5.2 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE AS SIMULAÇÕES

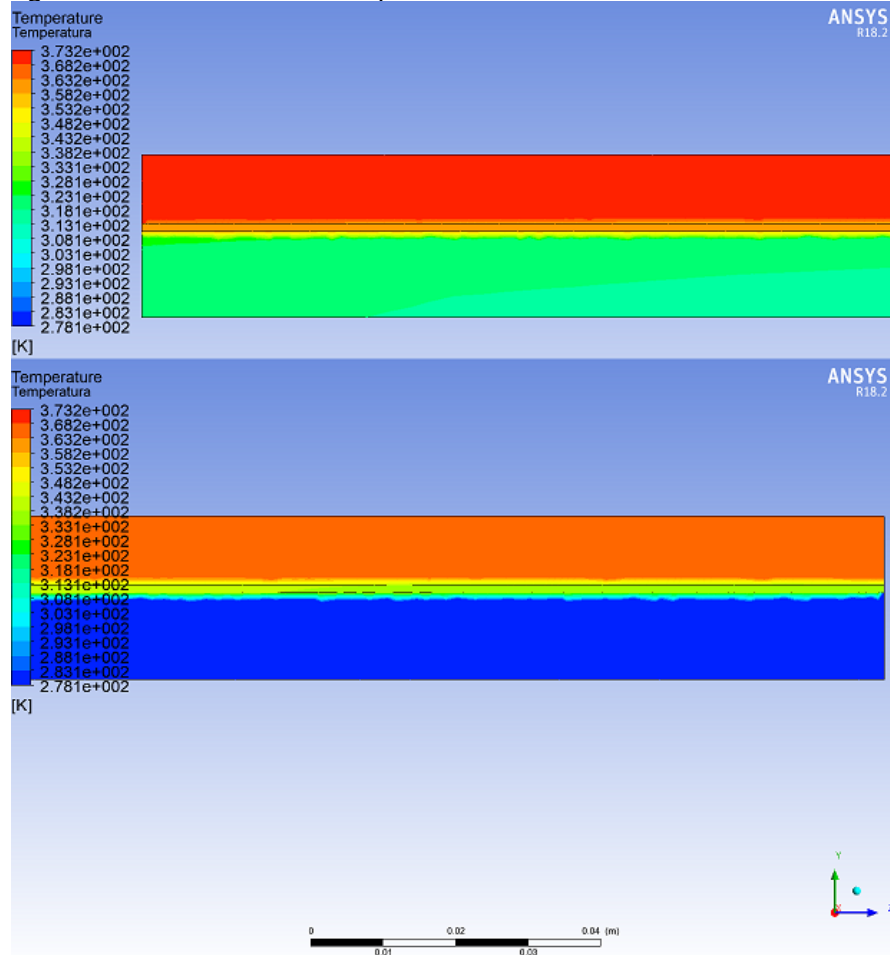
Foram realizadas simulações com algumas configurações de trocadores bitubulares. Em todas as simulações, a água foi utilizada como fluido frio e quente. Pode-se dizer também que em todas elas os tubos possuem 5m de comprimento, sendo o diâmetro do tubo interno de 25mm e do tubo externo de 45mm . Além disso, o material do tubo é o cobre e a configuração do fluxo é sempre contracorrente. Em todos os casos as temperaturas de entrada dos fluidos frio e quente foram, respectivamente, 5 e $100 \text{ }^\circ\text{C}$.

A Figura 23 mostra o contorno de temperatura aplicado na seção da simetria dos tubos no ANSYS CDF-Post, fruto do cálculo da simulação do trocador bitubular sem os microcanais. Dado o longo comprimento dos tubos, a parte superior da figura mostra a entrada do fluido quente a $100 \text{ }^\circ\text{C}$ (e saída do fluido frio, já que se trata de fluxo em contracorrente). Já a parte inferior da figura mostra a saída do fluido quente (em laranja) e entrada do fluido frio (em azul).

A Tabela 3 contém dados dos três cenários simulados no presente trabalho, cada um deles simulado com uma malha menos refinada e outra mais refinada. Dentre eles, apenas o primeiro cenário é para um caso de trocador de calor bitubular cujo tubo interno não apresenta microcanais (aqui chamado de contínuo). Todos os demais são cenários em que o tubo interno possui microcanais, variando largura dos mesmos, de acordo com o que foi apresentado na Figura 14, mantendo sempre a simetria circular. Vale observar que os cenários 2 e 3 mantiveram o mesmo número

de microcanais, bem como a angulação entre um microcanal e outro; variou-se apenas a largura: o cenário 3 possui microcanais com largura de 0,6 mm enquanto que o cenário 2 possui microcanais com largura maior, de 0,8 mm.

Figura 23 – Contorno de temperaturas na entrada e saída dos fluidos



Fonte: O Autor (2020).

Como a temperatura de entrada do fluido quente é sempre de 100 °C, a Tabela 3 traz apenas a temperatura de saída do fluido quente e a sua variação de temperatura para cada cenário considerado. Vale salientar que as temperaturas de saída do fluido quente foram colhidas discretamente ao longo de uma reta com mil pontos traçada no exato centro geométrico por onde passa o fluido quente, ou seja, uma reta equidistante entre a parede externa do tubo interno (área de transferência de calor) e a parede interna do tubo externo.

Tabela 3 – Cenários de simulação e seus respectivos resultados.

CENÁRIO	TUBO INTERNO	MALHA	MICROCANAIS			T _{sq}	T _{eq} - T _{sq}
			Largura	Profundidade	Nº		
Cenário 1	Contínuo	Menos refinada	N/A	N/A	N/A	93,35	6,65
Cenário 1	Contínuo	Mais refinada	N/A	N/A	N/A	93,85	6,15
Cenário 2	C/ microcanaís	Menos refinada	0,8 mm	0,65 mm	32	92,42	7,58
Cenário 2	C/ microcanaís	Mais refinada	0,8 mm	0,65 mm	32	91,58	8,42
Cenário 3	C/ microcanaís	Menos refinada	0,6 mm	0,65 mm	32	92,44	7,56
Cenário 3	C/ microcanaís	Mais refinada	0,6 mm	0,65 mm	32	92,57	7,43

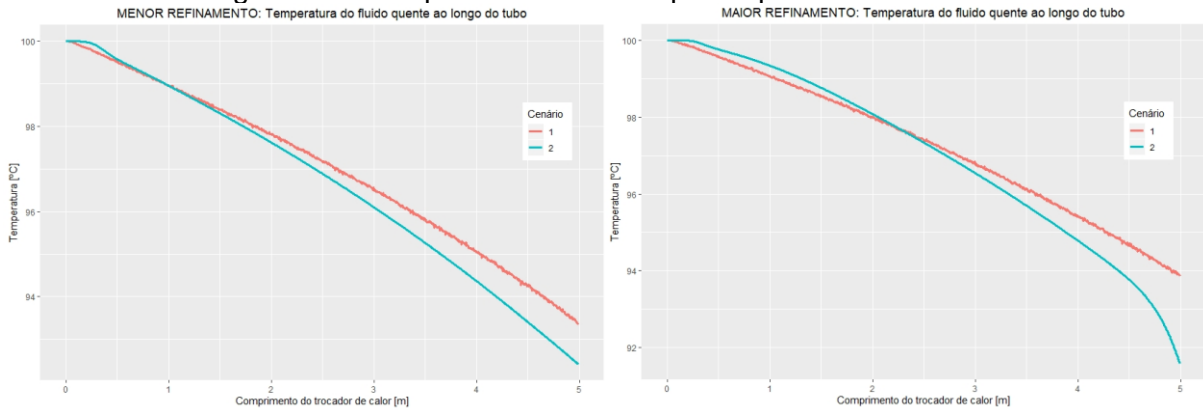
Fonte: O Autor (2020).

Dos dados de temperatura da Tabela 3, é possível observar que a inserção dos microcanaís de 0,8 X 0,65 mm no Cenário 2, quando é realizada a comparação com o Cenário 1 do trocador contínuo, par a par, no cenário com malha menos refinada, a redução de temperatura do fluido quente é 14% maior na configuração com os microcanaís e 36,9% maior na configuração com os microcanaís quando se considera os pares de malhas mais refinadas. A redução adicional da temperatura de saída do fluido quente é compreensível e esperada, uma vez que ao inserir os microcanaís está sendo ampliada a área de troca de calor entre os fluidos quente e frio.

A Figura 24 mostra as curvas da temperatura do fluido quente ao longo do comprimento do tubo para os Cenários 1 e 2: à esquerda são apresentadas as curvas oriundas dos resultados da malha com menor refinamento e à direita as curvas que resultaram da simulação utilizando a malha com maior refinamento, conforme descrito na Seção 4.2. Os *plots* foram feitos utilizando linguagem R, com a biblioteca gráfica *ggplot2*, cujo *script* está disponível no Apêndice B, de modo que se possa analisar as duas curvas de temperatura juntas.

Com os gráficos, é possível validar visualmente o que foi descrito no parágrafo anterior: para as duas configurações de malhas, par a par, os resultados melhores são apresentados pelo trocador de calor com microcanaís, em que a redução da temperatura de saída do fluido quente foi maior. O padrão das curvas é semelhante, mas em determinado ponto do comprimento do trocador, a decaída da temperatura do fluido quente se faz mais acentuada na configuração com os microcanaís.

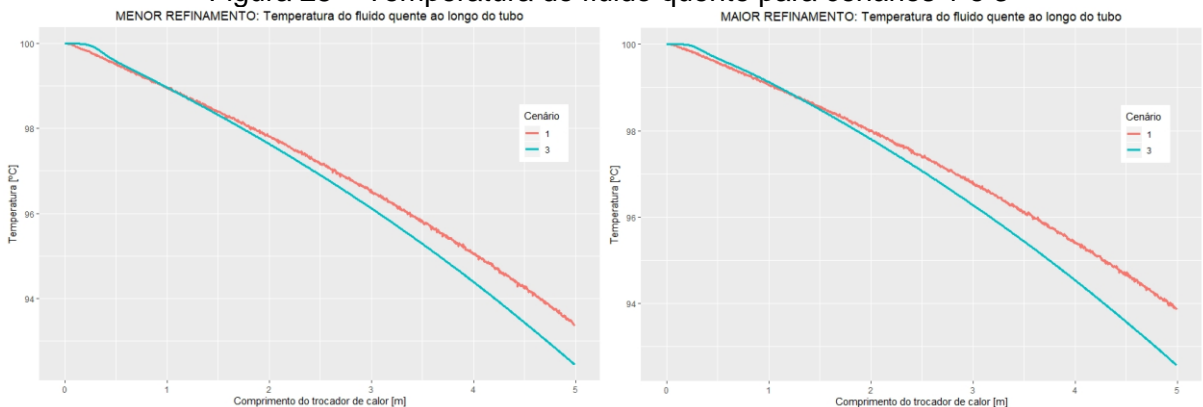
Figura 24 – Temperatura do fluido quente para cenários 1 e 2



Fonte: O Autor (2019).

A Figura 25 a seguir, por sua vez, realiza a comparação entre as curvas da temperatura do fluido quente ao longo do comprimento do tubo para os Cenários 1 e 3. Quando se considera o cenário com menor refinamento, o resultado apresentado no cenário 3 difere daquele apresentado pelo cenário 2 com intensidade que pode ser negligenciada. No entanto, quando se considera a simulação com maior refinamento, há uma redução de temperatura de saída do fluido quente aproximadamente 20,8% maior na configuração com microcanais do que naquela em que o não há, conforme dados da Tabela 3.

Figura 25 – Temperatura do fluido quente para cenários 1 e 3



Fonte: O Autor (2019).

Vale salientar que foram feitas tentativas de realizar simulações computacionais com uma outra configuração geométrica em que haveria um maior número de microcanais, mas não foi possível concretizá-la com sucesso devido ao grande aumento de esforço computacional e à dificuldade em atingir os critérios de convergência do Ansys.

Tabela 4 – Cenários de simulação e seus respectivos resultados (L = 10m).

CENÁRIO	TUBO INTERNO	MALHA	MICROCANAIS			T _{sq}	T _{eq} -T _{sq}
			Largura	Profundidade	Nº		
Cenário 1	Contínuo	Menos refinada	N/A	N/A	N/A	85,57	14,43
Cenário 1	Contínuo	Mais refinada	N/A	N/A	N/A	84,54	15,46
Cenário 2	C/ microcanais	Menos refinada	0,8 mm	0,65 mm	32	80,61	19,39

Fonte: O Autor (2020).

Além disso, foram realizadas simulações para uma configuração em que o comprimento total dos trocados de calor bitubulares em 10 m e não em 5 m. Como não foi possível realizar a simulação com malha mais refinada para o cenário com microcanais, por conta de limitações computacionais, os dados de resultados foram consolidados na Tabela 4 sem o cenário 2 com a malha mais refinada.

Considerando os dados da Tabela 4, para a configuração em que o comprimento é 10 m, há um aumento de cerca de 34% na redução da temperatura de saída do fluido quente na configuração com microcanais do que naquela sem eles. No entanto, quando comparados com os dados de saída do trocador de calor contínuo com malha mais refinada, esse aumento cai para cerca de 25%. A comparação par a par, nesse caso, não é possível por não ter sido possível realizar a simulação com malha mais refinada para o cenário com microcanais, como dito anteriormente.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho se propôs a realizar estudo, através de simulação numérica com o *software* comercial de fluidodinâmica computacional ANSYS CFX, sobre a influência, no processo de transferência de calor, da inserção de microcanais de perfil retangular na superfície interna do tubo interno (por onde escoava o fluido quente) de um trocador de calor bitubular.

Como especificações geométricas do projeto, foi considerado: a) um trocador de calor bitubular simples (sem incrustação de microcanais) de 5 metros de comprimento com diâmetro do tubo interno de 26mm, espessura do tubo interno de 1mm e diâmetro do tubo externo de 45mm; b) um trocador de calor bitubular com 32 microcanais separados por uma angulação de $11,25^\circ$ com as mesmas especificações gerais do trocador de calor sem microcanais, cujas dimensões dos microcanais eram de 0,8 X 0,65 mm, estando eles incrustados na superfície interior do tubo interno ao longo de todo seu comprimento. Além disso, foi variada a largura do microcanal em um dos cenários, para um valor de 0,6mm.

Durante as simulações iniciais, observou-se que um maior refinamento em volta da área de transferência de calor resultava em melhores resultados. Verificou-se também, para as geometrias consideradas, um melhor comportamento em malhas com elementos tetraédricos. Dessa maneira, decidiu-se realizar, para cada cenário considerado, simulações considerando malhas com menor e maior refinamento.

Na fase do *setup*, foram considerados três domínios diferentes: o do fluido quente, o da área de transferência de calor (tubo interno) e o do fluido frio. A água foi considerada como fluido quente e frio e o cobre foi escolhido como material do tubo. As temperaturas de entrada do fluido quente e frio foram especificadas em 100 °C e 5 °C, respectivamente. A pressão de referência escolhida foi de 1 atm. A vazões mássicas para os fluidos quente e frio foram de 0,5 e 0,1 kg/s. Foi definido um erro residual de 10^{-4} como critério de convergência

Para validação dos resultados, foi realizado a solução analítica do trocador de calor bitubular simples com o auxílio de um *script* em Linguagem R. Considerando as simplificações realizadas, identificou-se um erro que ficou entre 1,6 e 0,5% em relação aos resultados obtidos na simulação. Dessa maneira, a solução computacional foi considerada validada.

Ao realizar as comparações entre as soluções oriundas da simulação computacional, verificou-se sempre uma maior redução da temperatura de saída do fluido quente nas configurações em que havia microcanais. Isso era devido e esperado, uma vez que a inserção desses elementos faz com que haja aumento da área de transferência de calor. Além disso, verificou-se que um maior refinamento da malha faz a solução computacional se aproximar mais do valor obtido com a solução analítica, de modo que se percebe que com as malhas mais refinadas há uma menor diferença entre a redução de temperatura entre os cenários com e sem os microcanais.

Por fim, ao concluir esse trabalho, percebe-se que há espaço para trabalhos futuros, especialmente no que se refere a: i) proposta de novas geometrias e dimensões para os microcanais, a fim de avaliar o comportamento da temperatura de saída do fluido quente quando realizada comparação com o trocador de calor simples; ii) otimização das malhas para simulação de comprimentos maiores ($L \geq 10m$) sem depender de esforço computacional proibitivo e garantindo a convergência da solução; iii) estudo das propriedades mecânicas e de usinabilidade de modelos análogos.

REFERÊNCIAS

ANSYS. **ANSYS CFX introduction**. Canonsburg, 2013.

BEJAN, Adrian; KRAUS, Allan. **Heat transfer handbook**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

BORQUIST, Eric; THAPA, Suvhashis; WEISS, Leland. Experimental and lattice Boltzmann simulated operation of a copper micro-channel heat exchanger. **Energy Conversion And Management**, Elsevier BV, v. 117, p.171-184, jun. 2016.

ÇENGEL, Yunus; BOLES, Michael. **Termodinâmica**. 7. ed. Porto Alegre: AMGH Editora, 2013.

CFD ONLINE. **Codes**. Disponível em: <https://www.cfd-online.com/Wiki/Codes>. Acesso em: 12 ago. 2020.

CHUNG, T. J. **Computational fluid dynamics**. 2. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2010.

DIXIT, Tisha; GHOSH, Indranil. Review of micro- and mini-channel heat sinks and heat exchangers for single phase fluids. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 41, p. 1298-1311, jan. 2015.

ENGINEERING TOOLBOX, 2003. Overall Heat **Transfer coefficients for fluids –** heat exchanger surface combinations. Disponível em: https://www.engineeringtoolbox.com/overall-heat-transfer-coefficients-d_284.html. Acesso em: 12 ago. 2020.

GONG, Liang; ZHAO, Jin; HUANG, Shanbo. Numerical study on layout of micro-channel heat sink for thermal management of electronic devices. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier BV, v. 88, p.480-490, set. 2015. Elsevier BV.

HAN, Yanhui; LIU, Yan; LI, Ming; HUANG, Jin. A review of development of micro-channel heat exchanger applied in air-conditioning system. **Energy Procedia**, Elsevier BV, v. 14, p.148-153, 2012.

HARUN-OR-RASHID, Mohammad; JEONG, Ji Hwan. Replacement of Present Conventional Condenser of Household Refrigerator by Louver Fin Micro-Channel Condenser. **Arabian Journal For Science And Engineering**, v. 44, n. 2, p.753-761, 23 abr. 2018. Springer Science and Business Media LLC.

INCROPERA, Frank *et al.* **Fundamentals of heat and mass transfer**. 6. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007.

KAKAÇ, Sadık; LIU, Hongtan; PRAMUANJAROENKIJ, Anchasa. **Heat exchangers: selection, rating and thermal design**. 3. ed. Boca Raton: Taylor & Francis Group, 2012.

KIM, Jungchul; SHIN, Jeong Heon; SOHN, Sangho; YOON, Seok Ho. Analysis of non-uniform flow distribution in parallel micro-channels. **Journal Of Mechanical Science And Technology**, v. 33, n. 8, p.3859-3864, ago. 2019. Springer Science and Business Media LLC.

KIM, Sung-min; MUDAWAR, Issam. Thermal design and operational limits of two-phase micro-channel heat sinks. **International Journal Of Heat And Mass Transfer**, Elsevier BV, v. 106, p.861-876, mar. 2017.

LÓPEZ, Dennis Paúl Paz. **Simulação computacional de CFD de um pequeno trocador de casco e tubo**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia de Energias) - Instituto Latinoamericano de Tecnologia, Infraestrutura e Território, Universidade Federal da Integração Latinoamericana, Foz do Iguaçu, 2017.

NAQUIUDDIN, Nor Haziq; SAW, Lip Huat; YEW, Ming Chian; YUSOF, Farazila; NG, Tan Ching; YEW, Ming Kun. Overview of micro-channel design for high heat flux application. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, Elsevier BV, v. 82, p.901-914, fev. 2018.

RAM, A. Performance enhancement of mobile air conditioning system using variable geometry micro channel heat exchanger (MCHX). **International Journal of Engineering Sciences & Research Technology**, p. 809-819, abr. 2016. Thomson Reuters Endnote.

RESOLVED ANALYTICS. **Comparing CFD software**. Disponível em: <https://www.resolvedanalytics.com/theflux/comparing-cfd-software>. Acesso em: 12 fev. 2020.

SABINO, Ricardo Schayer. **Inspeção de feixes tubulares de trocadores de calor**. 2008. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.

SHAH, Ramesh; SEKULIĆ, Dušan. **Fundamentals of heat exchanger design**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2003.

THE BEST HEAT EXCHANGER MANUFACTURERS. **History**. 2018. Disponível em: <https://www.heatexchangermanufacturers.com/home/>. Acesso em: 12 ago. 2020.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2. ed. Harlow: Pearson Education, 2007.

APÊNDICE A – SCRIPT EM LIGUAGEM R PARA CÁLCULO ANALÍTICO

Abaixo, segue *script* em linguagem R para cálculo analítico da temperatura de saída do fluido quente no trocador de calor bitubular sem microcanais, a fim de comparação com os resultados oriundos da análise numérica.

```
##### UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO #####
##### DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA #####
##### TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO #####
# ESTUDANTE: LEANDRO VANDERLEY DOS PASSOS ALVES #

# Constantes
L = 5      # m
Di = 0.025 # m
Tqe = 100  # °C
Tfe = 5    # °C
mq = 0.5   # m/s
mf = 0.1   # m/s
cp = 4181  # J/kg K

# Coeficiente global de transferência de calor
U = c(340, 455)

# Cálculo de Cmin e Cmax
Cmin = mf*cp
Cmax = mq*cp

# Área de troca de calor
A = pi*Di*L

# Cálculo de NUT
Nut = (A*U)/Cmin

# Cálculo da eficiência
epsilon = Nut/(1+Nut)

# Cálculo da transferência máxima de calor
q_max = Cmin*(Tqe-Tfe)

# Cálculo da transferência de calor real
q = q_max*epsilon

# Temperaturas de saída
Tqs = Tqe - q/(mq*cp)
Tfs = Tfe + q/(mf*cp)

# Organização dos dados
dados <- data.frame(U = U,
```

$NUT = Nut,$
 $epsilon = epsilon,$
 $q = q,$
 $Tqs = Tqs,$
 $Tfs = Tfs)$

Exibição dos dados gerados
View(dados)

A execução do *script* acima gera os seguintes resultados:

	U	NUT	epsilon	q	Tqs	Tfs
1	340	0.3193439	0.2420475	9614.006	95.40110	27.99451
2	455	0.4273573	0.2994046	11892.200	94.31131	33.44343

APÊNDICE B – SCRIPT EM LINGUAGEM R PARA GERAÇÃO DE GRÁFICOS

Abaixo, segue *script* em linguagem R para geração dos gráficos para comparação das curvas de temperatura de saída do fluido quente ao longo dos tubos. Os arquivos de entrada utilizados foram extraídos do pós-processador do ANSYS CFX em formato .csv.

```
##### UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO #####
##### DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA #####
##### TRABALHO DE CONCLUSÃO DO CURSO #####
# ESTUDANTE: LEANDRO VANDERLEY DOS PASSOS ALVES #
```

```
# Importação dos dados
```

```
data1 = read.csv("def/Cenario1.csv", header = TRUE)
```

```
data2 = read.csv("def/Cenario2.csv", header = TRUE)
```

```
# Ajuste nos títulos
```

```
names(data1) <- c("Z", "T")
```

```
names(data2) <- c("Z", "T")
```

```
# Conversão de Kelvin para Celsius
```

```
data1$`T` = data1$`T` - 273.15
```

```
data2$`T` = data2$`T` - 273.15
```

```
# Separação dos cenários
```

```
data1$scenario <- "1"
```

```
data2$scenario <- "2"
```

```
# Visualização preliminar dos dados
```

```
View(data1)
```

```
View(data2)
```

```
# Organização dos dados
```



```
data <- rbind(data1, data2)
```

```
View(data)
```

```
# Plot
```

```
data %>%
```

```
  ggplot(aes(x=Z, y=T, colour = cenario)) +
```

```
  geom_line(size = 1.2) +
```

```
  ggtitle("MAIOR REFINAMENTO: Temperatura do fluido quente ao longo do tubo") +
```

```
  xlab("Comprimento do trocador de calor [m]") +
```

```
  ylab("Temperatura [°C]") +
```

```
  theme(legend.position = c(0.9, 0.7), plot.title = element_text(hjust = 0.5)) +
```

```
  labs(colour="Cenário") +
```

```
  theme(axis.text.x=element_text(size=rel(1.0))) +
```

```
  theme(axis.text.y=element_text(size=rel(1.0)))
```