

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADEMICO DE ENGENHARIA QUÍMICA
ENGENHARIA QUÍMICA**

**ANA PAULA DOS SANTOS
GABRIELA FERREIRA GABRICH**

**ANÁLISE DE TROCA TÉRMICA EM TROCADOR DE CALOR DE
TUBOS CONCÊNTRICOS CONCORRENTE MEDIANTE DIFERENTES
CONFIGURAÇÕES DE ALETAS**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2018

**ANA PAULA DOS SANTOS
GABRIELA FERREIRA GABRICH**

**ANÁLISE DE TROCA TÉRMICA EM TROCADOR DE CALOR DE
TUBOS CONCÊNTRICOS CONCORRENTE MEDIANTE DIFERENTES
CONFIGURAÇÕES DE ALETAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, do Departamento Acadêmico de Engenharia Química, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Everton Moraes Matos

PONTA GROSSA

2018



TERMO DE APROVAÇÃO

**ANÁLISE DE TROCA TÉRMICA EM TROCADOR DE CALOR DE TUBOS CONCÊNTRICOS
CONCORRENTE MEDIANTE DIFERENTES CONFIGURAÇÕES DE ALETAS**

por

Ana Paula dos Santos e Gabriela Ferreira Gabrich

Monografia apresentada no dia 14 de junho de 2018 ao Curso de Engenharia Química da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa. O candidato foi arguido pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Prof. Dr. Cesar Augusto Canciam
(UTFPR)

Bruna Cassia da Silva

Profa. Dra. Everton Moraes Matos
(UTFPR)

Profa. Dra. Juliana de Paula Martins
Responsável pelo TCC do Curso de Engenharia Química

“A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Curso”

AGRADECIMENTOS

É muito difícil expressar em palavras tamanha felicidade que sentimos ao chegar no término desse trabalho. Muitas pessoas fizeram parte dessa caminhada, nos apoiando de alguma forma, por meio de palavras de motivação, ou até mesmo um abraço apertado.

Agradecemos a Deus por nos iluminar permitindo que não desistíssemos diante das dificuldades e por nos ter concedido sabedoria para conseguirmos concluir o trabalho.

Ao professor Everton Moraes Matos que aceitou nos orientar e nos doou seu tempo, conhecimento e paciência.

As nossas famílias, pelo incentivo, amor e apoio incondicional durante todo desenvolvimento do trabalho.

Aos nossos amigos que entenderam nossa ausência.

A coordenação de engenharia química pela cooperação.

Agradecemos a todos que de alguma forma se envolveram em nossas vidas e nos trouxeram forças para a conclusão desse trabalho.

RESUMO

GABRICH, G. F; SANTOS, A. P. **Análise de troca térmica em trocador de calor de tubos concêntricos concorrente mediante diferentes configurações de aletas. 2018.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2018.

No presente trabalho foi realizada a simulação computacional no Ansys CFX de um trocador de calor do tipo tubo duplo aletado, observando a transferência de calor por convecção com escoamento em paralelo, mediante geometrias com diferentes tipos de aletas sendo elas do tipo anular, cônicas e de placas verticais. Uma tabela comparativa é apresentada, permitindo comparar e compreender qual tipo de aleta é melhor, dependendo do objetivo almejado pela indústria, o trocador de calor com aletas anulares apresentou a maior troca térmica e a maior perda de carga. Na escolha do trocador de calor deve ser levado em consideração àquele que apresente o melhor desempenho com o menor custo diante das condições de projeto e operação.

Palavras-chave: Trocador de Calor. Aleta. Transferência de Calor. Simulação. Tubo duplo.

ABSTRACT

GABRICH, G. F; SANTOS, A. P. **Thermal exchange analysis in a co-current concentric heat exchanger using different configurations of fins. 2018.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Química – Federal Technology University - Paraná. Ponta Grossa, 2018).

In the present study the computational simulation was performed in Ansys CFX of a double tube type heat exchanger, observing a heat transfer by convection with a parallel flow, through geometries with a different kind of fins, being of the annular, conical and vertical plate's type. A comparative chart presented is, allowing you to compare and understand which type of fin is better, depending on the industry's objective. The heat exchanger with annular fins had the highest thermal exchange and the highest charge loss. When choosing the heat exchanger should be taken into account for the one that presents the best performance with the lowest cost in view of the design and operation conditions.

Keywords: Heat Exchanger. Fin. Heat Transfer. Simulation. Double Tube.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Perfis de temperatura associados no trocador de calor tubo duplo e tipos de escoamentos.....	17
Figura 2 - Alguns tipos de geométricas de aletas.....	19
Figura 3 - (1) Geometria Anular, (2) Geometria Plana, (3) Geometria Piniforme	23
Figura 4 - Exemplo ampliado da malha de um dos trocadores de calor	24
Figura 5 - Corte longitudinal do trocador de calor tubular com aletas	27
Figura 6 - Perfil de temperatura no domínio frio	28
Figura 7 - Perfil de temperatura no domínio quente	28
Figura 8 - Perfil da pressão no domínio frio	29
Figura 9 - Perfil da pressão no domínio quente	29
Figura 10 - Corte longitudinal do trocador de calor tubular com aletas de placas	30
Figura 11 - Perfil de temperatura no domínio frio	31
Figura 12 - Perfil de temperatura no domínio quente	31
Figura 13 - Perfil da pressão no domínio frio	32
Figura 14 - Perfil da pressão no domínio quente	32
Figura 15 - Corte longitudinal do trocador de calor tubular com aletas cônicas .	33
Figura 16 - Perfil de temperatura no domínio frio	34
Figura 17 - Perfil de temperatura no domínio quente	34
Figura 18 - Perfil da pressão no domínio frio	35
Figura 19 - Perfil da pressão no domínio quente	35
Figura 20 - Volume e área do trocador com aletas anulares	36
Figura 21 - Área de entrada e saída do sólido quente do trocador com aletas anulares	36
Figura 22 - Volume e área do trocador de aletas com placas	37
Figura 23 - Área de entrada e saída do sólido quente do trocador de aletas com placas	37
Figura 24 - Volume e área do trocador de aletas cônicas	38
Figura 25 - Área de entrada e saída do sólido quente do trocador de aletas com placas	38

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de dados.....	39
-------------------------------------	----

LISTA DE SIGLAS

UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná
CFD	<i>Computer Fluid Dynamics</i>
CFX	<i>Command Field Exercise</i>
CAD	Computer-Aided Design

LISTA DE SÍMBOLOS

\dot{Q} taxa líquida de transferência de calor

\dot{m} vazão mássica

c_p calor específico a pressão constante

ΔT variação de temperatura do sistema

h_L perda de carga

f fator de atrito

L comprimento do tubo

D diâmetro do tubo

v velocidade do escoamento

g aceleração da gravidade

h_f perda de carga distribuída

h_t perda de carga total

Sumário

1 INTRODUÇÃO	12
1.2 PROBLEMA	13
1.2 HIPOTHESES	13
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 Objetivo geral	14
1.3.2 Objetivo específico	14
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR	15
2.2 TROCADORES DE CALOR	16
2.3 TROCA TÉRMICA	17
2.4 ALETAS	18
2.5 PERDA DE CARGA	20
2.6 SALOME	20
2.7 SOFTWARE PARA SIMULAÇÃO	21
3 MATERIAL E MÉTODO	22
3.1 DADOS EXPERIMENTAIS	22
3.2 DESENVOLVIMENTO DAS GEOMETRIAS	22
3.3 CRIAÇÃO DA MALHA	23
3.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL	24
3.4.1 Ajuste do Setup	25
3.4.2 Obtenção dos resultados	25
3.5 LOCAL	26
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	27
4.1 ALETAS ANULARES	27
4.2 ALETAS DE PLACAS	30
4.3 ALETAS CÔNICAS	33
4.4 ANÁLISE COMPARATIVA	35
5 CONCLUSÃO	41
REFERÊNCIAS	42

1 INTRODUÇÃO

Trocadores de calor são equipamentos largamente utilizados na indústria química, tem como objetivo promover a transferência de calor, que pode ser de dois ou mais fluidos a temperaturas diferentes. Sua configuração pode ser muito variada, sendo desenhada especialmente para cada necessidade conforme sofisticação tecnológica, geometria e tamanho requeridos. Os trocadores de calor atendem vários ramos da indústria, tais como: fábricas de processamento químico, frigoríficos, usinas de energia a vapor, radiadores para carros, entre out ras (OZISIK, 1985).

Os trocadores de calor do tipo tubo duplo, com tubos concêntricos (ou bitubulares), são relativamente simples, compostos basicamente por dois tubos com raios diferentes. Os fluidos que iram trocar calor podem escoar pelos tubos na mesma direção ou em sentidos opostos. Os principais componentes deste equipamento são os tubos de diferentes raios e as superfícies de entrada e saída desses fluidos. A transferência de calor ocorre pelas paredes do trocador, passando do fluido de maior temperatura para o de menor temperatura.

Segundo Incropera (2008), a transferência de calor por convecção ocorre na existência do deslocamento de um fluido e pode ser classificada como convecção natural, decorrente das forças de empuxo, que fazem o fluido escoar sobre os tubos e também existe a convecção forçada, sendo que esta precisa de um meio externo como ventilador ou bomba para induzir o escoamento do fluido.

A indústria busca incessantemente otimizar espaço e tempo os quais são convertidos indiretamente em lucro, diante disso, as aletas são uma alternativa bastante eficiente para aumentar a troca térmica de trocadores de calor. Segundo Chang e Wang (1997), aletas são superfícies estendidas que aumentam a taxa de transferência de calor devido ao aumento da área de troca térmica.

Atualmente, com o crescimento desenfreado do consumismo, que enriquece as indústrias e ao mesmo tempo faz com que ela crie alternativas para que produza cada vez mais em menos tempo e com menos recursos, existem duas opções para o estudo de novos equipamentos: criar um protótipo e fazer testes em escala laboratorial ou desenhar esses equipamentos e fazer a simulação em um ambiente virtual, nos softwares computacionais, opção que acaba sendo mais viável economicamente para a indústria, sendo uma ferramenta muito utilizada.

Existe no mercado uma variedade de pacotes computacionais que auxiliam na criação e otimização de equipamentos para as indústrias. A ferramenta dinâmica dos fluidos computacionais (CFD – *Computational Fluid Dynamics*) é uma delas e traz resultados confiáveis de forma simples e dinâmica, proporciona a criação de diversos tipos de desenhos e malhas computacionais, que são a representação do modelo físico estudado, dividido em inúmeros volumes de controle.

1.2 PROBLEMA

O sistema estudado consistiu em um trocador de calor, do tipo tubo duplo, com fluxo concorrente, evidenciando uma transferência de calor por convecção forçada o qual proporcionou um resfriamento do fluido (água) que inicialmente entrava a temperatura de 100 °C, escoando a uma velocidade de 0,001 m/s.

O problema consistiu em comparar três trocadores de calor, sendo que suas dimensões (raios e comprimento) eram as mesmas para os três mudando apenas o tipo de aleta utilizado. Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados dois softwares computacionais: Salome – utilizado na criação das geometrias e das malhas computacionais e o Ansys CFX – utilizado para a importação da malha, implementação dos parâmetros de fluxo do equipamento, obtenção e interpretação dos resultados.

1.2 HIPOTESSES

Não temos uma previsão do qual trocador de calor será o melhor, pois é relativo, cada indústria deseja algo específico, como por exemplo uma deseja trocar calor mais rápido, outra mais devagar. Diante disso, o intuito é fazer uma análise dos designs para as condições de operação.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo geral

Simular três trocadores de calor do tipo tubo duplo de fluxo paralelo, com diferentes tipos de aletas para analisar a troca térmica e perda de carga.

1.3.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos que instigam este trabalho estão descritos a seguir:

- Desenhar os trocadores de calor com diferentes aletas no software Salome, estabelecendo tamanhos e formatos;
- Modelar os trocadores de calor em software computacional, com as diferentes aletas;
- Aplicar as equações para obter as trocas térmicas e perdas de carga para os três tipos de trocadores de calor.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A transferência de calor pode ser definida como a energia (calor) trocada entre sistemas devido a diferença de temperatura. Tendo como objetivos a determinação do tempo de resfriamento ou aquecimento, a diferença de temperatura e as taxas de transferência de calor (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012).

A transferência do calor pode ocorrer de três formas diferentes, por condução, convecção e por radiação (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012)

A condução pode ser definida como o resultado da interação, quando partículas mais energéticas transferem energia de uma substância para partículas vizinhas, com menos energia (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012).

Na convecção a transferência de calor ocorre pelo movimento global (ou macroscópico) do fluido e pelo movimento molecular aleatório (INCROPERA, 2008). A transferência de calor será maior, quanto mais veloz for o movimento do fluido, por convecção (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012).

De acordo com a natureza do escoamento do fluido podemos classificar a transferência de calor por convecção. Podendo ser classificada como convecção forçada e convecção natural (INCROPERA, 2008).

A convecção forçada ocorre quando meios externos promovem o escoamento, como ventos atmosféricos, ventiladores ou bombas. A convecção natural é originada pelas diferenças de densidades, ocasionadas pela diferença de temperatura do fluido, que geram as forças de empuxo (INCROPERA, 2008).

A radiação ocorre devido a mudanças nas configurações eletrônicas de átomos ou moléculas, que resultam na liberação de energia na forma de ondas eletromagnéticas (ou fótons) pela matéria (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012).

2.2 TROCADORES DE CALOR

Os trocadores de calor são equipamentos que auxiliam a troca de calor, de fluidos com diferentes temperaturas, além de evitar a mistura entre os dois fluidos. Nos trocadores de calor a transferência de calor se dá por condução (na parede que separa os dois fluidos) e por convecção em cada fluido (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012).

Os trocadores de calor podem ser categorizados de acordo com o tipo de construção e perfil do escoamento (INCROPERA, 2008). Podendo ser do tipo, mais comum na indústria, casco e tubo, os quais contém vários tubos, ordenados dentro de um casco. Existem outros tipos de trocadores de calor como o tubo duplo, compacto, placa e quadro e regenerativo (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012).

Neste trabalho foi abordado os trocadores do tipo tubo duplo, que é o mais simples. Com tubos concêntricos (ou bitubular), os fluidos frio e quente se movimentam no mesmo sentido, ou contrário (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012). O escoamento pode ser contracorrente, fluidos quente e frio entram em direções opostas, e também concorrente ou em paralelo, onde fluidos frio e quente entram na mesma direção, conforme a figura 1 representa (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012).

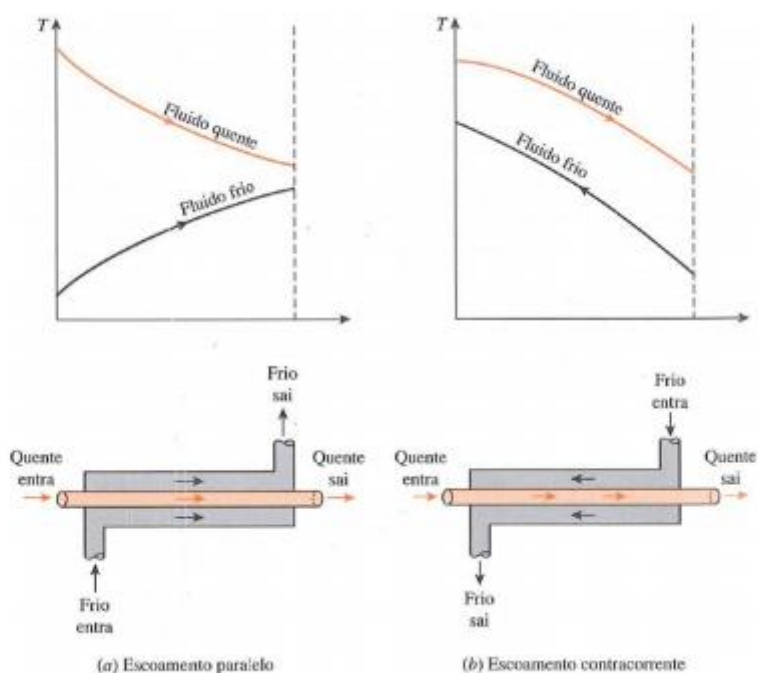


Figura 1 - Perfis de temperatura associados no tocador de calor tubo duplo e tipos de escoamentos.
Fonte: Çengel;Ghajar (2012).

2.3 TROCA TÉRMICA

Desenvolver equipamentos capazes de realizar troca térmica é um grande desafio, pois eles precisam remover ou adicionar energia a um fluido ou material sólido, com isso aparecem vários problemas que podem diminuir a eficiência do equipamento (LACERDA, *et al.*, 2003).

Utilizou-se a expressão (1) para a obtenção da taxa líquida de calor transferida para dentro ou fora de um volume de controle, que tem como unidade kj/s.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

\dot{Q} é a taxa líquida de transferência de calor, em W;

\dot{m} é a vazão mássica, em kg/s;

c_p é o calor específico a pressão constante, em kJ/kg.K;

ΔT é a variação de temperatura do sistema, em K.

Essa representação é utilizada para sistemas com escoamento em regime permanente com entrada e saída, sendo que a vazão de entrada tem que ser igual a vazão de saída. Outra condição para essa representação é quando forem desprezíveis as variações de energia cinética e potencial, e quando não houver trabalho (INCROPERA, 2008).

2.4 ALETAS

As aletas aumentam a transferência de calor a partir da superfície devido ao aumento da área de troca térmica expondo a superfície maior à convecção e à radiação. São feitas de materiais condutores, como por exemplo o alumínio. Podem ser fabricadas por extrusão, fixação de uma folha fina de metal sob uma superfície ou por solda (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012).

A condutividade térmica exerce um papel importante na taxa de transferência de calor, pois influencia fortemente na distribuição da temperatura ao longo da superfície aleta, busca reduzir as variações de temperatura no decorrer da aleta. Devido a isso, é de grande relevância que a escolha do material da aleta seja a melhor possível (INCROPERA, 2008).

Existem duas formas de aumentar a taxa de transferência de calor conhecidas, se a temperatura da superfície for fixa: uma delas é elevar o coeficiente de transferência de calor por convecção, a qual acontece quando aumentamos a velocidade do fluido e/ou quando a se reduz temperatura do fluido que passa no casco, contudo isso pode exigir a instalação de novos equipamentos, que muitas vezes se torna inviável, e mesmo acatando as exigências pode até não ser suficiente para trazer bons resultados, além disso, a redução da temperatura do fluido que passa no casco geralmente não é aplicável. Então uma opção muito visada é aumentar a área de troca térmica, anexando superfícies estendidas, o que faz com que aumente a área da superfície da qual ocorre a convecção, as chamadas aletas, as quais avançam da parede em direção ao interior do fluido adjacente (INCROPERA, 2008).

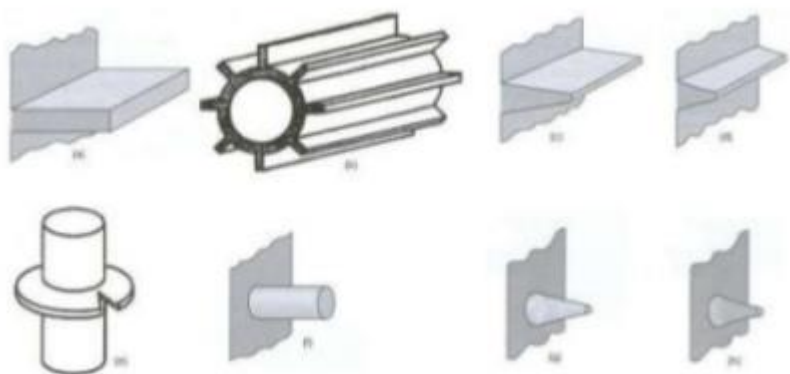
Pode-se fazer algumas alegações na análise da aleta, como: operação permanente, onde não há geração de calor na aleta, a condutividade térmica do material não possui variações. O coeficiente de transferência de calor mostra

variações ao decorrer da aleta, bem como na circunferência dos tubos, isso ocorre quando um determinado ponto é analisado e nesse ponto existe a movimentação do fluido, que pode ser estudada ponto a ponto. Porém, outra consideração pode ser feita, que é tomar como invariável e uniforme por toda superfície aletada esse coeficiente (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012).

Na região de perto da base da aleta, o fluido é cercado por superfícies sólidas, deixando-o encurralado, atrapalhando o movimento do fluido, por outro lado, o fluido que passa pela região da ponta da aleta tem pouco contato com a superfície sólida, fluindo melhor, isso significa que, se comparado a base e a ponta da aleta, o coeficiente de transferência de calor por convecção terá um valor mais alto na ponta. Sendo assim, acrescentar muitas aletas em uma superfície pode trazer o efeito inverso ao desejado, fazendo com que a taxa de transferência de calor global diminua (ÇENGEL; J.GHAJAR, 2012).

Existem várias geometrias de aletas, elas podem ser do tipo anular, a qual é fixa na circunferência do cilindro e a sua área de seção reta varia conforme o raio. Aleta plana vertical é aquela que cresce ao longo do eixo do cilindro fixada a parede do cilindro. A aleta piniforme é projetada de forma que possui área de seção reta circular, entre outras. A escolha do tipo de aleta pode considerar: o quanto o coeficiente de transferência de calor deve ser baixado, quanto a perda de carga precisa ser elevada levando em conta o escoamento do fluido passando pelas aletas, também pode-se analisar o peso, espaço e custo (INCROPERA, 2008).

Na Figura 2 pode-se ver exemplos de geométricas que podem ser aplicadas como aletas em uma superfície.



**Figura 2 - Alguns tipos de geométricas de aletas.
Fonte: Moreira (2016).**

2.5 PERDA DE CARGA

A perda de energia que ocorre com os fluidos, devido ao atrito deles com as paredes dos tubos, é definida como a perda de carga (FOX, 2014). Segundo Brunetti (2008) a perda de carga é a energia perdida, do fluido, pela unidade do peso.

A perda de carga está relacionada diretamente a tensão de cisalhamento e é ocasionada pela viscosidade. A perda de carga (h_L) é obtida pela variação da pressão (ΔP) dividida pelo produto entre a densidade (ρ) e gravidade (g) (ÇENGEL, 2007).

$$h_L = \frac{\Delta P}{\rho g} = f \frac{L \cdot v^2}{D \cdot 2g} \quad (2)$$

Sendo:

h_L = Perda de carga, em m;

f = Fator de atrito;

L = Comprimento do tubo, em m;

D = Diâmetro do tubo, em m;

v = Velocidade do escoamento, em m/s;

g = Aceleração da gravidade, em m/s².

A perda de carga total (h_T) será constituída pela perda de carga local ou singular (h_s), que ocorre em locais onde o fluido sofre perturbações bruscas, e pela perda de carga distribuída (h_F), gerada nos tubos retos, pelo atrito entre as partículas do fluido (BRUNETTI, 2008).

$$h_T = \sum h_s + \sum h_F \quad (3)$$

2.6 SALOME

É um software computacional de extensão aberta e flexível que contém elementos reutilizáveis permitindo criar geometrias 3D para o pré e pós processamento para simulação numérica pela interface CAD (*Computer Aided Design*). É um software de código aberto, sob os termos da licença GNU LGPL, que traz algumas opções de plataforma de trabalho (SALOME, 2018).

O Salome pode ser utilizado para geração de um modelo de desenho, possibilitando a criação de inúmeras geométricas e malhas para simulação e também para preparação de cálculos numéricos e na contemplação dos resultados dos cálculos (SALOME, 2018).

2.7 SOFTWARE PARA SIMULAÇÃO

O ANSYS CFX é uma ferramenta de software de dinâmica dos fluidos computacional (CFD), que serve para simular o comportamento de sistemas envolvendo fluxo de fluido, transferência de calor e outros processos físicos relacionados. Funciona resolvendo as equações do fluxo de fluido sobre uma região de interesse, com condições especificadas (conhecidas) na fronteira dessa região (ANSYS, 2018).

O CFD é uma ferramenta de projeto industrial que ajuda a reduzir as escalas de tempo do projeto, além de melhorar os processos em todo o mundo da engenharia. O CFD oferece uma alternativa econômica e precisa para o teste de modelo em escala, com variações na simulação sendo executada rapidamente, oferecendo muitas vantagens (ANSYS, 2018).

3 MATERIAL E MÉTODO

A realização desse trabalho levou em consideração vários passos, basicamente criou-se desenhos e as malhas, no software computacional Salome e em seguida, importou-se as malhas em um outro software, o Ansys CFX, visando o resfriamento da água que passa pelo tubo do meio, e que por fim conseguimos dados para uma comparação da troca térmica e perda de carga para os três desenhos para que então a indústria possa concluir qual tipo de aleta é mais efetiva para atender as suas necessidades.

- Desenvolvimento das três geometrias dos trocadores de calor tubo duplo, com superfície aletada;
- Criação das malhas de controle;
- Importação das malhas para o Ansys CFX;
- Implementação das condições de contorno nos domínios;
- Aperfeiçoamento das condições de contorno;
- Obtenção das soluções computadas pelo software Ansys CFX;
- Análise dos resultados;
- Comparação dos resultados.

3.1 DADOS EXPERIMENTAIS

As três geometrias dos trocadores de calor criadas no Salome terão como raio do cilindro menor 0,3 metros e do cilindro maior 0,5 metros e seus comprimentos serão 4 metros. Na simulação no Ansys CFX, será utilizado o mesmo setup para os 3 modelos, criando um padrão. O fluido utilizado será água, com entrada no tubo (entrada quente) a uma temperatura de 100°C e velocidade de 0,001 m/s e para o casco (entrada fria) a temperatura será de 10°C e a mesma velocidade 0,001 m/s.

3.2 DESENVOLVIMENTO DAS GEOMETRIAS

Os desenhos foram criados no Salome pois ele atende as necessidades das geometrias pretendidas e também devido ao seu fácil acesso, sendo um software

pouco complexo. As geométricas foram criadas em três dimensões, como podemos perceber na figura 3.

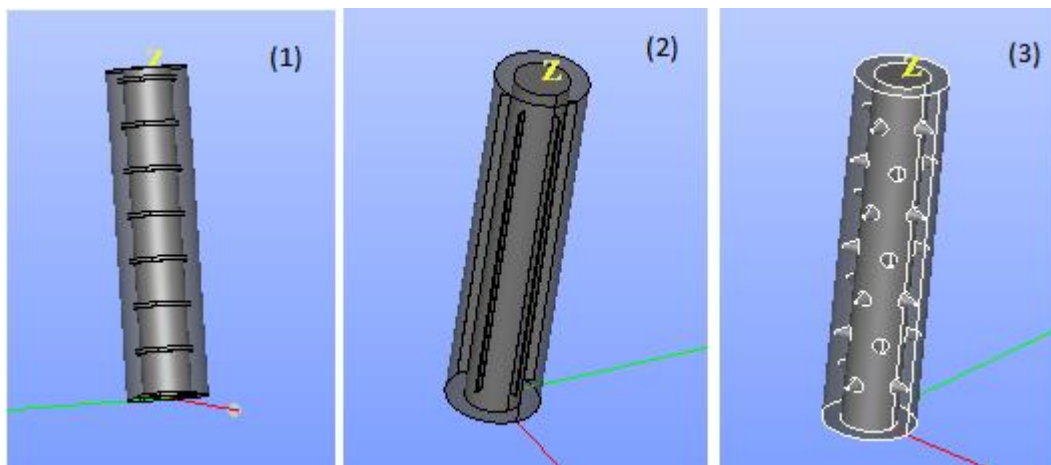


Figura 3 - (1) Geometria Anular, (2) Geometria Plana, (3) Geometria Piniforme
Fonte: Os autores.

Para desenvolvimento da geometria utilizamos a plataforma *geometry* do Salome. Criou-se dois cilindros, com diâmetros diferentes e depois foram desenvolvidas algumas formas no cilindro menor, que são as aletas, em seguida fizemos a fusão das aletas com o cilindro menor e posteriormente o corte da fusão no cilindro maior. Como dimensões utilizadas para os três casos foi raio de 0,5m para o cilindro maior, raio de 0,3 metros para o cilindro menor e comprimento de 4 metros para ambos os cilindros.

Esta é uma etapa muito importante pois podem acontecer erros que durante o desenvolvimento não conseguimos perceber, porém na criação da malha ou na configuração do setup na simulação, esses erros tornam-se evidentes e impossibilitam a continuação do trabalho, devido a isso, simplificações são bem-vindas.

3.3 CRIAÇÃO DA MALHA

A criação da malha no Salome é feita na plataforma de trabalho mesh. Foi gerada uma malha de elementos tetraédricos com mesh de 0,03 milímetros de comprimento máximo para gerar a discretização computacional. Esses elementos tetraédricos são simples de serem criados, porém almejam um número maior de

elementos do que o arranjo hexaédrico, contudo, formam malhas precisas que atendem as necessidades da simulação.

Existem outros softwares para geração da malha, mas por estarmos habituadas com o Salome, ser de fácil compreensão e atender as necessidades optamos por construir a malha no mesmo software.

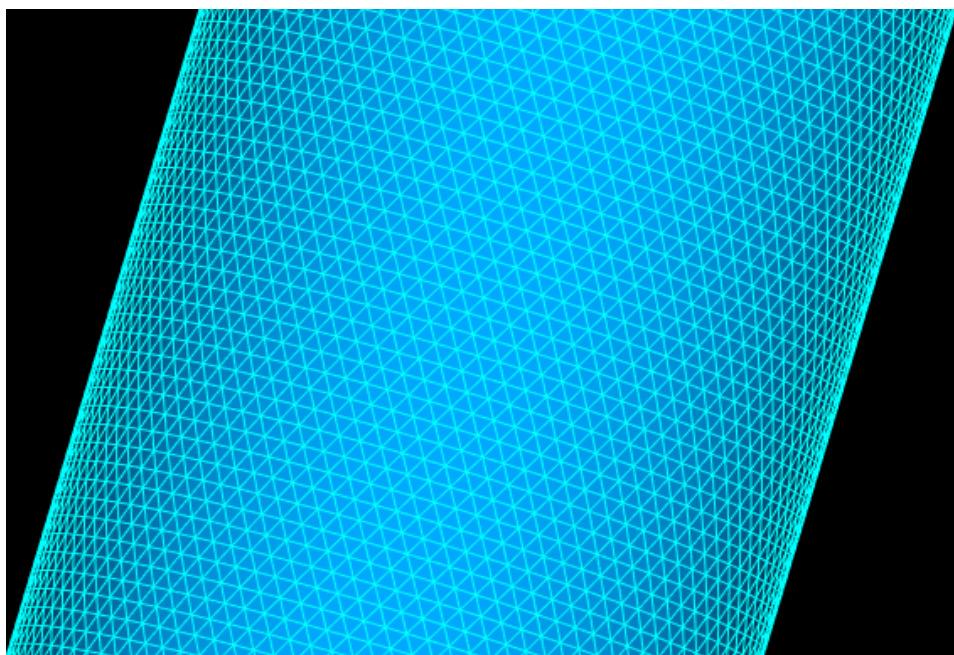


Figura 4 - Exemplo ampliado da malha de um dos trocadores de calor
Fonte: Os autores.

3.4 SIMULAÇÃO COMPUTACIONAL

A simulação foi feita no software Ansys CFX, o qual proporciona uma boa confiabilidade nos resultados e a possibilidade de uma análise do problema fluidodinâmico nos quesitos desejados.

O software CFD abrange uma ampla abordagem dos resultados, sendo uma ferramenta muito desejada devida sua capacidade de analisar e prever sistemas que contem escoamento de fluidos, associado a transferência de calor entre outros fenômenos (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Para iniciar a simulação, é utilizada a plataforma CFX-Pre, para um pré-processamento de dados, é necessário importar as geometrias, introduzir os

parâmetros e definir o problema físico e com o auxílio da interface gráfica, criar os domínios e interfaces para posterior transformação desse problema numa linguagem solver e posteriormente computar os dados.

3.4.1 Ajuste do Setup

Esta é a etapa de definir as condições de contorno, no CFX-Pre, e ajustar as configurações do sistema. Definir as entradas e saídas quente e frias, onde é inserida pressão, temperatura e local de entrada e saída, e também delimitar a parede, constituída pelo casco e por sua vez todas as faces em que não deve haver transferência de calor, condicionadas a situação adiabática. Em seguida criar dois domínios, quente e frio, para delimitar a passagem do fluido quente e o frio.

Ainda na configuração dos domínios, a opção de escolha na transferência de calor e turbulência é a *Thermal Energy*, o qual é indicado para fluidos incompressíveis e fluxo com baixa velocidade. Para a turbulência, utiliza-se o modelo k- ϵ pois foi convencionalizado o melhor modelo para fluidos.

Em seguida iniciamos a simulação e plotagem dos gráficos, para que pudéssemos prosseguir com o Solver.

3.4.2 Obtenção dos resultados

Após definir as condições de operação do trocador de calor, no CFX-Pré e efetivamente começar a simulação, os resultados são obtidos no CFX-Solver, onde acontece a resolução do modelo matemático. Se existe algum erro na simulação, na plataforma CFX-Solver, eles tornam-se evidentes, e muitas vezes trazem pistas de como solucioná-los.

Ao terminar o número necessário de iterações, que pode ser quando for observada uma convergência na solução, a simulação pode ser pausada para iniciar outra etapa, no CFD-Post, nesta plataforma, são inseridas as equações e criados planos de distribuição de pressão e temperatura, os quais tornam os resultados muito visíveis, devida a sua objetividade.

3.5 LOCAL

As simulações serão realizadas no campus da Universidade Tecnológica Federal do Paraná em Ponta Grossa, Paraná, onde existem computadores disponíveis com os softwares necessários licenciados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão apresentados os resultados obtidos ao longo dos estudos desse trabalho, os desenhos criados bem as simulações computacionais.

4.1 ALETAS ANULARES

A figura 5 mostra o trocador de calor com um corte na malha, mostrando o tubo interno aletado e o tubo externo, por onde passará o fluido frio, antes da simulação.

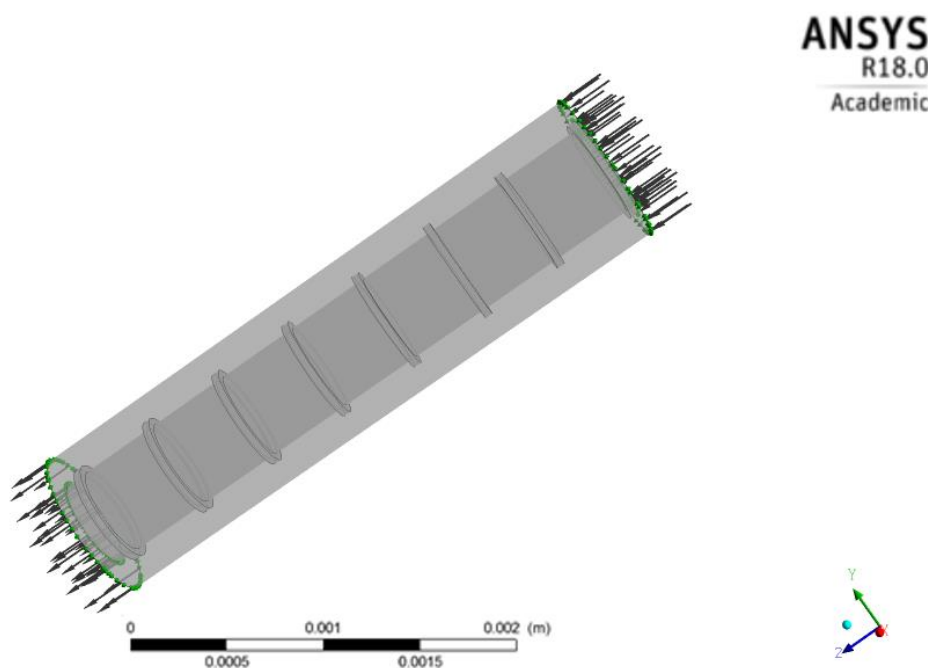


Figura 5 - Corte longitudinal do trocador de calor tubular com aletas anulares

Fonte: Os autores.

Após a execução do programa, foi plotado o gráfico para visualização do perfil de temperatura do domínio frio (fluido externo) e domínio quente (fluido interno).

As figuras 6 e 7 a seguir mostram a variação de temperatura em todo o volume do trocador.

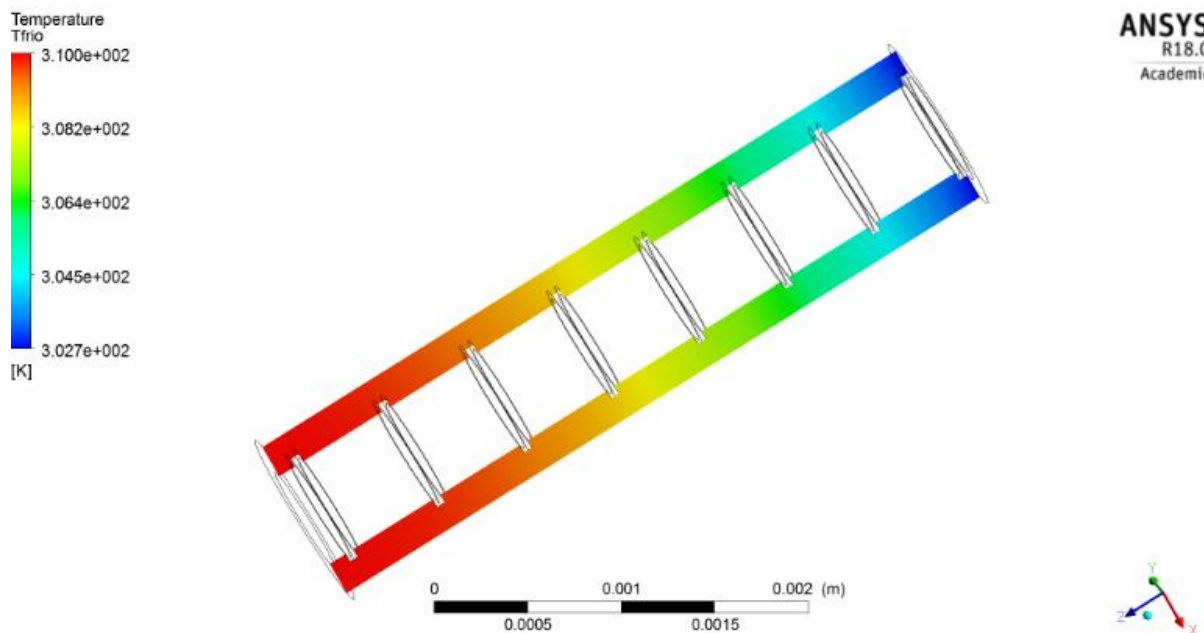


Figura 6 - Perfil de temperatura no domínio frio
Fonte: Os autores.

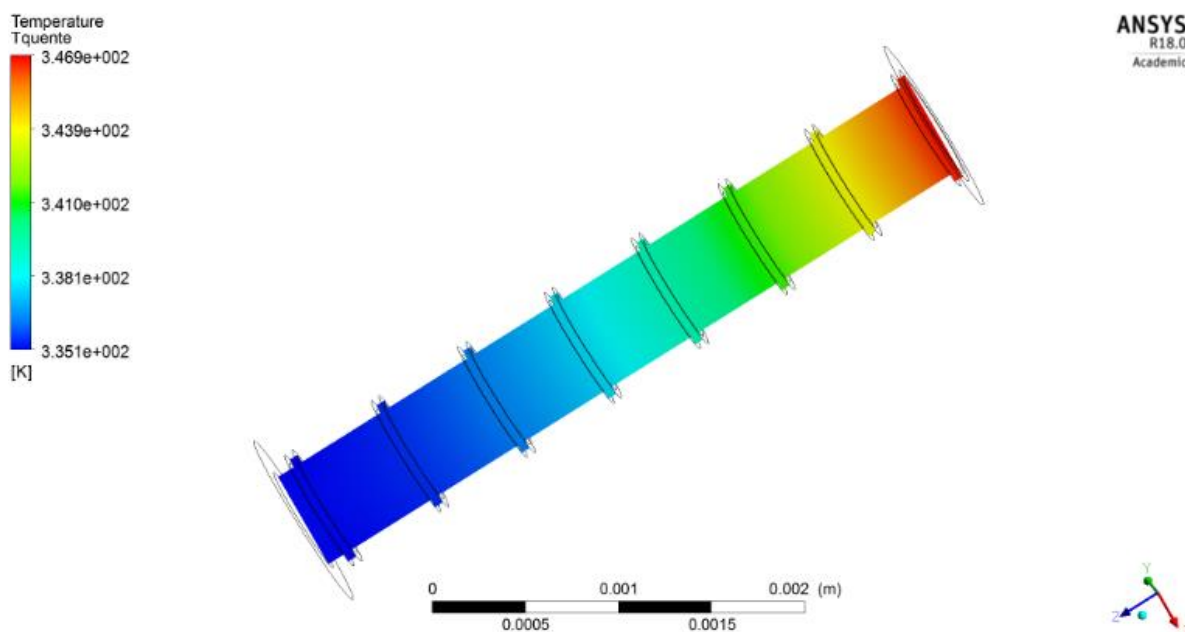


Figura 7 - Perfil de temperatura no domínio quente
Fonte: Os autores.

Após a execução do programa, foi plotado o gráfico para visualização do perfil de pressão do domínio frio (fluido externo) e domínio quente (fluido interno).

As figuras 8 e 9 mostram a variação da pressão em todo o volume do trocador.

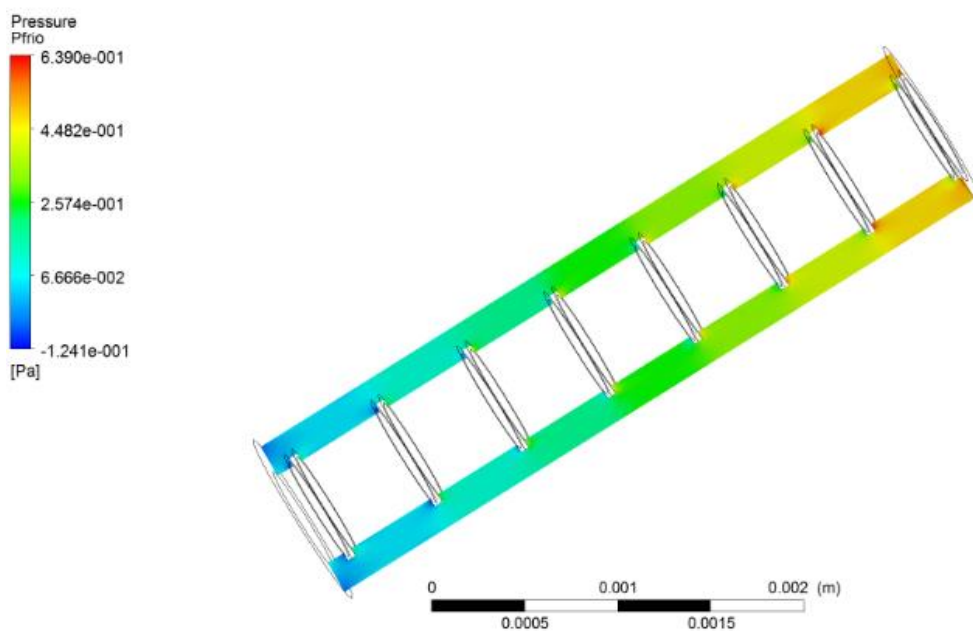


Figura 8 - Perfil da pressão no domínio frio
Fonte: Os autores.

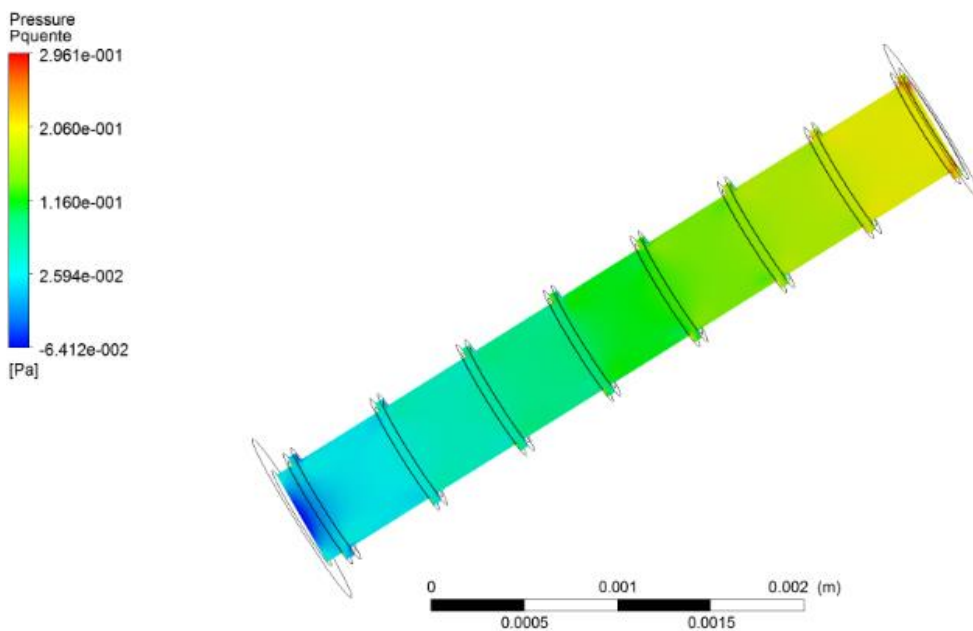


Figura 9 - Perfil da pressão no domínio quente
Fonte: Os autores.

5.2 ALETAS DE PLACAS

A figura 10 mostra o trocador de calor com um corte na malha, mostrando o tubo interno aletado e o tubo externo, por onde passará o fluido frio, antes da simulação.

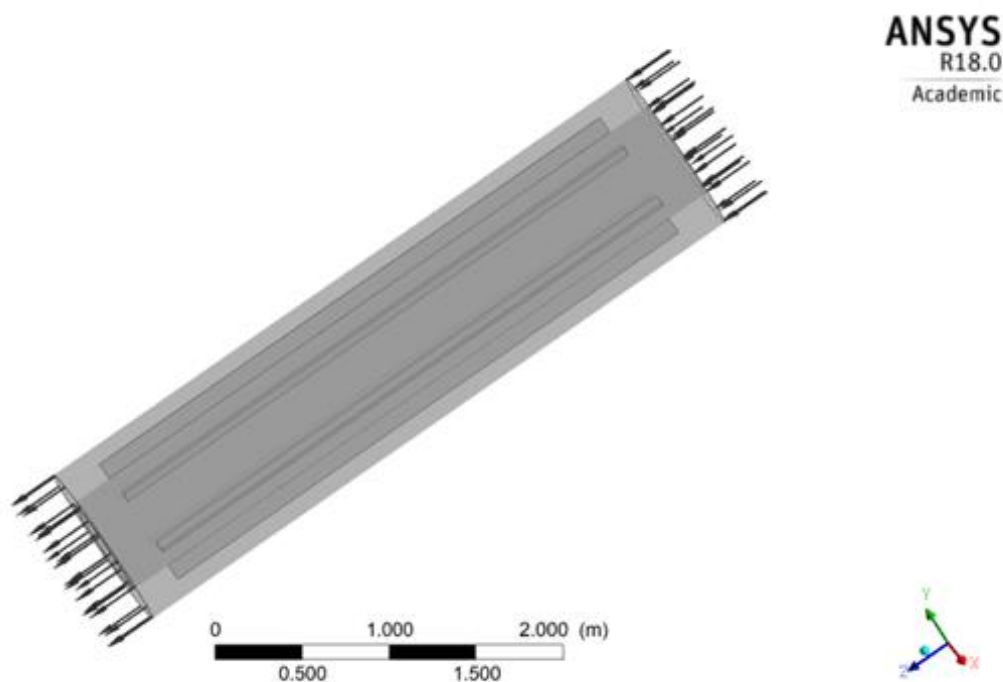


Figura 10 - Corte longitudinal do trocador de calor tubular com aletas de placas

Fonte: Os autores.

Após a execução do programa, foi plotado o gráfico para visualização do perfil de temperatura do domínio frio (fluido externo) e domínio quente (fluido interno).

As figuras 11 e 12 a seguir mostram a variação de temperatura em todo o volume do trocador.

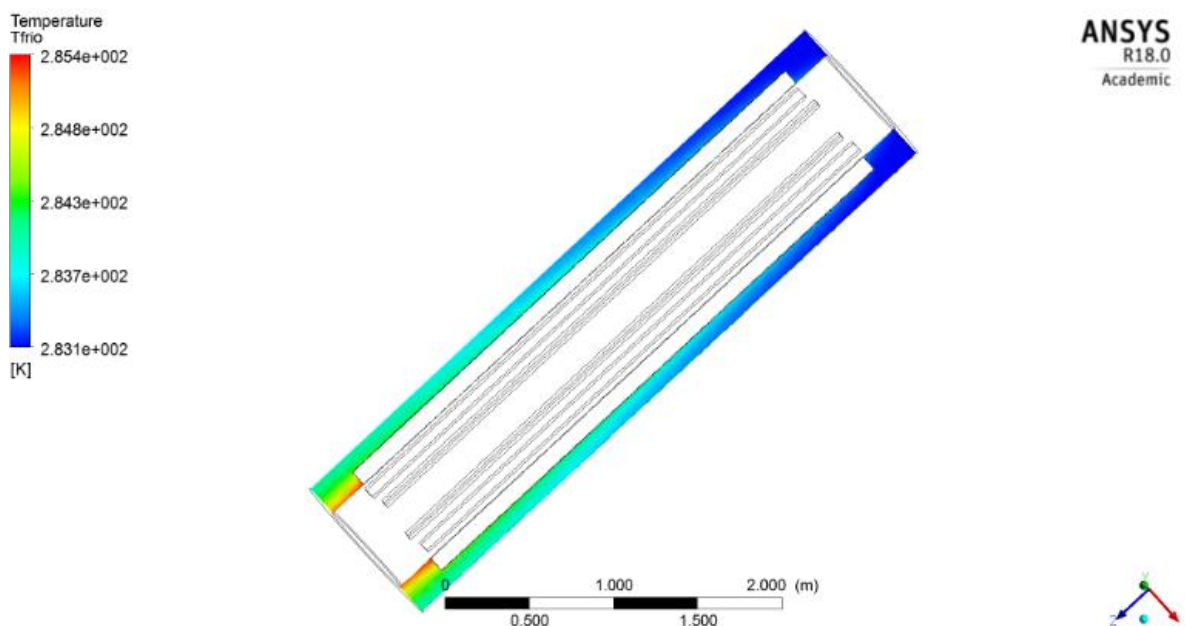


Figura 11 - Perfil de temperatura no domínio frio
Fonte: Os autores.

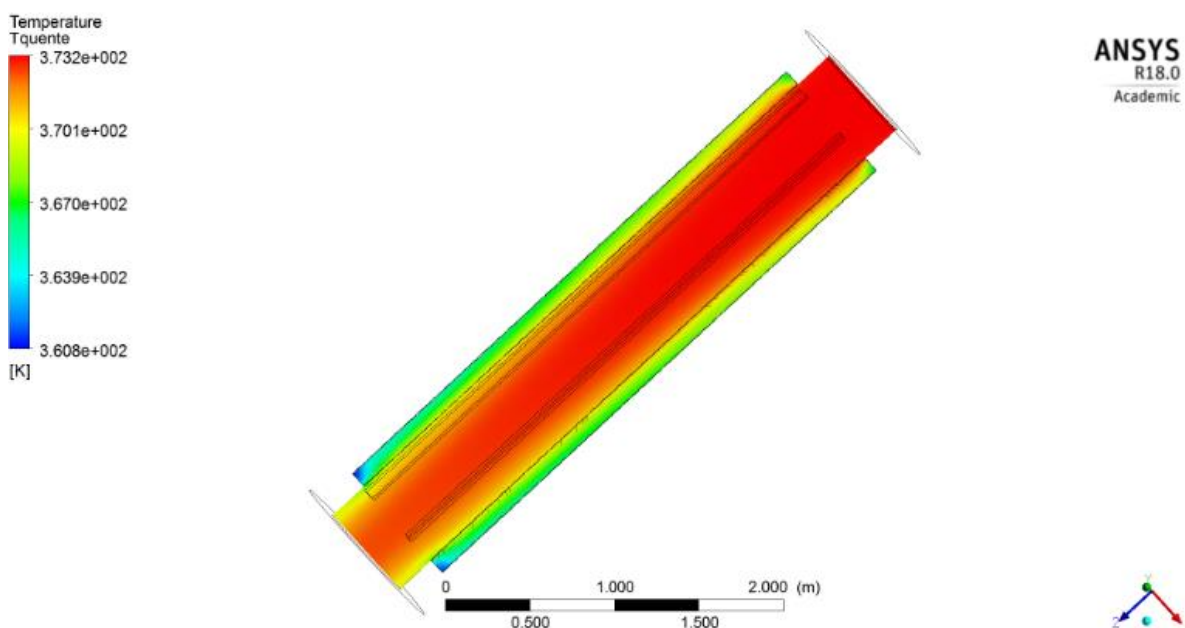


Figura 12 - Perfil de temperatura no domínio quente
Fonte: Os autores.

Após a execução do programa, foi plotado o gráfico para visualização do perfil de pressão do domínio frio (fluido externo) e domínio quente (fluido interno).

As figuras 13 e 14 a seguir mostram a variação da pressão em todo o volume do trocador.

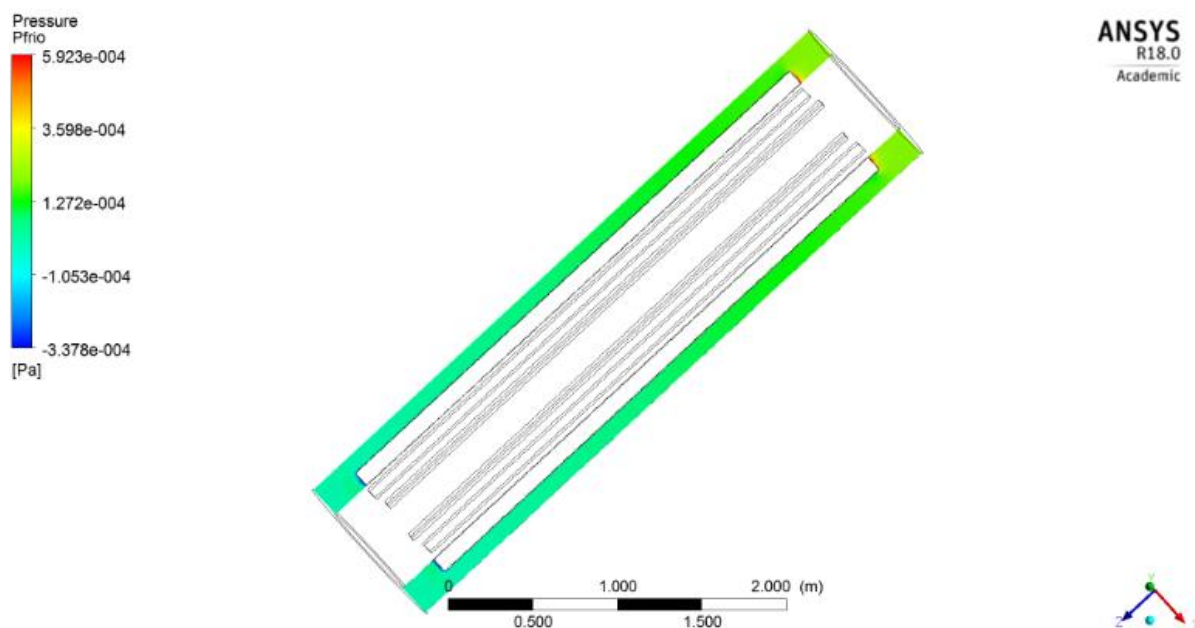


Figura 13 - Perfil da pressão no domínio frio
Fonte: Os autores.

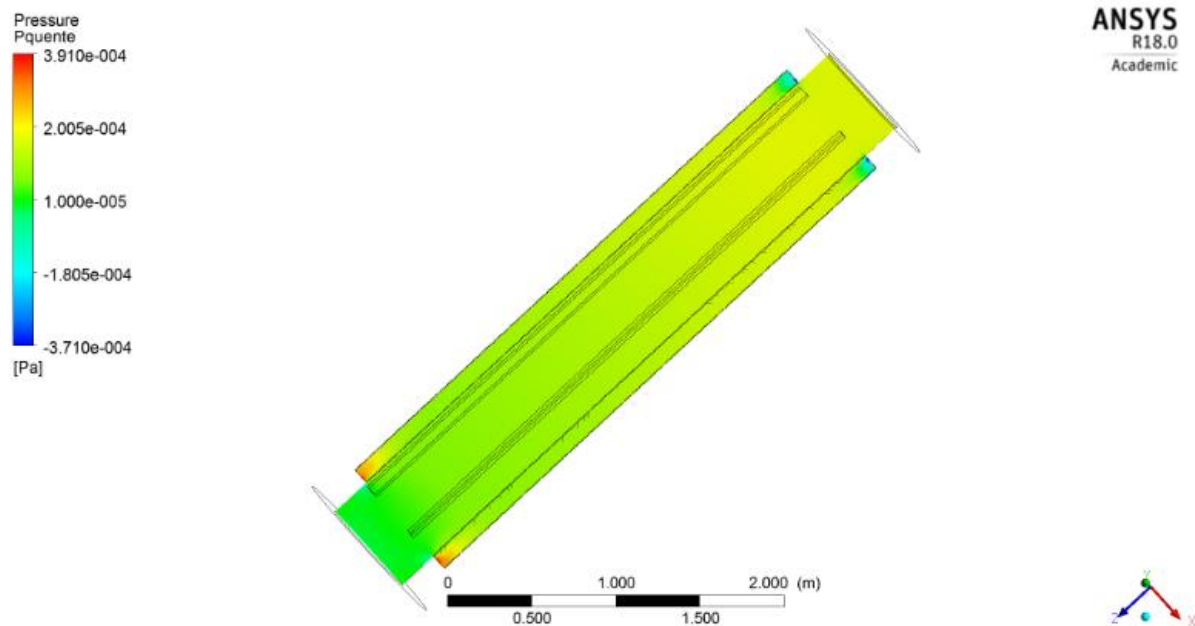


Figura 14 - Perfil da pressão no domínio quente
Fonte: Os autores.

5.3 ALETAS CÔNICAS OU PINIFORMES

A figura 15 mostra o trocador de calor com um corte na malha, mostrando o tubo interno aletado e o tubo externo, por onde passará o fluido frio, antes da simulação.

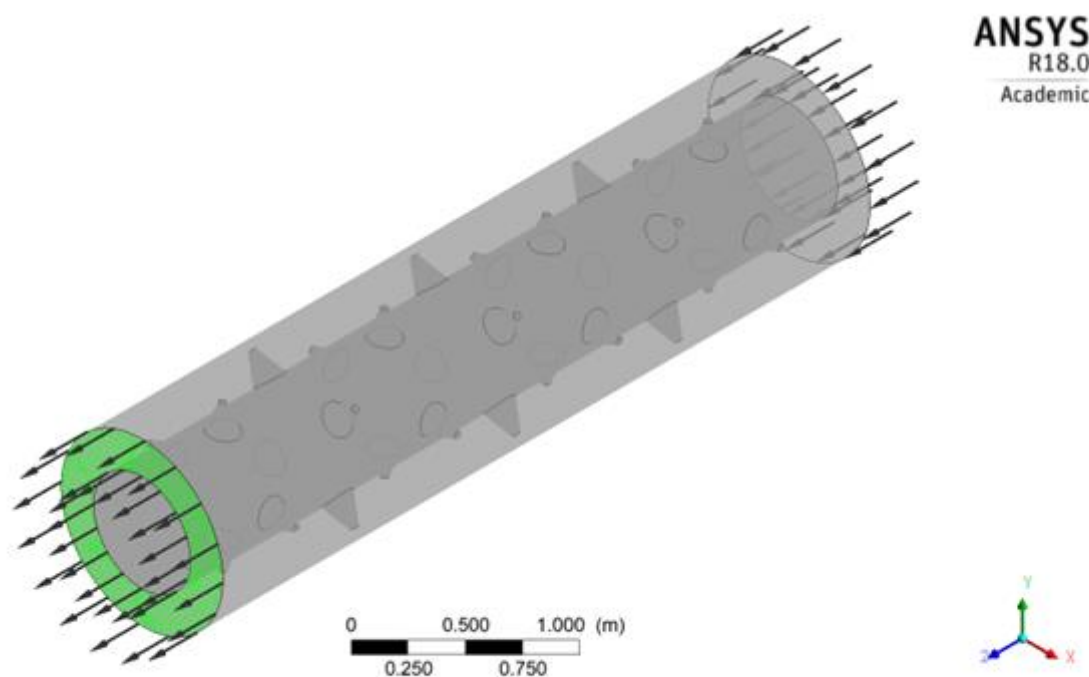


Figura 15 - Corte longitudinal do trocador de calor tubular com aletas cônicas

Fonte: Os autores.

Após a execução do programa, foi plotado o gráfico para visualização do perfil de temperatura do domínio frio (fluido externo) e domínio quente (fluido interno).

As figuras 16 e 17 a seguir mostram a variação de temperatura em todo o volume do trocador.

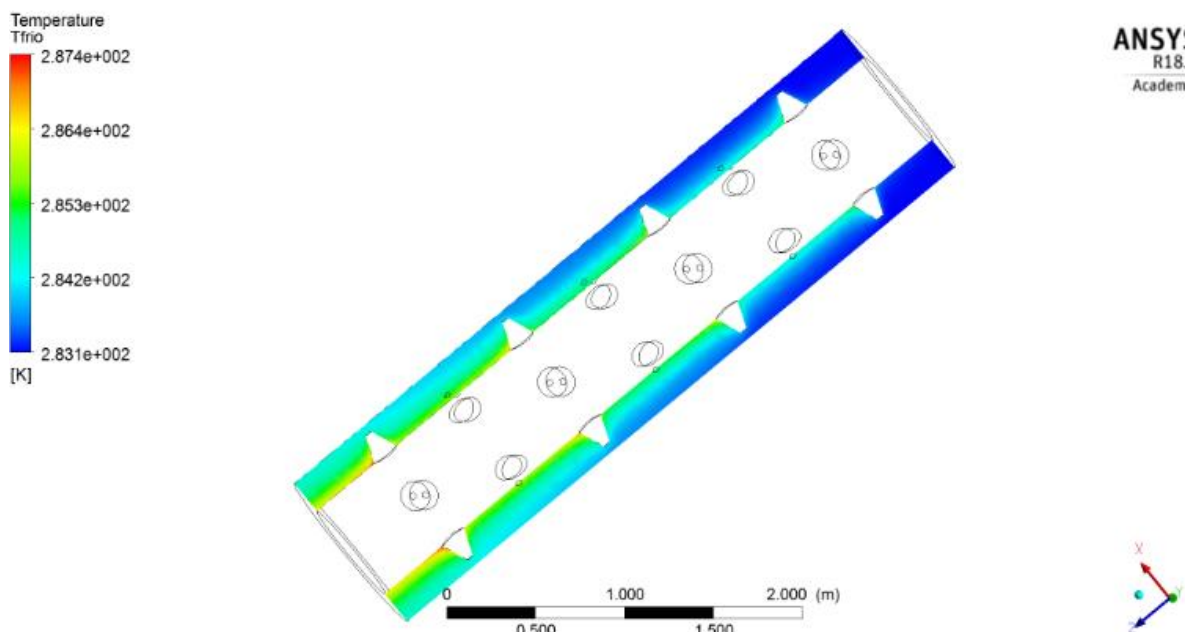


Figura 16 - Perfil de temperatura no domínio frio
Fonte: Os autores.

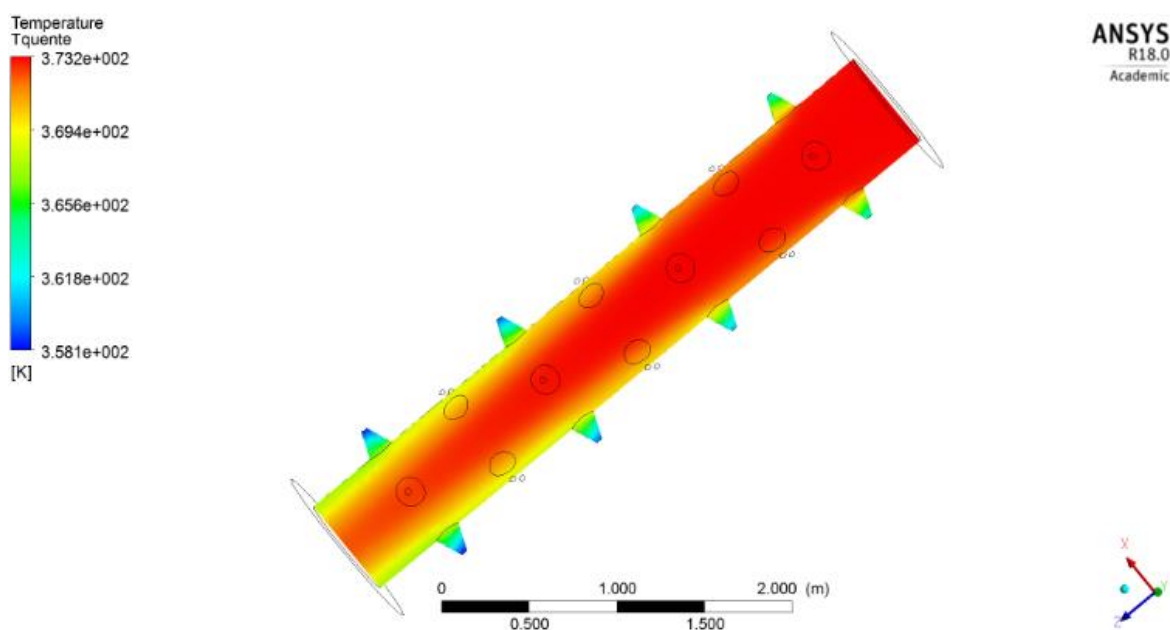


Figura 17 - Perfil de temperatura no domínio quente
Fonte: Os autores.

Após a execução do programa, foi plotado o gráfico para visualização do perfil de pressão do domínio frio (fluido externo) e domínio quente (fluido interno).

As figuras 18 e 19 a seguir mostram a variação da pressão em todo o volume do trocador.

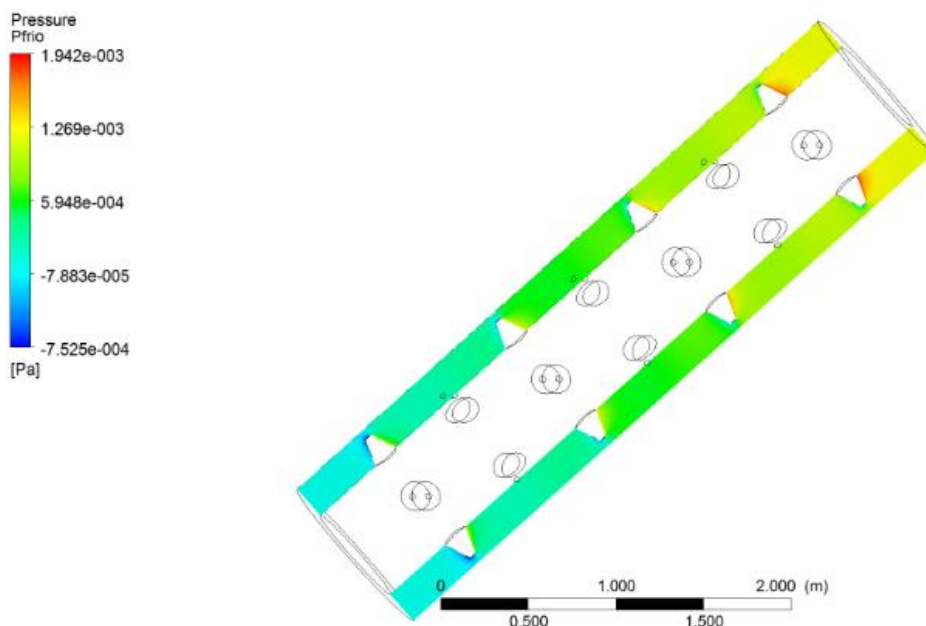


Figura 18 - Perfil da pressão no domínio frio
Fonte: Os autores.

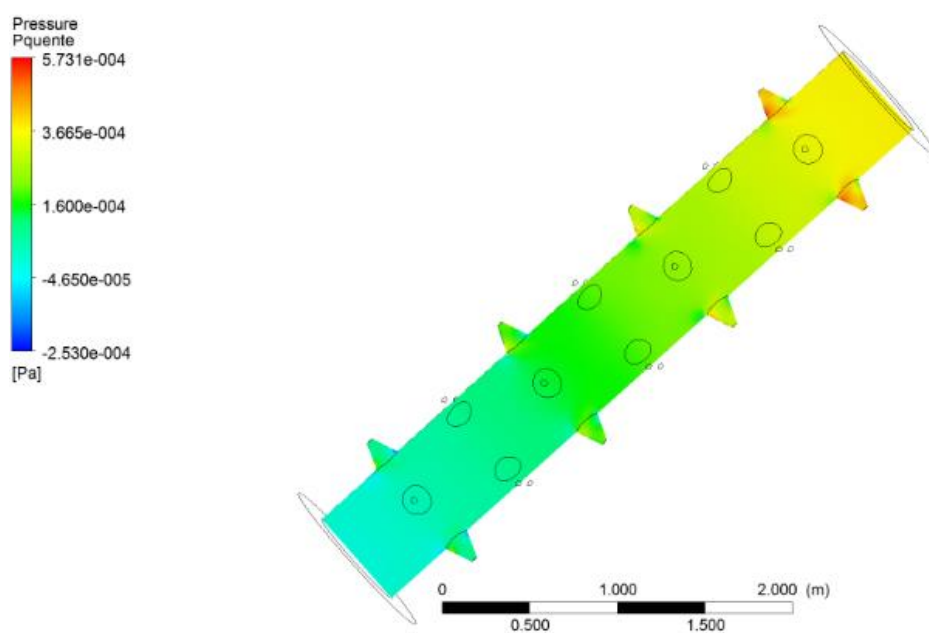


Figura 19 - Perfil da pressão no domínio quente
Fonte: Os autores.

5.4 ANÁLISE COMPARATIVA

Utilizando o software Salomé se pode obter o volume e a área de troca térmica de cada trocador de calor, como mostram as figuras a seguir, para os três tipos de geometrias. A área de troca térmica foi obtida utilizando a área do sólido

com aletas subtraindo das áreas da entrada e saída do fluido quente.

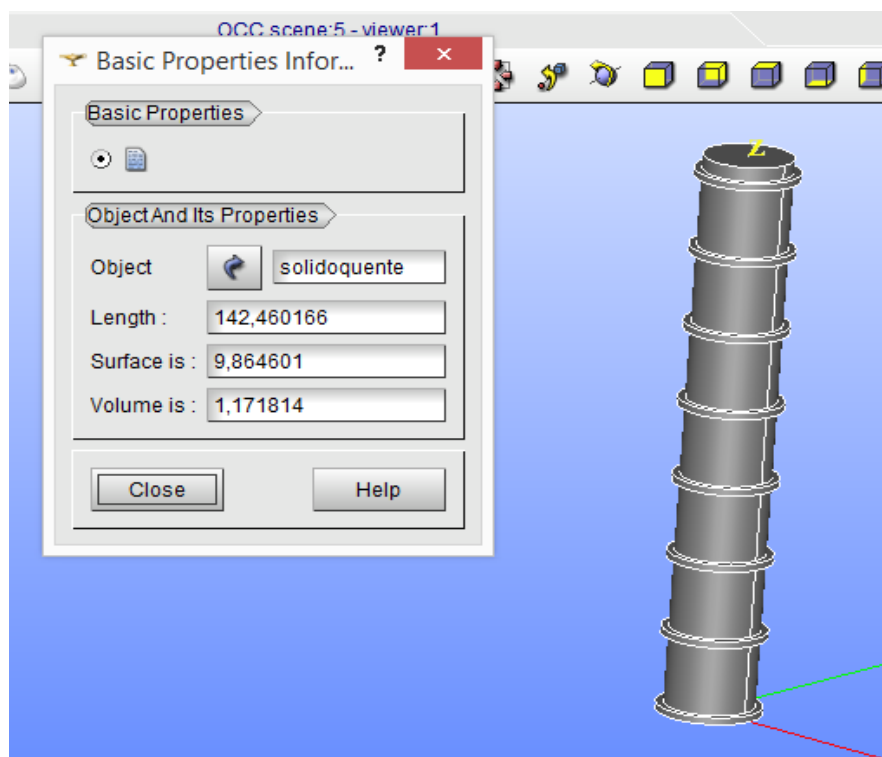


Figura 20 - Volume e área do trocador com aletas anulares
Fonte: Os autores.

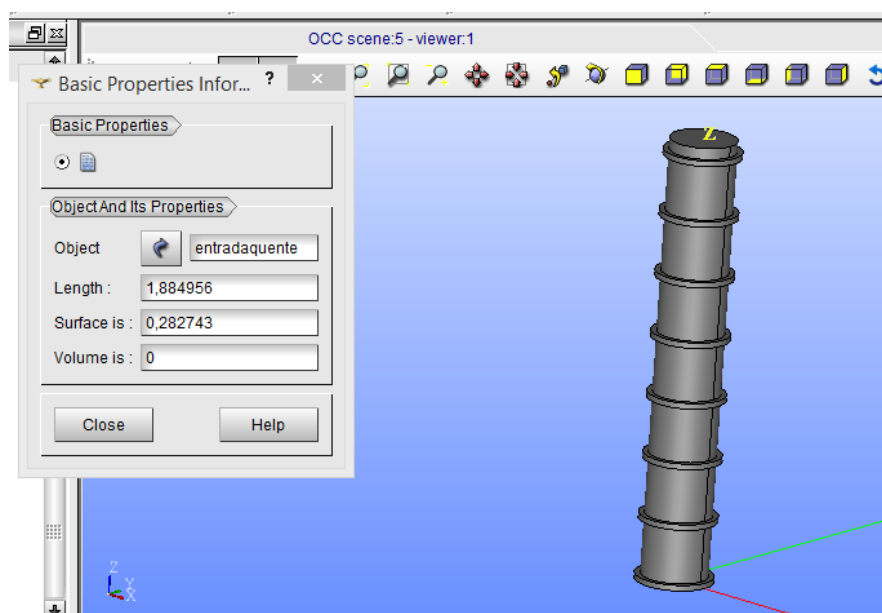


Figura 21 - Área de entrada e saída do sólido quente do trocador com aletas anulares
Fonte: Os autores.

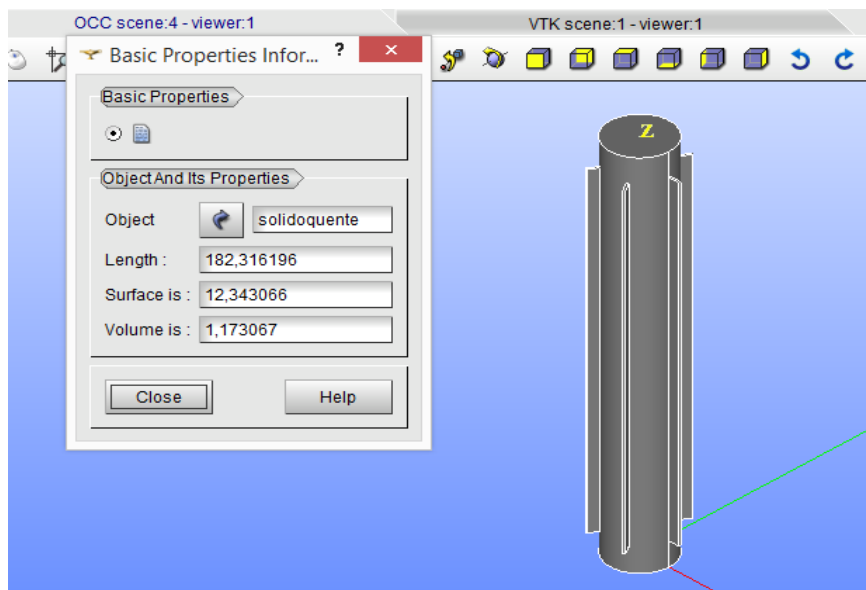


Figura 22 - Volume e área do trocador de aletas com placas

Fonte: Os autores.

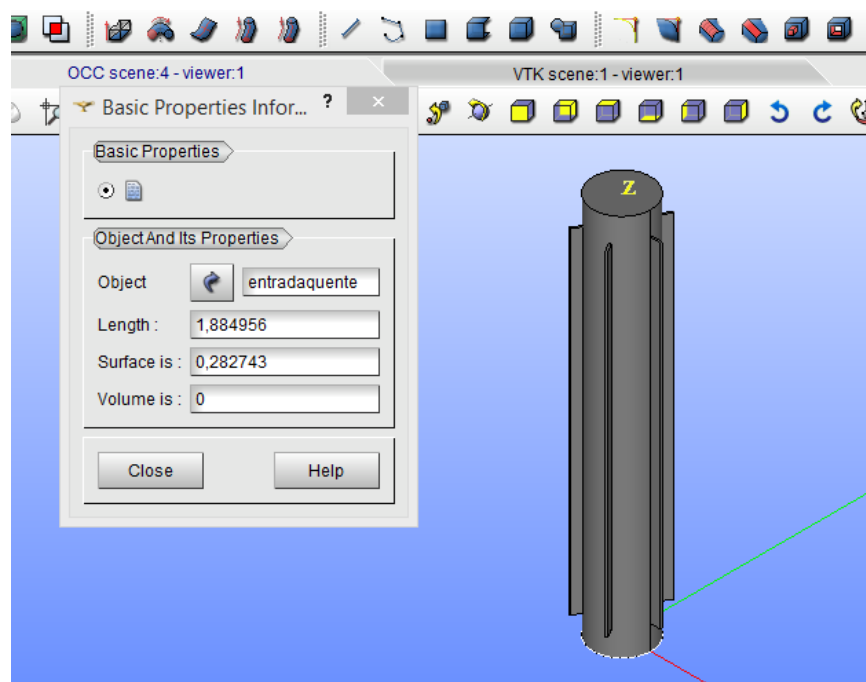


Figura 23 - Área de entrada e saída do sólido quente do trocador de aletas com placas

Fonte: Os autores.

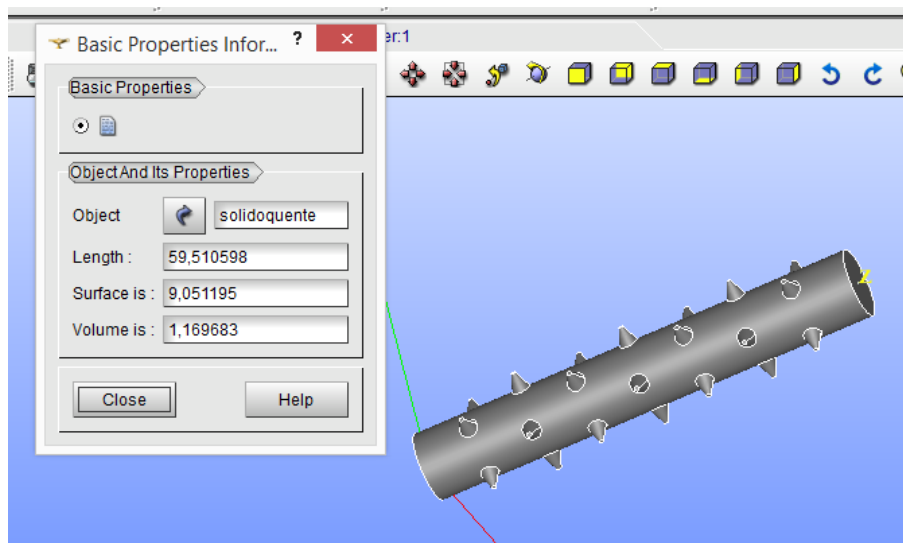


Figura 24 – Volume e área do trocador de aletas cônicas
Fonte: Os autores.

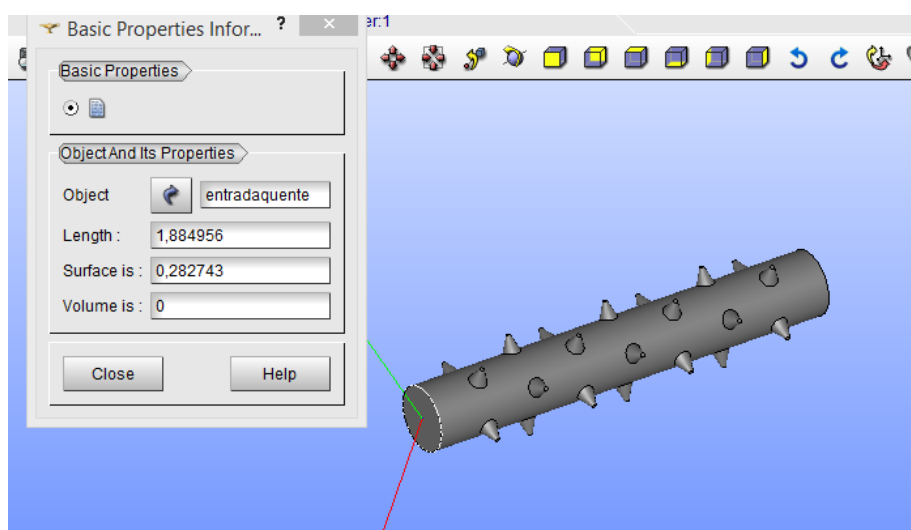


Figura 25 - Área de entrada e saída do sólido quente do trocador de aletas com placas
Fonte: Os autores.

Com os dados de volume, área de troca térmica das Figuras 20, 21, 22, 23, 24 e 25 e a diferença de temperatura e de pressão nos planos entre a entrada e saída do escoamento de cada um dos trocadores de calor simulados, tanto para fluido quente quanto frio, efetuada através da ferramenta *Expressions* no software CFX-Post, foi possível obter os dados da Tabela 1 a seguir.

Com os dados pode se obter a taxa de transferência de calor e a perda de carga em cada um dos trocadores de calor estudados.

A taxa de transferência de calor foi calculada através da Equação a seguir.

$$\dot{Q} = \dot{m} \cdot c_p \cdot \Delta T \quad (1)$$

Sendo,

\dot{m} : vazão mássica da água que entra no escoamento, calculada a partir do produto entre a massa específica da água (999,7026 kg/m³, para o fluido frio e 958,4 kg/m³, para o fluido quente), a velocidade de entrada (0,001 m/s) e área do plano de entrada do escoamento.

$C_{p\text{água}}$: Calor específico água ($C_{p\text{água}} = 4,18$ kJ/kg.K).

A perda de carga (h_L) pode ser obtida pela variação da pressão (ΔP), dos fluidos quente e frio, dividida pelo produto entre a densidade (ρ) (999,7026 kg/m³, para o fluido frio e 958,4 kg/m³, para o fluido quente) e gravidade (g) (9,80665 m/s²).

$$h_L = \frac{\Delta P}{\rho g} \quad (2)$$

Os valores obtidos podem ser observados na Tabela 1.

Tabela 1 – Comparação de dados

Tipo de Aleta		Área de Troca Térmica (m ²)	Volume (m ³)	Diferença de Temperatura (K)	Troca Térmica (W)	Diferença de Pressão (Pa)	Perda de Carga
Trocador de Calor com aletas anulares	Dominio Quente	9,2991	1,1718	11,6747	434,9211	0,2264	2,4085E-05
	Dominio Frio			7,2590	282,0768	0,5170	5,2731E-05
Trocador de Calor com aletas placas	Dominio Quente	11,7776	1,1731	1,9897	93,8763	0,0002	1,8374E-08
	Dominio Frio			1,0866	53,4782	0,0002	2,0854E-08
Trocador de Calor com aletas cônicas	Dominio Quente	8,4857	1,1697	3,3095	112,5058	0,0004	3,9784E-08
	Dominio Frio			1,7963	63,6963	0,0012	1,2218E-07

Fonte: Os autores.

Analisando os dados da Tabela 1 é possível notar que a partir da construção das geometrias, o trocador com as aletas anulares foi o com maior troca térmica e maior perda de carga. O trocador de calor com aletas cônicas teve a segunda maior troca térmica e perda de carga. Isso ocorreu devido à turbulência gerada por elas no escoamento e pela área de troca térmica de cada geometria. O volume dos tres trocadores de calor foi mantido próximo, por ser uma variável importante quando se trata de valor, pois quanto maior a quantidade do material utilizado para construção dos trocadores de calor, maior será o valor do mesmos.

Apesar do trocador de calor com aletas do tipo placas ter a maior área de troca térmica, apresentaram a menor troca térmica.

Analisando os resultados, devem ser levados em consideração para a escolha do trocador que cumpra o melhor desempenho com o menor custo, as condições de projeto e de operação do processo.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho se mostrou importante, pois os trocadores de calor são equipamentos de grande utilização nas indústrias. Tendo como ponto muito importante as suas geometrias para melhor eficiência, procurando sempre o menor custo de funcionamento e fabricação.

Pode se concluir que as diferentes geometrias realizadas neste trabalho podem ser usadas, a decisão de qual será a melhor opção para o processo ao qual se destinará deverá levar em consideração os custos e as variáveis de perda de carga e transferência de calor que cada tipo terá.

REFERÊNCIAS

ANSYS. **Fluids - Computational Fluid Dynamics**. Disponível em: <<https://www.ansys.com/products/fluids>> Acesso em 28 mai. 2018.

BRUNETTI, F., **Mecânica dos Fluidos**. 2º Edição, Pearson Prentice Hall, 2008.

CHANG, Yu-juei; WANG, Chi-chuan. A generalized heat transfer correlation for louver fin geometry. International Journal Of Heat And Mass Transfer. Great Britain, p. 533-544. jan. 1997. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0017931096001160>>. Acesso em: 29 mai. 2018.

FOX, W. Robert; MCDONALD, T. Alen; PRITCHARD, J. Philip, **Introdução a Mecânica dos fluidos**. 8º Edição, LTC, 2014.

INCROPERA, Frank P.; DEWITT, P. David; BERGMAN, L. Theodore; LAVINE, S. Adrienne. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6º Edição, Rio de Janeiro: Ltc, 2008.

LACERDA, F. R.; et al. Ambiente didático para ensino, modelagem e simulação da transferência de calor em sistemas com a utilização de aletas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE EDUCAÇÃO EM ENGENHARIA. 2003, Niterói. **Anais...** Niterói: UFF, 2003. p. 2.

MOREIRA, José R. Simões. **Processos de transferência de calor**. 2016. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/aalexavares/aulas-1-11conduo>>. Acesso em: 17 mai. 2018.

PLATAFORMA SALOME, 2005 – 2018. Disponível em:< <https://www.salome-platform.org/>> Acesso em 17 mai. 2018.

VERSTEEG, H. K.; MALALASEKERA, W. **An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method**. 2. Ed. England: pearson education limited, 2007.

ÇENGEL, Yunus A.; CIMBALA, John M. **Mecânica dos Fluidos: fundamentos e aplicações**. 1º Edição, ABDR, 2007.

ÇENGEL, Yunus A.; GHAJAR, Afshin J. **Transferência de calor e massa: uma abordagem prática**. 4º Edição, AMGH, 2012.

OZISIK, M.NECATI. **Heat Transfer - A Basic Approach**. New York: McGraw-Hill, 1985.