



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

YAGO DE MIRANDA AGUIAR

**Estudo para determinação de trocador de calor casco tubo e aplicação de
metodologia de análise simulacional**

Recife

2018

YAGO DE MIRANDA AGUIAR

**Estudo para determinação de trocador de calor casco tubo e aplicação de
metodologia de análise simulacional**

Recife
2018

YAGO DE MIRANDA AGUIAR

Estudo para determinação de trocador de calor casco tubo e aplicação de metodologia de análise simulacional

Projeto de Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Universidade Federal de Pernambuco como requisito para a obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Adson Beserra da Silva

Recife
2018

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

A283e Aguiar, Yago de Miranda.
 Estudo para determinação de trocador de calor casco tubo e
Aplicação de metodologia de análise simulacional/ Yago de Miranda
Aguiar - 2018.
 55folhas, Il.; Tabs.

 Orientador: Prof. Dr. Adson Beserra da Silva.

 TCC (Graduação) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Curso de Graduação de Engenharia Mecânica, 2018.
 Inclui Referências e Anexos.

 1. Engenharia Mecânica. 2. Trocador de calor. 3. Análise da Norma.
4. Simulação. 5. Metodologia. I. Silva, Adson Beserra da.(Orientador).
II. Título.

UFPE

621 CDD (22. ed.)

BCTG/2017-465



Universidade Federal de Pernambuco Departamento de
Engenharia Mecânica
Centro de Tecnologia e Geociências- CTG/EEP



ATA DE SESSÃO DE DEFESA DE
TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO - TCC2

Aos cinco dias do mês dezembro do ano de dois mil e dezoito, às 10:00, no bloco de salas de aula do Centro de Tecnologia e Geociências da UFPE, reuniu-se a banca examinadora para a sessão pública de defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Pernambuco, intitulado: **ESTUDO PARA DETERMINAÇÃO DE TROCADOR DE CALOR CASCO TUBO E APLICAÇÃO DE METODOLOGIA DE ANÁLISE SIMULACIONAL**, elaborado pelo aluno **Yago de Miranda Aguiar**, matrícula 081.145.564-55, composta pelo Prof. **Adson Beserra da Silva** (Orientador), Prof. **Marcus Costa de Araújo** (examinador 1) e Prof. **Francisco Espedito de Lima** (examinador 2). Após a exposição oral, o candidato foi argüido pelos componentes da banca que em seguida reuniram-se reservadamente, e deliberaram pela Aprovado (aprovação / reprovação) do candidato no Trabalho de Conclusão do Curso de Engenharia Mecânica da UFPE, atribuindo-lhe à monografia a média 7,0 (Sete). Para constar, redigi a presente ata, aprovada por todos os presentes, que vai assinada por mim e pelos demais membros da banca.

Orientador: Prof. **Adson Beserra da Silva** - DEMEC/UFPE Nota: _____

Assinatura: _____

Examinador 1: Prof. **Marcus Costa de Araújo** - DEMEC/UFPE Nota: _____

Assinatura: _____

Examinador 2: Prof. **Francisco Espedito de Lima** - DEMEC/UFPE Nota: _____

Assinatura: _____

Recife, 07e de Dezembro de 2018

José Maria A. Barbosa
Coordenador de Trabalho de Conclusão de Curso – TCC2
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica – CTG/EEP-UFPE

*Este trabalho é dedicado às pessoas que persistem em alcançar seus resultados,
mesmo que o caminho pareça impossível.*

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a minha família pelas oportunidades, suporte e apoio que me deram nessa caminhada. Ao meu orientador Prof. Msc. Adson Beserra da Silva por todo direcionamento e conhecimento compartilhado na elaboração deste trabalho. E por fim, a todos que estão comigo no dia a dia e de alguma forma me ajudaram a chegar até aqui.

RESUMO

O presente trabalho tem como objetivo determinar um trocador de calor do tipo casco tubo em contra corrente e contato indireto. Na determinação são apresentadas diversas informações gerais teóricas acerca do mesmo. Aliado a essas informações foi usada a norma TEMA para com as equações térmicas nela disponíveis, bem como a os limites de construção de cada parte do trocador facilitasse a construção do modelo. A construção de um código na linguagem de MATLAB, que fornece diretamente informações de saída de um trocador casco e tubo com um número livre de iterações a partir de dados de entrada, foi realizado para dar liberdade de teste de valores para uma melhor modelagem. Em seguida, munido das informações conseguidas com a teoria e código, é criado um modelo em 3 dimensões do trocador, que é usado para simulações computacionais. A simulação térmica é feita com seu passo a passo em um cenário aproximado ao da realidade que visa fixar a metodologia de análise.

Palavras-chave: Trocador de calor. Análise da Norma . Simulação. Metodologia.

ABSTRACT

The current project aims to determine a heat exchanger of the shell and tube type. In the determination are presented general theoretical information about it. Allied to this information was used TEMA standard with the finality of use the disponible thermal equations of the standard, as well as the limits of construtction of each parte of the heat exchanger for the otymize the construction of a model. A code in the MATLAB language, which directly provides output information of a shell and tube heat exchanger with a number of iterations from input data was made to give freedom of test many values for the construction of the model. Then, provided with the information obtained with the theory and code, a three dimensional model of the exchanger is created, to be used in the simulation in Ansys. The thermal simulation is done with its step by step in a scenario close to the reality that aims to fix the methodology of analysis.

Keywords: Heat Exchanger. Analysis of the Standard . Simulation. Metodology.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Escoamento em contra-corrente.	17
Figura 2 – Escoamento cruzado.	18
Figura 3 – Escoamento em multi passe.	19
Figura 4 – Transferência direta.	19
Figura 5 – Trocador de calor casco e tubo.	20
Figura 6 – Principais partes do trocador casco e tubo.	21
Figura 7 – Todas as partes do trocador de calor.	22
Figura 8 – Preme gaxeta.	23
Figura 9 – Incrustação.....	27
Figura 10 – Exemplo da nomenclatura.....	28
Figura 11 – Nomenclatura.....	29
Figura 12 – Tolerância da Norma	30
Figura 13 – Fluxograma.....	31
Figura 14 – Condições iniciais.	34
Figura 15 – Tabela diâmetro tubo retirada da norma TEMA.	36
Figura 16 – Tabela diâmetro casco.	36
Figura 17 – Padrao Tubo.....	36
Figura 18 – Tabela diâmetro tubo retirada da norma TEMA.	36
Figura 19 – Tabela diâmetro casco.	38
Figura 20 – Print da tela do código.	38
Figura 21 – Modelagem.	39
Figura 22 – Modelagem Interna.....	39
Figura 23 – Modelagem Interna com zoom.....	40
Figura 24 – Página Inicial Setup.....	43
Figura 25 – Página de geração de malha.	44
Figura 26 – Malha Gerada.....	49
Figura 27 – Segmento da malha.	49
Figura 28 – Gráfico de resíduos	50
Figura 29 – Simulação Temperatura.....	51
Figura 30 – Simulação Temperatura.....	51
Figura 31 – Simulação Pressão.....	51

Lista de tabelas

Tabela 1 – Fórmulas Térmicas	33
Tabela 2 – Parâmetros iniciais	34
Tabela 3 – Valores da geometria	35
Tabela 4 – Informações da Malha gerada	42
Tabela 5 – Resultados do código parte 1.	47
Tabela 6 – Resultados do código parte 2.	48
Tabela 7 – Medidas do modelo reduzido.....	48

Sumário

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL.....	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	TROCADORES DE CALOR.....	17
3.1	DEFINIÇÃO	17
3.2	CLASSIFICAÇÃO DE TROCADORES DE CALOR.....	17
3.2.1	De acordo com disposição de escoamento.....	17
3.2.2	De acordo com processo de transferência.....	18
3.2.3	De acordo com o tipo de construção	20
3.3	CONSTITUIÇÃO, CONSTRUÇÃO E OPERAÇÃO	21
3.3.1	Constituição	21
3.3.1.1	Aletas	22
3.3.2	Construção	23
3.3.2.1	Soldagem nas extremidades	23
3.3.2.2	Instalação	23
3.3.3	Entrada em operação	24
3.4	MATERIAIS DE CONSTRUÇÃO	24
3.5	APLICAÇÃO E MANUTENÇÃO	25
3.5.1	Aplicação	25
3.5.1.1	Caldeiras	26
3.5.1.2	Evaporadores	26
3.5.1.3	Recuperadores de calor	26
3.5.2	Manutenção	26
3.5.2.1	Incrustação	27
3.6	NORMA REGULAMENTADORA.....	28
3.6.1	Nomenclatura	28
3.6.2	Tolerâncias de fabricação	29
3.6.2.1	Dimensões externas, bocal e locais de suporte	29
3.6.3	Instalação, Operação e Manutenção	30
3.6.4	Padrões mecânicos classes R C B.....	30
3.7	FLUXOGRAMA DE FORMULAÇÃO	30
3.7.1	Fórmulas usadas no fluxograma	31
3.7.1.1	LMTD	31

3.7.1.2	Fator de correção	31
3.7.1.3	Coeficiente de transferência de calor	32
3.7.2	Área aproximada.....	32
3.7.3	Fórmulas Térmicas	32
4	MATERIAIS E MÉTODOS	34
4.1	PARÂMETROS INICIAIS.....	34
4.2	MATERIAIS E GEOMETRIA DO TROCADOR	35
4.2.1	Material	35
4.2.2	Geometria	35
4.2.2.1	Distribuição.....	36
4.3	CODIFICAÇÃO NO MATLAB	36
4.4	MODELAGEM	39
4.4.1	Tubos	40
4.4.2	Casco	40
4.4.3	Bocais	40
4.4.4	Espelho.....	40
4.4.5	Base	41
4.5	EQUIPAMENTOS E ACESSÓRIOS.....	41
4.6	METODOLOGIA PARA SIMULAÇÃO	42
4.6.1	Malha.....	42
4.6.1.1	Modelo Reduzido.....	42
4.6.2	Setup.....	42
4.6.2.1	Outputs e Inputs na malha.....	43
4.6.2.2	General e Models	43
4.6.2.3	Materials e Cell Zone	44
4.6.2.4	Condições de Contorno.....	44
4.6.2.5	Initialization e Run Calculation	45
5	RESULTADOS	46
5.1	RESULTADOS DO CÓDIGO	46
5.2	RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES	48
5.2.1	Modelo 3D.....	48
5.2.2	Malhas.....	49
5.2.3	Análise de Escoamento.....	49
5.2.4	Análise Térmica	50
6	CONCLUSÃO	53
	REFERÊNCIAS.....	54

1 Introdução

No atual mundo competitivo tanto as grandes empresas, como também as de menor porte, necessitam buscar sempre a maior eficiência e otimização no uso de seus dispositivos para obtenção de maximização do processo.

Um dispositivo que está em quase todas as indústrias de processamento é o trocador de calor, e por ele ser de grande importância no alcance da melhor eficiência de uma planta industrial e haver na engenharia diversas ferramentas de auxílio para sua definição, se faz necessário entendê-lo nos seus aspectos gerais e saber quais e como aplicar essas ferramentas.

O procedimento de determinação é orientado para o cenário específico, no caso o estudado foi a indústria açucareira. Foram buscado parâmetros iniciais para os fluidos frio e quente, caldo de cana e vapor d'água respectivamente, para que se fizesse a determinação deste equipamento. A importância no uso desses parâmetros neste tipo de indústria é fundamental na análise do equipamento.

A fim de tornar os usos dessas ferramentas mais entendíveis e junto a isso ter-se informações gerais dos trocadores de calor, será feita uma análise simulacional para o cenário mencionado, seguindo o passo a passo do tipo de trocador de calor de maior uso industrial, o casco tubo em contra corrente de contato indireto. Nesse passo a passo foi abordado o uso de ferramentas computacionais difundidas na engenharia, softwares de modelagem, de análise e codificador: SpaceClaim, Ansys e MATLAB.

Ao final do estudo, informações gerais do trocador de calor serão passadas para o reforço do conhecimento teórico, bem como o uso das ferramentas citadas para determinação do trocador. Todo esse estudo haverá sido visto num exemplo utilizando informações de um cenário industrial.

2 Objetivos

Os objetivos da pesquisa são divididos em geral e específicos, e podemos vê-los com detalhe abaixo.

2.1 Objetivo Geral

Desenvolvimento de estudo a, partir de valores usados na indústria da cana de açúcar, em trocador de calor do tipo casco/tubo com processo de transferência de contato indireto e escoamento em contra corrente, seguido de aplicação da metodologia de análise, em software, deste equipamento.

2.2 Objetivos Específicos

- Pesquisar e analisar literatura técnica(norma) de trocador de calor.
- Aplicar as fórmulas térmicas usadas no dimensionamento.
- Criar um código para determinar, a partir de inputs, a obtenção de parâmetros do dimensionamento do trocador.
- Modelar em 3D o trocador de calor em software específico.
- Aplicar a metodologia de análise térmica usando o software Ansys.
- Estudo analítico dos resultados.

3 Trocadores de calor

Nessa seção será abordada a fundamentação teórica dos trocadores de calor.

3.1 Definição

O trocador de calor tem como definição ser um dispositivo que é usado para transferir energia térmica entre dois ou mais fluidos, entre uma superfície sólida e um fluido ou entre partículas sólidas e um fluido, a diferentes temperaturas e a um contato térmico. Aplicações típicas envolvem aquecimento ou arrefecimento de uma corrente de fluido e evaporação ou condensação de componentes simples ou múltiplos de correntes de fluido. Em outras aplicações, o objetivo pode ser recuperar ou rejeitar calor (SHAH RAMESH K & SEKULIC, 2003).

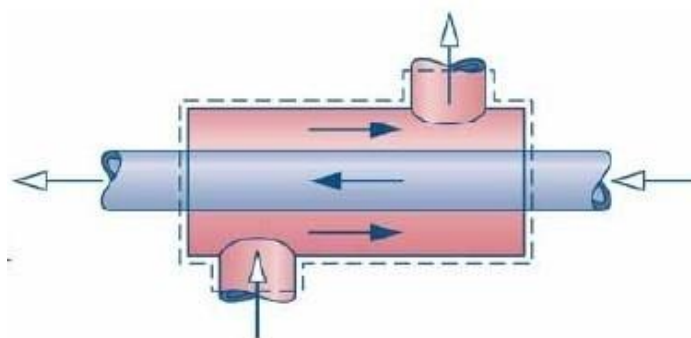
3.2 Classificação de trocadores de calor

Tem-se 3 classificações para trocadores de calor, e são elas : de acordo com o processo de transferência, de acordo com o tipo construtivo e de acordo com a disposição do escoamento, elas são vistas a depender do que quer ser estudado dos trocadores.

3.2.1 De acordo com disposição de escoamento

No tipo de trocador de calor mais simples de acordo com a disposição de escoamento, os fluidos quentes e frios se movem no mesmo sentido ou em sentidos opostos em uma reta numa construção com tubos concêntricos. Quando entram pela mesma extremidade, logo escoando no mesmo sentido, são chamados de correntes paralelas, já entrando em extremidades opostas, logo escoando em sentidos opostos, são chamados de contra-corrente. Esses tipos podem ser entendidos vendo a Figura 1.

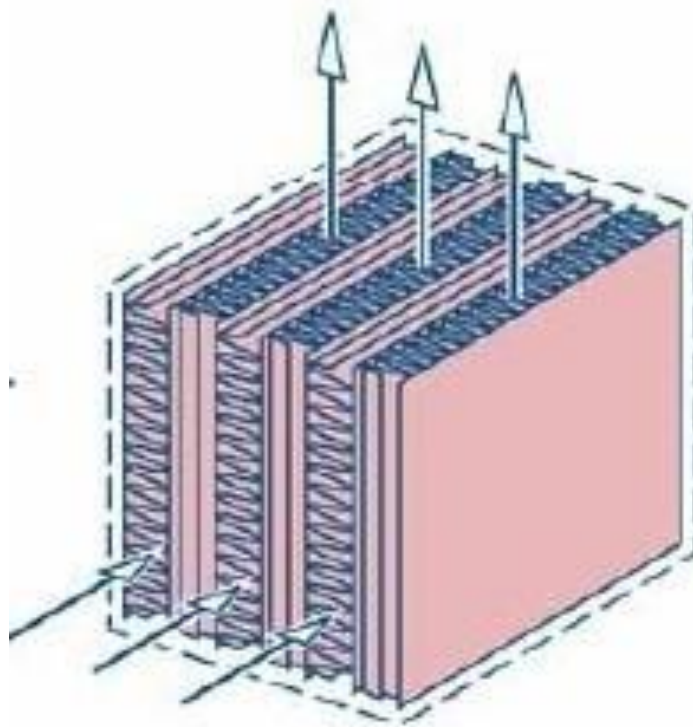
Figura 1 – Escoamento em contra-corrente.



Fonte: Cengel (2009)

Alternativamente os fluidos podem se mover em escoamento cruzado (um fluido perpendicular ao outro), podendo ser feito com ou sem aletas, e essa diferença é notada na mistura dos fluidos pois as aletas impedem que os fluidos se movam na direção y , não ocorrendo a mistura em nenhum dos fluidos pois o escoamento no interior dos tubos não ocorre mistura, nesse caso a temperatura do fluido varia com x e y , e enquanto que sem aletas a variação da temperatura ocorre na direção do escoamento principal que é x , acontecendo mistura em um dos fluidos. A natureza da condição de mistura influencia significativamente no desempenho do trocador. Ver Figura 2.

Figura 2 – Escoamento cruzado.



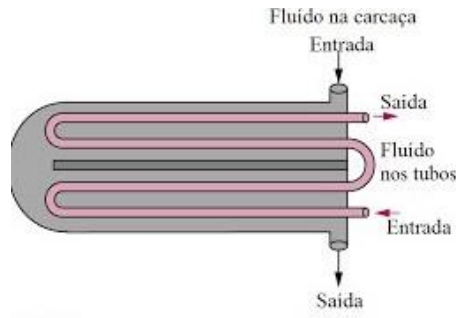
Fonte: CENGEL (2009)

O último tipo e mais complexo é o tipo de escoamento em multi passe, em que as unidades de um fluido sobem e descem através do caminho de fluxo da outra corrente de fluido, é possível grande variedade de configurações, é frequentemente empregada em trocadores por intensificar a troca térmica (CENGEL YUNUS A & GHAJAR, 2009). Ver na Figura 3.

3.2.2 De acordo com processo de transferência

Esse tipo de classificação é subdividido em : Contato direto e Contato indireto. No contato direto os dois fluidos se misturam havendo além de transferência de

Figura 3 – Escoamento em multi passe.

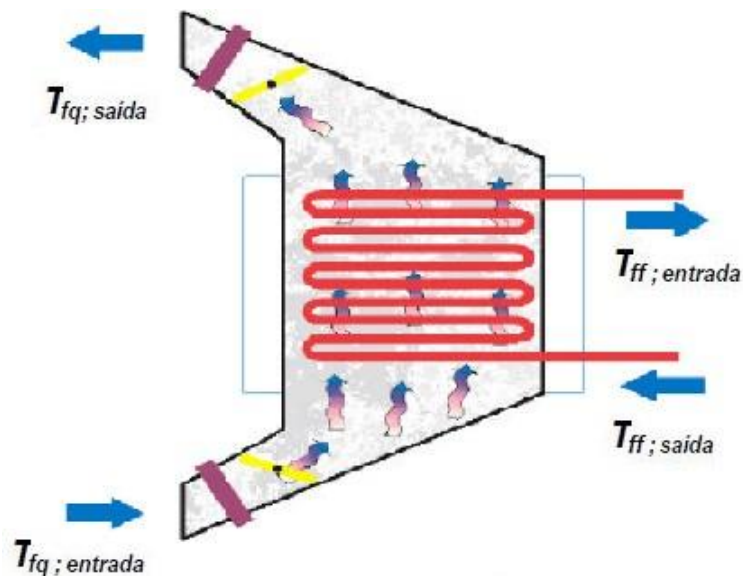


Fonte: Cengel (2009)

calor a transferência de massa. São alcançadas taxas de transferência de calor muito altas, comparado a outros equipamentos, e sua construção é relativamente barata. Um exemplo onde pode-se ver os trocadores de calor de contato direto, são nas torres de resfriamento.

No contato indireto tem-se a subdivisão em transferência direta e armazenamento. Na transferência direta há um fluxo contínuo de calor do fluido quente ao frio através de uma parede que os separa, não havendo mistura de fluidos, é designado como trocador de calor de recuperação, chamado de recuperador. Ver Figura 4.

Figura 4 – Transferência direta.



Fonte: Cengel (2009)

No tipo armazenamento, ambos os fluidos percorrem alternativamente as mesmas passagens de troca de calor, havendo uma superfície de transferência de troca de calor chamada de matriz, que é onde se armazena a energia térmica quando o fluido quente atravessa a superfície, posteriormente liberando-a quando o fluido frio passa por ela, esse

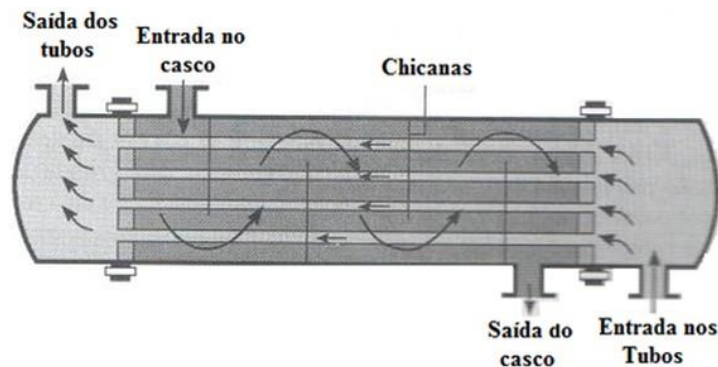
tipo é chamado de regenerador, eles podem ser dinâmicos ou estáticos, com respeito a mobilidade das partes da matriz (CENGEL YUNUS A & GHAJAR, 2009).

3.2.3 De acordo com o tipo de construção

Em relação ao tipo de construção tem-se duas configurações, e são elas: trocadores de calor tubulares e do tipo placa. Os tubulares são subdivididos em outros 3: casco e tubo, tubo duplo e serpentina.

Os trocadores de casco e tubo, também chamados de carcaça e tubo, são trocadores amplamente utilizados em processos industriais (aquecimento, resfriamento, evaporação ou vaporização e condensação de todas as espécies de fluidos). Quando se necessita de grandes áreas para transmissão de calor ou para aplicações de alta pressão (com pressões superiores a 30 bar e temperaturas superiores a 260 graus celsius), isso ocorre porque os trocadores de calor casco e tubo são robustos devido à sua forma. Consistem de tubos paralelos e esses tubos podem ser aletados, planos e possuir outras variações por onde circula um dos fluidos montados num casco cilíndrico, no qual circula o outro fluido. Tem vantagens em termos de fabricação, custos e desempenho térmico. Podem ser construídos com grandes superfícies de troca de calor em um volume relativamente pequeno, apresentando grande flexibilidade nas condições de projeto e operação (ampla faixa de temperatura e pressão). Ver Figura 5.

Figura 5 – Trocador de calor casco e tubo.



Fonte: Cengel (2009)

Os trocadores de tubo duplo consistem em dois tubos concêntricos, onde um dos fluidos escoia pelo tubo interno, e o outro pela parte anular entre os tubos em uma direção contra fluxo, é o mais simples dos trocadores de calor pela fácil manutenção envolvida, geralmente usado em aplicações de pequeno porte.

Os trocadores de calor do tipo serpentina (ou espiral), consistem em uma ou mais serpentinas (de tubos circulares), ordenados em uma carcaça, tem uma vantagem de

poder ser acomodada uma grande superfície em um determinado espaço, utilizando as serpentinas, porém a limpeza nesse caso é muito problemática.

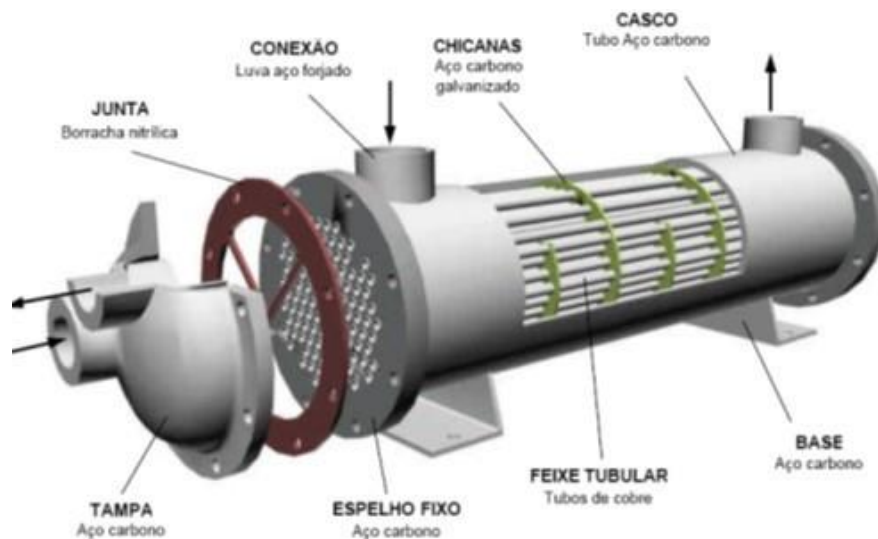
O tipo placa é construído com placas planas lisas, ou com algumas formas de ondulações, comparado ao tubular equivalente, esse trocador não pode suportar pressões muito altas, são classificados também como compactos, isso quer dizer que a razão entre a área de superfície de transferência de calor e o volume do trocador é maior que $700\text{m}^2/\text{m}^3$ (CENGEL YUNUS A & GHAJAR, 2009).

3.3 Constituição, construção e operação

3.3.1 Constituição

Como existe mais de um tipo de trocador de calor, logo tem-se particularidades na constituição deles, porém focaremos no tipo mais comum na indústria que é o casco tubo de contato indireto e em contra corrente, a Figura 6 mostra as principais partes desse tipo.

Figura 6 – Principais partes do trocador casco e tubo.

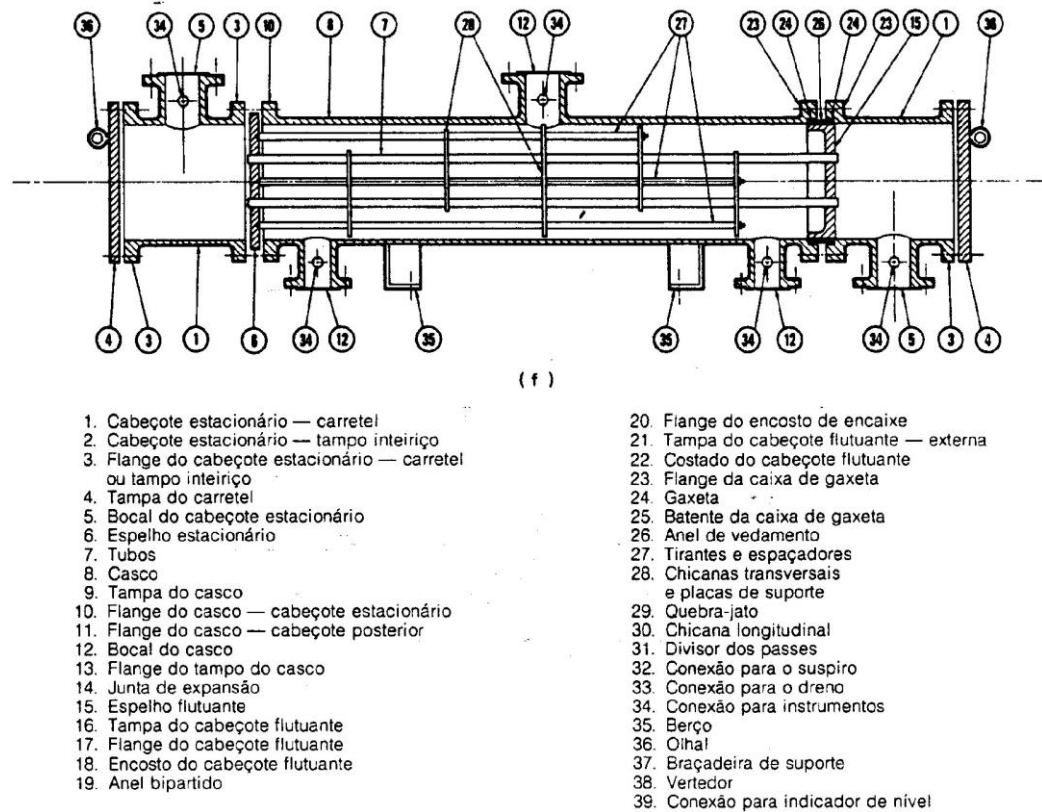


Fonte: Fraas (1989)

A base serve para apoiar o "corpo" do trocador nos locais. Esse "corpo" é constituído pelo casco, onde no interior encontra-se o feixe tubular, que é por onde passa um dos fluidos. As chicanas instaladas por entre os feixes tubulares servem para direcionar o fluido e suportar o feixe de tubos, em uma das extremidades tem-se a tampa, onde se encontra a entrada e saída para o outro fluido. Acoplada a essa tampa, tem-se a junta que se encaixa ao casco pelos espelhos, que são materiais circulares com furos por onde se encaixam os feixes tubulares nas suas terminações, e finalmente as conexões onde entram e saem o fluido que passa por entre os tubos e o casco (FRAAS, 1989).

A Figura 7 abaixo mostra todas as partes e detalhes de um trocador de calor. Alguns desses equipamentos são usados apenas em certas situações, de acordo com o que se quer do dispositivo.

Figura 7 – Todas as partes do trocador de calor.



Fonte: Fraas (1989)

3.3.1.1 Aletas

As aletas merecem uma atenção especial pois elas desempenham um papel fundamental na transferência de calor, que é otimizar a troca de calor de um fluido com outro, através do aumento da superfície de contato da tubulação por onde ele escoar. São produzidas de materiais altamente condutores como o alumínio, dentre os principais fatores que alteram a eficiência das aletas estão o número, o tamanho e a rotação das aletas. Elas podem ser retangulares, não retangulares, curvas e de pinos a depender do projeto. No estudo sobre as aletas tem-se três casos. As aletas longas, com extremidade finita não isolada e finitas com temperatura da extremidade conhecida, e para cada caso desse tem-se modos diferentes de resolver e logo formulações diferentes da distribuição de temperatura.

Um ponto muito importante ao implementar a aleta é saber até onde ela influencia positivamente, pois após determinado comprimento ela não contribui para a transferência

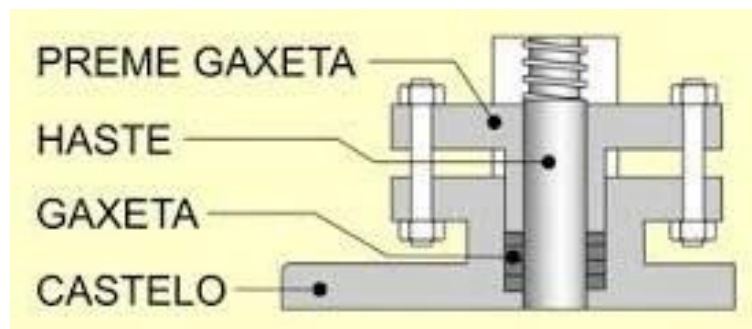
de calor. E estudos mostram que a relação de comprimento ideal é $L=2,65/m$, sendo m a massa (BERGMAN et al., 2011).

3.3.2 Construção

3.3.2.1 Soldagem nas extremidades

No que diz respeito a construção desses dispositivos, se no trocador não for necessário um sistema de absorção da dilatação térmica entre os tubos, as duas extremidades do lado do casco serão soldadas ao tubo. Já com um sistema de absorção de dilatação térmica apenas uma das extremidades do lado do casco será soldada ao tubo, e a outra estará livre com sistema de preme-gaxetas. O sistema de preme-gaxetas é simplesmente a parte da válvula que comprime a gaxeta em torno da haste, sendo a gaxeta o tipo de material usado para vedar a haste contra vazamentos no castelo (parte superior de uma válvula). Existem 3 tipos de sistema preme-gaxetas, a rosqueada, a de união e a parafusada. Ver Figura 8.

Figura 8 – Preme gaxeta.



Fonte: Ghizze (1989)

3.3.2.2 Instalação

Para a instalação correta do trocador de calor alguns preparativos devem estar prontos, como por exemplo as fundações ou os pontos de fixação previstos para a instalação dele. O equipamento deve ser instalado firme e isento de vibrações e nos casos onde a operação prevê o resfriamento de gases comprimidos não é recomendável a utilização de calços, bem como de cunhas soltas de nivelamento.

Caso os fluidos que circulam pelo trocador sejam mantidos em circulação por bombas, o trocador de calor deve ser instalado o mais próximo possível da conexão de pressão da bomba de modo a evitar qualquer problema de cavitação.

Após a fixação do trocador de calor os parafusos de todos os flanges devem ser reapertados obedecendo sempre uma sequência cruzada de aperto, no caso de trocador de calor com preme-gaxetas, os parafusos deste devem sofrer aperto adequado. Somente após

o reaperto de todos os parafusos do trocador de calor devem ser conectadas as tubulações. Eventuais conexões colocadas do lado do casco na parte sujeita a dilatação térmica devem ter caráter elástico prevendo o deslocamento do casco.

3.3.3 Entrada em operação

Antes da entrada em operação deverão ser parcialmente abertos os respiros adequados de forma a permitir a evacuação dos gases. Caso o trocador de calor seja fornecido com alguma substância protetora, ela deverá ser removida através de lavagem com solvente adequado.

No momento em que o trocador de calor é exposto às condições operacionais em função da diferença de temperatura existente entre o tubo e o casco, fica este sujeito a tensões oriundas da dilatação térmica correspondente. Caso essas tensões não ultrapassem determinados valores admissíveis, é possível construir-se um trocador de calor em que construtivamente toda dilatação térmica não é compensada através de elemento construtivo adequado. Caso esses valores ultrapassem os valores de tensões admissíveis, haverá a necessidade de que a dilatação térmica seja compensada conforme o tipo de construção, no caso do casco e tubo a compensação é feita com a introdução de um sistema preme-gaxetas.

Recomenda-se que o trocador de calor, em todas as suas conexões, seja provido de válvulas, de modo a possibilitar quaisquer trabalhos ou mesmo até a desmontagem do trocador sem a necessidade de que a linha toda seja drenada. Para a entrada em operação, o trocador de calor deve ser inicialmente inundado, conforme já descrito, com o fluído refrigerante. Após a total drenagem das bolhas de gás, os respiros correspondentes devem ser fechados. Após isso, deve ser iniciado o mesmo procedimento para o fluído a ser resfriado.

3.4 Materiais de construção

Quando trata-se de materiais usados para a construção de trocadores de calor é levado em conta que é um ponto importantíssimo na eficiência térmica do dispositivo, tanto quanto a característica geométrica, a temperatura e o coeficiente de condutibilidade térmico dos fluidos em questão.

Como já visto na Figura 6, onde tem-se as principais partes do trocador de calor casco e tubo, tem-se que o casco é feito com tubo de aço carbono, os espelhos em chapas de aço carbono classificadas, os feixes tubulares de cobre para aplicações normais, e opcionalmente em cupro-níquel usados em aplicações navais e as tampas fabricadas em ferro fundido ou aço carbono. Outras opções que também podem ser aplicadas é revestir os espelhos em latão naval e as tampas com ânodos de zinco.

Com o avanço da tecnologia, outros materiais estão sendo testados para atuar em situações com condições cada vez mais críticas e melhorar a eficiência térmica, além de aço carbono, inox, ligas de aço e cobre e o grafite, alguns exemplos foram o lançamento do trocador feito de tântalo, material de custo elevado, porém se desenvolveu um sistema de fusão com o aço inox, barateando o produto, e o trocador feito de carbetto de silício, visualmente similar a uma cerâmica. Esses materiais além de terem melhores resistências mecânica e química que o grafite, possuem uma melhor eficiência térmica, devido a sua alta condutividade. Outros materiais que estão sendo aplicados nessa indústria são titânio, zircônio e ligas especiais, e embora o custo inicial seja um pouco mais elevado, com o decorrer do tempo a relação custo-benefício é mais favorável (GHIZZE, 1989).

3.5 Aplicação e Manutenção

3.5.1 Aplicação

É praticamente impossível que em uma indústria não haja a utilização do calor em determinado processo, e é nesse ponto em que os trocadores de calor atendem as necessidades. As maiores utilizações são nas indústrias de: tratamento de águas residuais, sistemas de refrigeração, indústria de vinhos e cervejarias, indústria do petróleo e indústria química pesada, a transferência otimizada e a conservação da energia sob a forma de calor é um desafio constante, entre as principais aplicações dos trocadores de calor pode-se destacar:

Geração de vapor: Em projetos de geração de vapor, os trocadores de calor são utilizados em caldeiras industriais com função de condensador de amostra de vapor, pré-aquecedor de ar a vapor ou a gás, desaerador térmico e economizador de vapor.

Geração de energia: Em projetos de geração de energia, os trocadores de calor são utilizados na condensação de vapor de escape da turbina.

Biocombustível: Em projetos de destilaria de álcool, etanol e biodiesel, os trocadores de calor tem função de regenerar calor de diversos fluídos, aquecer mosto, condensar vapores alcoólicos e/ou etanol, aquecer ar em secadores e etc.

Produção de açúcar: Em usinas de produção de açúcar, os trocadores de calor são utilizados para resfriar o óleo do mancal da turbina a vapor, para aquecimento do caldo para facilitar a decantação, para evaporação e concentração de caldo de cana e cozimento de massa do açúcar (GHIZZE, 1989).

Dispositivos importantes e comuns em plantas industriais que apresentam o princípio de funcionamento similar aos trocadores de calor :

3.5.1.1 Caldeiras

As caldeiras são grandes tanques de calor onde um líquido pressurizado recebe calor e vaporiza, de modo a ser utilizado em vários outros equipamentos e processos na indústria. A grande maioria do uso do vapor para ceder calor a determinados locais. A maioria dos modelos de caldeira aquecem a água pressurizada até a condição de vapor saturado.

3.5.1.2 Evaporadores

Existem diversos tipos de evaporadores onde feixes de tubos promovem a retirada ou a adição de calor a determinado local. Na refrigeração o evaporador geralmente é uma caixa onde um fluido refrigerante remove calor dela e libera em outra extremidade. Evaporadores de concentração de soluções promovem o aumento da concentração de determinadas soluções pela adição de calor latente adicionado por tubulações de vapor geralmente oriundas da caldeira.

3.5.1.3 Recuperadores de calor

É um dispositivo comumente utilizado para aproveitar o calor gerado por gases quentes, como os gases produtos das queimas em caldeiras e outros equipamentos, diminuindo o gasto energético com aquecimento. O termo recuperador refere-se também para trocadores de calor em contracorrente líquido-líquido usado em indústrias químicas e refinarias e em processos fechados.

3.5.2 Manutenção

A necessidade da realização da limpeza nos trocadores de calor casco e tubo é anunciada geralmente pela perda de performance deles. Como os agentes deste efeito dependem do grau de sujeira de ambos os fluídos atuantes, não é possível formular-se uma diretriz geral para intervalos de limpeza. Quando ocorre a limpeza, o trocador deverá ser retirado de operação, assim como seus componentes.

Desde que as camadas não estejam extremamente agregadas aos tubos é possível remover uma quantidade satisfatória destas, através de limpeza mecânica, ou seja, com a combinação de jatos de água com escova de nylon. Para camadas cuja aderência é mais interna, como por exemplo: incrustação de carbonato de cálcio, é recomendável a utilização de ácido sulfúrico fraco. Caso também se faça necessária a limpeza do casco, o mesmo deverá ser limpo com jatos de vapor, sendo que, para isto o feixe tubular deverá ser retirado dele (BERGMAN et al., 2011).

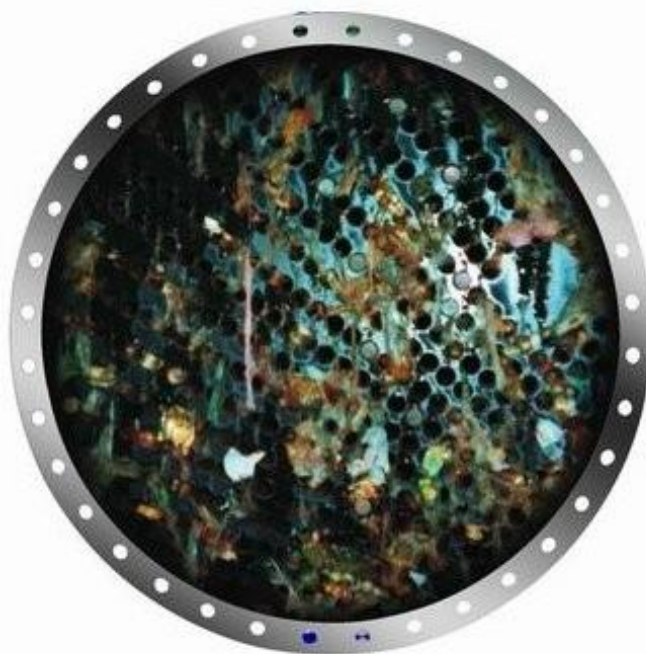
3.5.2.1 Incrustação

Uma incrustação ocorre quando um fluido passa por um trocador de calor, e as impurezas precipitam-se sobre a superfície dos tubos. A precipitação destas impurezas pode ser causada por: Uso frequente do trocador de calor, ausência de limpeza regular do trocador de calor, redução da velocidade dos fluidos movendo-se através do trocador de calor e superdimensionamento do trocador de calor.

Efeitos de incrustação são mais abundantes nos tubos quentes dos trocadores de calor que em tubos frios. Isto é causado porque impurezas são menos facilmente dissolvidas num fluido frio. Isto é porque, para a maioria das substâncias, a solubilidade aumenta quando a temperatura aumenta.

A incrustação aumenta a área da seção transversal para o calor ser transferido e causa um aumento na resistência à transferência de calor através do trocador de calor. Isto é porque a condutividade térmica da camada de incrustação é baixa. Então se reduz o coeficiente de transferência térmica global e a eficiência do trocador de calor. Ocorrendo isto, pode-se conduzir a um aumento nos custos de bombeamento e manutenção. Ver Figura 9 ([BERGMAN et al., 2011](#)).

Figura 9 – Incrustação.



Fonte: Bergman (2011)

3.6 Norma Regulamentadora

As normas regulamentadoras são o conjunto de requisitos e procedimentos relativos à segurança e medicina do trabalho, de observância obrigatória nas empresas privadas, públicas e órgãos do governo.

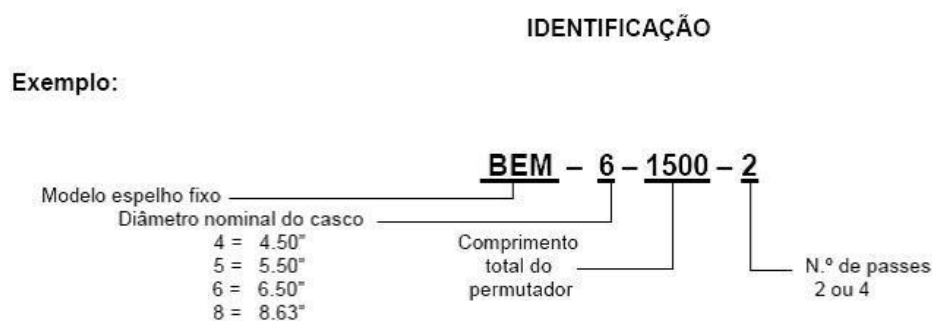
No caso dos trocadores de calor, as normas vigentes a eles irão descrever o processo como um todo, com critérios de projeto, materiais, condições de trabalho adequados, medidas do projeto entre outros pontos. A norma mostrada aqui e usada no projeto é a TEMA que é a mais importante se tratando em trocadores de calor, usada internacionalmente.

3.6.1 Nomenclatura

A prática recomendada pela Norma e usada industrialmente para designação dos trocadores de calor é mediante números e letras. A designação do tipo deve ser feita por letras indicando a natureza do carretel, do casco e da extremidade oposta ao carretel respectivamente.

Esse tipo de nomenclatura facilita a identificação de trocadores no âmbito industrial. Pode ser visto na Figura 10 um exemplo dessa prática, e na Figura 11, mais completa, com a designação das letras a sua respectiva imagem da parte do trocador para que não haja dúvidas no momento da designação de nomeação do trocador.

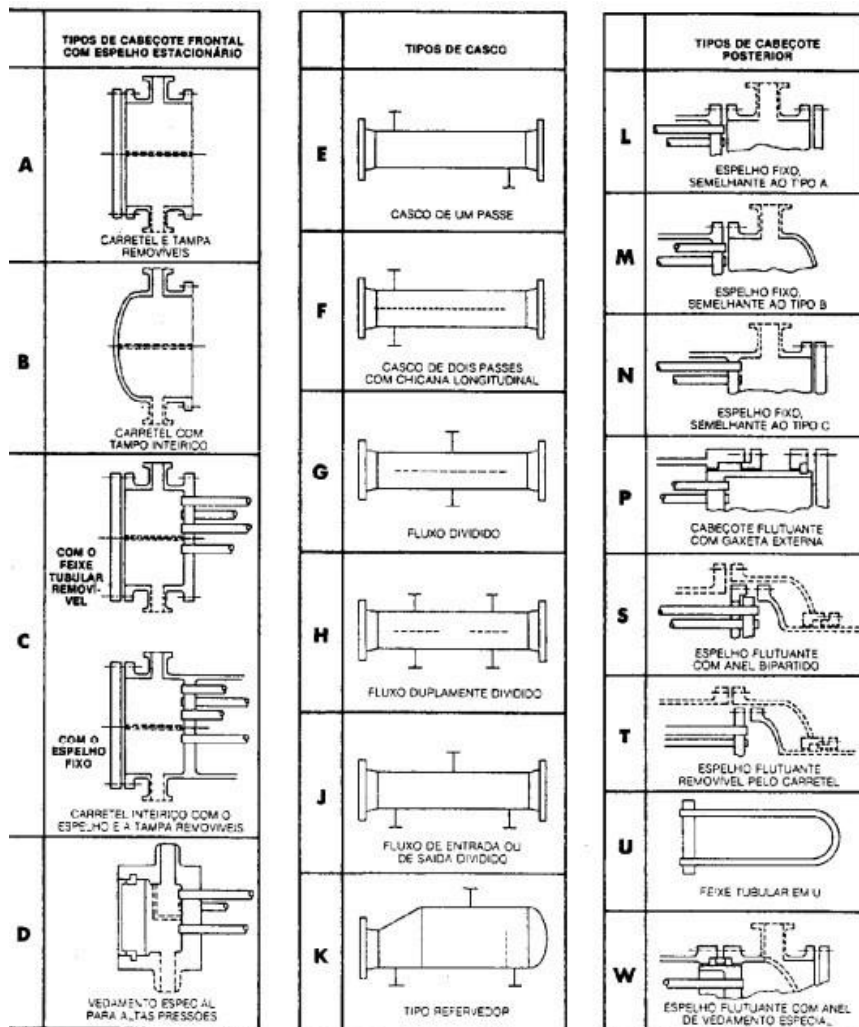
Figura 10 – Exemplo da nomenclatura.



Fonte: Fraas (1989)

E a Figura 11 mais completa, com a designação das letras e sua respectiva imagem da parte do trocador.

Figura 11 – Nomenclatura.



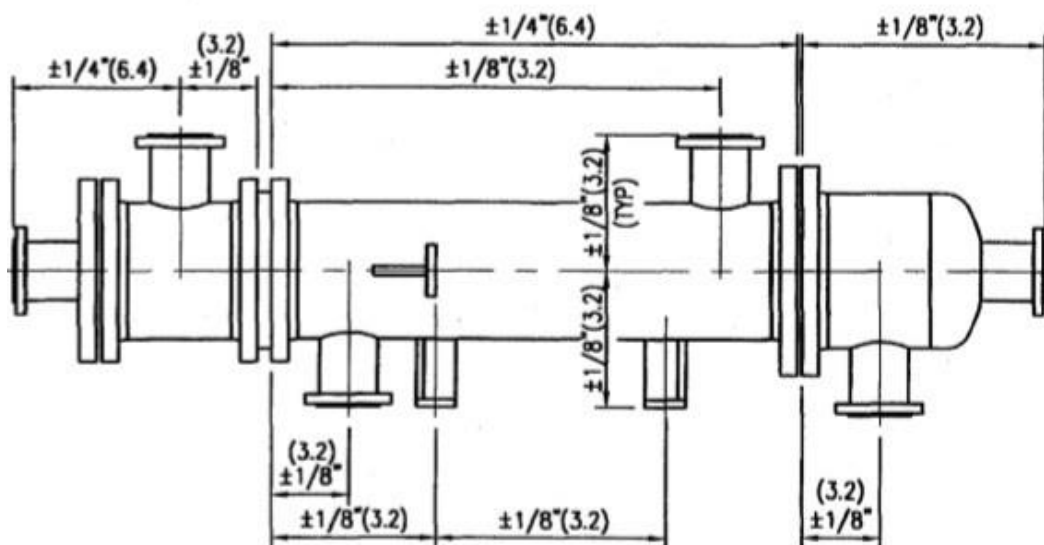
Fonte: Norma TEMA (2007)

3.6.2 Tolerâncias de fabricação

3.6.2.1 Dimensões externas, bocal e locais de suporte

A Figura 12 mostra as dimensões permitidas para partes do trocador de calor, onde as dimensões em parênteses estão em milímetros.

Figura 12 – Tolerância da Norma



Fonte: TEMA (2007)

3.6.3 Instalação, Operação e Manutenção

Aborda-se como se deve instalar o equipamento, listando quais falhas ocorrem, a entrada em operação, com aparafusamento ideal, temperatura, operação de início e fim, e a parte de manutenção com as inspeções de unidade, limpeza e substituição de peças.

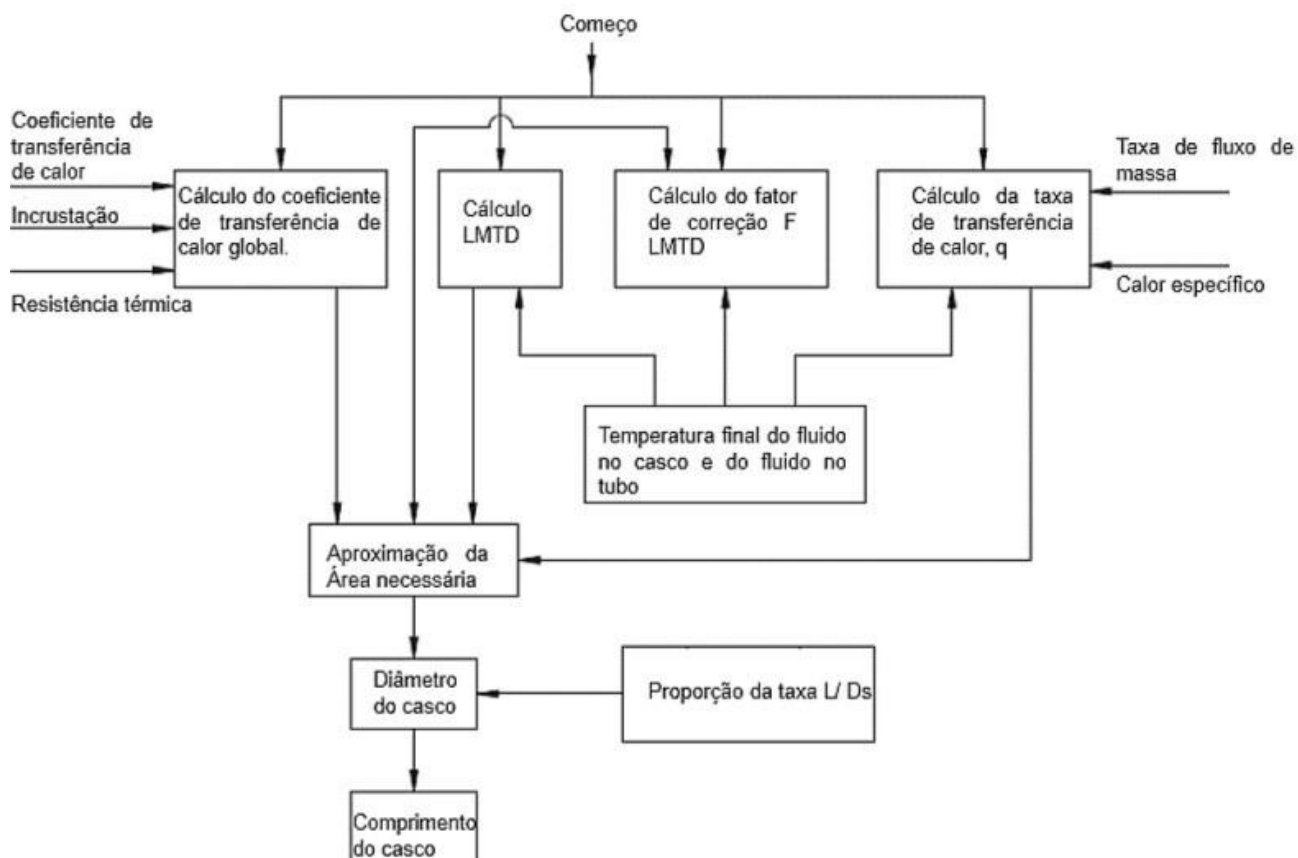
3.6.4 Padrões mecânicos classes R C B

Nessa parte, inicialmente, identifica-se a classe do trocador de calor a ser trabalhada, no caso dessa pesquisa o trocador será o do tipo C, que trabalha com processos de aplicações gerais e requerimentos comerciais. Então segue-se com testes líquidos, teste pneumático, teste padrão, descrição de partes de carbono, partes de metal e temperatura das partes. Começa-se a dar medidas máximas para partes do trocador, como tubo e chapas, e fórmulas para calcular espessura das respectivas partes.

3.7 Fluxograma de formulação

Para seguir com o processo segue-se um fluxograma já utilizado na determinação de trocadores, que utiliza os inputs dos fluidos para chegar na aproximação da área necessária, que irá viabilizar o alcance dos outros parâmetros importantes para a construção. O fluxograma pode ser visto na Figura 13.

Figura 13 – Fluxograma.



Fonte: THULUKKANAM, K. Heat exchanger design handbook, 2013

3.7.1 Fórmulas usadas no fluxograma

Para seguir a risca o fluxograma mostrado, devemos usar as fórmulas que nos levarão aos parâmetros procurados, essas fórmulas e tabelas são encontradas na norma TEMA.

3.7.1.1 LMTD

O LMTD é calculado utilizando as diferenças finais e iniciais dos dois fluidos dividido pelo logaritmo da divisão das diferenças. Admite-se fluido frio como fluido A. Ver Equação 3.1.

$$DTML = (\Delta T_a - \Delta T_b) / \ln(\Delta T_a / \Delta T_b) \quad (3.1)$$

3.7.1.2 Fator de correção

Para escoamento em contracorrente, a diferença de temperatura representativa é igual à diferença de temperatura média logarítmica e $F=1,0$.

3.7.1.3 Coeficiente de transferência de calor

Para o cálculo do coeficiente de transferência de calor global se usa a Equação 3.2. Onde para o caso estudado admite-se $E_f=1$. h_0 e h_i são as taxas de transferência de calor sensível de fluido frio e quente respectivamente, que se usa a média tabelada dos limites de cada fluido utilizado. A_0 , r_0 e A_i são respectivamente as áreas externa e interna dos tubos, que são escolhidos via Figura 16, que é um tabela retirada da Tema. R_0 , R_i e R_w são as resistências externas e internas dos tubos e superfície da parede, onde faz-se uma aproximação, para esse tipo de escoamento, de $0,000088 \text{ m}^2\cdot\text{K}/\text{w}$.

O cálculo do Q_{rec} , calor total recebido, é calculado com a fórmula padrão de transferência térmica, onde o mc , que é a vazão mássica do fluido, e o C_{pc} , que é a capacidade calorífica, serão dados a partir do fluido escolhido. Ver Equação 3.3.

$$1/U_c = (d_o/d_i \cdot h_i) + ((d_o \cdot \ln(d_o/d_i))/2k) + (1/h_o) \quad (3.2)$$

$$Q_{rec} = mc \cdot C_{pc} (T_{c2} - T_{c1}) \quad (3.3)$$

3.7.2 Área aproximada

Após ter todos os parâmetros, a área aproximada é calculado utilizando a Fórmula 3.4. E a partir disso, utilizando a Fórmula 3.5, pode-se ao estimar um número de tubos usual, ter o comprimento do casco.

$$A = Q/U \cdot \Delta T_m \quad (3.4)$$

$$A = \pi \cdot d_o \cdot L \cdot nT \quad (3.5)$$

3.7.3 Fórmulas Térmicas

Como se trata de um processo iterativo, pois o coeficiente global ainda não é considerado convergente por ter apenas 1 iteração, por vir de duas médias aritméticas de coeficientes, usa-se outras fórmulas que estão listadas na Tabela 1, para que os valores de área e coeficiente converjam a um valor.

Onde u_t , u_s , k_t , k_s , N_t são viscosidade e condutividade térmica de casco e tubo, e Número de tubos respectivamente.

Tabela 1 – Fórmulas Térmicas

$Pr = C_{ph} \cdot u_t / k_t$	%Número de Prandtl fluido quente
$Pr_s = C_{pc} \cdot u_s / k_s$	%Número de Prandtl fluido quente na superfície
$De = ((P_t^2) - (\pi \cdot (D_o^2)/4)) / (\pi \cdot D_o)$	%Diâmetro equivalente aparente para layout quadrado
$C = P_t - D_o$	%Espaçamento entre as paredes externas do tubo, em m
$Re = 4 \cdot m_h / (N_t \cdot \pi \cdot D_i \cdot u_t)$	%Número de reynolds fluido quente
$F_t = 1 / ((1.58 \cdot \log(Re)) - 3.28)^2$	%Fator de atrito
$Nu = ((F_t/2) \cdot Re \cdot Pr) / (1.07 + (12.7 \cdot ((F_t/2)^{0.5}) \cdot (Pr^{(2/3)} - 1)))$	%Equação de Nusselt
$h_i(i) = k_t \cdot Nu / D_i$	%Taxa de transferência de calor sensível, W/m ² .K
$A(i) = q_{rec} / (U_c(i) \cdot \Delta T_{ml})$	%Área da superfície de troca de calor calculada, com Fr=1(contra corrente)
$L(i) = A(i) / (\pi \cdot D_o \cdot N_t)$	%Cálculo do comprimento
$N_c(i) = \text{round}(L(i) / D_{ic})$	%Número de chicanas no casco, é usado essa fórmula pois é da mesma magnitude do Dic
$B(i) = L(i) / (N_c(i) + 1)$	%Espaçamento entre as chicanas
$A_s(i) = D_{ic} \cdot C \cdot B(i) / P_t$	%Área da seção transversal através do qual o fluido escoar, em m ²
$G_s(i) = m_c / A_s(i)$	%Velocidade Mássica aparente do fluido circulante, em kg/m ² .s
$Re_M(i) = G_s(i) \cdot De / u_s$	%Reynolds modificado ² .s
$h_o = ((k_s \cdot 0.36) / De) \cdot (((De \cdot G_s(i)) / u_s)^{0.55}) \cdot (Pr_s^{(1/3)}) \cdot ((u_s / u_{ws})^{0.14})$	%Taxa de transferência de calor sensível, W/m ² .K
$A_{tp} = (\pi \cdot (D_i^2) \cdot N_t) / 4$	%Área da seção transversal dos tubos em cada passe
$U_m = m_h / A_{tp} \cdot \rho_o$	%Velocidade de escoamento
$\Delta P_t = ((4 \cdot F_t \cdot L(10) / D_i) + 4) \cdot (\rho_o \cdot (U_m^2) / 2)$	%Queda de pressão nos tubos
$F_s = \exp(0.576 - (0.19) \cdot \log(Re_M))$	%Fator de atrito do fluido no casco
$f_{is} = (u_s / u_{ws})^{0.14}$	%Fator de correção da viscosidade
$\Delta P_s = F_s \cdot (G_s(5)^2) \cdot (N_c(5) + 1) \cdot D_{ic} / (2 \cdot \rho_o \cdot D_o \cdot f_{is})$	%Queda de pressão no casco

4 Materiais e Métodos

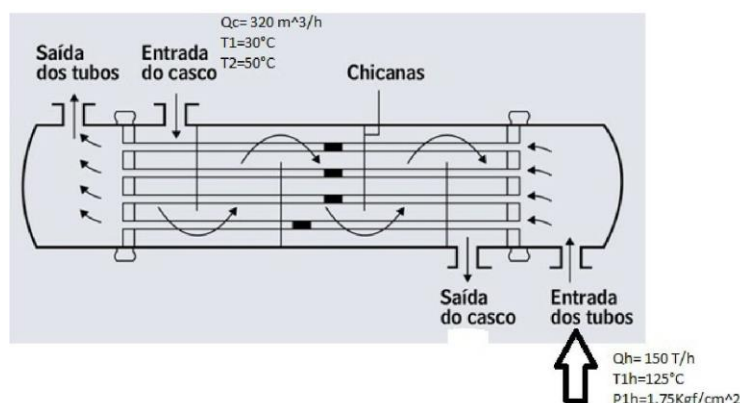
4.1 Parâmetros iniciais

Os parâmetros iniciais postos para esse projeto são muito próximas ao que é usado atualmente na indústria da cana de açúcar, para trocador de calor casco tubo em contra corrente e contato indireto.

Para o fluido frio tem-se o caldo de cana, com vazão mássica de $320\text{ m}^3/\text{h}$ onde se deseja elevar sua temperatura de 30°C até 50°C , para isso acontecer haverá um fluido quente, que é o vapor d'água, com pressão absoluta de $1,75\text{ kgf/cm}^2$, vazão mássica de 150 T/h e temperatura inicial de 125°C . Ver Tabela 2 e Figura 14.

Esses parâmetros são usados nas fórmulas mencionadas na seção de equações do fluxograma, e então chega-se as informações necessárias para o dimensionamento. Como se trata de uma aproximação é necessário fazer mais iterações, e então usa-se as formulas da seção para o complemento das iterações e outros parâmetros.

Figura 14 – Condições iniciais.



Fonte: Cengel, Yunus A & Ghajar, Afshin J. Tranferência de Calor e Massa, 2009

Tabela 2 – Parâmetros iniciais

Parâmetro inicial	Fluido Quente	Fluido Frio
$T_{inicial}$	125°C	30°C
T_{final}	-	50°C
$Pressão_{inicial}$	$1,75\text{ kgf/cm}^2$	1 atm
Vazão Mássica	150 T/h	$320\text{ m}^3/\text{h}$

Fonte: Autor

4.2 Materiais e Geometria do Trocador

Nessa seção será abordada os materiais que são feitos os trocadores e os tipos de geometrias deles.

4.2.1 Material

O material usado no casco e tubos na modelagem será o aço inox, por ser comum para o tipo de trocador estudado e por ele ter uma alta resistência a temperaturas, aproximadamente até os 399°C. Esta temperatura está acima da qual será alcançada no estudo, visto as condições iniciais na Tabela 2.

Em trocadores de calor que utilizam caldo de cana como fluido, geralmente tem uma geometria de tubo quadrada para que não haja acúmulo de matéria orgânica nas paredes, porém se admitirá o tipo padrão, curvo, por questão de abrangência mais geral e facilidade para replicação.

4.2.2 Geometria

A determinação geométrica, é feita a partir da norma e suas tabelas. Esses valores são escolhidos de acordo com o material usado, custo para fabricação e principalmente se eles se adequem com os valores de outras partes do trocador.

O dimensionamento do casco passa pela escolha do número de tubos, onde foi escolhido 116 tubos para ter-se um comprimento não tão extenso, $L=7m$. Essa relação é vista na Fórmula 5.

As dimensões para o tubo foram extraídos da tabela da norma TEMA na Figura 15, lembrando que se está utilizando aço inox, pois o material interfere diretamente na escolha. Para os valores do casco também foi visto outra tabela da norma Tema, na Figura

16. Como neste projeto não é necessário um casco tão robusto, decidiu-se utilizar a terceira opção da tabela para que se possa comportar os 116 tubos estabelecidos inicialmente.

Os valores finais para a modelagem são vistos na Tabela 3.

Tabela 3 – Valores da geometria

Partes	Símbolo	Valor
Diâmetro interno do casco	Dic	635mm
Espessura do casco	tc	7,9mm
Diâmetro interno dos tubos	Dit	28,46mm
Diâmetro externo dos tubos	Det	31,8mm

Fonte : Autor

Figura 15 – Tabela diâmetro tubo retirada da norma TEMA.

TABLE RCB-2.21

BARE TUBE DIAMETERS AND GAGES

O.D. In. (mm)	Copper and Copper Alloys	Carbon Steel, Aluminum and Aluminum Alloys	Other Alloys
	B.W.G.	B.W.G.	B.W.G.
1/4 (6.4)	27 24 22	- - -	27 24 22
3/8 (9.5)	22 20 18	- - -	22 20 18
1/2 (12.7)	20 18	- -	20 18
5/8 (15.9)	20 18 16	18 16 14	20 18 16
3/4 (19.1)	20 18 16	16 14 12	18 16 14
7/8 (22.2)	18 16 14 12	14 12 10 -	16 14 12 -
1 (25.4)	18 16 14	14 12 -	16 14 12
1-1/4 (31.8)	16 14	14 12	14 12
1-1/2 (38.1)	16 14	14 12	14 12
2 (50.8)	14 12	14 12	14 12

Fonte: Norma TEMA (2007) Figura

16 – Tabela diâmetro casco.

TABLE CB-3.13

MINIMUM SHELL THICKNESS

Dimensions in Inches (mm)

Nominal Shell Diameter		Minimum Thickness			
		Carbon Steel		Alloy *	
		Pipe	Plate		
6	(152)	SCH. 40	-	1/8	(3.2)
8-12	(203-205)	SCH. 30	-	1/8	(3.2)
13-23	(330-584)	SCH. 20	5/16 (7.9)	1/8	(3.2)
24-29	(610-737)	-	5/16 (7.9)	3/16	(4.8)
30-39	(762-991)	-	3/8 (9.5)	1/4	(6.4)
40-60	(1016-1524)	-	7/16 (11.1)	1/4	(6.4)
61-80	(1549-2032)	-	1/2 (12.7)	5/16	(7.9)
81-100	(2057-2540)	-	1/2 (12.7)	3/8	(9.5)

*Schedule 5S is permissible for 6 inch (152 mm) and 8 inch (203 mm) shell diameters.

Fonte: Norma TEMA (2007)

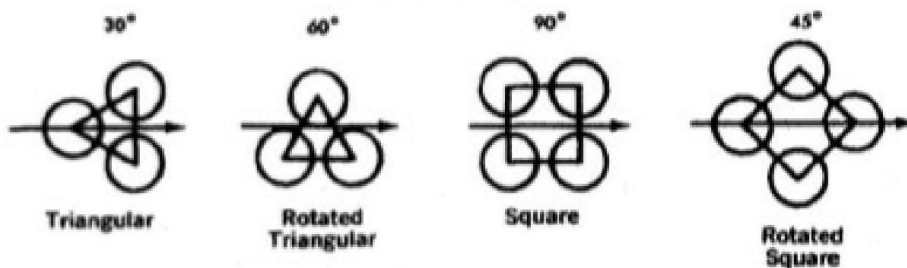
4.2.2.1 Distribuição

Para a distribuição dos tubos foi selecionado a quadrada pois, desse modo, é possível fazer a limpeza mecânica que é necessária por se tratar de material orgânico, e a distância entre os centros dos tubos também se enquadrava na norma, sendo maior que 1,25x o diâmetro interno deles. Ver Figura 17 (ASSOCIATION, 2007).

Figura 17 – Padrao Tubo.

RCB-2.4 TUBE PATTERN

Standard tube patterns are shown in Figure RCB-2.4.

FIGURE RCB-2.4

Note: Flow arrows are perpendicular to the baffle cut edge.

Fonte: Norma TEMA (2007)

Figura 18 – Tabela diâmetro tubo retirada da norma TEMA.

TABLE RCB-2.21

BARE TUBE DIAMETERS AND GAGES			
O.D. In. (mm)	Copper and Copper Alloys	Carbon Steel, Aluminum and Aluminum Alloys	Other Alloys
	B.W.G.	B.W.G.	B.W.G.
1/4 (6.4)	27	-	27
	24	-	24
	22	-	22
3/8 (9.5)	22	-	22
	20	-	20
	18	-	18
1/2 (12.7)	20	-	20
	18	-	18
5/8 (15.9)	20	18	20
	18	16	18
	16	14	16
3/4 (19.1)	20	16	18
	18	14	16
	16	12	14
7/8 (22.2)	18	14	16
	16	12	14
	14	10	12
	12	-	-
1 (25.4)	18	14	16
	16	12	14
	14	-	12
1-1/4 (31.8)	16	14	14
	14	12	12
1-1/2 (38.1)	16	14	14
	14	12	12
2 (50.8)	14	14	14
	12	12	12

Fonte: Norma TEMA (2007)

Figura 19 – Tabela diâmetro casco.

Nominal Shell Diameter	Minimum Thickness				
	Carbon Steel			Alloy *	
	Pipe	Plate			
6 (152)	SCH. 40	-	-	1/8	(3.2)
8-12 (203-205)	SCH. 30	-	-	1/8	(3.2)
13-23 (330-584)	SCH. 20	5/16 (7.9)	5/16 (7.9)	1/8	(3.2)
24-29 (610-737)	-	5/16 (7.9)	5/16 (7.9)	3/16	(4.8)
30-39 (762-991)	-	3/8 (9.5)	3/8 (9.5)	1/4	(6.4)
40-60 (1016-1524)	-	7/16 (11.1)	7/16 (11.1)	1/4	(6.4)
61-80 (1549-2032)	-	1/2 (12.7)	1/2 (12.7)	5/16	(7.9)
81-100 (2057-2540)	-	1/2 (12.7)	1/2 (12.7)	3/8	(9.5)

*Schedule 5S is permissible for 6 inch (152 mm) and 8 inch (203 mm) shell diameters.

Fonte: Norma TEMA (2007)

4.3 Codificação no MATLAB

Para auxiliar no dimensionamento do modelo de trocador, e ter agilidade no cálculo dos parâmetros que servissem de base comparativa para o resultado da análise, foi criado um código no MATLAB que atendesse esses pontos. O código utiliza apenas dos valores das condições iniciais, os valores de dimensões oriundos das tabelas e o número de iterações desejadas para gerar as informações. Essas fórmulas já foram citadas na seção de fórmulas térmicas e os valores tabelados já escolhidos na seção geometria. Na Figura 20 tem-se parte do próprio código. O código completo está no Anexo A.

Figura 20 – Print da tela do código.

```

45 - Dic=input('Digite o diametro interno do casco:'); %O diametro interno do casco será visto da tabela de acordo com o numero de tubos e Pt
46 - Uc(1)=725; %Média entre 450 e 1000, valores para vapor orgânico leve em W/m²*K
47 - Uci(1)=725;
48 - for i=1:10
49 -     Uci(i)=(Do/(Di*hi(i)))+(Do*log(Do/Di)/(2*K))+(1/ho(i)); %Formula do coeficiente global de transf com incrustação
50 -     Uci(i+1)=Uci(i)+Rfo+Rfi;
51 -     Uc(i+1)=1/(Uci(i+1));
52 -     A(i)=qrec/(Uc(i)*DTml); %Area da superficie de troca de calor calculada, com Fr=1( contra corrente)
53 -     L(i)=A(i)/(pi*Do*Nt); %Calculo do comprimento
54 -     %Usaremos a distribuição Triangular dos tubos
55 -     %O número de passes estipulado foi de 1
56 -     Nc(i)=round(L(i)/Dic); %Numero de chicanas no casco, é usado essa formula pois é da mesma magnitude do Dic
57 -     B(i)=L(i)/(Nc(i)+1); %Espaçamento entre as chicanas
58 -     As(i)=Dic*C*B(i)/Pt; %Área da seccao transversal atraves do qual o fluido escoas, em m²
59 -     Gs(i)=mc/As(i); %Velocidade Mássica aparente do fluido circulante, em kg/m².s
60 -     ReM(i)=Gs(i)*De/us; %Reynolds modificado
61 -     ho(i+1)=(ks*0.36/De)*(((De*Gs(i))/us)^(0.55))*((Prs^(1/3))*((us/uws)^(0.14)));
62 - end

```

Fonte: Autor

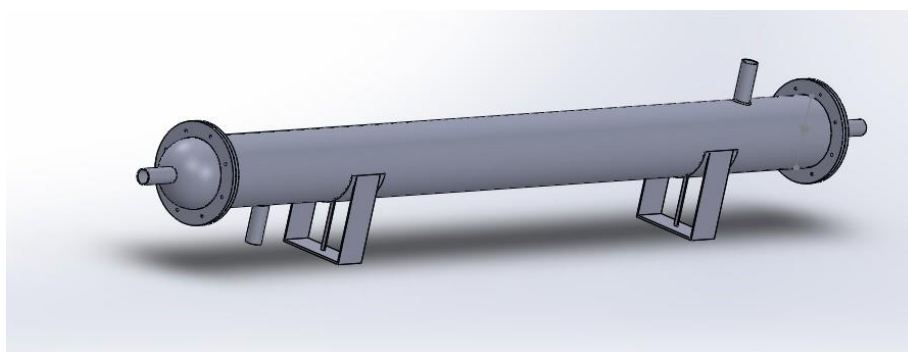
4.4 Modelagem

Para seguir com a análise do trocador de calor proposto, se faz necessário a construção do modelo em três dimensões em um software CAD, sendo usado nesse caso o SpaceClaim. Essa modelagem representa de forma simplificada a geometria do trocador de calor, dado que para o caso de simulações térmicas pode-se fazer algumas simplificações na hora de modelar, como por exemplo a exclusão do vertedor, olhal, etc.

Como se trata de simulação envolvendo fluido, deve-se representá-lo de forma objetiva. Esta representação é feita através dos preenchimentos das regiões correspondentes a cada fluido envolvido no processo. Isto é feito para que posteriormente se faça possível definir qual fluido vai passar em qual local e suas condições de contorno.

A Figura 21 mostra o modelo já construído no software, a Figura 22 mostra a parte interna do mesmo onde pode-se observar o fluido, e a Figura 23 um zoom para uma melhor visualização da parte interna.

Figura 21 – Modelagem.



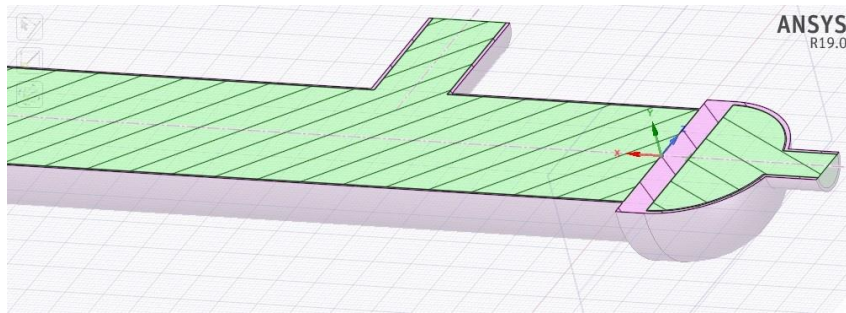
Fonte: Autor

Figura 22 – Modelagem Interna.



Fonte: Autor

Figura 23 – Modelagem Interna com zoom.



Fonte: Autor

Abaixo, segue brevemente como foi feita a determinação dos valores para cada parte do modelo:

4.4.1 Tubos

Para os tubos, como já dito anteriormente, foi utilizado o mesmo comprimento do casco, $L=7\text{m}$, e diâmetros internos e externos, retirados da tabela da norma, de 28,46 e 31,8mm respectivamente, com 114 tubos dispostos formando um quadrado de distancia entre os centros de 50mm.

4.4.2 Casco

O casco foi construído com comprimento de $L=7\text{m}$, após definida a área e para não ter que usar um número de tubos ainda maior, utilizando o mesmo material dos tubos: aço inox com zinco, e com diâmetros interno e espessura de 512mm e 7,9mm respectivamente, também definidos na tabela da norma.

4.4.3 Bocais

Os bocais tiveram como medidas de altura, $h=304\text{mm}$ e diâmetro interno $D_b=101\text{mm}$ para que respeitasse o limite da norma, que permite de 25 a 900 mm de altura para os bocais. A espessura seguiu a mesma do casco com $T_b=7,9\text{mm}$

4.4.4 Espelho

As medidas do espelho seguiram as recomendações da norma, com as medidas no intervalo que ela propõe como visto na Figura 12, com espessura de 30mm, diâmetro de 750 mm, e os furos com diâmetro de 13mm.

4.4.5 Base

A base foi construída seguindo-se apenas como complemento físico do trocador, com altura e espessuras comuns às utilizadas na indústria, por não estar sendo analisado o projeto de forças. Foi respeitado os limites da norma.

Altura= 180mm, espessura= 9,5mm e espessura da circunferência= 6,5mm.

4.5 Equipamentos e acessórios

Na modelagem deve-se atentar apenas ao pontos mais importante, pelo fato de algumas partes do dispositivo influenciarem muito pouco na simulação, no entanto aumentaram o tempo de trabalho para o desenho. Nessa seção ficaram os equipamentos, que não estão na modelagem, e acessórios que são usados no trocador de calor.

Vertedor: É uma estrutura hidráulica que pode ser utilizada para diferentes finalidades, como medição de vazão e controle de vazão, sendo estes os principais usos.

Olhal: É um elemento de fixação como um cabo (de metal ou de fibra) com um orifício (buzina) para se passar outro elemento ou para se o poder prender por essa orifício.

Gaxeta: As gaxetas são usadas para a fabricação de anéis de vedação, tais anéis evitam vazamentos, se destacam por terem facilidade de trabalhar com todos tipos de fluidos e amplas faixas de temperatura ou pressão.

Tirantes: É uma peça estrutural composta por um ou mais elementos, que tem por função resistir a esforços, forças ou tensões, de tração.

Anel de vedamento: O vedador é fabricado em forma circular e utiliza como matéria-prima elastômeros diversos. O material é um polímero de propriedades elásticas, parecido com a borracha, capaz de suportar grandes deformações antes da ruptura. O anel é colocado entre ranhuras pré-dimensionadas no produto. Ao ser pressionado pela água, ele se deforma e é comprimido contra a extremidade oposta à ranhura para vedar o sistema.

4.6 Metodologia para simulação

A análise simulacional iniciou-se, com a determinação das condições de contorno, no software Ansys utilizando o Fluid Fluent. Com os passos de todo esse processo: geração de malha, setup , equações de fluxo, etc.

4.6.1 Malha

A criação da malha é um processo crucial no processo de simulação, é possível alterá-la de diversas formas, como seu tamanho, sua forma e qualidade. Nesse estudo não se fez objetivo fazer análise de malha, logo foi gerada a malha padrão com as informações na Tabela 4.

Tabela 4 – Informações da Malha gerada

Informações da Malha	Valor
Nós	7.550.000
Elementos	18.820.000

Fonte: Autor

O modelo determinado com base na literatura estudada e norma usada, está bem dimensionado. No entanto para o uso em simulação, ocorre que ele supera a capacidade de equipamento disponíveis. Com isso optou-se por determinar um modelo reduzido, que está aproximado do inicial com uma proporcionalidade.

Ao gerar a malha da geometria definida percebeu-se o enorme número de nós e elementos da mesma, na casa dos milhões, algo que retardaria muito o processo de simulação. Então decidiu-se optar por um modelo reduzido que seguiria nos moldes do inicial, mantendo uma escala para obter um resultado aproximado.

4.6.1.1 Modelo Reduzido

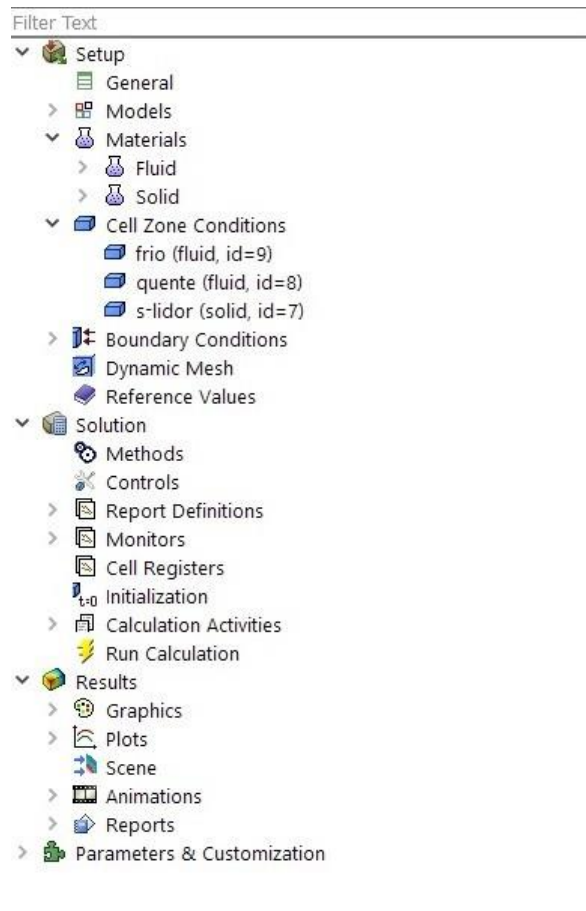
O modelo reduzido determinado para a análise não teve o formato do trocador modificado, porém as medidas foram diminuídas preferencialmente na escala 1:2. Outras dimensões tiveram uma mudança diferente por questões da norma e para se adequar ao novo modelo fazendo com que o resultado final fosse análogo ao modelo anterior.

4.6.2 Setup

O Setup é a parte crucial de uma simulação, após a determinação do modelo. Nesta etapa incluem-se entradas e saídas dos fluidos quentes e frios, equações de energia, eixo da gravidade, materiais usados, interfaces e pra finalizar as condições de contorno que vão ditar o funcionamento da simulação com a realidade.

O fluxo usado no setup para esse tipo de simulação em fluidos, segue a ordem da Página inicial do setup, que pode ser vista na Figura 24.

Figura 24 – Página Inicial Setup.



Fonte: Autor

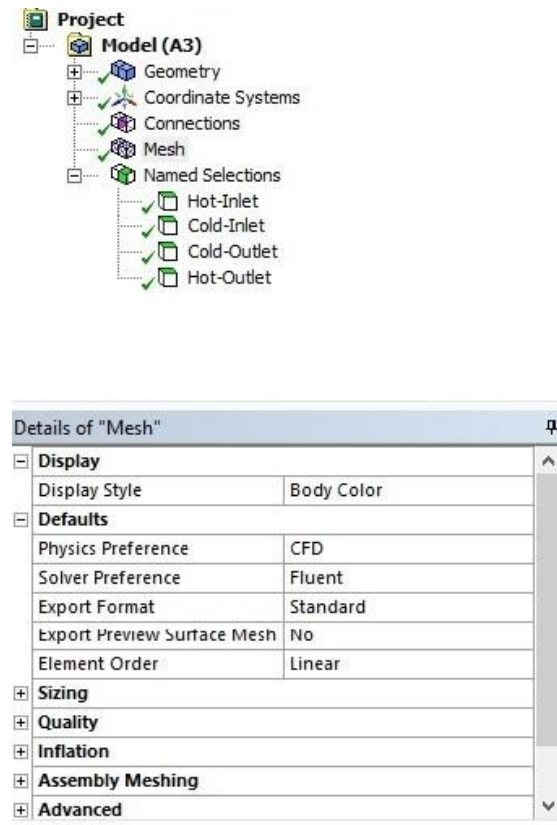
4.6.2.1 Outputs e Inputs na malha

Ainda no local onde foi gerada a malha, é necessário antes de partir pro Setup propriamente dito, criar as entradas e saídas onde os fluidos quentes e frios irão passar, algo que será visto posteriormente para inclusão das condições de contorno. Ver Figura 25.

4.6.2.2 General e Models

Em "General" deve-se ativar a gravidade e inserir-la no eixo adequado, de acordo com a modelagem feita, e a opção do tempo para transiente, pois essa opção trabalha com equações que variam no tempo, deixando a simulação mais completa. Em seguida em Models, ativamos a energia e na opção abaixo, modelo viscoso escolhe-se K-epsilon e o modelo Realizable, pois é a opção que trabalha com equações que mais se assemelham a um trocador de calor com fluxo turbulento e sem descolamento, ativando também a Scalable Wall functions para a troca térmica das paredes.

Figura 25 – Página de geração de malha.



Fonte: Autor

4.6.2.3 Materials e Cell Zone

Na parte de Materials, adicionam-se os materiais a serem usados, nesse caso o caldo de cana e vapor d'água. Porém mesmo o Ansys disponibilizando de um biblioteca de materiais, o caldo de cana teve que ser adicionado, com suas propriedades como capacidade calorífica, densidade, etc. Em seguida, na Cell Zone inserir os respectivos materiais na zonas respectivas de troca de calor: sólido, fluido frio e fluido quente.

4.6.2.4 Condições de Contorno

As condições de contorno, que são inseridas nas saídas e entradas mencionadas na Figura 26, postas na geração da malha. Nesse caso, foi posto velocidade do fluido quente de 32 m/s e do fluido frio de 5 m/s, velocidade essas calculadas da vazão mássica de entrada e fatorizadas no código para o modelo reduzido, e pressão de entrada 171 KPa, dada como condição inicial, e as outras pressões ambientes.

4.6.2.5 Initialization e Run Calculation

Em Solution, vai-se na opção Controls onde limita-se a temperatura e pressão para não haver possibilidade de fuga de valores, com mínima de 40°C e máxima de 125°C. Em seguida em initialization seleciona-se a opção de Híbrida, onde o Ansys irá seguir com a temperatura e pressão do ambiente e interfaces.

Antes de finalmente iniciar as iterações, deve-se ir em Run calculation escolher o número de iterações a serão rodadas, lembrar-se que poucas iterações vão gerar um resultado não confiável e sem convergência, e em data file quantities os parâmetros a serem observados pós simulação.

5 Resultados

Nessa seção serão abordados os resultados obtidos na pesquisa.

5.1 Resultados do código

Como resultado para o código construído, dado as condições iniciais e as fórmulas já mencionadas. Alguns desses parâmetros não foram usados diretamente no trabalho em questão, mas eles complementam muito o estudo do dispositivo, tornando mais robusto e o entendimento de cada parâmetro encontrado. Ver tabelas 5 e 6.

Tabela 5 – Resultados do código parte 1.

Simbolo	Detalhe	Valor	Unidade
mc	Vazão mássica do fluido frio	92,53	Kg/s
tc1	Temperatura inicial do fluido frio	30	°C
tc2	Temperatura final do fluido frio	50	°C
mh	Vazão mássica do fluido quente	42	Kg/s
ro	Densidade fluido quente	1,275	Kg/m ³
ros	Densidade fluido frio	1041,3	Kg/m ³
th1	Temperatura inicial fluido quente	125	°C
Ph	Pressão absoluta do fluido quente	1,75	Kgf/cm ²
Dtc	Variação da temperatura fria	20	°C
Cpc	Capacidade calorífica do fluido frio a 40°C	3,14	kJ/kg.K
qrec	Calor recebido pelo fluido frio	5810884	Joule
qced	Calor cedido pelo fluido quente	5810884	Joule
th2	Temperatura final do fluido quente	91,8	°C
hi(1)	Taxa de transferencia de calor sensível com vapor	10000	W/m ³ .K
ho(1)	Taxa de transferencia de calor sensível com organico leve	1750	W/m ³ .K
Do	Diâmetro externo dos tubos	0,0318	m
Di	Diâmetro interno dos tubos	0,0285	m
K	Condutividade térmica do material do tubo	23	W/m.K
Rfi	Resistência à incrustação inicial	$8,8 \cdot 10^{-5}$	m ² .K/W
Rfo	Resistência à incrustação inicial	$8,8 \cdot 10^{-5}$	m ² .K/W
DTml	Variação da temperatura logarítmica média	64,84	°C
Nt	Número de tubos	114	Adimensional
Pt	Passo transversal dos tubos	0,05	m
ut	Viscosidade do fluido quente na temperatura média	$1,264 \cdot 10^{-5}$	Pa.s
kt	Condutividade térmica do fluido quente	0,0258	W/m.K
ks	Condutividade térmica do fluido frio	0,484	W/m.K
us	Viscosidade do fluido frio na temperatura média	$3,03 \cdot 10^{-5}$	Pa.s
uws	Viscosidade do fluido frio na temperatura da parade	$3,03 \cdot 10^{-5}$	Pa.s
Pr	Número de Prandtl fluido quente	2,045	Adimensional
Prs	Número de Prandtl fluido quente na temp parada	1,965	Adimensional
De	Diâmetro equivalente aparente para Layout	0,0577	m
C	Espaçamento entre as paredes externas do tubo	0,19	m

Fonte: Autor

Tabela 6 – Resultados do código parte 2.

Re	Número de Reynolds fluido quente	906430	Adimensional
Ft	Fator de atrito	0,003	Adimensional
Nu	Número de Nusselt	2002,6	Adimensional
Dic	Diametro interno do casco	0,512	m
Uc	Coefficiente global de troca térmica	839,44	W/m ² .K
L	Comprimento do casco	7	m
A	Área superficial de troca de calor	106,7	m ²
Nc	Número de Chicanas	13	Adimensional
B	Espaçamento entre as paredes do fluido circulante	0,4654	m
As	Área da secção transversal do qual o fluido escoia	0,0891	m ²
Gs	Velocidade mássica aparente	1038,3	Kg/m ² .s
ReM	Númeoro de Reynolds Modificado	197660	Adimensional
ho(10)	Taxa de transferencia de calor sensível com vapor final	1815,4	W/m ³ .K
hi(10)	Taxa de transferencia de calor sensível com organico leve final	3095,2	W/m ³ .K
Atp	Área da secção transversal dos fluidos em cada passe	0,1043	m ²
Um	Velocidade de escoamento	513,2	m/s
DPT	Queda de pressão nos tubos	1126400	Pa
Fs	Fator de atrito do fluido no casco	0,1754	Adimensional
fis	Fator de correção da viscosidade	1	Adimensional
DPs	Queda de pressão no casco	20488	Pa

Fonte: Autor

5.2 Resultado das Simulações

5.2.1 Modelo 3D

O modelo utilizado para simular teve como dimensões para construção tais valores, como pode se ver na Tabela 7.

Tabela 7 – Medidas do modelo reduzido

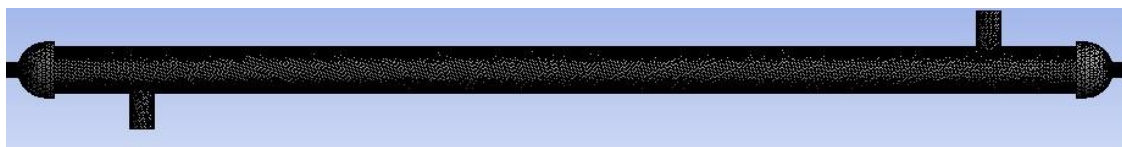
Partes	Diâmetro Interno (mm)	Espessura (mm)	Largura (mm)
Tubos	14,23	3,34	3500
Casco	152	7,9	3500
Espelho	180	10	30
Bocal Frio	76,2	7,9	30
Bocal Quente	40	7	50

Fonte: Autor

5.2.2 Malhas

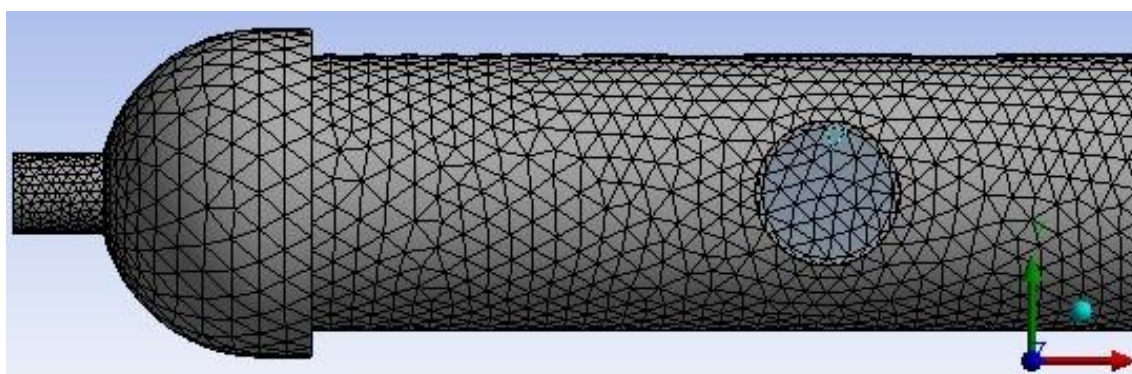
Após haver inserido o modelo para cálculo no Fluent, o próximo passo foi gerar as malhas do mesmo. Optou-se, como mencionado, por gerar a malha com o padrão do Ansys para CFD, chegando ao resultado de malha de 941.000 nós e 4.563.000 elementos. Ver Figura 26 e 27.

Figura 26 – Malha Gerada.



Fonte: Autor

Figura 27 – Segmento da malha.



Fonte: Autor

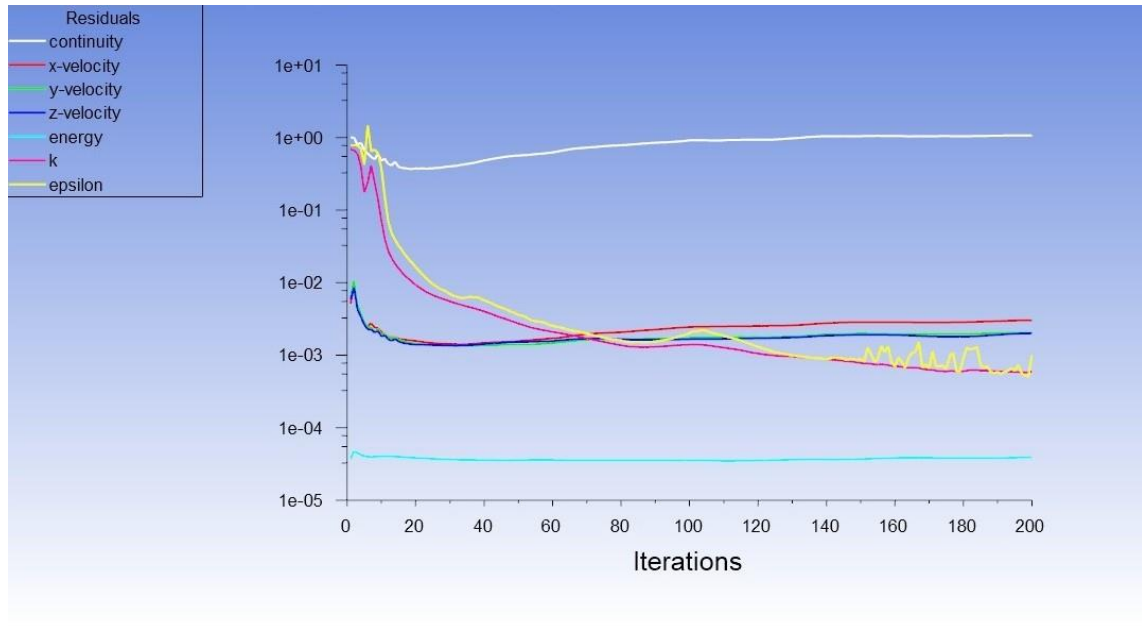
5.2.3 Análise de Escoamento

Como resultado de 200 iterações, após ter posto as entradas no Setup, obteve-se o gráfico da escala de residuais da Figura 28. Esse gráfico é importante no tocante a verificação de convergência dos resíduos e comportamento do fluido dentro do trocador.

Dentre os resíduos, estão a continuidade que serve para observar se os parâmetros estão seguindo como esperado, sem grande divergências, as velocidade em x,y,z que são dadas pela velocidade do fluido naquele eixo, a energia no conjunto trocador de calor, e as constantes enérgicas K e Epsilon que são calculadas de acordo com a fórmula fluídica de cálculo definida no Setup. Outra para análise é que, como esperado, os valores tem uma queda brusca inicialmente pelo fato do fluido entrar e passar por uma zona não linear, que é o espelho em geometria curva. E após entrar nos tubos, entram em uma zona constante, que é visivelmente observada pelo comportamento dos resíduos após a iteração 100.

É importante observar que, excetuando-se a variável Epsilon que ainda estava numa fase de transição ao valor de convergência, os outros resíduos dos parâmetros se mantiveram constantes, o que indica uma convergência e confiabilidade na resposta gerada.

Figura 28 – Gráfico de resíduos



Fonte: Autor

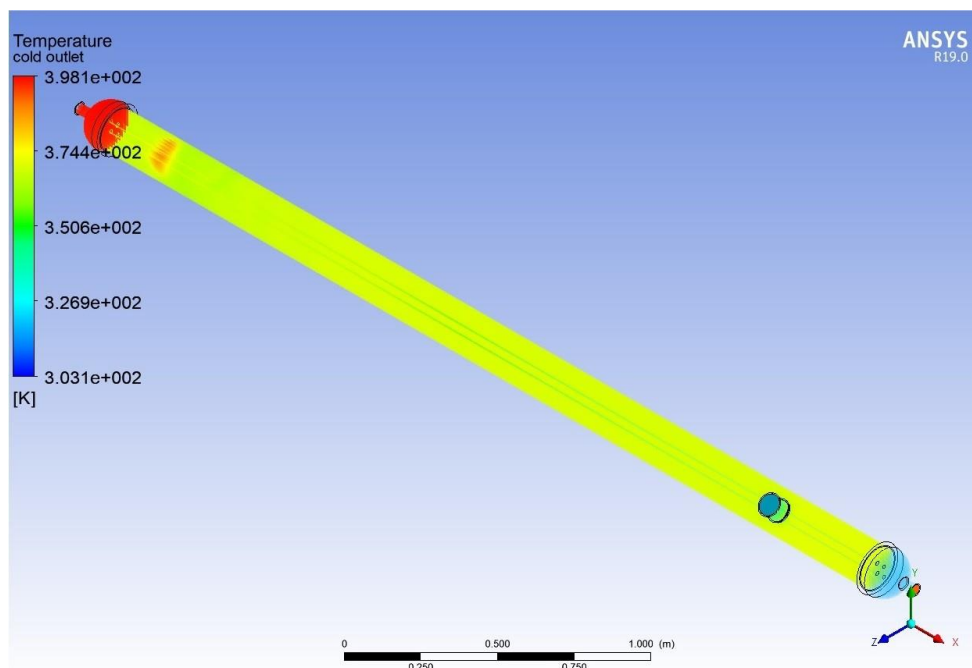
5.2.4 Análise Térmica

Por fim chegou-se ao resultado da análise térmica propriamente dita, onde pode-se ver nas Figuras 29 e 30 que as temperaturas finais estão realmente próximas do esperado, já que como visto acima, na tabela 5, a temperatura final esperada para fluido quente seria de $91,8^{\circ}\text{C}$ e vemos algo em torno dos 100°C , e fluido frio esperado seria de 50°C e vemos algo em torno dos 47°C .

Essas observações da temperatura são vistas observando a tabela de cores no canto superior esquerdo. Os pontos analisados aqui foram as saídas e entradas dos fluidos frios e quentes, feito após a geração da malha, e o corpo do casco, local onde acontece a maior troca térmica. O fluido quente passa pelos tubos e saindo na bocal do espelho e o fluido frio passando pelo casco e saindo no bocal superior.

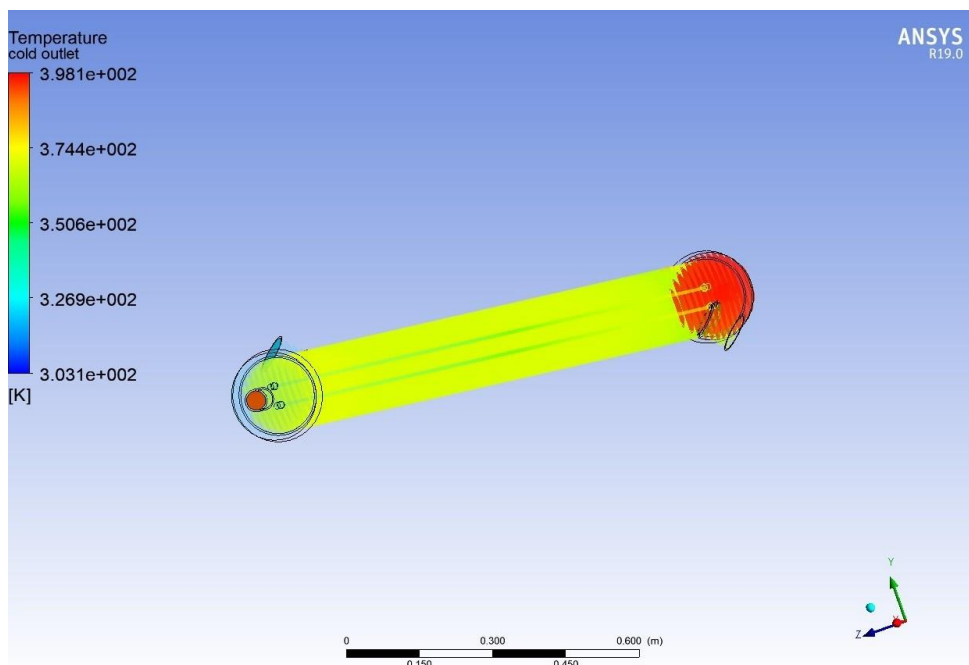
Um ponto que chama a atenção é a temperatura do comprimento do casco, que se mantém ao longo do comprimento, na faixa dos 92°C . A provável manutenção da temperatura nesse espaço deve-se ao fato do fluido quente passar a uma velocidade rápida para o tamanho do casco, não havendo tempo suficiente pra troca térmica numa dimensão da área do casco.

Figura 29 – Simulação Temperatura.



Fonte: Autor

Figura 30 – Simulação Temperatura.

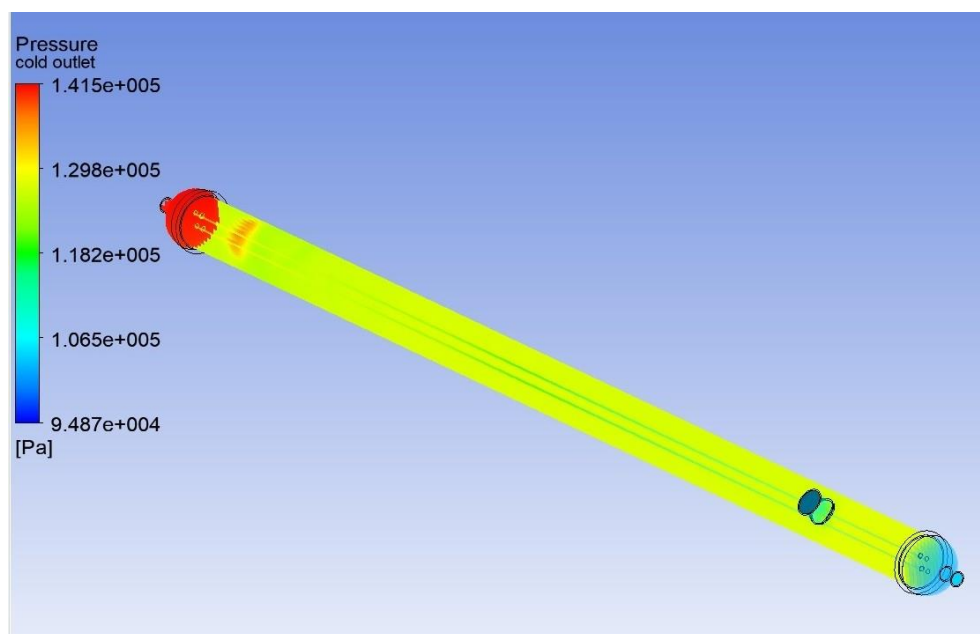


Fonte: Autor

E na Figura 31, há uma análise da pressão da pressão. Similarmente como na temperatura, utiliza-se a escala de cores no canto superior esquerdo. É perceptível ver uma queda de pressão, indicada na cor azul, na saída do fluido quente, saída dos tubos, que sai a 948.7000 Pa o que já indica uma diminuição, visto que a entrada foi a 171000, que foi a condição inicial dada.

Essa diminuição da pressão está ligada diretamente a queda da temperatura no ponto, pois usando a fórmula $PV=nRT$, ve-se que a variação da temperatura é diretamente proporcional a variação da pressão.

Figura 31 – Simulação Pressão.



Fonte: Autor

6 Conclusão

O desenvolvimento do presente trabalho trouxe informações muito relevantes dos trocadores de calor, dado que ele é de fundamental importância nas indústrias de processo.

O cenário utilizado no presente trabalho, foi o da indústria açucareira. Propiciando assim um link entre o estudo acadêmico e a aplicação direta deste equipamento. Esta indústria oferece informações de parâmetros iniciais bastante confiáveis, e assim pode-se ter uma escala comparativo condizente.

Isso foi possível graças a definição dos objetivos específicos e o cumprimento deles. O uso da norma e a aplicação das fórmulas, seguindo um fluxograma, foi cumprido ao ter-se a modelagem bem definida e dimensionada. O código criado também deu flexibilidade de valores para que os testes pré modelagem ocorrem-se sem problemas.

Aplicou-se posteriormente a metodologia de análise, após haver inserido o modelo no Ansys, e ter feito o passo a passo de geração de malha, input de valores, escolha de parâmetros, etc. Logo chegou-se aos resultados de escoamento e térmicos que foram analisados comparativamente em relação ao que se esperava deles pelo cenário escolhido.

Os resultados foram bastante confiáveis do que foi proposto, o que indica um correto entendimento do problema e aplicação dessas implementações junto aos softwares de análise. O estudo servirá de base para futuras otimizações em trocadores de calor, onde proverá um grande pontapé inicial no que diz respeito ao conhecimento do dispositivo e uso das ferramentas associadas ao projeto e análise.

Referências

- ALTABEY WAEEL & NOORI, M. . W. L. ***Using Ansys for Finite Element Analysis, Volume II: Dynamic, Probabilistic Design and Heat Transfer Analysis***. [S.l.]: Momentum Press, 2018.
- ASSOCIATION, T. E. M. ***Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Associations Standards of the Tubular Exchanger***. [S.l.], 2007. Citado na página 33.
- BERGMAN, T. L. et al. ***Fundamentals of heat and mass transfer***. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado 3 vezes nas páginas 20, 23 e 24.
- CENGEL YUNUS A & GHAJAR, A. J. ***Tranferência de Calor e Massa***. [S.l.]: AMGH Editora, 2009. Citado 3 vezes nas páginas 15, 17 e 18.
- FRAAS, A. P. ***Heat exchanger design***. [S.l.]: John Wiley & Sons, 1989. Citado na página 18.
- GHIZZE, A. ***Manual de trocadores de calor, vasos e tanques***. [S.l.]: IBRASA, 1989. Citado na página 22.
- LÓPEZ, D. P. P. ***Simulação Computacional de CFD de um pequeno trocador de calor casco e tubo***. 2017.
- SHAH RAMESH K & SEKULIC, D. P. ***Fundamentals of heat exchanger design***. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2003. Citado na página 14

ANEXO – Código de construção de trocador de calor

Código Parte 1

```

1  %TCC- TROCADOR DE CALOR - DIMENSIONAMENTO
2  %ITERAÇÃO DE VALORES
3  clear;
4  %Valores iniciais conhecidos
5  mc=92.53; %vazao massica do fluido frio em kilos por segundo
6  tcl=30; %temperatura inicial fluido frio
7  tc2=50; %temperatura final fluido frio
8  mh=42; %vazao massica do fluido quente em kilos por segundo
9  ro=1.275; %Kg/m3
10 ros=1041.3; %Kg/m3 fluido frio
11 thl=125; %temperatura inicial fluido quente
12 Ph=1,75; %pressao absoluta do fluido quente em kgf/cm^2
13 Dtc=tc2-tcl; %variação de temperatura fria
14 Cpc=3140; %Capacidade calorifica do fluido frio a 40 graus, temp media, em J/kg.K
15 Cph=4176; %Capacidade calorifica do fluido quente a 110 graus, temp media estipulada, em J/kg.K
16 qrec=mc*Cpc*Dtc;
17 qced=qrec;
18 th2=thl-qced/(mh*Cph);
19 hi(1)=10000; %Taxa de trans de calor sensivel com vapor, média dos limites encontrados , W/m^2.K
20 ho(1)=1750; %Taxa de trans de calor sensivel com organico leve, média dos limites encontrados
21 %Limites do coeficiente global de transferencia encontrado, 900<U<1200 de vapor para organicos leves
22 Do=0.03180; %Diametro externo dos tubos, mais usal, valor entre custo e facili de limpeza, em m

```

Fonte: Autor

Código Parte 2

```

23 - Di=0.02846; %Diametro interno dos tubos, retirado de BWG 14, em m
24 - K=23; %Contuidade termica do material do tubo, retirado do uso de aço carbono c/zinco
25 - Rfi=0.000088 ; %Resistencia à incrustação inicial, retiradas de tabela
26 - Rfo=0.000088 ;
27 - DTml=((th2-tc2)-(th1-tc1))/log((th2-tc2)/(th1-tc1)) ; %Calculo da variação de temperatura logaritimica média
28 - Nt=164; %Chute inicial do numero de tubos
29 - Pt=0.0508; %Passo transversal dos tubos em m, 2 polegadas
30 - ut=1.264*(10^-5); %Viscosidade na temperatura média em Pa.s
31 - kt=0.0258; %W/m°C
32 - ks=0.484; %Interpolação entre 0,475 a 0,493 para 4,4°C a 100,4°C
33 - us=3.03*(10^-4); %Interpolação entre 5.10^-3 a 0.04.10^-3 para 4° a 100°
34 - uws=3.03*(10^-4); %em Pa.s
35 - Pr=Cph*ut/kt; %Numero de Prandtl fluido quente
36 - Prs=Cpc*us/ks; %Numero de Prandtl fluido quente
37 - De=((2*(Pt^2)*sqrt(3))-pi*(Do^2))/(pi*Do); %Diametro equivalente aparente para layout triangular
38 - C=Pt-Do; %Espaçamento entre as paredes externas do tubo, em m
39 - Re=4*nh/(Nt*pi*Di*ut); %Numero de reynolds fluido quente
40 - Ft=(1/((1.58*log(Re))-3.28)^2); %Fator de atrito
41 - Nu=((Ft/2)*Re*Pr)/(1.07+(12.7*((Ft/2)^(0.5))*((Pr^(2/3))-1))); %Equação de Nusselt
42 - for i=2:10

```

Fonte: Autor

Código Parte 3

```

42 - for i=2:10
43 - hi(i)=kt*Nu/Di; %Coeficiente de transferencia, W/m^2.K
44 - end
45 - Dic=input('Digite o diametro interno do casco:'); %O diametro interno do casco será visto da tabela de acordo com o numero de tubos e Pt
46 - Uc(1)=725; %Média entre 450 e 1000, valores para vapor organânico leve em W/m^2.K
47 - Usi(1)=725;
48 - for i=1:10
49 - Usi(i+1)=(Do/(Di*hi(i)))+(Do*log(Do/Di)/(2*K))+1/ho(i)); %Formula do coeficiente global de transf com incrustação
50 - Uci(i+1)=Usi(i+1)+Rfo+Rfi;
51 - Uc(i+1)=1/(Uci(i+1));
52 - A(i)=qrec/(Uc(i)*DTml); %Area da superficie de troca de calor calculada, com Fr=1( contra corrente)
53 - L(i)=A(i)/(pi*Do*Nt); %Calculo do comprimento
54 - %Usaremos a distribuição Triangular dos tubos
55 - %O número de passes estipulado foi de 1
56 - Nc(i)=round(L(i)/Dic); %Numero de chicanas no casco, é usado essa formula pois é da mesma magnitude do Dic
57 - B(i)=L(i)/(Nc(i)+1); %Espaçamento entre as chicanas
58 - As(i)=Dic*C*B(i)/Pt; %Área da secção transversal através do qual o fluido escoas, em m^2
59 - Gs(i)=mc/As(i); %Velocidade Mássica aparente do fluido circulante, em kg/m^2.s
60 - ReM(i)=Gs(i)*De/us; %Reynolds modificado
61 - ho(i+1)=((ks*0.36)/De)*(((De*Gs(i))/us)^(0.55))*((Prs^(1/3))*((us/uws)^(0.14)));
62 - end
63 - Atp=(pi*(Di^2)*Nt)/4; %Área da secção transversal dos tubos em cada passe
64 - Um=nh/Atp*ro; %Velocidade de escoamento
65 - %Agora irá ser calculado a queda de pressão nos tubos e casco
66 - DPt=((4*Ft*L(10)/Di)+4)*(ro*(Um^2)/2); %Queda de pressão nos tubos
67 - Fs=exp(0.576-(0.19)*log(ReM)); %Fator de atrito do fluido no casco
68 - fis=(us/uws)^0.14; %Fator de correção da viscosidade
69 - DPs=Fs*(Gs(5)^2)*(Nc(5)+1)*Dic/(2*ros*Do*fis); % Queda de pressão no casco

```

Fonte: Autor