

DIMENSIONAMENTO DE UM TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBO ATRAVÉS DO MÉTODO DE BELL-DELAWARE PARA O APROVEITAMENTO DA ENERGIA TÉRMICA DA ÁGUA QUENTE DE UM FORNO A INDUÇÃO

Claudio Antunes Junior¹
Marilise Cristine Montegutti²
Tiago Luis Haus³

RESUMO

Os trocadores de calor são bastante utilizados nas indústrias para o aproveitamento da energia térmica gerada por um fluido, evitando assim o desperdício de energia e podendo utilizá-la em outra atividade. O estudo deste trabalho tem como objetivo principal o dimensionamento de um trocador de calor casco e tubo para que se obtenha o aproveitamento da energia térmica da água, esta proveniente de um forno a indução. Para isso foi aplicado o método de *Bell-Dellaware*, o qual é de literatura aberta, e também foi utilizada a norma TEMA da *Tubular Exchanger Manufacturers Association*. Essas duas fontes auxiliaram na busca das melhores características para o trocador de calor do estudo. Os cálculos executados foram totalmente baseados no método de *Bell-Delaware* e na norma TEMA, os quais foram realizados com o auxílio da linguagem de programação *Python*. A partir dos resultados obtidos foi possível verificar que o método utilizado é viável, principalmente pela comparação dos resultados atingidos estarem de acordo com os valores que são determinados pelos autores citados. O método pode ser utilizado como um ‘pré-dimensionamento’ para a verificação de viabilidade e funcionamento de um trocador para determinada situação, contudo ainda é necessário efetuar um dimensionamento posterior através do uso de um *software* para que sejam consideradas várias situações e mais variáveis, o que é de difícil execução para o método empregado no trabalho.

Palavras-chave: Trocador de Calor. Bell-delaware. Energia Térmica. TEMA. Python.

¹ Graduado em Engenharia Mecânica pela FAE Centro Universitário. *E-mail*: cantunes.j@gmail.com

² Graduada em Engenharia Mecânica pela FAE Centro Universitário. *E-mail*: marilisemontegutti@hotmail.com

³ Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade Federal do Paraná. Professor e coordenador do curso de Engenharia Ambiental e Sanitária da FAE Centro Universitário. *E-mail*: tiago.haus@fae.edu

INTRODUÇÃO

Os trocadores de calor são amplamente utilizados na indústria para o aproveitamento da energia térmica gerada por um fluido. Esta que seria desperdiçada pode então ser utilizada em outra atividade. Para isso existem vários tipos de construções possíveis para o equipamento, dependendo do que se deseja para que assim seja possível determinar qual o melhor para a sua necessidade.

Em específico, no trabalho será abordado o dimensionamento de um trocador de calor tipo casco e tubo, o qual foi escolhido em função da necessidade de se ter que aquecer a água para atividades específicas através do uso de energia elétrica, assim como a água quente que é proveniente do forno é resfriada também através do uso de energia elétrica. Diante disso, julgou-se necessário encontrar uma alternativa para diminuir o uso excessivo de energia elétrica. O estudo inicial era dimensionar um trocador de calor através do uso de um *software*, porém em nossas pesquisas e contato com os fabricantes, se notou que o custo dos *softwares* é bem elevado.

Em função do que foi proposto, o dimensionamento do trocador de calor foi baseado na norma TEMA da *Tubular Exchanger Manufacturers Association* e no método de *Bell-Delaware* que é encontrado em literatura aberta, e para a elaboração dos cálculos se recorreu à linguagem de programação *Python*.

1 OBJETIVOS

O objetivo geral é dimensionar um trocador de calor tipo casco e tubo através do método de *Bell-Delaware*, com o objetivo de aproveitar a energia térmica da água.

Os objetivos específicos são:

Determinar quais são as melhores características para o dimensionamento do trocador de calor, para o nosso estudo;

Verificar a eficácia do método de *Bell-Delaware*, o qual se encontra disponível em literatura aberta;

Programar os cálculos do método de *Bell-Delaware* na linguagem de programação *Python*.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 TRANSFERÊNCIA DE CALOR

A ciência da termodinâmica estuda as formas pelas quais a energia é transferida e as interações entre o sistema e o meio em que está inserida. Essa interação pode ser chamada de trabalho ou de calor (INCROPERA, 2007).

A transferência de calor estuda os mecanismos de transporte de calor e a determinação da temperatura distribuída dos fluxos de calor. Esses mecanismos são chamados de convecção, condução e radiação (LIVI, 2004).

2.1.1 Condução

A condução caracteriza-se como a transferência de energia através das partículas mais energizadas da substância para as partículas menos energizadas, o que resulta em uma interação entre as partículas, a qual pode ocorrer em sólidos, líquidos e gases (ÇENGEL, 2014).

Em líquidos e gases a condução é a colisão ou difusão das moléculas durante seu movimento aleatório. Nos sólidos é a combinação das vibrações das moléculas no arranjo periódico da substância e no transporte de energia através dos elétrons livres (ÇENGEL, 2014).

2.1.2 Convecção

A transferência por convecção ocorre entre a superfície de um sólido, líquido ou gás com o fluido em movimento, e quanto mais rápido a movimentação dos fluidos a transferência de calor por convecção aumenta (ÇENGEL, 2014).

Esta pode ser caracterizada como forçada quando os fluidos são forçados a fluir nas superfícies externas devido a um ventilador, bomba ou o vento. Definida, também como convecção natural quando o movimento do fluido é causado pela densidade e pela variação de temperatura do fluido (ÇENGEL, 2014).

2.1.3 Conservação da Energia

É a primeira lei da termodinâmica, a qual indica que um sistema não pode criar ou destruir energia, mas a energia pode ter uma transformação na sua forma, ou pode

se transferir como calor ou trabalho. Para a aplicação desta lei é necessário conhecer o volume de controle, que é a superfície delimitada, por onde o trabalho, calor ou massa podem passar (KREITH, 2003).

Se a taxa de fluxo de calor na entrada for igual a taxa de fluxo da saída, não há um armazenamento de calor no volume de controle. Porém, se a taxa de fluxo de calor somada à energia gerada for maior que a taxa de fluxo de calor na saída, há um armazenamento de calor no volume de controle. Quando não há armazenamento, o sistema encontra-se em um estado estacionário (KREITH, 2003).

2.2 ENERGIA TÉRMICA

É a energia relacionada com a movimentação randômica dos átomos e das moléculas. A energia térmica pode ser determinada a partir da mensuração da temperatura. Quanto maior for a movimentação dos átomos em determinada amostra, a temperatura irá se elevar e aumentar a energia térmica (CHANG,2013).

2.3 TROCADORES DE CALOR

Os trocadores de calor são utilizados para transmitir energia térmica de um sistema para a sua vizinhança ou entre o próprio sistema. Eles podem ser classificados de várias maneiras, como pelo modo de operação, pela quantidade e natureza dos fluidos utilizados, pela maneira que é construído e outros fatores (BRAGA, 2004).

2.3.1 Natureza da Transferência

Em relação à natureza da transferência, os trocadores podem ser classificados em contato direto ou indireto. Estes ainda podem ser divididos em trocadores de transferência direta e de armazenamento (BRAGA, 2004).

2.3.1.1 Trocadores de calor de contato indireto

Nos trocadores de calor de transferência indireta ocorre a transferência de calor contínua entre dois fluidos, um quente e outro frio, através da parede que os separa. Não ocorre a mistura dos fluidos em virtude da parede de separação. Esses trocadores são chamados de recuperador e podem ser de placa, tubulares ou de superfície estendida (BRAGA, 2004).

2.3.1.2 Trocadores de calor de contato direto

Nos trocadores de contato direto ocorre a mistura dos dois fluidos. A aplicação destes vai além da transferência de calor, pois ocorre a transferência de massa também. Esse trocador, além de mais barato, possui taxa de transferência de calor superior aos de contato indireto, porém é necessário que os dois fluidos possam se misturar (BRAGA, 2004).

2.3.2 Tipos de Construção

Conforme a NBR 11696, os trocadores de calor foram classificados em relação ao seu tipo de construção, como: duplo-tubo, serpentina, placas, resfriados a ar, rotativo regenerativo os que foram citados são os mais encontrados na indústria, assim como o trocador de calor tipo casco e tubo (ABNT, 1991).

2.3.2.1 Tema

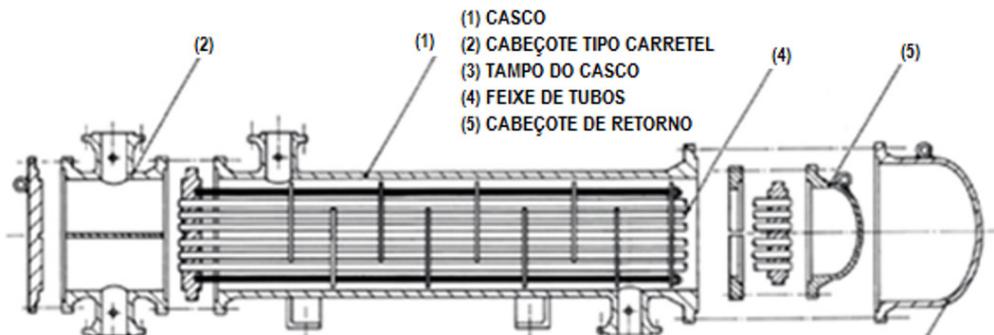
A TEMA (Associação de Fabricação de Trocador Tubular) é uma norma de padronização de construção mecânica dos trocadores de calor tubulares, que leva em consideração três classes de trocador de calor de casco tubo, sendo eles: R, C e B. A classe R é utilizada em processos severos, como por exemplo para o petróleo. Já a classe B é utilizada em processamento químico e a classe C, a mais comum, é utilizada na indústria (THULUKKNAM, 2013).

A norma padronizou os tipos de cabeçotes de entrada, retorno e os tipos de cascos.

2.3.2.1.1 Casco e tubo

Composto por um feixe de tubos que são envolvidos por um casco, em sua maioria cilíndrico, sendo que um fluido irá se movimentar no interior dos tubos e o outro no seu exterior. Esse tipo de construção que é exibida na FIG. 1 é constituída por outros componentes como o cabeçote de entrada, o casco, o feixe de tubos e o cabeçote de saída (ABNT, 1991).

FIGURA 1 – Trocador casco e tubo



FONTE: Adaptada, ABNT, (1991, p. 4)

2.4 MÉTODO DE BELL-DELAWARE

O departamento de Engenharia Química da Universidade de *Delaware* nos anos de 1947 a 1963 realizou pesquisas na área de escoamento de fluidos e transferência de calor no lado casco para os trocadores casco tubo. Esses estudos foram financiados por instituições e empresas como, por exemplo, a TEMA, a ASME e a Dupont (ARAÚJO, 2002).

Este método trata do escoamento do lado casco dos trocadores de calor e é o método mais preciso e recomendado na literatura aberta (ARAÚJO, 2002).

Os estudos iniciais foram baseados na transferência de calor e na perda de carga entre os feixes de tubo. Após isso, foram analisadas as características dos trocadores reais. O método foi desenvolvido para casco tipo E (ARAÚJO, 2002; TEMA, 2009).

2.4.1 Procedimento para Projeto Térmico

Em geral o procedimento para o design do trocador de calor casco tubo é bastante longo por isso é necessário dividi-lo em algumas etapas (THULUKKNAM, 2013).

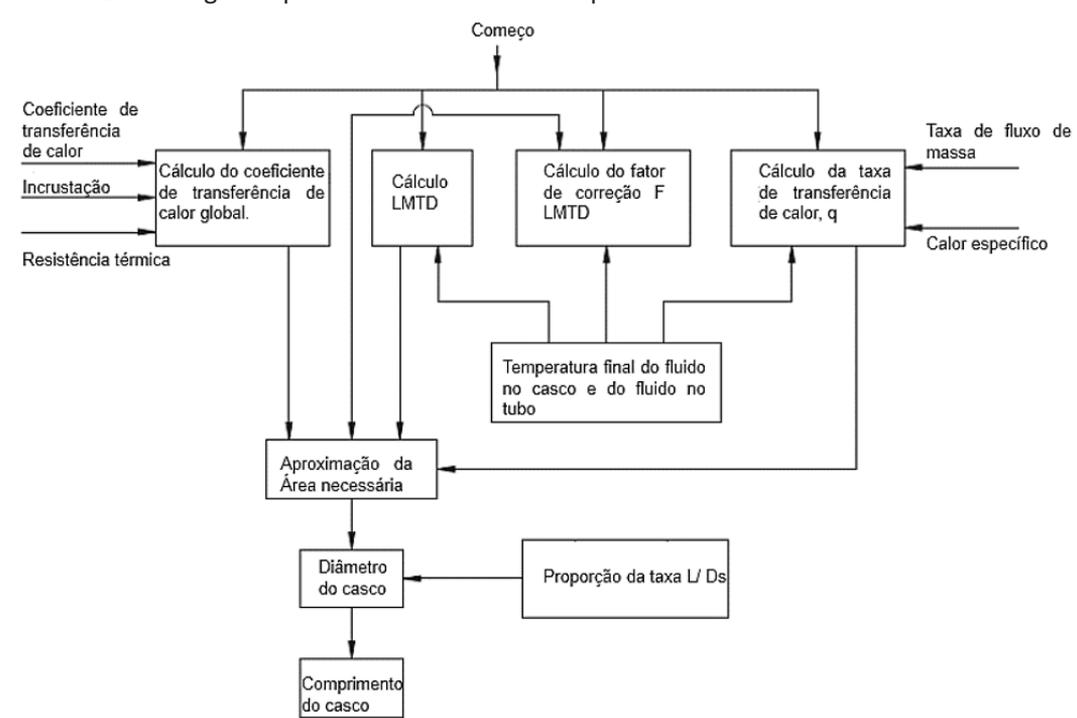
- Dimensionamento aproximado do trocador de calor casco e do tubo.
- Avaliação dos parâmetros geométricos conhecidos para o auxílio nos cálculos.
- Fatores de correção para a transferência de calor e para a queda de pressão.
- Coeficiente de transferência de calor no casco e para a queda de pressão.
- Coeficiente de transferência de calor no tubo e para a queda de pressão.
- Avaliação e comparação dos resultados com as especificações.

O método de Bell-Delaware para o dimensionamento aproximado do trocador de calor casco tubo é um procedimento que tem como objetivo chegar em um conjunto de parâmetros do trocador de calor (THULUKKNAM, 2013). O projeto para aproximação inclui os seguintes estágios:

- Calcular o coeficiente de transferência de calor global.
- Calcular a taxa de transferência de calor necessária.
- Calcular a área necessária para transferência de calor.
- Geometria do projeto.

A FIG. 2 é um fluxograma para o dimensionamento aproximado.

FIGURA 2 – Fluxograma para o dimensionamento aproximado



FONTE: Adaptada, THULUKKNAM, (2013, p. 344)

2.4.2 Procedimento para o Método de Bell-Delaware

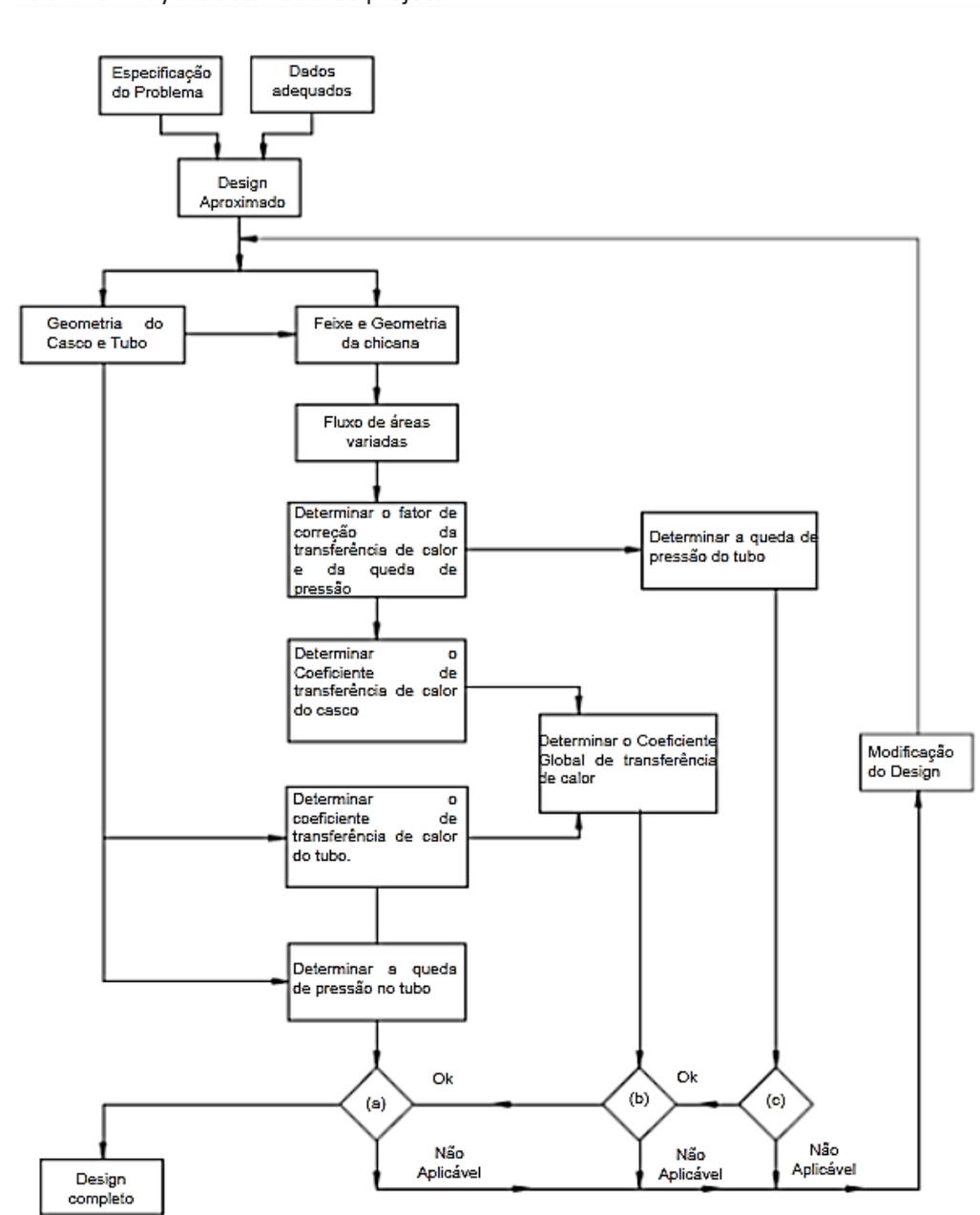
O método de *Bell-Delaware* assume que algumas propriedades dos fluidos e da construção do trocador de calor já são conhecidas ou especificadas, por isso é necessário realizar primeiramente o dimensionamento térmico (THULUKKNAM, 2013).

As propriedades necessárias são: vazão mássica, temperatura de entrada e saída, densidade, viscosidade, condutividade térmica e calor específico do fluido que está no

casco; assim como alguns dados da geometria: diâmetro externo do tubo $[d]$, *layout* dos tubos $[\theta_{tp}]$, diâmetro interno do casco $[D_s]$, diâmetro limite dos tubos $[D_{otl}]$, comprimento efetivo dos tubos entre os espelhos $[L_{ti}]$, corte da chicana $[B_s]$ como uma porcentagem do diâmetro interno do casco $[D_s]$, espaçamento das chicanas $[L_{bc}]$, espaçamento da chicana de entrada e saída $[L_{bi}]$ e $[L_{bo}]$, e o número das tiras de vedação $[N_{ss}]$ (THULUKKNAM, 2013).

Na FIG. 3 encontra-se o fluxograma detalhado do projeto.

FIGURA 3 – Layout detalhado do projeto



FONTE: Adaptada, THULUKKNAM, (2013, p. 348)

2.5 PYTHON

É uma linguagem de programação, utilizada para escrever softwares. Ela possui alguns aspectos que a tornam mais fácil, como: é uma linguagem interpretada, ou seja, a linguagem é executada por outro programa, que é chamado de interpretador, o qual lê o código fonte e o interpreta. Tem tipagem dinâmica, o que caracteriza que não é necessário declarar o que é a variável, como, por exemplo, inteiro ou decimal, não havendo restrições para as variáveis (BORGES, 2009).

3 METODOLOGIA

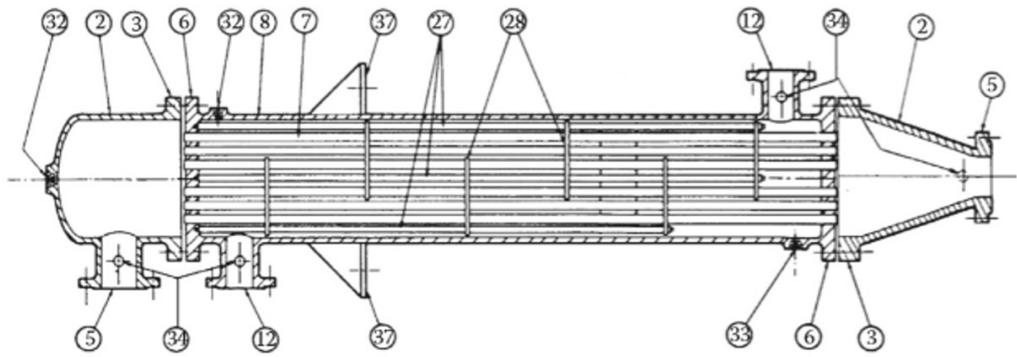
O trabalho foi desenvolvido, com base em bibliografias especializadas e normas, principalmente na norma TEMA (*Standards Of The Tubular Exchanger Manufacturers Association*) da *Tubular Exchanger Manufacturers Association* e no livro *Heat Exchanger Design Handbook* do autor Kuppan Thulukknam, os quais possuem as equações e tabelas utilizadas no desenvolvimento.

3.1 TROCADOR DE CALOR

Com o auxílio da norma de padronização TEMA e com a pesquisa bibliográfica realizada, foi definido dimensionar um trocador de calor do tipo casco e tubo:

- Entrada tipo B (*Bonnet*) a qual é usada geralmente para fluidos limpos.
- Casco do tipo E que é o mais comum e barato, ele possui apenas um passe no casco isso caracteriza que o fluido entra em uma das extremidades e sai na outra.
- Saída tipo M, pois permite uma expansão térmica moderada e a diferença das temperaturas de entrada é menor que 56°C.

FIGURA 4 – Trocador de calor do tipo BEM



FONTE: THULUKKNAM, (2013, p. 324)

A construção do trocador de calor casco tubo tipo BEM de acordo com a Figura 4 têm os seguintes componentes: (2) Cabeçote Estacionário anterior e posterior; (3) Flange do cabeçote estacionário; (5) Bocal do cabeçote estacionário; (6) Estacionário; (7) Tubos; (8) Casco; (12) Bocal do casco; (27) Espaçador; (28) Chicanas transversais ou suporte de placas; (32) Abertura para conexão; (33) Conexão para esvaziar; (34) Instrumentos de ligação; (37) Suporte.

3.1.1 Dimensionamento Térmico

O dimensionamento térmico foi baseado no tópico 2.4.1 da fundamentação teórica do trabalho. A sequência dos passos realizados foi descrita na FIG. 5.

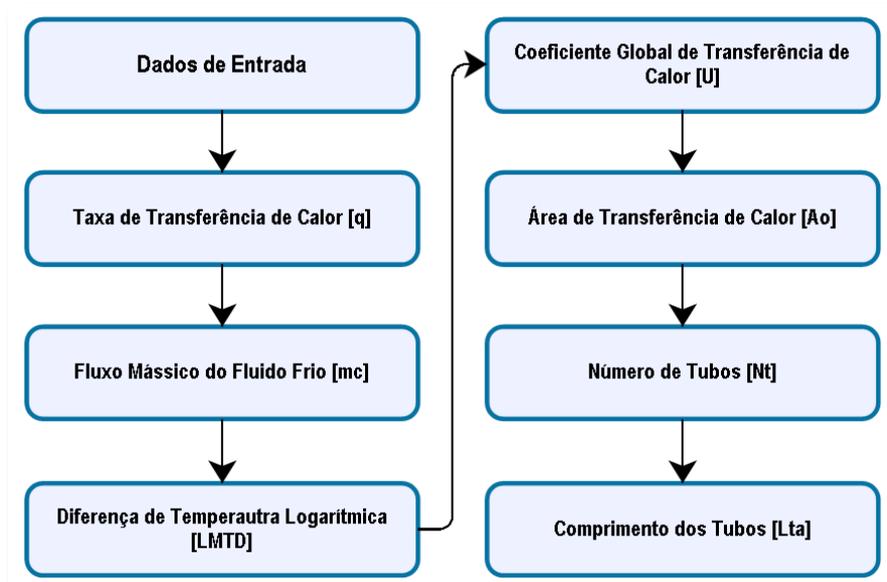
Para o dimensionamento alguns dados foram coletados juntamente com a empresa para que então tivéssemos nossos dados de entrada, os quais seguem na TAB. 1.

TABELA 1 – Dados de entrada

FLUIDO QUENTE – ÁGUA DEIONIZADA		FLUIDO FRIO – ÁGUA	
$T_{h,i}$	60 °C	$T_{f,i}$	20 °C
$T_{h,o}$	30 °C	$T_{f,o}$	35 °C
m_q	26 m ³ /hr	m_f	-
P	3 bar	-	-

FONTE: Os Autores (2017)

FIGURA 5 – Fluxograma do dimensionamento térmico

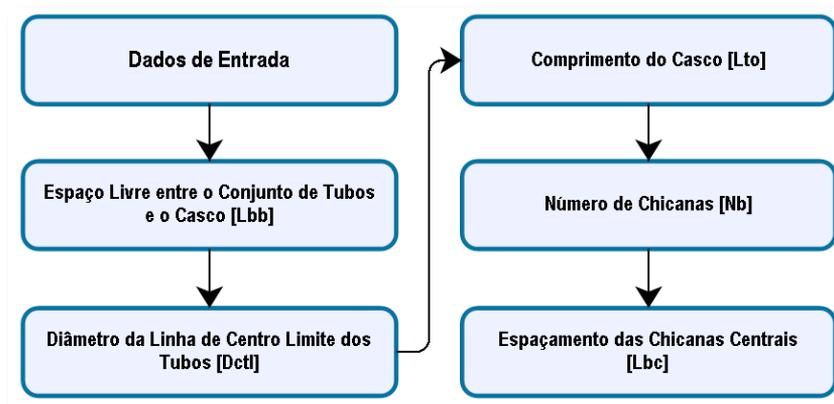


FONTE: Os Autores (2017)

2.1.2 Método de Bell-Delaware Parâmetros do Casco

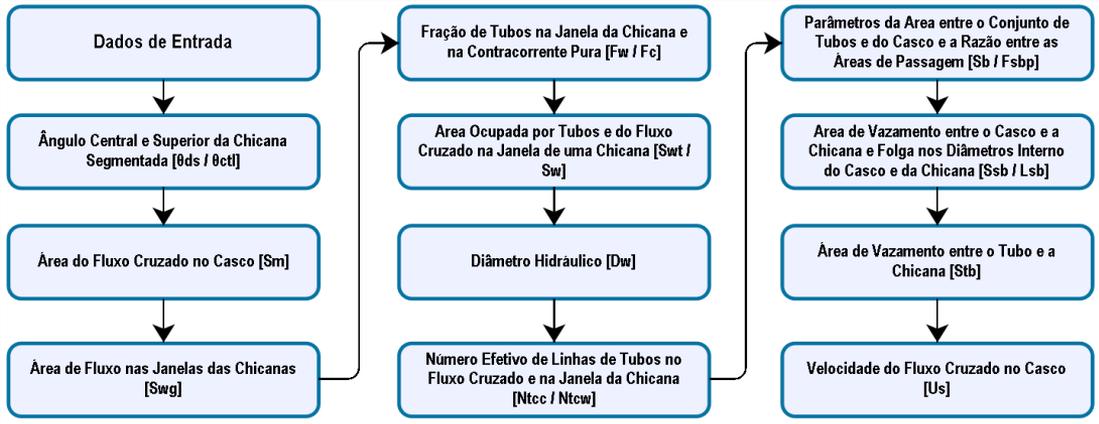
O dimensionamento pelo método de *Bell-Delaware* foi baseado no tópico 2.4.2 da fundamentação teórica do trabalho. Todas as informações dos passos realizados foram descritas nas Figuras 6, 7, 8, 9, 10 e 11, as quais são fluxogramas que apresentam a ordem dos cálculos de cada um dos passos para o dimensionamento do trocador de calor casco e tubo. Os dados de entrada de cada um dos fluxogramas que seguem são referentes aos seus passos anteriores e dados tabelados.

FIGURA 6 – Fluxograma dos parâmetros do casco



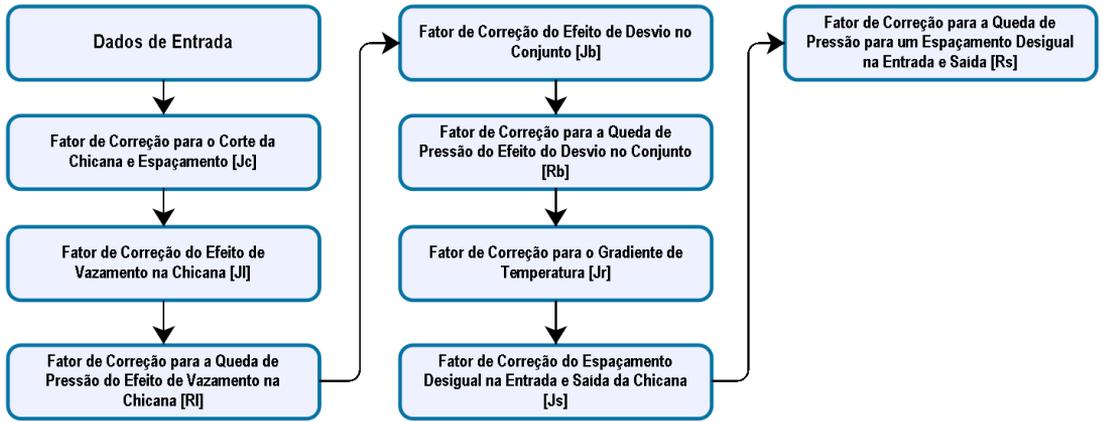
FONTE: Os Autores (2017)

FIGURA 7 – Fluxograma dos cálculos auxiliares



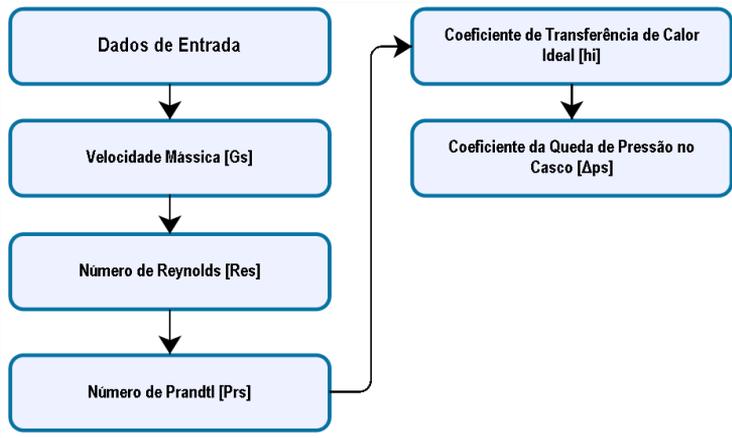
FONTE: Os Autores (2017)

FIGURA 8 – Fluxograma dos fatores de correção da queda de pressão e da transferência de calor no casco



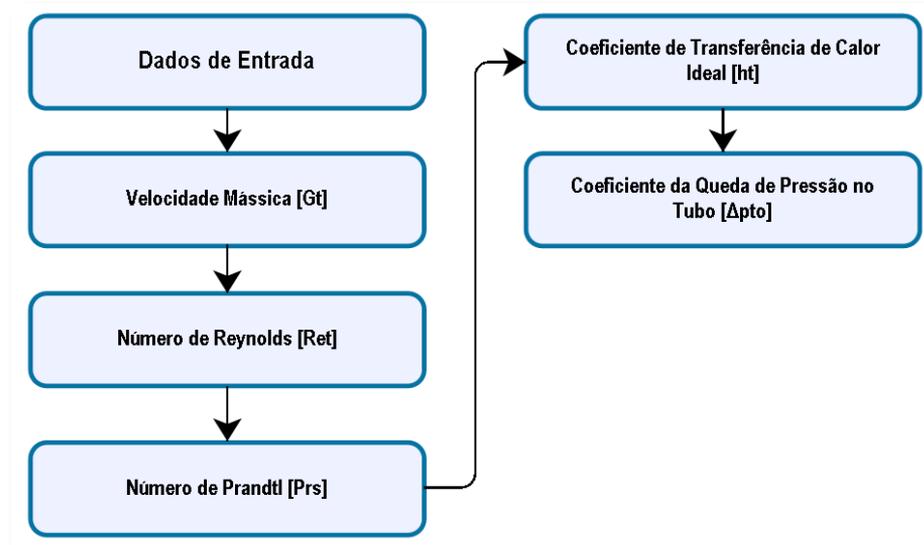
FONTE: Os Autores (2017)

FIGURA 9 – Fluxograma do coeficiente de transferência de calor e queda de pressão no casco



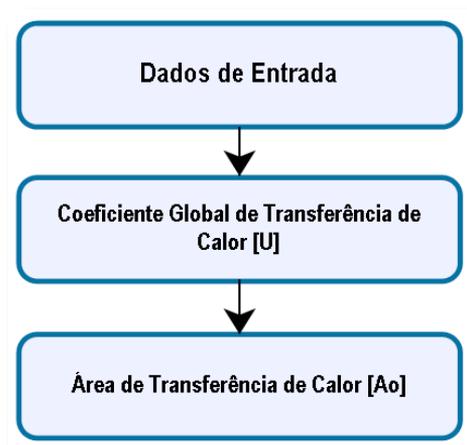
FONTE: Os Autores (2017)

FIGURA 10 – Fluxograma do coeficiente de transferência de calor e queda de pressão no tubo



FONTE: Os Autores (2017)

FIGURA 11 – Fluxograma do coeficiente global de transferência de calor e a área de transferência de calor



FONTE: Os Autores (2017)

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O modelo do trocador de calor BEM foi escolhido em função de algumas características, sendo essas: não haverá mudança drástica nas temperaturas, nas quais o trocador de calor será utilizado; o fluido utilizado é limpo e o conjunto de tubos não precisa ser removido; não existe o perigo de contaminação dos fluidos que irão entrar no trocador; e se necessário é possível realizar a limpeza mecânica. Além desses fatores, ele é caracterizado como um dos mais comuns no mercado.

Como são necessários alguns dados iniciais, além dos que apresentamos na TAB. 1, para obter os resultados que serão apresentados na TAB. 2, foi necessário determinar os diâmetros do tubo e do casco, assim como o material do tubo. O diâmetro externo do tubo de 1 in foi escolhido em função da tubulação já existente na empresa, a qual faz hoje ligação do forno com a torre de resfriamento, e o material escolhido para os tubos foi o cobre, pois ele possui alta condutividade térmica, se comparado com o aço, e baixa corrosão. A escolha do diâmetro interno do casco de 17.25 in foi feita com base no espaço físico disponível na empresa, evitando assim que o trocador de calor fosse muito largo e não existisse espaço suficiente para sua instalação.

Os resultados obtidos através dos cálculos realizados conforme a ordem dos cálculos apresentados pelos fluxogramas do tópico anterior são os que estão representados na TAB. 2. Os resultados mais importantes foram comparados com o que é recomendado pelas bibliografias.

TABELA 2 – Resultados do dimensionamento

Continua

RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DO TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBO			
Variável	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADE
Transferência de calor do sistema	q	905666.67	W
Fluxo mássico do fluido frio	m_c	14.45	kg/s
Diferença de temperatura logarítmica	LMTD	16.37	-
Resistência térmica da parede do tubo	r_w	0.00002966	hr.ft ² .F/BTU
Coefficiente global de transferência de calor	U	813.87	BTU/hr.ft ² .F
Área de transferência de calor	A_o	331.35	ft ²
Número de tubos	N_t	78	-
Comprimento dos tubos	L_{ta}	194.72	In
Espaço livre entre o conjunto de tubos e o casco	L_{bb}	1.03	In
Diâmetro da linha de centro limite dos tubos	D_{ctl}	15.21	In
Comprimento do casco	L_{to}	196.45	In
Número de chicanas	N_b	3	-
Espaçamento das chicanas centrais	L_{bc}	48.68	In
Ângulo central da chicana segmentada	θ_{ds}	1.19	Rad
Ângulo superior da chicana segmentada	θ_{ctl}	0.71	Rad
Área do fluxo cruzado no casco	S_m	399.59	in ²
Área de fluxo nas janelas das chicanas	S_{wg}	9.79	in ²
Fração de tubos na janela da chicana	F_w	0.090	-
Fração de tubos na contracorrente pura	F_c	0.820	-

RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DO TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBO			
Variável	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADE
Área ocupada por tubos na chicana segmentada	S_{wt}	5.53	in ²
Área de fluxo cruzado na janela da chicana	S_w	4.26	in ²
Diâmetro hidráulico equivalente	D_w	0.53	in ²
Número efetivo de linhas de tubos no fluxo cruzado	N_{tcc}	13	-
Número efetivo de linhas de tubos na janela da chicana	N_{tcw}	0.4	-
Área entre o conjunto de tubos e do casco	S_b	74.72	in ²
Razão entre as áreas de passagem	F_{sbp}	0.19	-
Folga entre o diâmetro interno do casco e o diâmetro da chicana	L_{sb}	3.17	In
Área de vazamento entre o casco e a chicana	S_{sb}	69.57	in ²
Área de vazamento entre o tubo e a chicana	S_{tb}	53.51	in ²
Velocidade do fluxo cruzado no casco	U_s	1.99	in/s
Fator de correção para o corte da chicana e espaçamento	J_c	1.14	-
Fator de correção do efeito de vazamento na chicana	J_l	0.60	-
Fator de correção para a queda de pressão do efeito de vazamento na chicana	R_l	0.34	-
Fator de correção do efeito do desvio no conjunto	J_b	0.89	-
Fator de correção para a queda de pressão do efeito do desvio no conjunto	R_b	0.72	-
Fator de correção para o gradiente de temperatura adverso	J_r	1.00	-
Fator de correção do espaçamento desigual na entrada e saída da chicana	J_s	1.00	-
Fator de correção para a queda de pressão para um espaçamento desigual na entrada e na saída	R_s	2.00	-
Velocidade mássica no casco	G_s	41253.41	lb _m /hr.ft ²
Número de reynolds no casco	Re_s	29057.87	-
Número de prandtl no casco	Pr_s	5.78	-
Coefficiente de transferencia de calor ideal no casco	h_i	82.08	BTU/hr.ft ² .F
Coefficiente da queda de pressão no casco	Δp_s	0.55	lbf/ft ²
Velocidade mássica no tubo	G_t	1931147.17	lb _m /hr.ft ²
Número de reynolds no tubo	Re_t	69541.28	-

RESULTADOS DO DIMENSIONAMENTO DO TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBO			
Variável	SÍMBOLO	VALOR	UNIDADE
Número de prandtl no tubo	Pr_t	5.47	-
Coefficiente de transferência de calor ideal no tubo	h_t	1834.62	BTU/hr.ft ² .F
Coefficiente da queda de pressão no casco	Δp_{to}	4338.45	lbf/ft ²
Coefficiente global de transferência de calor	U	531.27	BTU/hr.ft ² .F
Área de transferência de calor	A_o	507.60	ft ²

FONTE: Os Autores (2017)

Segundo Thulukknam (2013), o fator de correção do efeito de vazamento na chicana [J_v] tem como recomendação o valor mínimo de 0.6, sendo o ideal de 0.7 a 0.9, e tem seu resultado influenciado diretamente pelo *pitch* e pelo *layout* do tubo. Conforme a TAB. 2, o resultado encontrado para esse fator foi de 0.6, contudo inicialmente o valor calculado foi abaixo do mínimo recomendado, o que levou à mudança do *pitch* de 1.25 in, que é o valor mínimo recomendado, para o valor de 1.5 in. Além disso, houve a mudança do *layout* dos tubos de 30° para 45°. Para o fator de correção da queda de pressão [R_p], Thulukknam (2013) apresenta o intervalo de 0.4 a 0.5 e o valor encontrado foi de 0.34, o qual está próximo dos valores indicados.

Conforme Thulukknam (2013), o fator de correção do desvio no conjunto [J_b] tem como recomendação valores próximos a 0.9 para folgas relativamente pequenas entre o casco e o conjunto de tubos. Comparando-o com o resultado obtido de 0.89, pode-se dizer que a folga entre o casco e o tubo é pequena. O fator de correção da queda de pressão [R_p] tem como valores sugeridos por Thulukknam (2013) de 0.5 a 0.8, sendo que nos nossos cálculos chegamos no valor de 0.72, que está dentro do indicado.

O cálculo do fator de correção para o gradiente de temperatura adverso [J_r] teve como resultado o valor 1, o mesmo valor indicado por Thulukknam (2013) para o número de Reynolds superior a 100. Já para os fatores de correção [J_s] e [R_s], sendo esses os fatores de correção para o coeficiente de transferência de calor e outro para a queda de pressão do espaçamento desigual da entrada e saída da chicana, foram considerados os valores de espaçamento das chicanas iguais, tanto para inicial, central e final, sendo os valores obtidos, conforme Thulukknam (2013), de $J_s = 1$ e $R_s = 2$.

Os resultados dos números de Prandtl foram de 5.78 para o casco com temperatura média de 300 K e de 5.47 para o tubo com temperatura média de 303 K (INCROPERA, 2007) para as temperaturas entre 300 K e 305 K variando de 5.83 a 5.20, respectivamente. Assim, foi possível verificar que os valores calculados estão dentro do especificado.

Inicialmente utilizamos os valores de 1101 BTU/hr.ft².F para os coeficientes de

transferência de calor do casco [h_s] e do tubo [h_t] para a água (LIU, 2002). Podemos então comparar com os valores calculados que é de 82.08 BTU/hr.ft².F para o casco e de 1834.62 BTU/hr.ft².F para o tubo, demonstrando que ocorreu uma grande diferença principalmente para os valores do casco. Apesar dessa grande diferença encontrada nos valores dos coeficientes de transferência de calor, o valor do coeficiente de transferência de calor global [U] e a área de transferência de calor [A_o], os quais são dependentes daqueles, não mostraram uma grande diferença, variando de 813.87 BTU/hr.ft².F para 531.27 BTU/hr.ft².F e de 331.35 ft² para 507.60 ft².

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O método de *Bell-Delaware* pode ser aplicado para o dimensionamento do trocador de calor casco e tubo, porém se verificou a falta de informação para algumas variáveis, sendo necessária a utilização de bibliografias auxiliares para complementar o entendimento das mesmas. Tivemos dificuldades para encontrar bibliografias que abrangessem todos os cálculos e também foi difícil encontrar programas que poderiam nos auxiliar na realização do dimensionamento. Várias pesquisas foram realizadas junto aos fabricantes dos *softwares* para verificar a possibilidade de adquirir uma versão de estudante, porém sem sucesso, pois eles não possuem versão de estudante e o valor para serem adquiridos é muito alto. Entretanto foi encontrado um programa, o qual tem acesso gratuito por 30 dias, porém não foi utilizado devido à falta do manual ou da ficha técnica do *software*, bem como pelo fato de não conhecermos as variáveis que o programa utilizava para os cálculos. Diante disso, optamos por realizar os cálculos através do método de *Bell-Delaware*, que é encontrado na literatura aberta, e junto com o auxílio de normas e outras bibliografias, foi realizado o dimensionamento do trocador de calor casco e tubo, conforme proposto.

Para encontrar os resultados foi necessário determinar algumas características básicas para o dimensionamento, as quais são específicas para o nosso estudo, como os diâmetros dos tubos e do casco, os seus materiais, o *layout* e o *pitch* dos tubos, a distância das chicanas e sua porcentagem de corte. Essas são algumas das principais características que exercem grande influência nos resultados obtidos, os quais foram calculados com o auxílio da linguagem de programação *Python*. Tal linguagem ajudou bastante, principalmente pela facilidade em se modificar as variáveis para os cálculos, os quais são comparados no tópico resultados e discussões, e se encontram próximos ou dentro das especificações recomendadas.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, E. C. C. **Trocadores de calor**: serie de apontamentos. São Carlos: EDUFSCAR, 2002.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 11696**: trocadores de Calor. Rio de Janeiro, 1991.

BORGES, L. E. **Python para desenvolvedores**. Rio de Janeiro: Edição do Autor, 2009. Disponível em: <<https://pt.scribd.com/document/336947584/Python-para-Desenvolvedores-1a-Ed-pdf>>. Acesso em: 12 maio 2016.

BRAGA, W. **Transmissão de calor**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2004.

ÇENGEL, Y. A. **Heat and mass transfer: fundamentals & applications**. 5. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2014.

CHANG, R.; GOLDSBY, K. A. **Química**. 11. ed. Porto Alegre: AMGH, 2013.

INCROPERA, F. P. et al. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 6. ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2007.

KAPUNO, R. R. A.; RATHORE, M. M. **Engineering heat transfer**. 2. ed. Massachusetts: Jones & Bartlett Learning, 2011.

KREITH, F.; MANGLIK, R. M.; BOHN, M. S. **Princípios da transferência de calor**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

LIU, H.; KAKAÇ, S. **Heat exchangers: selection, rating and thermal design**. 2. ed. New York: CRC, 2002.

LIVI, C. P. **Fundamentos de fenômenos dos transportes**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

NUMPY DEVELOPERS. **NumPy**. Disponível em: <<http://www.numpy.org>>. Acesso em: 11 set. 2016.

STANDARDS OF THE TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURES ASSOCIATION. **Tema**. 9th ed. Nova York, 2007.

THOME, J. R. **Engineering data book III**. Alabama: Wolverine Tube, Inc., 2010.

THULUKKANAM, K. **Heat exchanger design handbook**. 2nd ed. New York: CRC, 2013.

ZOHURI, B. **Compact heat exchangers: selection, application, design and evaluation**. Switzerland: Springer International Publishing, 2017.