

## DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE ECONÔMICA DE UM TROCADOR DE CALOR DE BANCADA DO TIPO CASCO E TUBO PARA FINS DIDÁTICOS

**Eduardo Bocchese Pereira**<sup>1</sup>

**Fernanda Brand**<sup>2</sup>

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul - Campus Farroupilha

**Resumo:** Neste estudo foi desenvolvido o dimensionamento de um trocador de calor do tipo casco e tubo com dimensões reduzidas para utilização em bancada, com posterior levantamento de custos para aquisição de materiais. A aplicação didática deste tipo de equipamento na docência de disciplinas da área de ciências térmicas em cursos de engenharia é fundamental para ampliar o impacto do ensino de conceitos de troca térmica, dada a ampla utilização de trocadores de calor nos mais diversos ramos da indústria. O processo de dimensionamento foi realizado utilizando o método Bell-Delaware aplicado à algumas premissas dimensionais, o que permitiu obter um trocador de calor compacto e adequado para o uso proposto. Ao final do estudo foi possível avaliar a dimensão do investimento financeiro necessário para adquirir os materiais considerados no cálculo.

**Palavras-chave:** Trocador de calor casco-tubo, método Bell-Delaware e dimensionamento.

### 1 INTRODUÇÃO

Dentro do ensino de engenharia, um dos pontos obrigatórios aos cursos é a parte de vivência prática acadêmica do corpo discente com os fenômenos físicos estudados em sala de aula, conforme determinado pelo MEC (2019) na Resolução nº 2, de 24 de Abril de 2019. E a justificativa para tal obrigatoriedade é analisada por Feisel e Rosa (2005):

"A função da profissão de engenharia é manipular materiais, energia e informação, gerando dessa forma benefícios à humanidade. E para fazer isso com sucesso, é necessário que os engenheiros tenham o conhecimento da natureza que vá além da teoria - conhecimento esse que é tradicionalmente obtido em laboratórios didáticos." (FEISEL; ROSA, 2005, p. 1)

Dentro deste cenário surgem desafios econômicos em se obter o aparato necessário para compor um laboratório acadêmico, o que acaba obrigando algumas instituições de ensino superior a adquirirem menos equipamentos, gerando assim uma defasagem em certas áreas do conhecimento, já que para certos fenômenos físicos não será possível explorar o aprendizado para além da teoria. E para o ensino das diversas áreas estudadas no curso de Engenharia Mecânica, este cenário se torna extremamente preocupante, uma vez que os fenômenos físicos ensinados em sala de aula demandam em sua maioria equipamentos de elevado custo de aquisição e manutenção, mas que são ainda assim excepcionalmente úteis para que o graduando consiga relacionar conceitos básicos analisados teoricamente com a prática em bancadas didáticas que conseguem simular o ambiente industrial, que muitas vezes se torna o destino profissional destes estudantes. Analisando tal situação, será estudada a área de trocas térmicas e a

<sup>1</sup> E-mail: eduardo.bocchese@gmail.com - Discente

<sup>2</sup> E-mail: fernanda.brand@farroupilha.ifrs.edu.br - Docente

estrutura atual do laboratório do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul (IFRS) campus Farroupilha.

O laboratório atual da instituição dispõe de bancadas focadas na mecânica dos fluidos, permitindo o estudo e testes de conceitos associados à tubulações, bombas e turbinas, não havendo uma bancada especializada para a área térmica, que abrange a utilização de equipamentos tais como trocadores de calor. O estudo de tal fenômeno físico é de suma importância uma vez que uma aplicação otimizada de um trocador de calor pode promover um desenvolvimento industrial sustentável, em virtude de que algumas das funções primordiais desta ferramenta são evitar que haja o desperdício de energia térmica para o ambiente, produção de energia, condicionamento de ar e processamentos químicos industriais (BERGMAN; LAVINE, 2019).

Para aplicação didática de um trocador de calor o tipo de casco e tubo é selecionado para ser estudado e projetado, uma vez que a sua aplicação industrial traz diversas vantagens tais como fabricação, custos e desempenho térmico (BALBUENO, 2006), o que fará com que o graduando tenha a oportunidade de se aproximar mais da indústria ainda na faculdade. Dentro de tal projeto serão estudados também os parâmetros de funcionamento do equipamento, buscando um design com eficiência térmica otimizada e com baixo custo de construção, atingindo tais pontos a partir do cálculo do coeficiente global de transferência de calor pelo método Bell-Delaware.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Para criar o embasamento teórico do dimensionamento deste equipamento didático, o presente capítulo analisará os parâmetros e métodos para o projeto de trocadores de calor casco e tubo, relacionando os estudos já desenvolvidos na área com a aplicação desejada.

### 2.1 CONFIGURAÇÃO GERAL E EQUACIONAMENTO DE UM TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBO

O processo de troca térmica entre dois fluidos com um gradiente de temperatura entre si quando ambos estão separados por uma parede sólida é um desenvolvimento de engenharia com uma vasta aplicação industrial. Para permitir que este processo ocorra, utilizam-se trocadores de calor em suas diferentes configurações, sendo os mesmos adaptáveis ao contexto necessário. Dentro deste estudo, como já mencionado e justificado anteriormente, será dimensionado um trocador de calor do tipo casco e tubo, onde pode-se analisar o processamento térmico por meio de dois volumes de controle:

- Primeiro volume de controle: fluido dentro dos tubos; e
- Segundo volume de controle: fluido dentro do casco.

A análise de eficiência geral do equipamento ocorre por meio do estudo da interação entre os dois volumes que carregam os fluidos que, inicialmente, possuem um gradiente de temperatura entre si. Na Figura 1 é possível observar o conceito básico de design de um trocador de tipo casco e tubo, onde as etapas para o processo térmico são as seguintes:

1. Um dos fluidos é bombeado para dentro dos tubos, por meio da entrada destinada a essa parte do trocador. Dentro dos tubos o fluido percorre o trecho de maneira direta, sem obstáculos até saída, completando o seu fluxo dentro do trocador;
2. O segundo fluido é bombeado para dentro do casco do trocador, onde o seu fluxo encontrará obstáculos à sua circulação por meio das chicanas, que têm como objetivo gerar turbulência na movimentação. Essa agitação permite um aumento no coeficiente de convecção por meio de um fluxo cruzado do fluido do casco em relação aos tubos (BERGMAN; LAVINE, 2019).

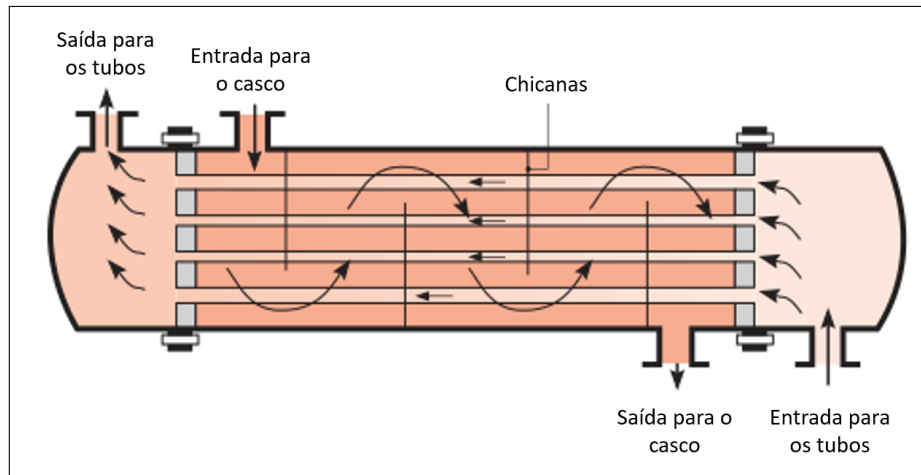


Figura 1 – Configuração geral de um trocador de calor casco e tubo. Fonte: adaptado de Bergman e Lavine (2019)

Seguindo o processo descrito acima, ambos fluidos não se misturam em nenhuma etapa do processo, realizando a troca térmica por meio das paredes sólidas dos tubos que conduzem um dos fluidos, como demonstrado na Figura 2.

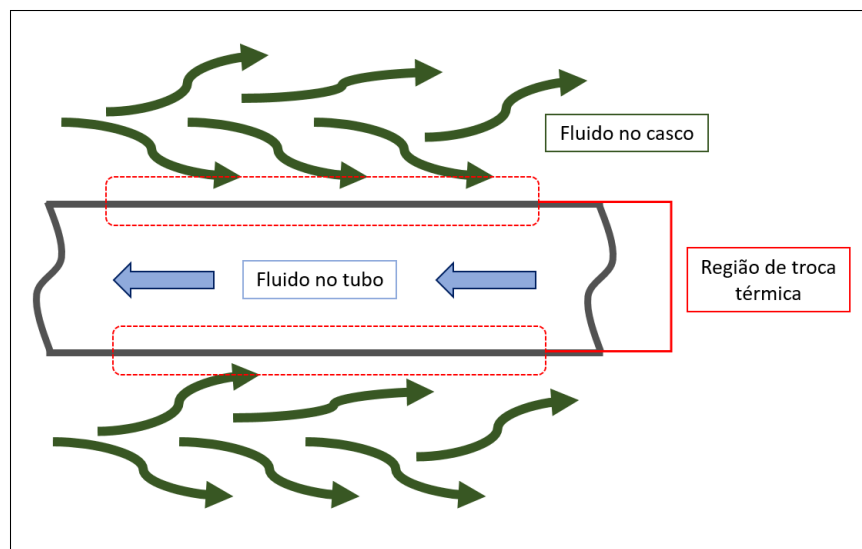


Figura 2 – Troca térmica e fluxo dos fluidos em um trocador de calor tipo casco e tubo, utilizando como exemplo um fluxo contracorrente. Fonte: o Autor

Para compreender o processo do trocador e partir para o seu dimensionamento específico, é preciso revisar o conceito básico de transferência de calor que ali ocorre, sendo o primeiro ponto de revisão a Equação (1) que representa a taxa de calor  $Q$  transferida por convecção, onde  $\dot{m}$  é a vazão mássica e  $C_p$  é o calor específico, ambos parâmetros ligados ao fluido e o seu fluxo no sistema, e  $\Delta T$  representa a diferença de temperaturas presente na troca térmica. Conforme destacado por Bicca e Secchi (2005), outro parâmetro de importância para os cálculos deste tipo de processo é o número de Reynolds, o qual é calculado por meio da Equação (2).

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

$$Re_d = \frac{V_t D_i \rho_t}{\mu_t} \quad (2)$$

Onde há  $V_t$  como velocidade média do fluido no interior do tubo,  $D_i$  o diâmetro interno onde o fluxo ocorre,  $\rho_t$  e  $\mu_t$  sendo respectivamente densidade e viscosidade dinâmica do fluido em escoamento. As conclusões básicas fornecidas pelo número de Reynolds calculado resumem-se na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores de Reynolds e seus respectivos escoamentos.

Reynolds calculado	Escoamento
$Re_d < 2.300$	Laminar
$2.300 < Re_d < 4.000$	Regime de transição
$Re_d > 4.000$	Turbulento

Como será visto mais adiante, o valor de Reynolds do escoamento, especialmente do casco, é usado em um dos métodos de design de trocadores de calor para a avaliação de um dos coeficientes de troca térmica.

Para os cálculos básicos de troca térmica a área  $A$  (m<sup>2</sup>) onde ocorre a troca de calor é determinada conforme a carga térmica  $Q$  (W) do sistema a um dado gradiente de temperatura  $\Delta T$  (°C) (NITSCHKE; GBADAMOSI, 2016).

$$A = \frac{Q}{U\Delta T} \quad (3)$$

Sendo  $U$  o coeficiente global de transferência de calor, cuja função matemática é medir a capacidade de um material ou uma combinação de materiais para trocar calor, demonstrando assim a resistência existente no sistema para que a troca térmica ocorra entre dois fluidos através de uma dada área (SPARROW; GORMAN; ABRAHAM, 2013). A sua determinação pode ocorrer por meio de tabelas já estabelecidas por experimentos registrados na literatura, ou mediante métodos matemáticos que seguem uma série de análises e pré determinações para dimensionamento geral do trocador, conforme é demonstrado por Thulukkanam (2000) na Equação (4).

$$U = \frac{1}{\left(\frac{1}{h_s}\right) + R_{f,o} + \left(\frac{t_w}{k_w}\right) \left(\frac{d_e}{d_m}\right) + \left(\frac{d_e}{d_i}\right) \left(R_{f,i} + \frac{1}{h_i}\right)} \quad (4)$$

Na Equação (4) os principais fatores são  $h_s$  e  $h_i$  que representam os coeficientes de película do lado do casco e do lado do tubo respectivamente.  $R_{f,o}$  e  $R_{f,i}$  são os fatores de incrustação do casco e tubo;  $t_w$  e  $k_w$  a espessura e a condutividade térmica da parede do tubo;  $d_e$ ,  $d_i$  e  $d_m$  os diâmetros externo, interno e médio do tubo.

Para o cálculo de  $h_i$ , que está relacionado ao volume de controle dos tubos, é necessário fazer uso da Equação (5), onde há  $k_q$  sendo o a condutividade térmica do fluido,  $d_i$  o diâmetro interno do tubo,  $Nu$  o número de Nusselt definido a partir do número de Reynolds e Prandtl e  $\phi_t^n$  sendo o fator de correção da viscosidade do fluido, que neste caso será desprezado, portanto considerado igual a 1.

$$h_i = Nu \left(\frac{k_q}{D_i}\right) \phi_t^n \quad (5)$$

A definição do número de Nusselt será feita a partir da relação apresentada pela Equação (6) que é aplicável a fluxos turbulentos em tubos lisos em que ocorre resfriamento.

$$Nu = 0,023 Re_q^{0,8} Pr_q^{0,3} \quad (6)$$

Avançando para os métodos específicos de design de um trocador de calor, a literatura apresenta a metodologia Bell-Delaware, que é uma generalização de estudos anteriores que buscavam estabelecer uma diretriz para dimensionamento deste tipo de equipamento, trazendo uma abordagem matemática mais aplicável ao caso. Dentro da metodologia de Bell-Delaware, os fatores dimensionais do equipamento, como arranjo dos tubos e sua geometria e o espaçamento entre as chicanas, relacionando este ultimo aspecto à distribuição de fluxo do fluido do casco são de extrema importância e considerados no modelamento matemático, como demonstrados na Equação (7) (OZDEN; TARI, 2010).

$$h_s = h_{si}(j_c j_l j_b j_s j_r) = h_{si} j_{tot} \quad (7)$$

Onde  $h_{si}$  é o coeficiente de transferência de calor ideal no casco e  $j_c$ ,  $j_l$ ,  $j_b$ ,  $j_s$  e  $j_r$  são fatores de correção a serem descritos a seguir (SERNA; JIMÉNEZ, 2005):

- $j_c$  é o fator de correção do corte das chicanas, sendo idealmente igual a 1, o que demonstra que o projeto dimensional da chicana está adequado;
- $j_l$  é o fator de correção do vazamento das chicanas, onde um trocador dimensionado adequadamente apresentará este valor entre 0,7 e 0,9;
- $j_b$  é o fator de correção das correntes que evadem o feixe tubular;
- $j_s$  é o fator de correção do espaçamento das chicanas localizadas na entrada e saída do trocador; e
- $j_r$  é o fator de correção de fluxo laminar, onde ele compensa a baixa transferência de calor no início do fluxo devido ao desenvolvimento de um escoamento laminar.

Para o cálculo do coeficiente  $h_{si}$ , a Equação (8) poderá ser utilizada.

$$h_{si} = j_i c_{pf} \frac{\dot{m}_f}{S_m} \left( \frac{k}{c_p \mu_f} \right)^{2/3} \left( \frac{\mu_f}{\mu_q} \right)^{0,14} \quad (8)$$

Onde  $\dot{m}_f$ ,  $k$ ,  $c_{pf}$  e  $\mu_f$  são a vazão mássica, condutividade térmica, calor específico e a viscosidade do fluido do casco, respectivamente, e  $\mu_q$  é a viscosidade do fluido no tubo. O termo  $j_i$  é um fator de correção dado pela Equação (9) e  $S_m$  representa a área de escoamento cruzado aos tubos sendo calculado por meio da Equação (11).

$$j_i = a_1 \left( \frac{1,33}{L_{tp}/d_e} \right)^a (Re_f)^{a_2} \quad (9)$$

Onde  $L_{tp}$  e  $d_e$  são o passo e o diâmetro externo dos tubos, e o termo  $a$  é definido conforme a Equação (10).

$$a = \frac{a_3}{1 + 0,14(Re_s)^{a_4}} \quad (10)$$

As constantes  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  e  $a_4$  são obtidas em tabelas presentes na literatura, onde há uma correlação do número de Reynolds calculado e o arranjo de tubos definido para o projeto.

$$S_m = L_{bc} \left( L_{bb} + \frac{D_{ctl}}{L_{tp}} (L_{tp} - d_e) \right) \quad (11)$$

Sendo  $L_{bc}$  o espaçamento central entre chicanas, conforme demonstrado na Figura 3,  $L_{bb}$  é a folga entre o casco e o feixe tubular e  $D_{ctl}$  é o limite diametral do feixe tubular.

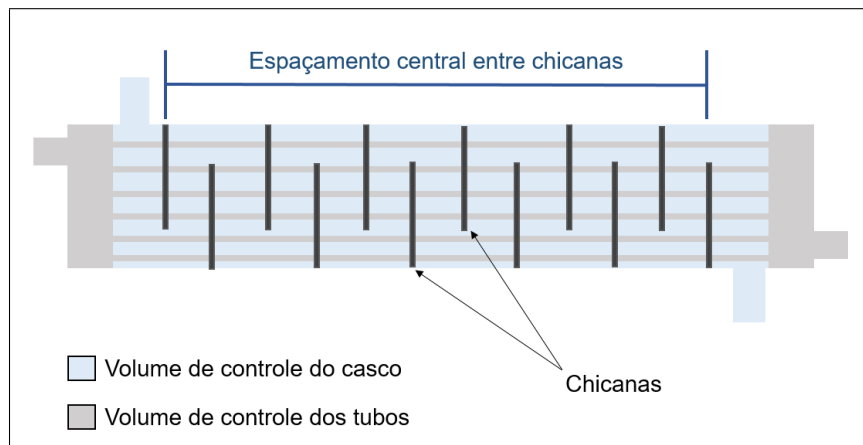


Figura 3 – Representação gráfica do espaçamento central entre chicanas. Fonte: o Autor

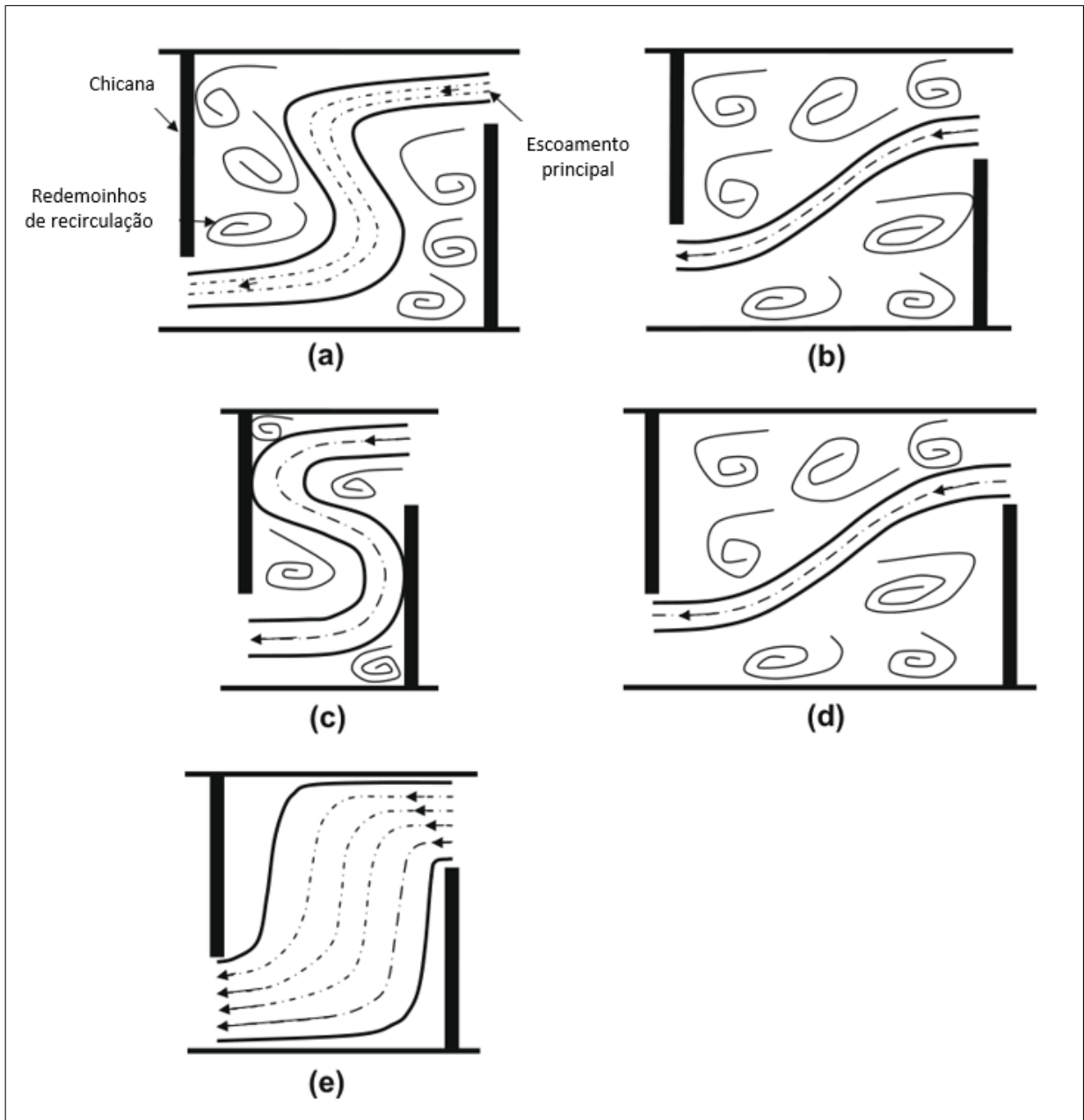


Figura 4 – Efeito do posicionamento e folga das chicanas no escoamento do fluido do casco: (a) chicanas com folga pequena, (b) chicanas com folga grande, (c) espaçamento curto entre chicanas, (d) espaçamento longo entre chicanas, (e) folga e espaçamento das chicanas ideal . Fonte: adaptado de [Ozden e Tari \(2010\)](#)

Seguindo os fatores de correção considerados pelo método Bell-Delaware, a Figura 4 detalha as diferentes formas que o design das chicanas podem influenciar no escoamento principal do fluido de dentro do casco, e a distribuição deste escoamento é demonstrada na Figura 5, cuja teoria foi elaborada anteriormente ao método Bell-Delaware por [Tinker \(1958\)](#) que buscou justamente considerar no dimensionamento os diferentes fluxos que ocorrem dentro de um trocador de calor do tipo casco e tubo, sendo tais fluxos classificados da seguinte forma:

- Escoamento A: fluxo de vazamento do fluido entre as chicanas e o casco;
- Escoamento B: fluxo cruzado puro (principal corrente para a troca térmica);
- Escoamento C: fluxo de by-pass entre o feixe de tubos e o casco; e
- Escoamento D: fluxo entre a chicana e o casco.

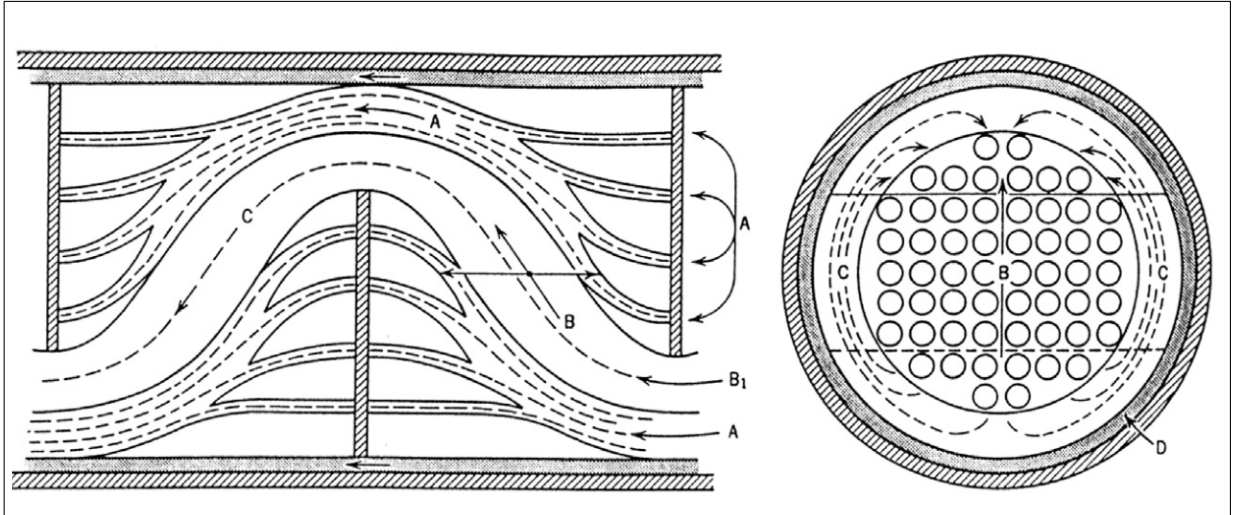


Figura 5 – Distribuição do escoamento do fluido dentro do casco. Fonte: Nitsche e Gbadamosi (2016)

Para o posicionamento dos tubos dentro do casco, a literatura demonstra diversas formas de arranjo, sendo as mais comuns a triangular e a quadrada, conforme mostrado na Figura 6. No passo quadrado o fluxo médio entre os tubos e o coeficiente de troca térmica são inferiores que o passo triangular, porém, se for possível esperar um preenchimento severo de fluido dentro do trocador, o passo quadrado é a melhor escolha por conta da maior facilidade para limpeza do sistema (NITSCHKE; GBADAMOSI, 2016).

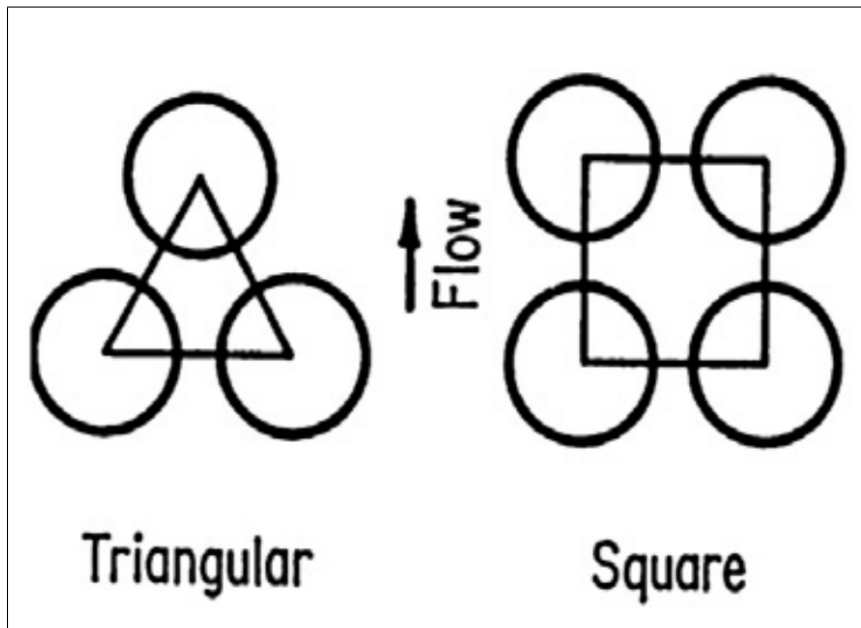


Figura 6 – Padrões de arranjo dos tubos mais utilizados. Fonte: Nitsche e Gbadamosi (2016)

Durante as etapas de dimensionamento do trocador de calor alguns aspectos construtivos e funcionais do equipamento precisam ser previamente definidos no escopo inicial do projeto. Dentro da parte de funcionamento há a necessidade de se entender como os fluxos dos fluidos do processo irão trabalhar: concorrente ou contracorrente (dependendo do sistema de componentes que irão alimentar o trocador de calor, o mesmo poderá ser regulado para trabalhar das duas formas). Este parâmetro basicamente analisa a relação dos direcionamentos dos fluidos do trocador, onde ambos podem estar escoar na mesma direção (concorrente) ou em direções opostas (contracorrente). Maiores detalhes serão explorados a seguir e na Figura 7.

- Contracorrente: o fluxo do casco e dos tubos são direcionados em direções opostas, o que cria uma situação onde a temperatura de saída do fluido frio pode ser maior que a temperatura de saída do fluido quente (MUKHERJEE, 1998); e
- Concorrente: neste caso ambos fluidos são direcionados à mesma direção, o que causa uma séria limitação de projeto por conta da baixa média logarítmica das diferenças de temperatura de trabalho (LMTD) e também pelo fato da temperatura de saída do fluido frio ser, em qualquer caso, menor que a temperatura de saída do fluido quente (MUKHERJEE, 1998).

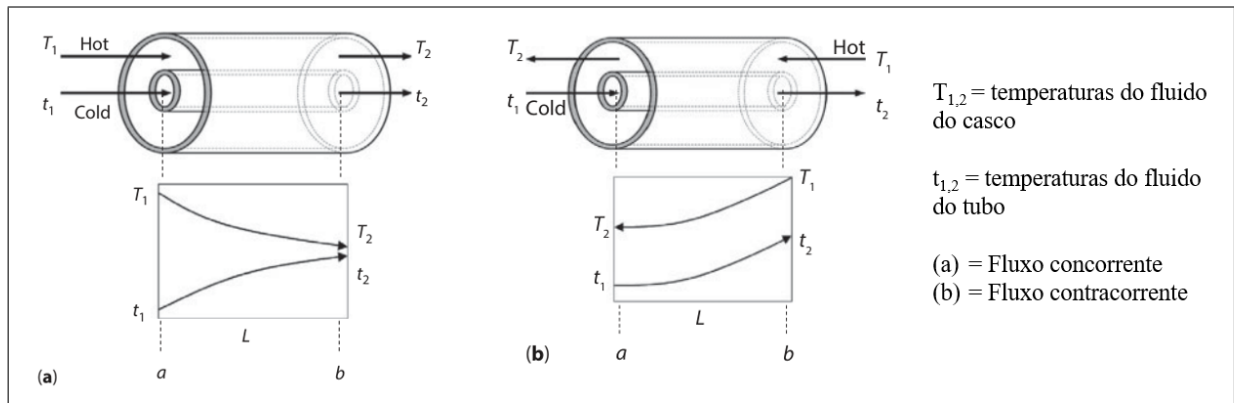


Figura 7 – Descrição gráfica do comportamento das temperaturas dos fluidos conforme a configuração de fluxo escolhida. Fonte: adaptado de Flynn e Theodore (2019)

Seguindo na linha de pesquisa de dimensionamento de trocadores de calor, há outro método também amplamente utilizado e citado na literatura que é a metodologia de Kern. Tal método foi originalmente desenvolvido para correlacionar dados de trocadores de calor de mercado por um simples equacionamento análogo às equações de fluxo em tubos (SHINDE; PANCHA, 2012).

Dessa forma, Kern propôs um método mais simplificado ao método Bell-Delaware, podendo ainda ser utilizado em conjunto com este primeiro método discutido, trazendo uma forma de otimizar o processo de design do trocador de calor, uma vez que cada método poderá ser aplicada a cada volume de controle separadamente.

Os passos para o dimensionamento segundo Kern consistem basicamente nos seguintes aspectos:

- Balanço térmico e cálculo da média logarítmica das temperaturas de trabalho; e
- Determinação dos fluidos envolvidos no processo e uma estimativa do número de tubos necessários.

## 2.2 TROCADORES DE CALOR DE BANCADA

Dentro do mercado de equipamentos laboratoriais, há a oferta de trocadores de calor de bancada, onde o sistema de troca térmica é realizado de maneira rápida e com materiais e controladores simples. A empresa Labtrix (2021) é um dos exemplos que disponibiliza um trocador didático de casco e tubo, conforme a Figura 8, onde segundo a página na internet na qual o equipamento é anunciado, suas principais características são:

- Conjunto de válvulas no sistema para escolha da configuração da corrente: contra corrente ou co corrente;
- Água quente suprida por meio de um reservatório aquecido com temperatura controlada;
- Água fria em um reservatório de 100 litros, onde após a troca a mesma pode ser descartada ou resfriada externamente para utilização em novo ciclo;
- Medição de vazão da água quente e fria por meio de rotâmetro;

- Faixa de vazão de até 12 L/min; e
- Transdutores de temperatura do tipo Pt 100 instalados em diferentes pontos do sistema para análise do processo.



Figura 8 – Modelo de trocador de calor de bancada XP1515.2. Fonte: página na internet da empresa [Labtrix \(2021\)](#)

Neste modelo comercial disponível no mercado, observam-se diversos elementos de trocadores industriais presentes, como todo o sistema de controle da fluxo de ambos fluidos, medidores de temperatura e vazão assim como o próprio trocador de calor em si, tendo o seu casco transparente mostrando a vazão do fluido pelas chicanas e o contato do mesmo com os tubos para efetuar a troca térmica.

Outro modelo de trocador de calor casco e tubo mais compacto foi desenvolvido pela empresa Nova Nd Tecnologia, onde o equipamento em si pode ser acoplado à uma bancada de execução de testes separada responsável pelo fornecimento e controle dos fluidos. As principais características dimensionais deste trocador são:

- Casco em material polimérico transparente com diâmetro externo de 6 mm e interno de 5 mm; e
- Tubos internos fabricado em aço inoxidável com diâmetro de externo de 6 mm e interno de 4 mm.

### 3 DIMENSIONAMENTO E ANÁLISE DO TROCADOR DE CALOR

Realizada a análise geral dos métodos que envolvem o dimensionamento de um trocador de calor e os dados disponíveis de trocadores de bancada comerciais, o presente estudo irá focar-se no dimensionamento de um equipamento de mesmo tipo, onde o objetivo resume-se no cálculo da área de troca térmica necessária considerando as condições de processo e de queda de pressão, alinhando tais fatores com a necessidade do trocador possuir um baixo custo de manufatura e manutenção, sendo assim aplicável ao que se propõe no contexto previamente citado. No caso deste estudo, o cálculo da área requerida para troca térmica possibilitará encontrar o número de tubos necessários ao equipamento, um vez que o comprimento e diâmetro deles será pré determinado.

#### 3.1 DIMENSIONAMENTO GERAL

Como a aplicação do presente equipamento a ser dimensionado terá um foco didático e de baixo custo de fabricação, o mesmo será considerado em dimensões consideravelmente reduzidas quando comparado à trocadores industriais e terá para a execução as premissas listadas abaixo:

- Trocador trabalha em regime contracorrente com água-água;
- Passo quadrado entre os tubos (90°);
- Comprimento total dos tubos igual a 800 mm;
- Tamanho do cabeçote de entrada e saída igual ao espaçamento entre chicanas;
- Fluido quente alocado nos tubos;
- Fluido frio alocado no casco; e
- Fatores de incrustação desprezados

Para os dados de temperatura o presente estudo usará os valores obtidos experimentalmente por [Ribeiro \(2019\)](#) além de dados de catálogo de trocadores de calor didáticos comerciais, sendo as temperaturas listadas nas Tabelas 2 e 4, e a vazão de fluido de 12 l/min, conforme o trocador de calor comercial modelo *XP1515.2* da empresa [Labtrix \(2021\)](#). Com tais dados pré estabelecidos, [Thulukkanam \(2000\)](#) determina o processo matemático inicial de dimensionamento do trocador, onde a primeira análise foca-se na quantidade de calor  $Q$  envolvida no processo e para isso é preciso ter a seguinte premissa para a parte de balanço de energia do processo:

$$Q = Q_f = Q_q \quad (12)$$

Onde  $Q_f$  e  $Q_q$  representam a quantidade de calor absorvida pelo fluido frio e a quantidade de calor perdida pelo fluido quente respectivamente, ou seja, todo o calor envolvido no processo de troca não é dispersado no ambiente do sistema, ficando todo ele contido entre os fluidos. Tal premissa permite realizar o cálculo da quantidade de calor teórico que será trocado no equipamento, usando como base a Equação (1). Para este cálculo os dados de entrada utilizados são provenientes do fluido frio, listados na Tabela 2, chegando ao resultado de 4161 Watts para a carga térmica trocada no processo. Após isso, utilizando a base de dados listada pela [TEMA \(2007\)](#), serão pré determinados os diâmetros do casco e tubos, bem como o passo dos tubos, usando a relação da Equação (13). Com tais dados se torna possível o cálculo e listagem dos parâmetros adimensionais como Reynolds e Prandtl, seguindo para o resumo de informações para ambos volumes de controle, que está exibido nas Tabelas 2, 3, 4 e 5.

$$Ltp = 1,5 d_e \quad (13)$$

Tabela 2 – Valores coletados em tabelas e referências para parâmetros de dimensionamento e construção da parte do casco.

<b>Dados tabelados e de referência para o fluido frio e casco</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Prandtl	$Pr_f$	5,83	Adimensional
Viscosidade	$\mu_f$	$855 \cdot 10^{-6}$	$N \cdot s/m^2$
Massa específica	$\rho_f$	997,05	$kg/m^3$
Calor específico	$C_{pf}$	4179	$J/kg \cdot K$
Condutividade térmica	$k_f$	$613 \cdot 10^{-3}$	$W/m \cdot K$
Diâmetro interno do casco	$Di_c$	205	$mm$
Temperatura de entrada	$Te_f$	25	$^{\circ}C$
Temperatura de saída	$Ts_f$	30	$^{\circ}C$

Tabela 3 – Valores calculados para parâmetros de dimensionamento e construção da parte do casco.

<b>Dados calculados para o fluido frio e casco</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Vazão mássica	$\dot{m}_f$	0,199	kg/s
Reynolds	$Re_f$	1413	Adimensional

Tabela 4 – Valores coletados em tabelas e referências para parâmetros de dimensionamento e construção da parte dos tubos.

<b>Dados tabelados e de referência para o fluido quente e tubos</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Prandtl	$Pr_q$	3,42	Adimensional
Viscosidade	$\mu_q$	$528 \cdot 10^{-6}$	$N \cdot s/m^2$
Massa específica	$\rho_q$	988,05	$kg/m^3$
Calor específico	$C_{pq}$	4182	$J/kg \cdot K$
Condutividade térmica	$k_q$	$645 \cdot 10^{-3}$	$W/m \cdot K$
Diâmetro interno do tubo	$d_i$	16,52	mm
Diâmetro externo do tubo	$d_e$	19,05	mm
Espessura do tubo	$t_t$	1,24	mm
Temperatura de entrada	$Te_q$	50	°C
Temperatura de saída	$Ts_q$	37	°C

Tabela 5 – Valores calculados para parâmetros de dimensionamento e construção da parte dos tubos.

<b>Dados calculados para o fluido quente e tubos</b>			
<b>Parâmetro</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>	<b>Unidade</b>
Vazão mássica	$\dot{m}_q$	0,199	kg/s
Reynolds	$Re_q$	33744,70	Adimensional
Passo dos tubos	$Ltp$	28,6	mm

Com um fluxo contracorrente, a diferença efetiva de temperaturas é definida pela média logarítmica das diferenças de temperatura (LMTD) (THULUKKANAM, 2000). O cálculo deste fator, conforme a Equação (14), será de suma importância para a avaliação final da área de troca térmica requerida ao trocador de calor.

$$LMTD = \frac{(Te_q - Ts_f) - (Ts_q - Te_f)}{\ln((Te_q - Ts_f)/(Ts_q - Te_f))} \quad (14)$$

Em casos onde o trocador de calor possui fluxo misto (fluxo contracorrente e concorrente ocorrendo simultaneamente) é necessário multiplicar  $LMTD$  por um fator de correção  $F$ , porém, o trocador didático deste estudo está sendo considerado sem fluxo misto e com apenas um passe, o que dispensa a aplicação deste fator de correção. O valor calculado de  $LMTD$  para este projeto foi de 15,66 °C.

Antes de se obter o coeficiente  $U$  é necessário descobrir a área de escoamento cruzado  $S_m$ , que usa o passo dos tubos  $Ltp$ , o diâmetro externo deles  $De_t$  e os fatores listados na Tabela 6.

Tabela 6 – Dados para o cálculo da área de escoamento cruzado.

<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valor/Equação</b>
$L_{bb}$	Folga entre o feixe tubular e o casco	$12 + 0,005 D_{ic}$
$L_{bc}$	Espaçamento central entre chicanas	668,8 mm
$D_{ctl}$	Limite diametral do feixe tubular	$D_{ic} - L_{bb}$

Realizando o cálculo do coeficiente global de transferência de calor  $U$  por meio da Equação (4), onde para os fatores de correção  $j$  da Equação (7) foram utilizados os valores obtidos por Martins (2021), conforme a Tabela 7, sendo possível utilizar a Equação (3) para extrair a área de troca térmica requerida, o que permite por fim calcular o número de tubos necessários para realizar a troca térmica estipulada. Já para o fator  $\Delta T$  foi utilizado o resultado obtido para a média logarítmica das diferenças de temperatura  $LMTD$ . O resumo de todos os cálculos efetuados, com os dados a serem utilizados como parâmetros de construção estão sintetizados na Tabela 8.

Tabela 7 – Valores de correção para o cálculo do coeficiente global de transferência de calor.

<b>Valores para os fatores <math>j</math> de correção para o cálculo de <math>U</math></b>		
<b>Símbolo</b>	<b>Descrição</b>	<b>Valor</b>
$j_c$	Corte das chicanas	1
$j_l$	Vazamento das chicanas	0,8
$j_b$	Correntes que evadem o feixe tubular	0,86
$j_s$	Espaçamento das chicanas de entrada e saída	1
$j_r$	Fluxo laminar	1

Tabela 8 – Valores calculados para os parâmetros de construção do trocador de calor.

<b>Dados calculados para o dimensionamento</b>		
<b>Descrição</b>	<b>Símbolo</b>	<b>Valor</b>
Fator de correção do coeficiente de calor ideal no casco	$j_i$	0,014
Constante $a$	$a$	0,38
Área de escoamento cruzado aos tubos	$S_m$	47329,26 mm <sup>2</sup>
Coeficiente de transferência de calor ideal no casco	$h_{si}$	411,24 W/(m <sup>2</sup> .°C)
Coeficiente de película do casco	$h_s$	282,93 W/(m <sup>2</sup> .°C)
Coeficiente de película do tubo	$h_i$	5351,12 W/(m <sup>2</sup> .°C)
Coeficiente global de transferência	$U$	266,76 W/(m <sup>2</sup> .°C)
Área de transferência de calor requerida	$A$	0,99 m <sup>2</sup>
Número de tubos necessários	$N_t$	18

Os dados obtidos a partir do dimensionamento teórico fornecem os parâmetros iniciais para que se analise os suprimentos necessários para construção do equipamento, além de fornecerem um direcionamento sobre os requisitos básicos de funcionamento do trocador considerando o caso proposto. Isso serve como base para análises futuras de alterações do projeto, onde parâmetros dimensionais e de materiais podem ser modificados de acordo a necessidade funcional ou econômica.

### 3.2 ESTUDO DE VIABILIDADE ECONÔMICA

Realizada a parte de dimensionamento, agora há dados suficientes para o levantamento de materiais para a construção deste trocador de calor didático:

- Tubos de cobre 3/4 polegadas com 1,2 mm de espessura: item essencial ao sistema, será usado para fabricar a região dos tubos do trocador;
- Chapas de aço inoxidável 2 mm: serão usadas para a fabricação das chicanas, onde o critério de espaçamento estabelecido por [Thulukkanam \(2000\)](#) determina que a distância prática para fabricação é igual a 20% do diâmetro do casco, porém, 40-50% seria a configuração mais otimizada, com isso neste estudo será usada a média entre ambas distâncias, adotando 30% do diâmetro do casco como o espaçamento entre chicanas, gerando assim a necessidade de 12 unidades das mesmas;
- Tubo em aço carbono com diâmetro externo de 21 cm: será utilizado para confeccionar o casco do trocador;
- Conexões hidráulicas metálicas e plásticas: para possibilitar o acesso dos fluidos ao equipamento;
- Bomba elétrica de 0,5 Hp: será necessária para direcionamento do fluido quente dos reservatório ao trocador de calor;
- Resistor elétrico de 2000 Watts: para aquecer a água que irá circular pelos tubos; e
- Reservatórios plásticos: serão utilizados para armazenar os o fluido quente na entrada e saída do circuito, sendo que para o fluido frio poderá ser utilizada a água presente na rede de abastecimento do campus.

Com o levantamento de dados sobre os materiais necessários realiza-se a estimativa de custos em lojas virtuais para que seja avaliada a viabilidade econômica de construção deste trocador de calor de bancada:

Tabela 9 – Custos e quantidades de material estimados para a construção do trocador.

Levantamento de custos para construção da bancada		
Descrição do material	Quantidade	Valor total por item
Tubo de cobre 3/4 com 1 mm de espessura	17 m	R\$ 941,26
Tubo de aço carbono 21 cm de diâmetro	1 m	R\$ 62,00
Chapas de aço inoxidável 304   500x200x2	7 unidades	R\$ 826,00
Conexões hidráulicas	Quantidade a ser estimada	R\$ 80,00 - estimado
Bomba elétrica 0,5 Hp	1 unidade	R\$ 100,00
Resistor elétrico de 2000 W	1 unidade	R\$ 159,90
Sensor de temperatura com display digital	4 unidades	R\$ 352,24

Para a parte de reservatórios plásticos poderão ser utilizados materiais de reciclagem, como tonéis adaptados ao equipamento, o que ajuda a minimizar os custos de fabricação. Dessa forma, estima-se que o custo total em materiais para a construção do trocador de calor seja de R\$ 2.521,40.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a conclusão dos dimensionamento e levantamentos de custos, estima-se que o trocador de calor tenha as seguintes principais características:

- Comprimento total do casco igual a 1 metro;

- Diâmetro interno do casco igual a 205 mm;
- Comprimento dos tubos de cobre igual a 800 mm;
- Diâmetro externo dos tubos igual 19,05 mm;
- Vazão volumétrica de 12 l/min de ambos fluidos;
- 11 chicanas internas igualmente espaçadas entre si;
- 2 placas para acomodar as extremidades dos tubos;
- Número de tubos igual a 18; e
- Os parâmetros variáveis a serem medidos no equipamentos serão as vazões e temperaturas de ambos fluidos.

Com tais dados provenientes do dimensionamento teórico um desenho preliminar foi desenvolvido, tendo como principais parâmetros as características de construção calculadas, conforme a listagem anterior. A Figura 9 representa a placa presente no interior do casco, demonstrando também o arranjo de distribuição dos tubos do trocador.

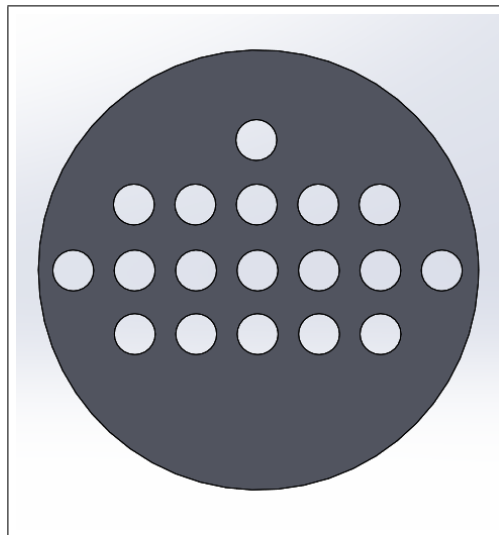


Figura 9 – Placa do trocador de calor com o arranjo de distribuição dos tubos. Fonte: o Autor

Para a parte das chicanas a Figura 10 mostra os dois modelos de chicanas presentes no trocador, cuja altura  $H$  é igual a 80% do diâmetro interno do casco (THULUKKANAM, 2000).

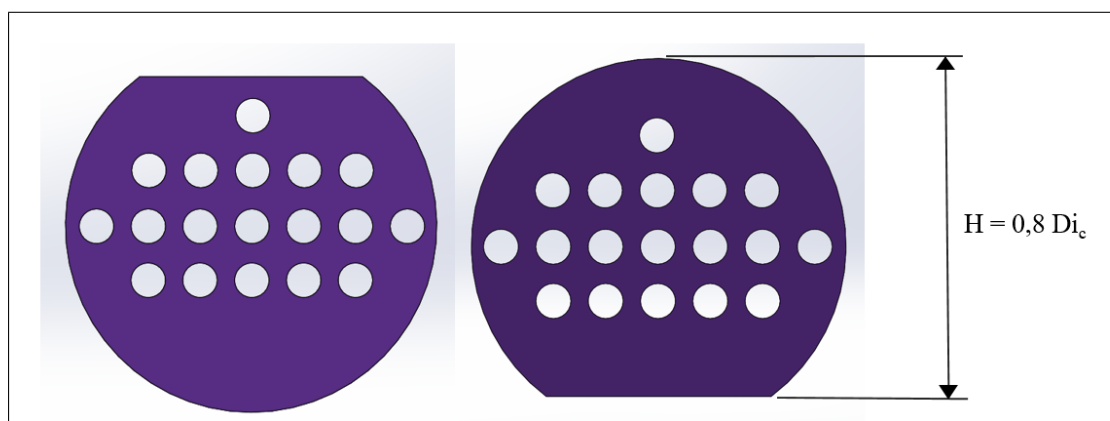


Figura 10 – Chicanas do trocador de calor. Fonte: o Autor

A Figura 11 demonstra o arranjo das 11 chicanas dentro do casco.

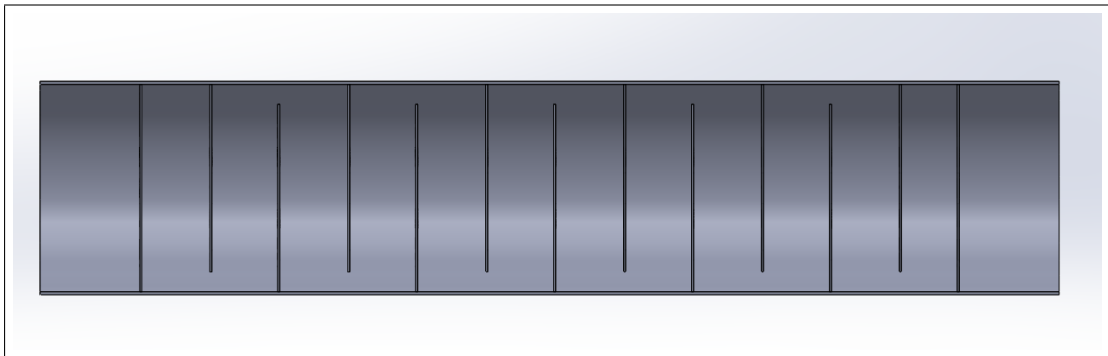


Figura 11 – Distribuição das chicanas dentro do casco do trocador. Fonte: o Autor

A configuração geral da montagem destes componentes em conjunto com os 18 tubos, o casco e as tampas das extremidades são demonstradas nas Figuras 12, 13 e 14.

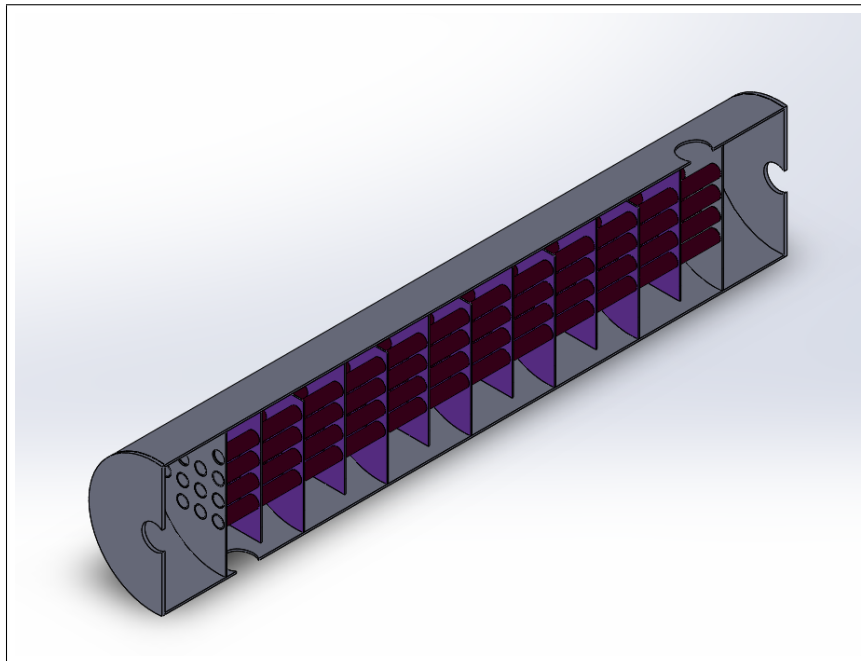


Figura 12 – Corte do trocador para visualização interna dos tubos e chicanas. Fonte: o Autor

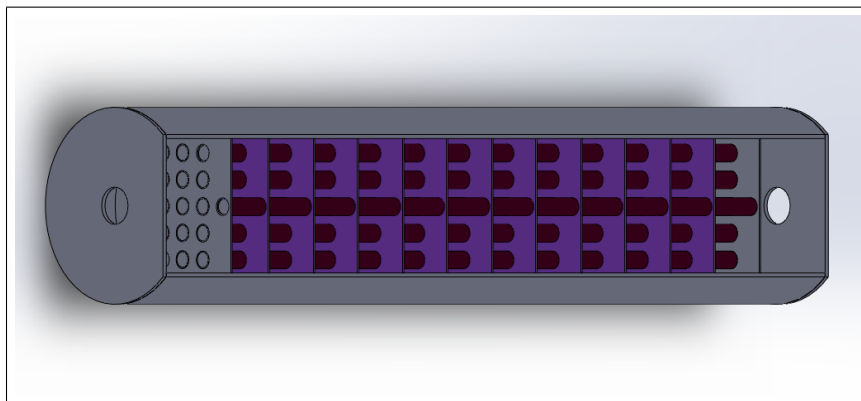


Figura 13 – Segundo corte do trocador para visualização interna dos tubos e chicanas. Fonte: o Autor

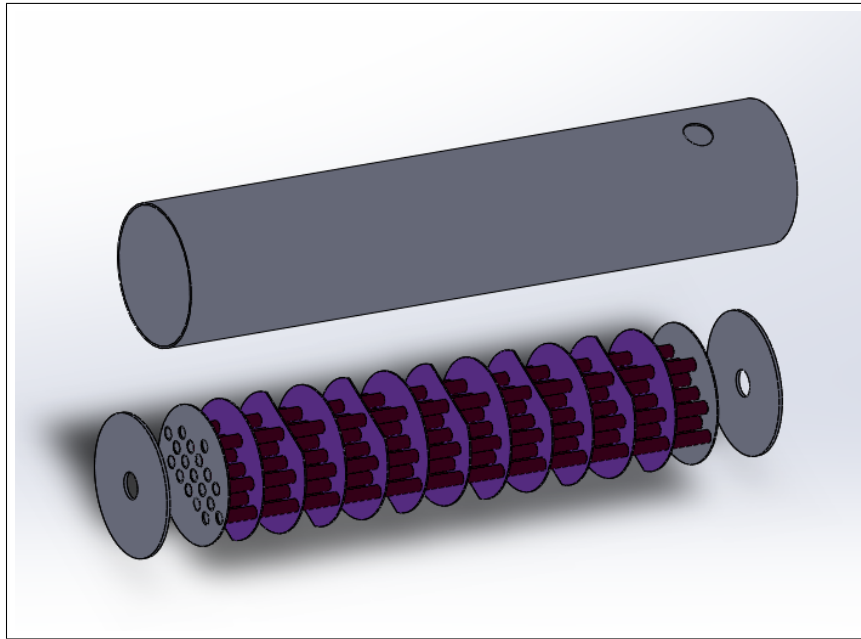


Figura 14 – Vista explodida para visualização do interior do trocador. Fonte: o Autor

A esquematização dos escoamentos de entrada e saída para os fluidos frio (casco) e quente (tubos) está demonstrado na Figura 15.

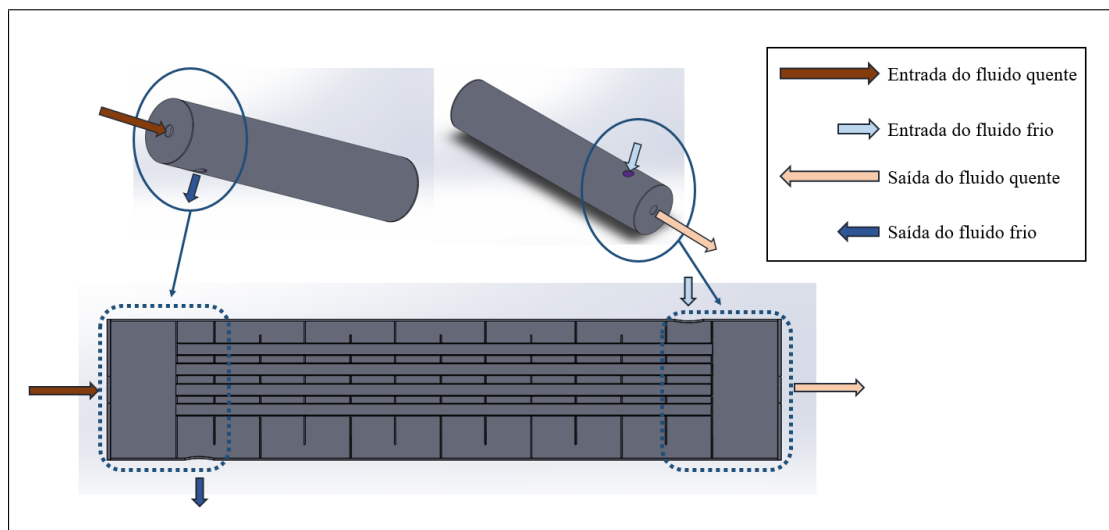


Figura 15 – Esquematização dos pontos de entrada e saída dos fluidos do trocador. Fonte: o Autor

Com tais características e as referências de bancadas comerciais, se torna possível a construção deste equipamento para que este seja utilizado ao que se propõe, onde a depender da disponibilidade de recursos, alguns itens podem ser alterados como o material dos tubos que pode ser substituído por alumínio no lugar do cobre e as placas necessárias para manufatura das chicanas, que podem ser fabricadas em aço carbono pintado no lugar do inox 304. Os impactos técnicos de tais mudanças estão resumidos a seguir:

- Alumínio no lugar do cobre para os tubos: a menor condutividade térmica do alumínio em relação ao cobre acarretará em uma área requerida para troca térmica maior, resultando em número maior de tubos necessários ao equipamento; e

- Placas de aço carbono pintado no lugar de aço inox 304 para as chicanas: a vida útil das chicanas será menor, devido ao contato constante com água, que causará um processo de oxidação do material base em certo ponto do ciclo de vida deste componente, porém, esta mudança não irá alterar ou comprometer o funcionamento do trocador em si.

Neste estudo buscou-se utilizar os materiais mais próximos do que é o ideal em uma perspectiva industrial, uma vez que considera-se plenamente viável a sua construção por meio de projetos de pesquisa acadêmicos, o que elimina a necessidade de contratação de serviços externos para processamento dos materiais. Importante ressaltar que qualquer modificação de dimensão dos componentes também compromete os resultados de parâmetros calculados, tornando necessária a revisão da parte de dimensionamento do trocador de calor.

Outro ponto importante é analisar a possibilidade de efetuar o trabalho do trocador em fluxo concorrente, o que implica em mudanças na forma de calcular *LMTD*, onde a Equação (14) é aplicável à todos arranjos de fluxo, exceto para concorrente (THULUKKANAM, 2000). Dessa forma, o cálculo da variação da temperatura deverá ser modificado conforme demonstrado na Equação (15).

$$LMTD = \frac{(T_{e_q} - T_{e_f}) - (T_{s_q} - T_{s_f})}{\ln((T_{e_q} - T_{e_f}) / (T_{s_q} - T_{s_f}))} \quad (15)$$

Neste tipo de configuração para os escoamentos o valor de  $\Delta T$  a ser usado na Equação (3) será de 14,14 °C, sucedendo uma área requerida para troca térmica *A* de 1,1 m<sup>2</sup>, o que resulta em um aumento de 10% em comparação com o resultado para fluxo contracorrente, mostrando assim o impacto da escolha da direção dos escoamentos dos fluidos em um trocador de calor deste tipo.

## 5 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados obtidos neste estudo, pôde-se verificar todo o processo de dimensionamento de um trocador de calor do tipo casco e tubo didático seguindo o método Bell-Delaware bem como a seleção e levantamento de custos de materiais necessários à construção do equipamento, cuja aplicação industrial ocorre nos mais diversos ramos de manufatura: metalúrgica, química, petrolífera, alimentícia e entre outras. Com isso, a realização dos cálculos de dimensionamento e indicação dos materiais necessários à construção da bancada didática se mostrou de suma importância para que haja no futuro continuidade deste trabalho, ampliando-o para a parte de construção e testes de funcionamento.

O levantamento de custos demonstrou também ser necessário a avaliação do dimensionamento utilizando outros materiais com melhores custos de aquisição, o que pode otimizar a viabilidade econômica para a parte de construção do trocador. Ainda assim, para a parte de manufatura, os processos envolvidos na montagem do equipamento não são de grande complexidade, podendo ser realizados pelo corpo discente que optar continuar com o estudo.

A aplicação deste trocador de calor calculado no laboratório da instituição certamente trará benefícios didáticos, facilitando o ensino de conceitos básicos da área da termodinâmica e de trocadores de calor em si, além de possibilitar a execução de projetos de extensão na área que poderão usar a bancada para validar dimensionamentos teóricos e ampliar o estudo deste tipo de equipamento.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALBUENO, G. **Modelagem Hierárquica de Trocadores de Calor Casco e Tubos**. 189 p. Dissertação (Dissertação de Mestrado em Engenharia) — Departamento de Engenharia Química, Porto Alegre, 2006.
- BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. **Incropera - Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa**. [S.l.]: LTC, 2019.
- BICCA, G. B.; SECCHI, K. W. A. R. Modelagem de trocadores de calor casco e tubos. **Seminário do Programa de Pós Graduação em Engenharia Química, UFRGS**, 2005.
- FEISEL, L. D.; ROSA, A. J. The role of the laboratory in undergraduate engineering education. **J. Eng. Educ.**, Wiley, v. 94, n. 1, p. 121–130, jan. 2005.
- FLYNN, T. A. A. M.; THEODORE, L. **Kern's Process Heat Transfer Second Edition**. [S.l.]: Scrivener Publishing, 2019.
- LABTRIX. **XP 1515.2 BANCADA TROCADOR DE CALOR CASCO E TUBOS E A PLACAS**. 2021. <<https://labtrix.com.br/xp-1515-2/>> Acessado em: 19 de Maio de 2024.
- MARTINS, M. Y. Dimensionamento e simulação de um trocador de calor do tipo casco-tubo de pequenas dimensões. 2021.
- MEC. 2019. Resolução N° 2, de 24 de Abril de 2019.
- MUKHERJEE, R. Effectively design shell-and-tube heat exchangers. **CHEMICAL ENGINEERING PROGRESS**, 1998.
- NITSCHKE, M.; GBADAMOSI, R. O. Heat exchanger design. In: **Heat Exchanger Design Guide**. [S.l.]: Elsevier, 2016. p. 1–19.
- OZDEN, E.; TARI, I. Shell side CFD analysis of a small shell-and-tube heat exchanger. **Energy Convers. Manag.**, Elsevier BV, v. 51, n. 5, p. 1004–1014, maio 2010.
- RIBEIRO, O. P. B. e M. Estudo e desenvolvimento de um trocador de calor para fins didáticos. **Revista Científica Multidisciplinar Núcleo do Conhecimento**, 2019.
- SERNA, M.; JIMÉNEZ, A. A compact formulation of the bell–delaware method for heat exchanger design and optimization. **Chem. Eng. Res. Des.**, Elsevier BV, v. 83, n. 5, p. 539–550, maio 2005.
- SHINDE, S.; PANCHA, M. H. Comparative thermal performance analysis of segmental baffle heat exchanger with continuous helical baffle heat exchanger using kern method. **International Journal of Engineering Research and Applications**, IJERA, v. 2, p. 2264–2271, ago. 2012.
- SPARROW, E.; GORMAN, J.; ABRAHAM, J. Quantitative Assessment of the Overall Heat Transfer Coefficient U. **Journal of Heat Transfer**, v. 135, n. 6, p. 061102, 05 2013. ISSN 0022-1481. Disponível em: <<https://doi.org/10.1115/1.4023566>>.
- TEMA. **Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association**. [S.l.], 2007.
- THULUKKANAM, K. **Heat Exchanger Design Handbook**. Boca Raton, FL: CRC Press, 2000. (Mechanical Engineering).
- TINKER, T. Shell-side characteristics of shell-and-tube heat exchangers: A simplified rating system for commercial heat exchangers. **Journal of Fluids Engineering**, ASME International, v. 80, n. 1, p. 36–49, jan. 1958. ISSN 0097-6822. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1115/1.4012245>>.

---

## SIZING AND ECONOMIC ANALYSIS OF A DIDATIC SHELL-TUBE HEAT EXCHANGER

**Abstract:** In this study the sizing for a small shell-tube heat exchanger was developed, aiming a didatic application for it, followed by an economic analysis with material aquisition costs. The didatic application of this type of equipment in thermodynamics and fluid mechanics lectures for engineering courses is essential to maximize the impact of teaching heat exchange concepts, due to the wide usage of heat exchanger in the industry. The sizing process was realized trough Bell-Delaware method applied to some dimentional premises, which allowed to obtain a list of needed materials to manufacture the equipment itself. By the end of the study was possible to analyse the size of the financial impact to aquire the related material and the impact of each considered component in the heat exchanger's performance.

**Keywords:** Shell-tube heat exchanger, Bell-Delaware method and sizing.

---