

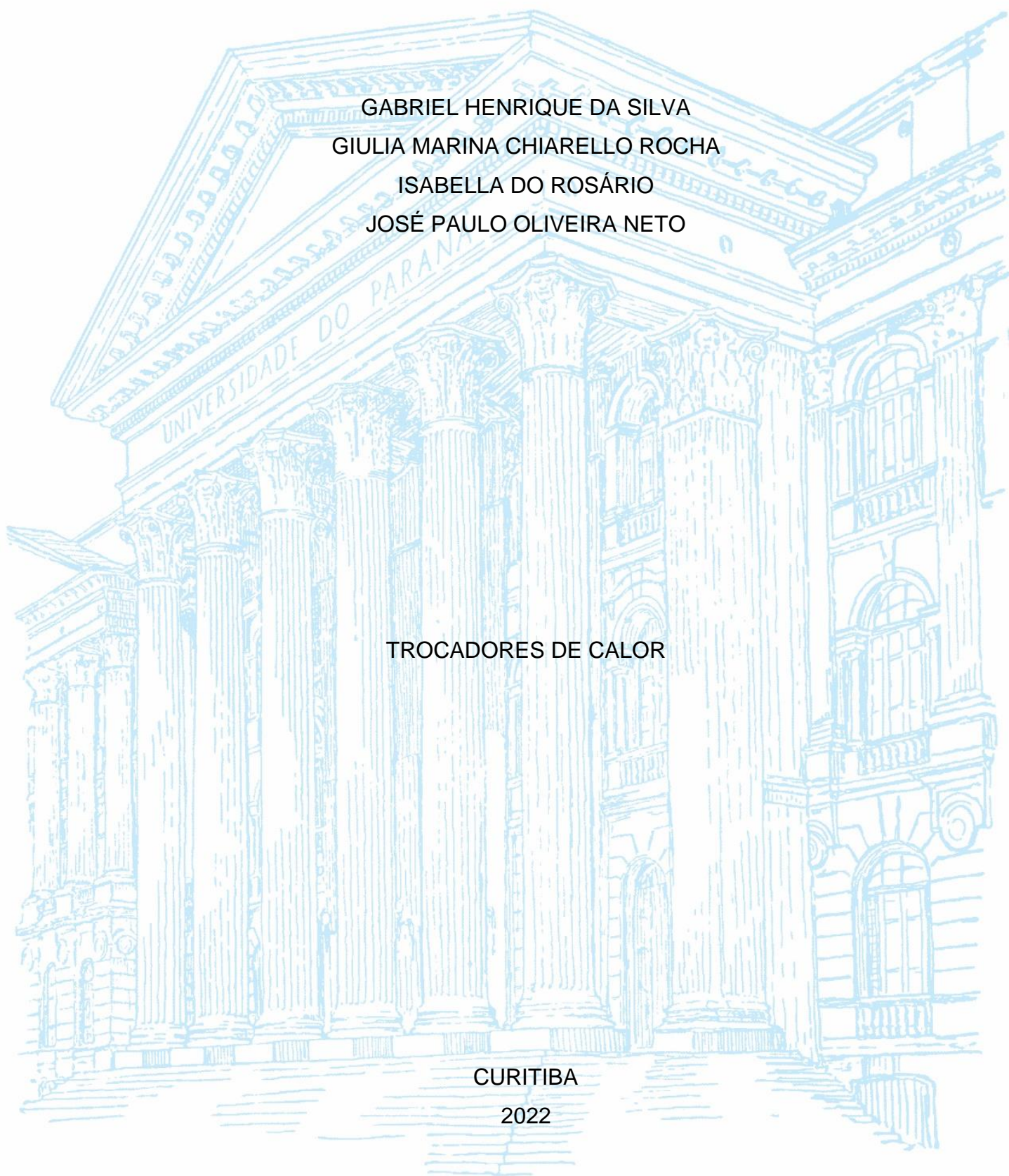
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

GABRIEL HENRIQUE DA SILVA
GIULIA MARINA CHIARELLO ROCHA
ISABELLA DO ROSÁRIO
JOSÉ PAULO OLIVEIRA NETO

TROCADORES DE CALOR

CURITIBA

2022



GABRIEL HENRIQUE DA SILVA
GIULIA MARINA CHIARELLO ROCHA
ISABELLA DO ROSÁRIO
JOSÉ PAULO OLIVEIRA NETO

TROCADORES DE CALOR

Trabalho acadêmico apresentado ao curso de Engenharia Química, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial na disciplina TQ081 – Fenômenos de Transporte II.

Orientador: Prof^a. Dra. Regina Maria Matos Jorge

CURITIBA

2022

RESUMO

O processo de troca térmica entre dois fluidos, ou mais, é realizado por equipamentos denominados trocadores de calor. Tais equipamentos apresentam classificações por tipo de escoamento dos fluidos, por tipo de contato, ou seja, se existe uma parede que separa os fluidos e pelo tipo de construção, tubular, por placas planas lisas ou com alguma ondulação. Além disso, durante a análise de um trocador de calor, devem ser considerados os fenômenos termodinâmicos que regem o processo, bem como, a resistências térmica à troca de energia entre os fluidos envolvidos.

Palavras-chave: Trocador de calor. Troca térmica. Termodinâmica.

SUMÁRIO

1 OBJETIVO	5
2 INTRODUÇÃO À TRANSFERÊNCIA DE CALOR	5
2.1 FORMAS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	5
3 CLASSIFICAÇÃO DE TROCADORES DE CALOR.....	6
3.1 QUANTO A EXISTÊNCIA DE MUDANÇA DE FASES.....	6
3.2 QUANTO AO MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR	7
3.3 QUANTO A COMPACTICIDADE	7
3.4 QUANTO A CONSTRUÇÃO	7
3.4.1 DUPLO TUBO	7
3.4.2 CASCO E TUBOS.....	8
3.4.3 PLACAS	10
3.4.4 OUTROS	10
3.5 QUANTO AO TIPO DE ARRANJO	10
3.6 QUANTO A DISPOSIÇÃO DAS CORRENTES.....	11
4 MATERIAIS, INCRUSTAÇÃO E CORROSÃO.....	12
4.1 MATERIAIS USADOS NA CONSTRUÇÃO DE TROCADORES DE CALOR	12
4.2 MATERIAIS USADOS NA ISOLAMENTO DE LINHAS E EQUIPAMENTOS.....	12
5 TROCADORES DE CALOR COM MUDANÇA DE FASE.....	13
5.1 CONDENSADORES	13
5.2 EBULIDORES	13
5.3 EVAPORADORES	13
5.4 CRISTALIZADORES.....	13
REFERÊNCIAS.....	15

1 OBJETIVO

O presente trabalho tem como objetivo abordar o princípio de trocas térmicas, os equipamentos responsáveis pela troca de calor, suas classificações, arranjos e os materiais que os constituem.

2 INTRODUÇÃO À TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Os trocadores de calor funcionam segundo o princípio de troca térmica. Para entendê-la, precisamos expor alguns conceitos fundamentais:

- Temperatura: mede o grau de excitação das partículas de um corpo ou sistema;
- Sistema: região do espaço ou quantidade de matéria a ser estudada;
- Calor: energia transferida, quando existir um gradiente de temperatura, entre um sistema e o ambiente, ou, de um ponto a outro de um mesmo corpo.

Portanto, quando houver uma diferença de temperatura dentro de um sistema ou quando houver o contato entre sistemas com temperaturas desiguais, ocorrerá, a troca térmica num fluxo de energia (calor) do sistema mais quente para o mais frio. A forma que o calor será transferido dependerá do contato entre os corpos (condução), da dependência, ou não, de um meio material (radiação) ou pelo escoamento de um fluido (convecção).

2.1 FORMAS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Condução: há troca de energia pelo movimento cinético ou pelo choque das moléculas, para líquidos ou gases, bem como, pela vibração da rede no caso dos sólidos. Ademais, para os metais temos o deslocamento de elétrons livres. O fluxo de calor (q) conduzida no processo é regida pela lei de Fourier:

$$q = -k \frac{dT}{dx}$$

Onde:

- q é a o fluxo de calor por condução (W/m^2);
- k é a condutividade térmica ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$ ou W/mK);
- A é a área perpendicular ao fluxo de calor (m^2);
- T é a temperatura ($^\circ\text{C}$ ou K);
- x é a espessura de parede (m).

A condutividade térmica é uma propriedade de cada material e que varia em decorrência da sua composição química e temperatura. Pode-se dizer que para maiores

valores de k , o material será considerado condutor térmico, bem como, para menores valores o material será considerado isolante. A variação da condutividade para alguns materiais está representada a seguir.

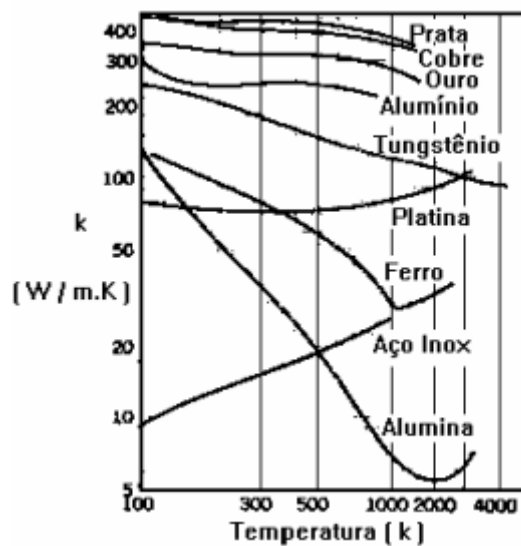


FIGURA 1 – VALORES DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Radiação: devido a modificações eletrônicas dos átomos constituintes dos materiais ocorre a emissão da energia por ondas eletromagnéticas (fótons). Essa forma de transferência de calor não necessita da presença de um meio material para se propagar e os corpos estão separados no espaço.

Todos os corpos que possuem temperatura absoluta diferente de zero irão irradiar calor. Contudo, deve-se considerar o poder emissivo (E), ou seja, a taxa de energia liberada por área. Sendo assim, da lei de Stefan-Boltzmann tem-se o poder emissivo máximo:

$$E_{\text{máx}} = \sigma * T_s^4$$

Onde:

- σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2 \text{ K}^4$)
- T_s é temperatura absoluta da superfície (K).

Um corpo é chamado de irradiador perfeito, ou corpo negro, quando seu poder emissivo for máximo. Entretanto, corpos reais absorvem e emitem apenas parte da energia, dessa forma o fluxo de calor emitido (q) é dado por:

$$q = \sigma * \varepsilon * \Delta T^4$$

Onde:

- q é o fluxo de calor transferido por irradiação (W/m^2)
- σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 * 10^{-8} W/m^2 K^4$);
- ε é a emissividade;
- ΔT é a diferença de temperatura entre a superfície e a vizinhança.

A emissividade é uma propriedade que depende do material e seus valores variam no intervalo $[0,1]$, sendo 0 para um corpo totalmente refletor e 1 para o corpo negro.

Convecção: processo pelo qual o calor é transferido pelo escoamento de um fluido. Visto que, as partículas aquecidas de um fluido tendem a migrar para as regiões de menor temperatura na superfície de um sólido. Sendo assim, podendo ocorrer de forma natural ou forçada, quando são utilizados equipamentos, por exemplo, bombas. A taxa de transferência de calor é chamada de lei de resfriamento de Newton:

$$q = h * (T_s - T_\infty)$$

Onde:

- h é o coeficiente de transferência de calor por convecção ($W/m^2 K$);
- T_s é a temperatura da superfície (K);
- T_∞ é a temperatura do fluido (K);
- q é o fluxo de calor por convecção (W/m^2)

O coeficiente de convecção depende de propriedades termodinâmicas, rugosidade, temperaturas envolvidas, velocidade de escoamento, entre outros fatores. Dessa forma, comumente os coeficientes são definidos experimentalmente.

Tabela 9.6 Faixas de valores típicos do coeficiente convectivo h para ar e água

SISTEMA		h [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$]
Convecção natural	Gases	3 a 20
	Líquidos	100 a 600
	Água em ebulição	1000 a 20.000
Convecção forçada	Gases	10 a 100
	Líquidos	50 a 500
	Água	500 a 10.000
Condensação de vapores		1000 a 100.000

Fonte: Bird et al. (2004).

FIGURA 2 – COEFICIENTES DE CONVECÇÃO

Pela lei de resfriamento, concluímos que o fluxo de calor é diretamente proporcional a área, portanto, quando for necessário aumentar o fluxo de calor, deve-se aumentar a área de transferência de calor. Isso pode ser feito mudando a geometria das aletas que escoam o fluido.

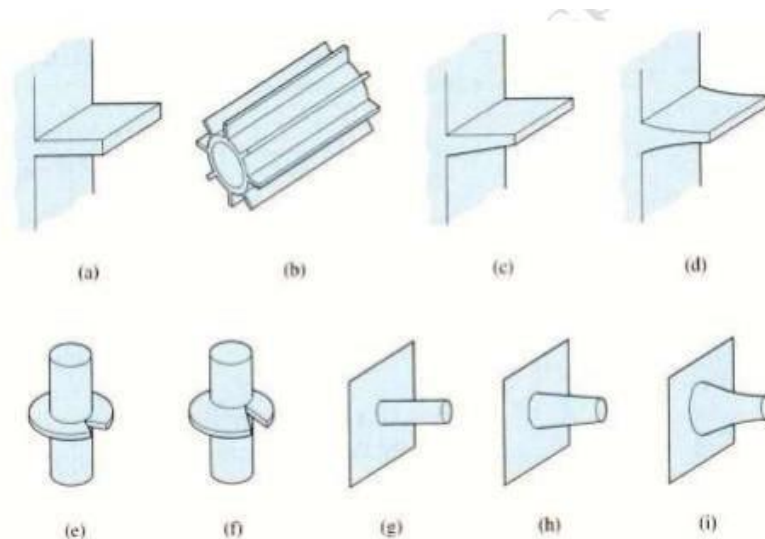


FIGURA 3 – EXEMPLOS DE ALETAS

3 CLASSIFICAÇÃO DE TROCADORES DE CALOR

Os trocadores de calor são fundamentais para o bom desenvolvimento do processo de uma indústria, já que há uma necessidade constante de trocas de calor e seu uso facilita muito esse processo. O tipo de trocador ideal pode variar de acordo com a necessidade específica de seu uso. Esta seção tem por objetivo classificar os trocadores de calor quanto a uma série de critérios, importantes para a escolha do trocador ideal para cada processo.

3.1 QUANTO A EXISTÊNCIA DE MUDANÇA DE FASES

Os trocadores de calor podem ser divididos em dois grupos quanto a quantidade de fases presentes: monofásico, onde há existência de uma única fase, tem mudanças de fase no fluido que escoam no trocador; e multifásico, onde há uma mudança de fase no fluido que escoam pelo trocador.

3.2 QUANTO AO MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Os trocadores de calor funcionam de acordo com o princípio de troca térmica, sendo então divididos entre trocadores de calor que operam em condução, convecção e irradiação.

3.3 QUANTO A COMPACTICIDADE

Os trocadores de calor podem também ser classificados quanto a razão entre área da superfície de troca térmica em um dos lados do equipamento e seu volume, o que configura a compacticidade. Uma compacticidade elevada implica um volume pequeno para o trocador de calor, enquanto uma propriedade reduzida de compacticidade leva um volume maior.

Para processos em que a densidade de área superficial em um dos lados do trocador excede ou equivale a $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$, o trocador é classificado como compacto, enquanto equipamentos com razão inferior a 700 são classificados como não compactos (por exemplo os trocadores do tipo tubular plano e caso e tubos de razão entre 70 e $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$).

3.4 QUANTO A CONSTRUÇÃO

Os trocadores de calor ainda podem ser classificados de acordo com suas características construtivas. Os mais comuns são os tubulares e os de placas.

3.4.1 DUPLO TUBO

É constituído por dois tubos concêntricos. Em um deles circula o fluido frio e o outro o fluido quente. Um dos fluidos escoam pelo tubo interno e o outro

pela parte anular entre tubos, em uma direção de contrafluxo. O fluxo de calor tem, como passagem, a área de contato entre os fluidos, representada pela área do tubo interno. Se o tubo fosse curto, a quantidade de calor trocada, por unidade de tempo (fluxo) será também reduzida. Este é talvez o mais simples de todos os tipos de trocador de calor pela fácil manutenção envolvida. É geralmente usado em aplicações de pequenas capacidades.

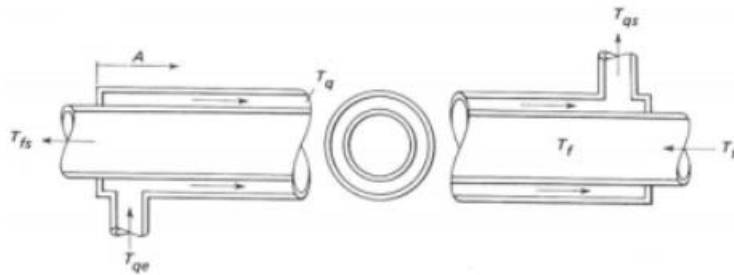


FIGURA 4 – TROCADOR DE CALOR DUPLO TUBO

3.4.2 CASCO E TUBOS

Em alguns casos, um trocador de calor duplo tubo se mostra insuficiente para a necessidade de troca de calor devido à área não tão grande que ele proporciona para isso. A solução para esse problema foi obtida enfileirando um número grande de tubos dentro de uma única carcaça. O conjunto interno de tubos é conhecido como banco de tubos. Pelo tubo externo, ou carcaça, circula um dos fluídos, enquanto no feixe tubular, ou no banco de tubos, escoia o outro. Um conjunto de placas metálicas, denominada de chicanas, forçam o fluido que circula pela carcaça a viajar sempre cruzando o banco de tubos, de modo a aumentar a eficiência das trocas térmicas.

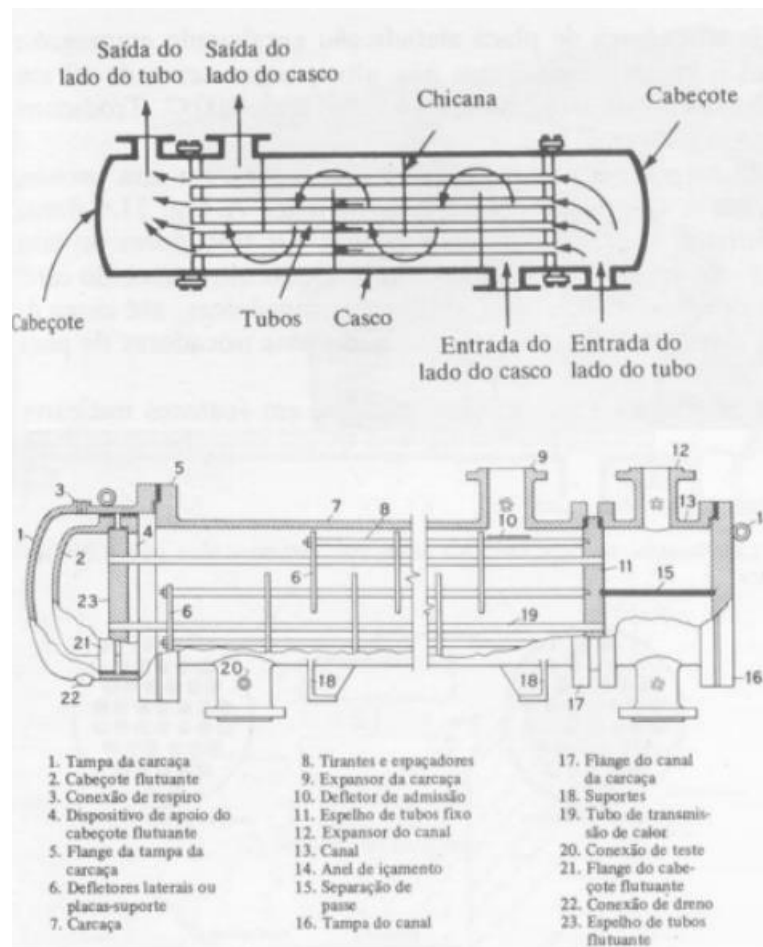


FIGURA 5 – TROCADOR DE CASCO E TUBOS

Além disso, suponha que o fluido quente circula no banco de tubos: a temperatura dos tubos será muito maior que a da carcaça, levando o feixe tubular a dilatar-se mais. Se o feixe estiver firmemente fixo pelas extremidades à carcaça, a dilatação diferenciada levará ao empenamento do feixe, danificando-o de modo irreversível. Dessa maneira é necessária uma extremidade para os feixes tubulares, que pode mover-se livremente no interior da carcaça. Esse tipo de trocador é chamado de cabeçote flutuante.

Uma outra solução para o problema da área encontrado no trocador de duplo tubo é o trocador de calor que consiste em uma ou mais serpentinas (de tubos circulares) ordenadas em uma carcaça. Uma grande superfície pode ser acomodada em um determinado espaço utilizando as serpentinas e as expansões térmicas, problema que pode ocorrer nos trocadores de cascos e tubos, não são nenhum problema, entretanto a limpeza é muito problemática.

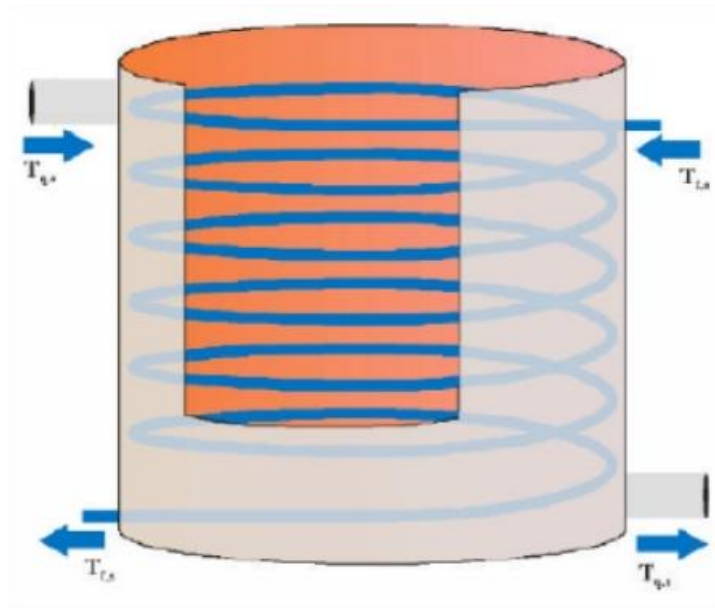


FIGURA 6 – TROCADOR DE CALOR DE SERPENTINA

3.4.3 PLACAS

É constituído por placas delgadas, que podem ser lisas ou onduladas. Este tipo de trocador não pode suportar pressões ou temperaturas muito altas, comparado ao trocador tubular equivalente. São trocadores de calor tipo compactos. Um exemplo desse tipo de construção são os radiadores. Os de placa aletada são construídos de forma que aletas planas ou onduladas são separadas por chapas planas. Os de tubo aletado suportam altas pressões e uma de suas utilizações é em reatores nucleares.

3.4.4 OUTROS

Entre outros tipos de trocador de calor, há os já citados regenerativos. Eles podem ser estáticos ou dinâmicos. A diferença se dá que os estáticos não apresentam partes móveis e constituem numa parte porosa com uma válvula que coordena a alternância dos fluidos.

3.5 QUANTO AO TIPO DE ARRANJO

Podemos classificar os arranjos de trocadores de calor como em série e paralelo.

3.6 QUANTO A DISPOSIÇÃO DAS CORRENTES

Podemos classificar os trocadores de calor quanto à disposição dos tubos e placas como corrente cruzada, contracorrente ou paralelas.

A configuração cruzada tem por característica a disposição na forma perpendicular, ou seja, em um processo em que a corrente quente escoar na horizontal, necessariamente o escoamento da corrente fria é realizado na vertical.

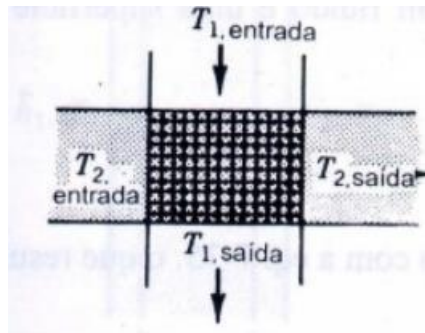


FIGURA 7 – Escoamento cruzado

A configuração em contracorrente apresenta o escoamento no mesmo eixo, porém em sentidos opostos para correntes quentes e frias. Os trocadores de calor que operam esta condições são, geralmente, os mais utilizados na indústria por apresentarem alta eficiência na troca térmica entre os fluidos que escoam no trocador.

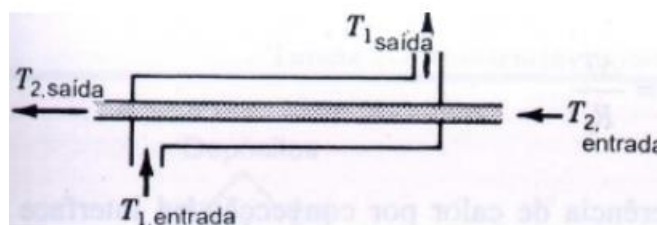


FIGURA 8 – Escoamento em contracorrente

Já a configuração paralela é caracterizada pelo escoamento dos fluidos quente e frio no mesmo eixo e mesmo sentido, o que, geralmente, gera uma baixa eficiência de troca térmica.

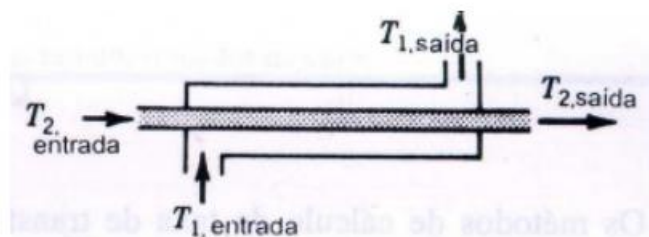


FIGURA 9 – Escoamento paralelo

4 MATERIAIS, INCRUSTAÇÃO E CORROSÃO

4.1 MATERIAIS USADOS NA CONSTRUÇÃO DE TROCADORES DE CALOR

O materiais que constituem os trocadores de calor devem ser escolhidos de acordo com a necessidade, geralmente utilizando metais não ferrosos como o cobre, alumínio, latão e ligas de cobre e níquel, para evitar a corrosão do equipamento. Também podem ser utilizados tubos de aço inox, devido as suas propriedades anticorrosivas e versatilidade de operação. Também podem ser utilizados tubos de aço-carbono. As aletas geralmente acompanham o material dos tubos, enquanto cascos usam aço carbono, inox ou alumínio. Já as câmaras podem ser de materiais ferrosos.

Além de fatores técnicos, devem ser levados em conta aspectos relacionados ao custo-benefício do processo, além do coeficiente de condutividade térmica que forneça a troca que o processo necessita.

4.2 MATERIAIS USADOS NA ISOLAMENTO DE LINHAS E EQUIPAMENTOS

Os isolantes térmicos são ótimas soluções para reduzir o consumo de energia elétrica e dar segurança para a operação. Existe uma diversa gama de materiais para realizar tal isolamento, variando de acordo com o objetivo. Os mais comuns são lã de vidro, poliestireno e manta 3TC. A lã de vidro é

caracterizada como um material inerte e maleável; já o poliestireno é configurado como um bom isolante, embora seja utilizado em outros ramos da indústria; a manta 3TC é uma tecnologia recente, por isso tem uma eficiência maior para as três formas de troca térmica.

5 TROCADORES DE CALOR COM MUDANÇA DE FASE

5.1 CONDENSADORES

Se assemelhando aos evaporadores, os condensadores são trocadores de calor que tem por objetivo a obtenção de uma corrente líquida a partir de uma corrente gasosa, operando com o resfriamento dessa corrente. Podem ser do tipo serpentina aletada, placas ou conjunto de tubos. Na saída do condensador, o líquido estará a uma pressão elevada, sendo necessária atenção nesse ponto do equipamento.

5.2 EBULIDORES

Os ebulidores utilizam resistências elétricas para aquecer um fluido até a temperatura de ebulição, alcançando o equilíbrio líquido vapor para o fluido que escoar.

5.3 EVAPORADORES

Os evaporadores são trocadores de calor que realizam a troca térmica por condução entre o fluido refrigerante (que é evaporado) e o fluido refrigerado (geralmente ar ou água). A operação ocorre a pressão e temperatura constante, exceto pelas perdas de carga envolvidas no processo. O fluido refrigerante sai do evaporador como um gás superaquecido.

5.4 CRISTALIZADORES

Os trocadores de calor considerados cristalizadores promovem um processo físico de resfriamento de uma mistura líquida para obtenção de cristais

dos componente da mistura, partindo da troca térmica de um fluido refrigerante com essa mistura (tal com a temperatura maior que a do fluido refrigerante).

REFERÊNCIAS

BOHORQUEZ, W. O. I. **TROCADORES DE CALOR. UFJF/Departamento de Engenharia de Produção e Mecânica.** Disponível em:

<http://www.ufjf.br/washington_irrazabal/files/2014/05/Aula-23_Trocadores-de-Calor.pdf> Acesso em: 06 maio 2022.

COULSON, J. AND RICHARDSON, J (1999). **Chemical Engineering- Fluid Flow. Heat Transfer and Mass Transfer** - Volume 1; Reed Educational & Professional Publishing LTD

INCROPERA, Frank P., DE WITT, David. **Fundamentos de transferência de calor e massa.** 4 ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1998.

ÖZISIK, M. N. **Transferência de Calor – Um Texto Básico.** Editora Guanabara Koogan S. A.; Rio de Janeiro-RJ, 1990.

S. KAKAÇ; H. LIU (2002). **Heat Exchangers: Selection, Rating and Thermal Design 2nd Edition** ed. [S.l.]: CRC

TERMOTEEK. **MANUTENÇÃO DE TROCADOR DE CALOR CASCO TUBO.** Disponível em: <<http://www.termotek.com.br/manutencao-trocador-calor-casco-tubo>> Acesso em: 06 maio 2022.