

Trocadores de Calor



Em processos industriais, a energia na forma de calor é transferida por uma variedade de métodos,

- condução em aquecedores de resistência elétrica;
- condução-convecção em trocadores de calor, caldeiras e condensadores;
- radiação em fornos de calor radiante e secadores
- métodos especiais, como aquecimento dielétrico.

Trocadores de calor são dispositivo utilizados para realizar processos da troca térmica entre dois fluidos em diferentes temperaturas. Estes processos são comuns em muitas aplicações da Engenharia. Podemos utilizá-los no aquecimento e resfriamento de ambientes, no condicionamento de ar, na produção de energia, na recuperação de calor e no processo químico.

O equipamento geralmente opera em condições de estado estacionário

Projeto de Trocadores de Calor

A partir dos balanços de massa e energia, é calculada a taxa necessária de transferência de calor. Em seguida, usando o coeficiente geral e a média ΔT , é determinada a área necessária para a transferência de calor e, no caso de equipamentos cíclicos, a duração de cada ciclo.

Em dispositivos simples, essas quantidades são avaliadas facilmente e com considerável precisão, mas em unidades de processamento complexas a avaliação é freqüentemente difícil e sujeita a considerável incerteza.

O projeto final é quase sempre um compromisso, com base no julgamento da engenharia, para obter o melhor desempenho geral, levando em consideração os requisitos de serviço.

Trocadores de Calor de casco e tubos

Os trocadores de calor tubulares são tão importantes e amplamente usados em processos industriais que seu design é altamente desenvolvido. Os padrões desenvolvidos e aceitos pelo TEMA (Standards of the Tubular Exchanger Manufacturers Association) estão disponíveis e incluem em detalhes os materiais, métodos de construção, técnicas de projeto e dimensões dos trocadores.

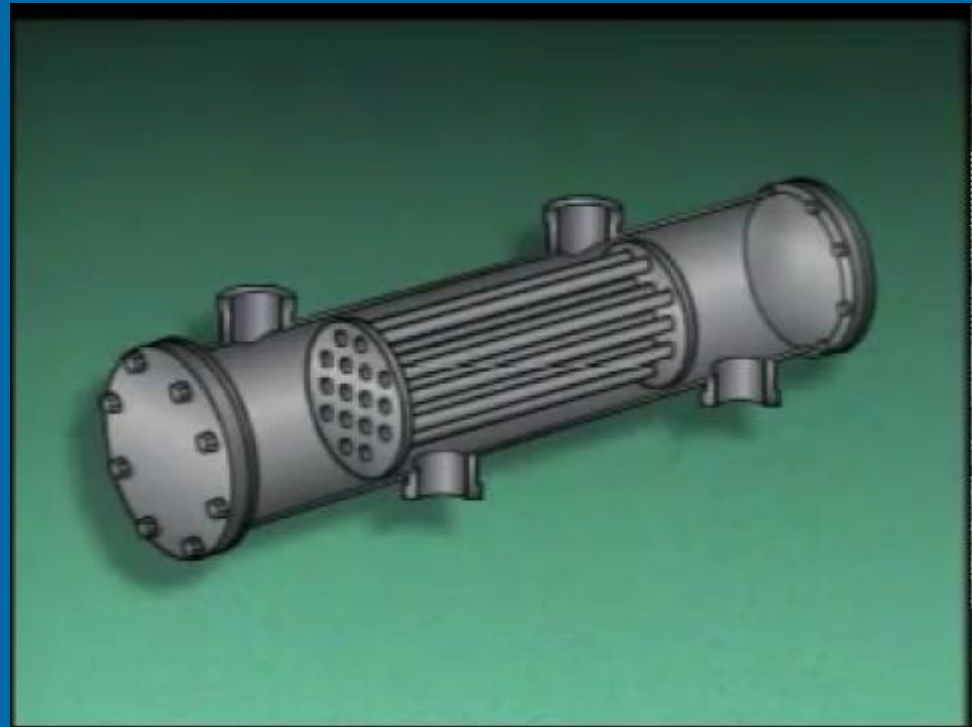
Tubular Exchangers Manufacturers Association. *Standards of the TEMA*, 7a. ed. Nueva York: TEMA, 1988.

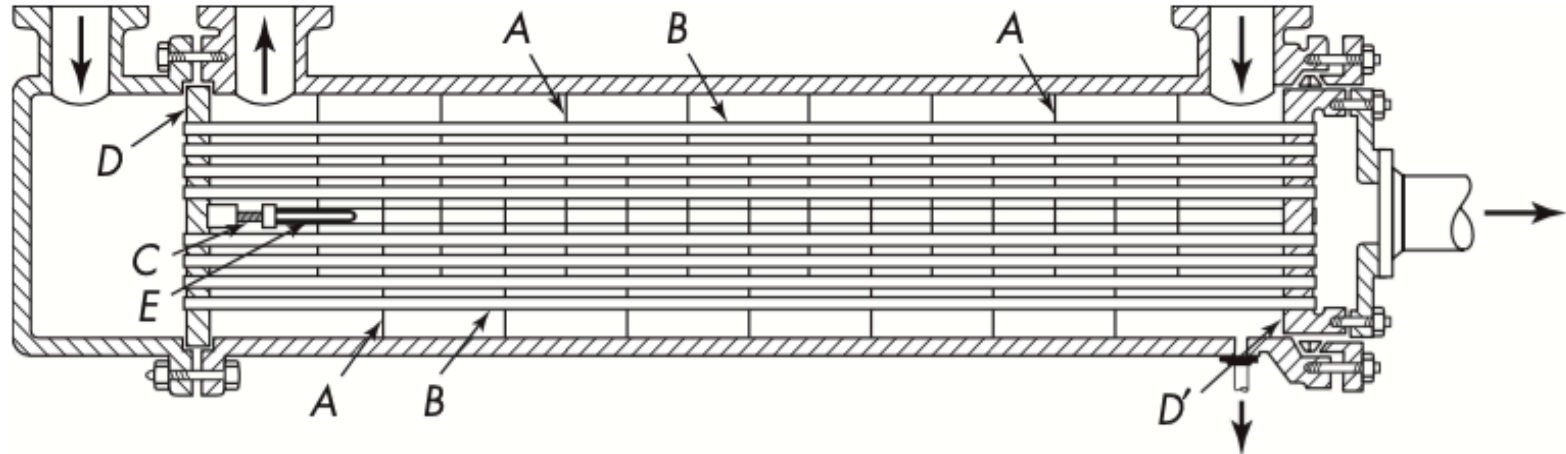
Trocadores com múltiplas passagens

Se o número de tubos for reduzido e o comprimento aumentado de forma que a vazão seja alta o suficiente, o comprimento necessário do tubo provavelmente não será prático.

A construção com várias passagens de tubo permite o uso de comprimentos de tubo padrão, enquanto garante alta velocidade e coeficiente do lado do tubo.

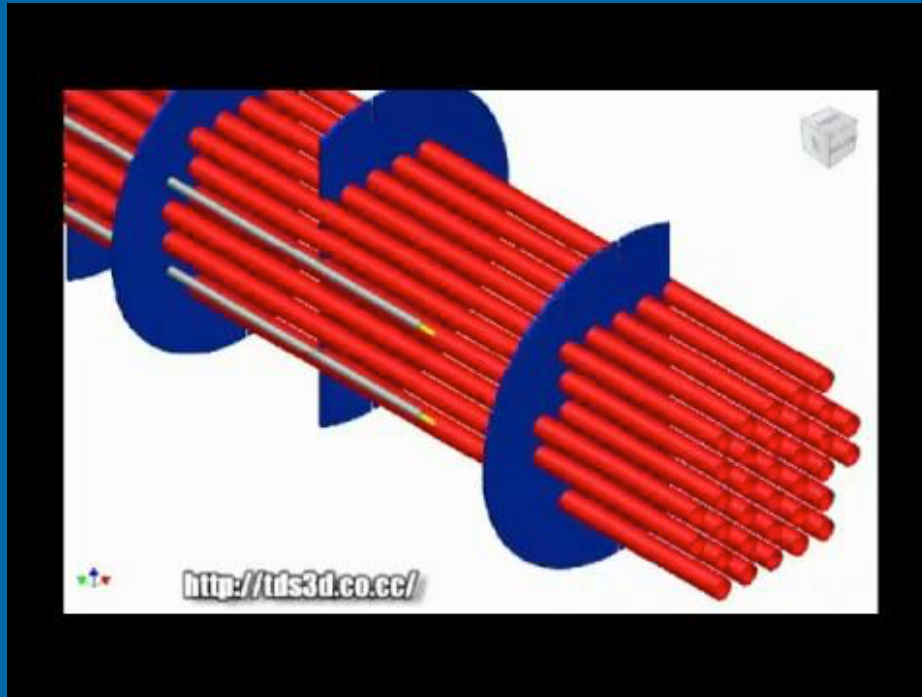
As desvantagens deste tipo de trocador são:
1) a construção do trocador é um pouco mais complicada; 2) algumas seções do trocador possuem fluxo paralelo, o que limita a aproximação da temperatura, e 3) a perda por atrito aumenta consideravelmente.

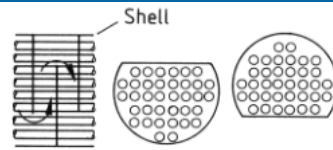




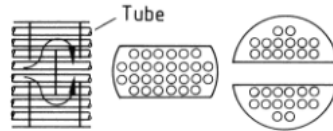
Trocador de passagem simples 1:1 em contra-corrente: A, placas defletoras; B, tubos; C, varetas guias; D, placas tubulares; E, tubos espaçadores

Placas defletoras: promovem o fluxo cruzado e aumentar a velocidade média do fluido no casco. São discos circulares de chapa metálica perfurados e seccionado em um lado

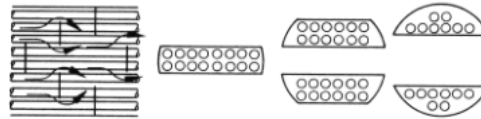




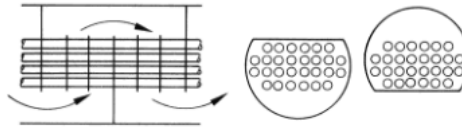
Single-segmental baffle



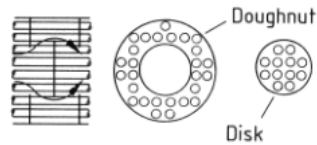
Double-segmental baffle



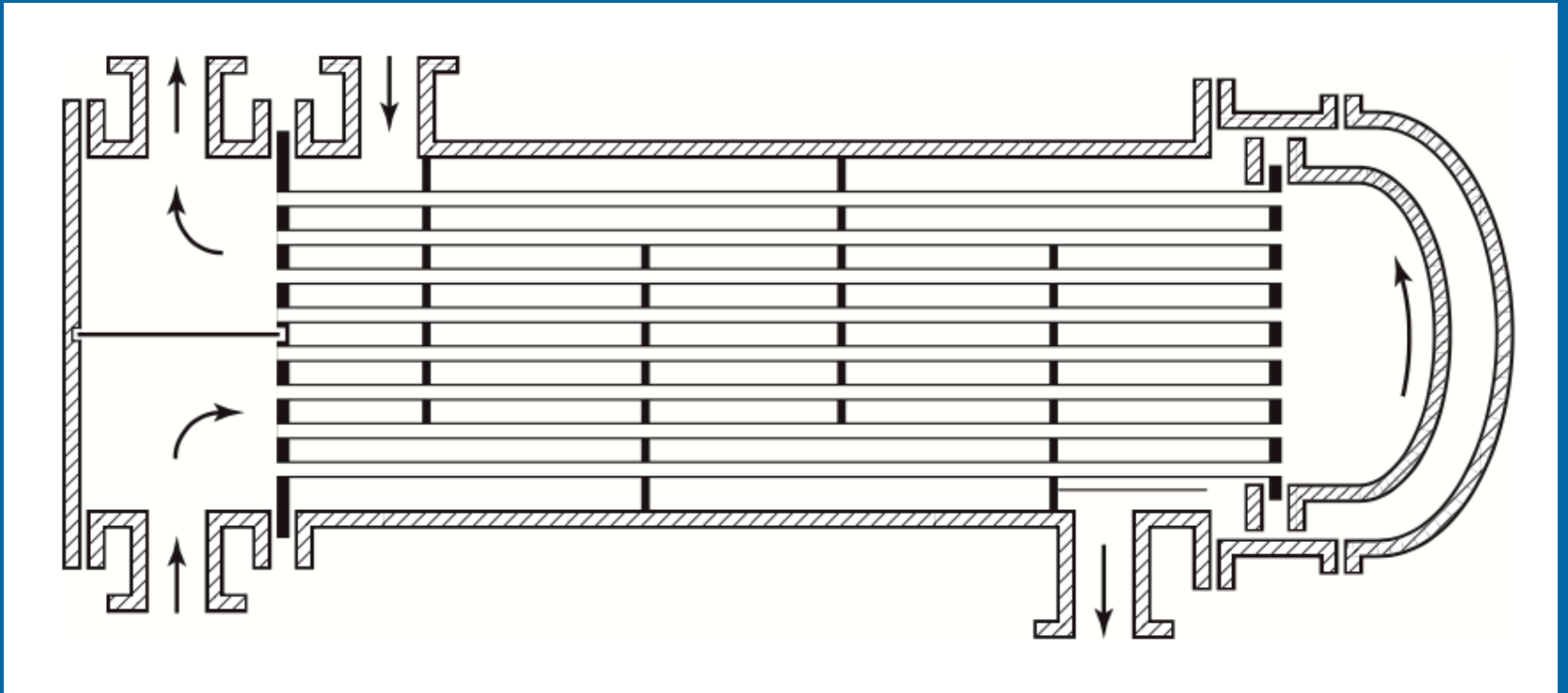
Triple-segmental baffle



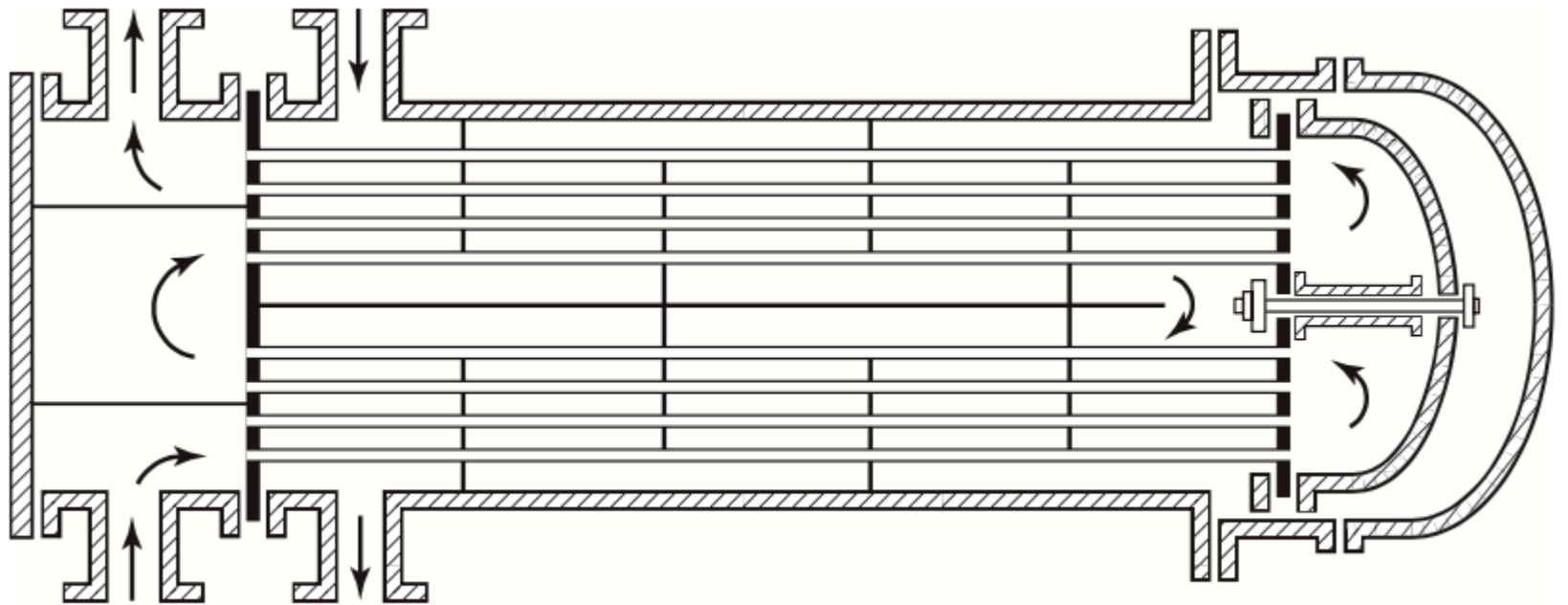
No-tubes-in-window segmental baffle



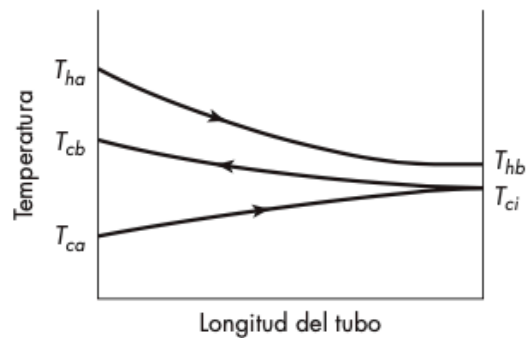
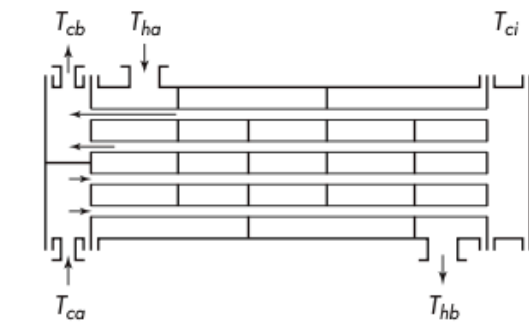
Disk-and-doughnut baffle



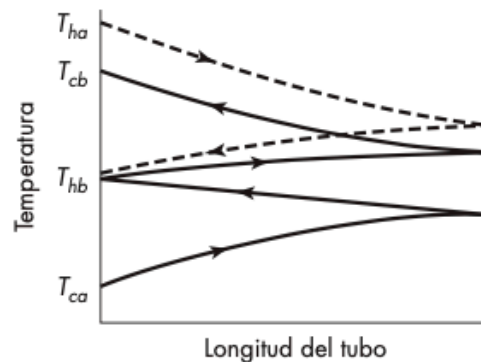
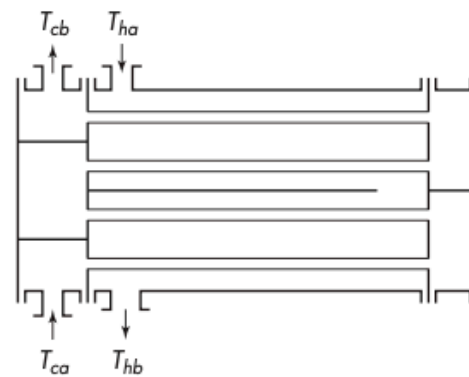
Trocador 1:2, uma passagem pelo casco e duas pelos tubos



Trocador 2:4, duas passagens pelo casco e quatro pelos tubos



a)



b)

FIGURA 15.5

Curvas temperatura-longitud: a) intercambiador 1-2; b) intercambiador 2-4.

Correção da Diferença de Temperatura Média Logarítmica

Não se pode aplicar diretamente a definição anterior de LMTD pois a consideração de que a diferença de temperatura é uma função linear do calor transferido não pode ser feita para trocadores de passagens múltiplas.

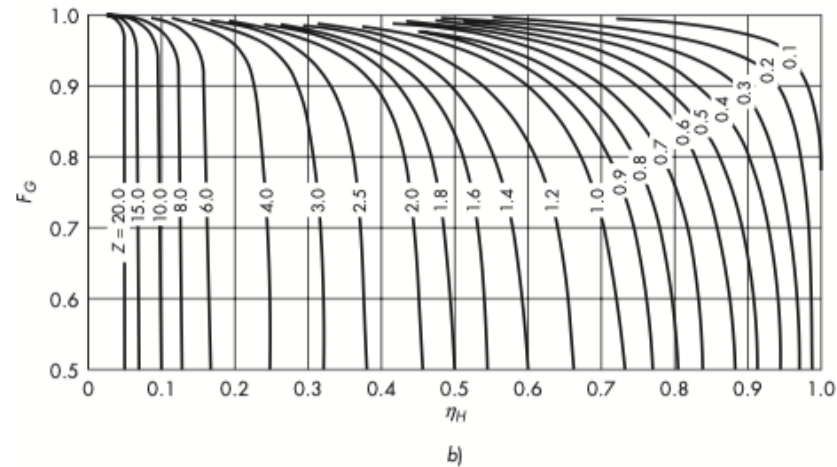
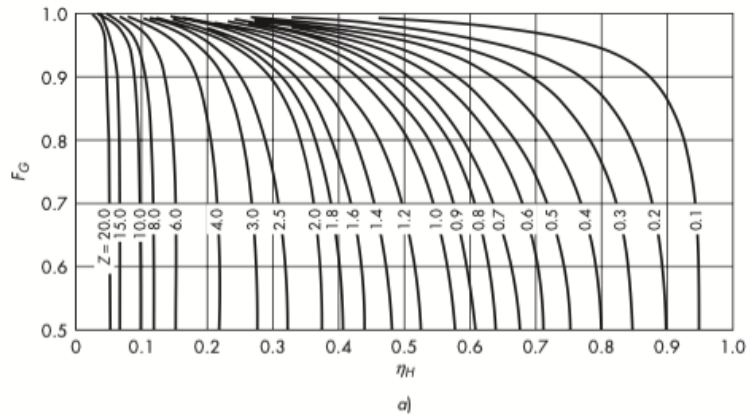
É comum definir um fator de correção F_G , pelo qual o LMTD deve ser multiplicado para obter uma média correta da diferença de temperatura

Se o coeficiente global de transferência de calor e os calores específicos forem constantes e todos os elementos de um determinado fluido tiverem o mesmo histórico térmico em relação à sua passagem pelo trocador, F_G pode ser calculado a partir da equação

$$F_G = \frac{(Z^2 + 1)^{1/2} \ln \left(\frac{1 - \eta_H}{1 - Z\eta_H} \right)}{(Z - 1) \ln \left(\frac{2 - \eta_H(Z + 1 - (Z^2 + 1)^{1/2})}{2 - \eta_H(Z + 1 + (Z^2 + 1)^{1/2})} \right)}$$

$$Z = \frac{T_{ha} - T_{hb}}{T_{cb} - T_{ca}}$$

$$\eta_H = \frac{T_{cb} - T_{ca}}{T_{ha} - T_{ca}}$$



Corrección del LMTD: a) intercambiadores 1-2; b) intercambiadores 2-4. (Tomado de R. A. Bowman, A. C. Mueller y W. M. Nagle, *Trans. ASME*, 61:283, 1940. Cortesía de American Society of Mechanical Engineers.)

Determina-se os valores das relações Z e η_H e através dos gráficos encontra-se o valor de F_G

Exemplo: Em um trocador de calor 1:2 os valores das temperaturas são $T_{ca} = 70^\circ\text{C}$; $T_{cb} = 120^\circ\text{C}$; $T_{ha} = 240^\circ\text{C}$; $T_{hb} = 120^\circ\text{C}$. Qual é a redução real da temperatura média em este trocador?

a partir da equação

$$\eta_H = \frac{120 - 70}{240 - 70} = 0.294 \quad Z = \frac{240 - 120}{120 - 70} = 2.4$$

$$(Z^2 + 1)^{1/2} = (2.4^2 + 1)^{1/2} = 2.60$$

$$F_G = \frac{2.6 \ln \left(\frac{1 - 0.294}{1 - (2.4 \times 0.294)} \right)}{1.4 \ln \left(\frac{2 - 0.294(3.4 - 2.6)}{2 - 0.294(3.4 + 2.6)} \right)} = 0.807$$

$$\Delta T = 240 - 120 = 120^\circ\text{C}$$

$$\Delta T = 120 - 70 = 50^\circ\text{C}$$

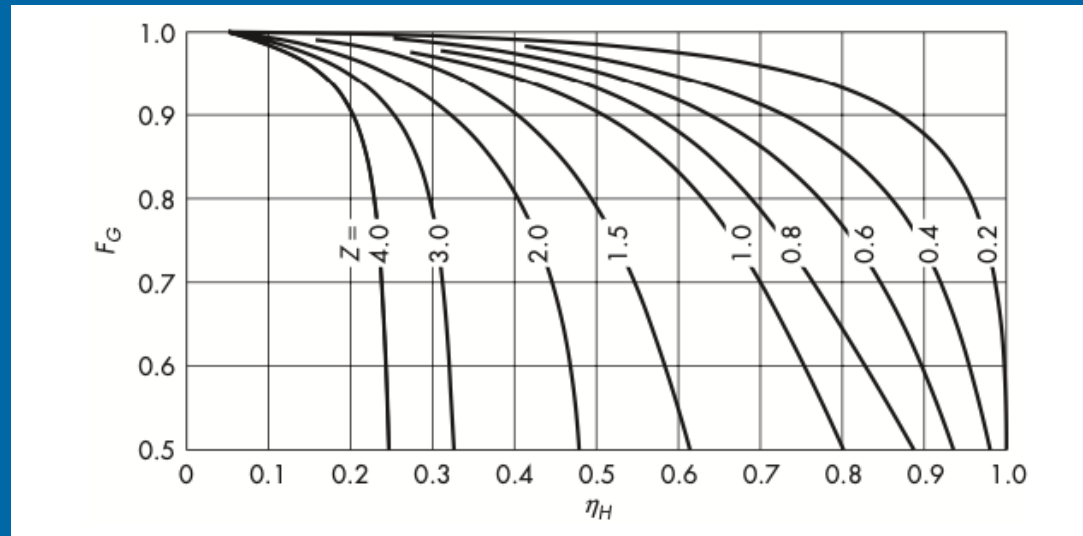
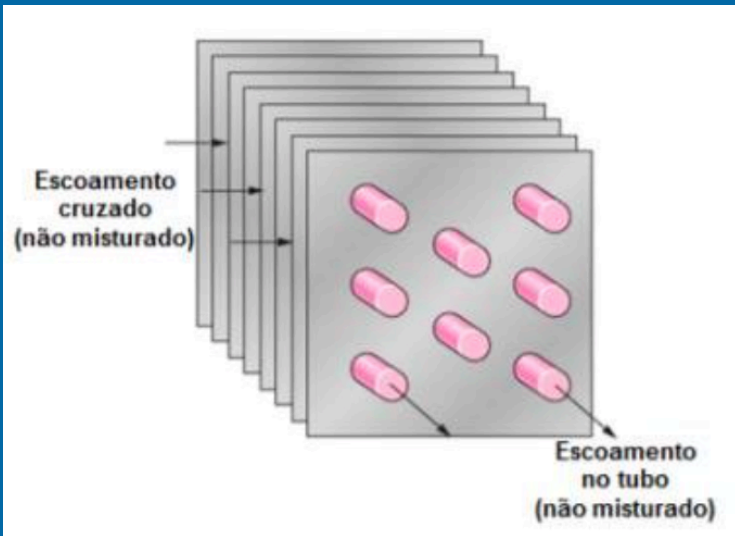
$$\overline{\Delta T}_L = \frac{120 - 50}{\ln(120/50)} = 80^\circ\text{C}$$

$$\overline{\Delta T} = 0.81 \times 80 = 65^\circ\text{C}$$

a partir do gráfico $F_G = 0,082$

Trocadores com fluxo cruzado

Em alguns trocadores, como aquecedores de ar, a carcaça é retangular e o número de tubos em cada linha é o mesmo. O fluxo passa diretamente pelos tubos e não são necessárias placas defletoras

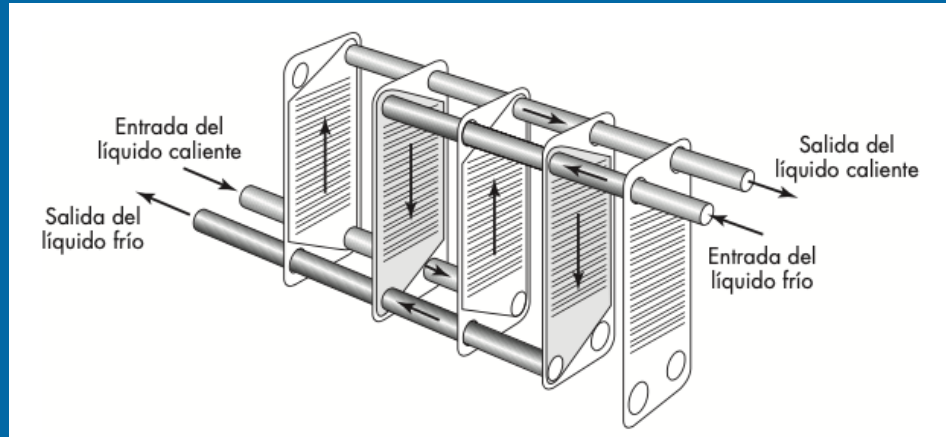


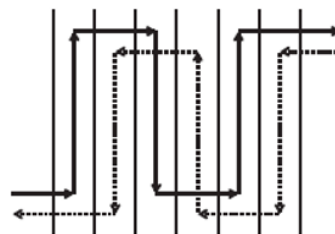
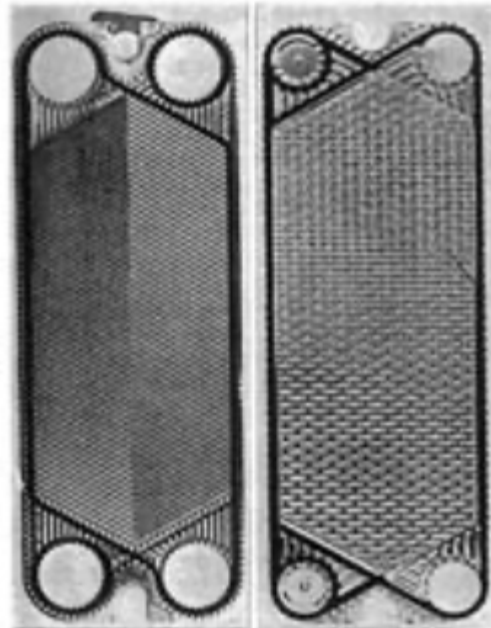
Trocadores de carcaça e tubos são muito versáteis. qualquer combinação de gás, líquido, fluido condensando ou evaporando, ou fluido em duas fases, podem ser usados em um ou nos dois lados do trocador. Pressões de operação podem variar de vácuo até altas pressões (>14 MPa, i.e., 2000 psig). As temperaturas de operação podem ser bastante variadas, das baixas até 1000°C. Líquidos contendo partículas dispersas, corrosivos ou viscosos podem ser utilizados. O custo do trocador por unidade de área é relativamente alto.

Trocadores do tipo Placa

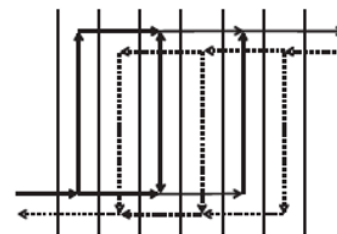
Para muitas aplicações de transferência de calor entre fluidos a temperatura e pressão moderadas, uma alternativa aos trocadores de casco e tubo são os trocadores de placa nervurada, que consistem em muitas placas de aço inoxidável nervuradas separadas por gaxetas, fixadas a uma estrutura de aço.

Os entradas internas e as ranhuras de entrada nas placas direcionam o fluido quente e frio para os espaços alternados entre as placas. Os dutos induzem turbulência para melhorar a transferência de calor e cada placa é suportada por vários contatos com placas adjacentes, que têm um padrão ou ângulo de duto diferente.





Counter-current series flow



Counter-current parallel flow

Flow channels in a plate heat exchanger

São usados com líquidos ou fluidos condensando ou evaporando.

Devido as alta quedas de pressão associadas as placas corrugadas, estes trocadores são raramente usados para gases. As pressões de operação são limitadas a 2.5 MPa (360 psig) mas pressões de até 1.0 MPa (150 psig) são as mais usuais. As temperaturas de operação são limitadas pelo material usado para vedação e estão na faixa de no máximo 150°C.

Geralmente os preços são competitivos com os trocadores de carcaça e tubos principalmente quando são feitos de aço inoxidável.

Gaxetas: juntas em elastômero responsáveis pela vedação entre os meios de troca e a atmosfera que equipam as placas.

Algumas vantagens dos trocadores de placas

- podem ser facilmente desmontados para limpeza, manutenção e inspeção
- a área de troca térmica pode ser facilmente ajustada pela flexibilidade do tamanho das placas, padrão de corrugação e arranjo de passagens
- a alta turbulência reduz entre 10 e 25% o acúmulo de incrustações quando comparadas com trocadores de carcaça e tubos
- a área requerida é de metade a um terço da área requerida por um trocador de carcaça e tubo

Algumas limitações

Podem ser usados para uma pressão máxima de 2.5 Mpa (360 psi) mas usualmente não ultrapassa 1 MPa

O material das vedações restringe o uso para líquidos corrosivos e a temperatura de operação (260°C) usualmente 150°C

Para velocidades elevadas a queda de pressão é muito alta quando comparada com um trocador de carcaça e tubo

Não são utilizáveis para aplicações em alto vácuo.

Aletas: são extensões adicionadas a superfície do trocador com a finalidade de aumentar a área de troca térmica.

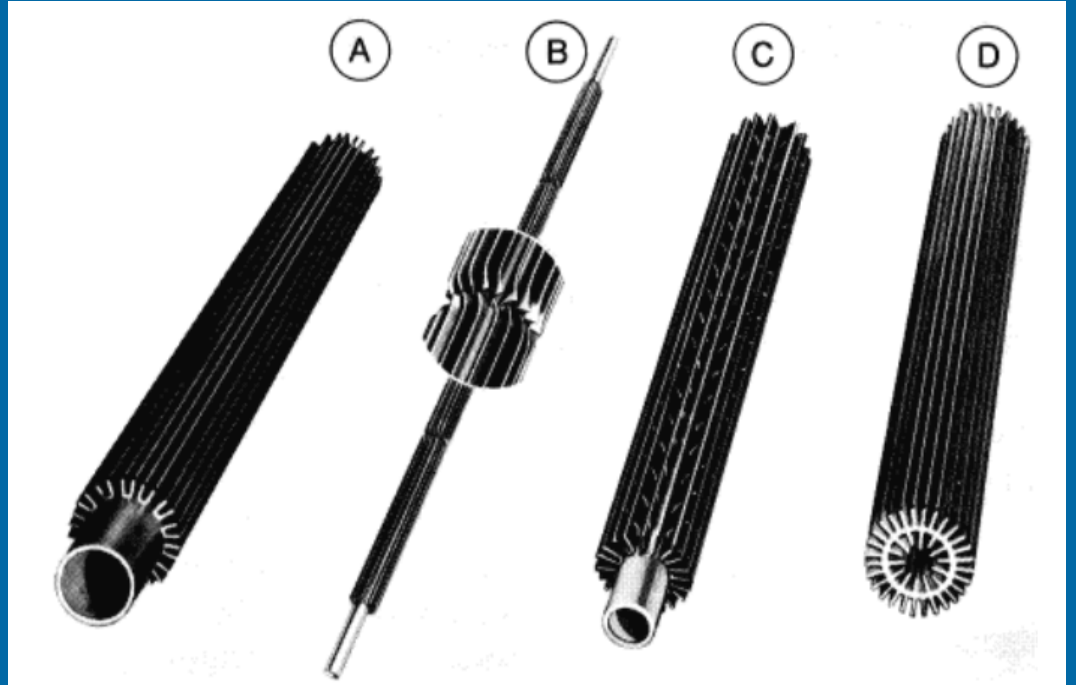
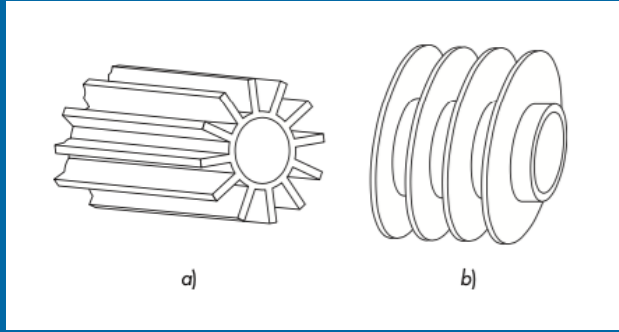
Aletas são usadas normalmente na parte externa, mas também podem ser usadas no interior dos tubos.

Aletas longitudinais são usadas em aplicações que envolvem condensação e para líquidos viscosos em trocadores de tubos concêntricos.

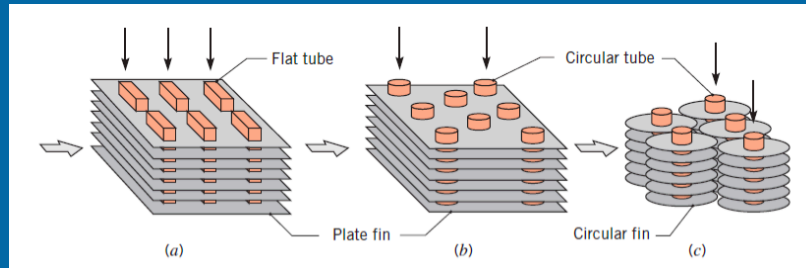
Trocadores de carcaça e tubos utilizam as vezes tubos aletadas para aumentar a área no lado da carcaça quando o coeficiente de troca é baixo.

Os trocadores de tubos aletados são geralmente usados quando um fluido está a alta pressão ou quando um dos fluidos tem um coeficiente de troca térmica muito superior ao outro.

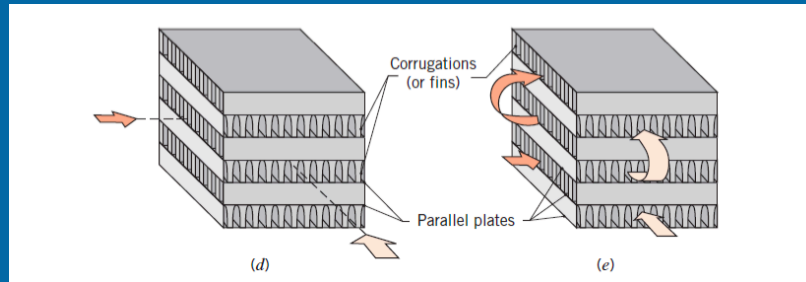
São muito usados como condensadores ou evaporadores em climatização e refrigeração e em trocadores resfriado a ar.

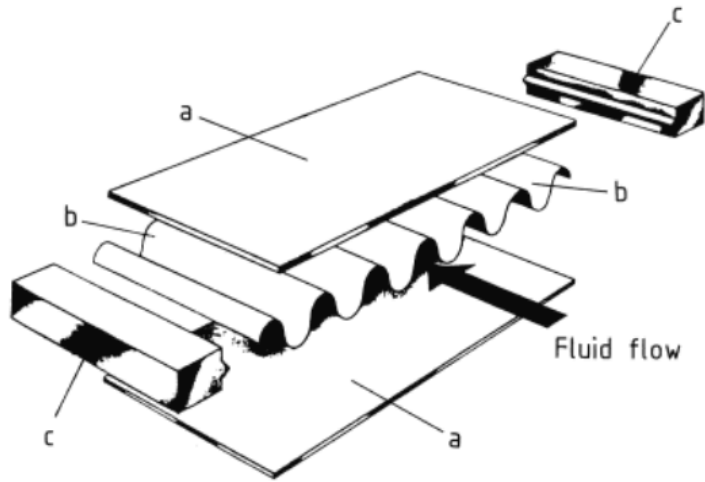


Trocadores de tubos aletados; são usados com gás, líquido, fluido condensando ou evaporando, ou fluido em duas fases. As pressões de operação nos tubos podem ser muito altas, como nos trocadores de carcaça e tubos. A temperatura de operação depende do método de conexão das aletas, do material empregado e da sua espessura. Usualmente está na ordem de 100 a -500°C . Fluidos contendo partículas podem ser usados no lado do tubo. O custo por unidade de área é geralmente maior que para os trocadores de placas aletadas.

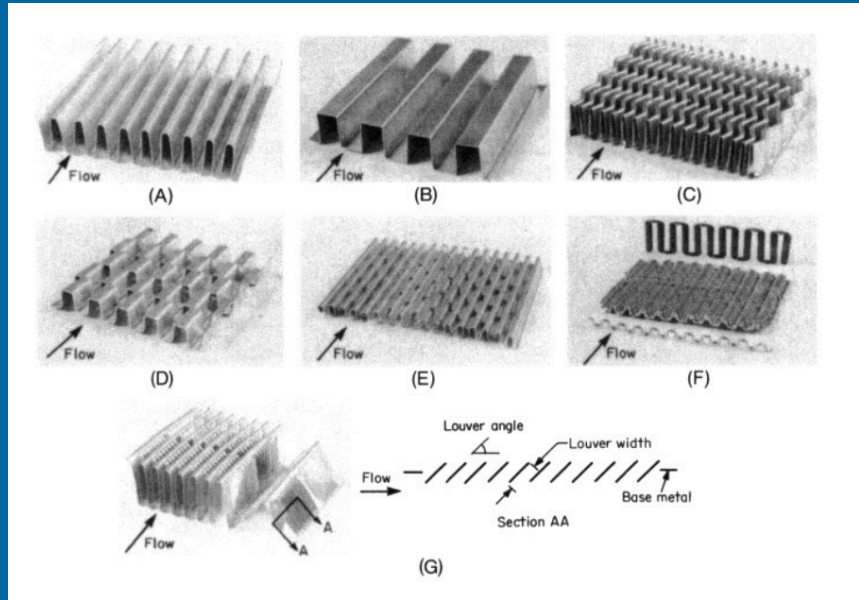


Trocadores de placas aletadas: qualquer combinação de gás, líquido, fluido condensando ou evaporando, ou fluido em duas fases, podem ser usadas. As pressões de operação são normalmente limitadas a 700 kPa (100 psig), e as temperaturas de operação podem chegar a 840°C. Líquidos contendo partículas dispersas, líquidos corrosivos e líquidos viscosos não podem ser usados. O custo é relativamente baixo quando comparado a os trocadores de carcaça e tubos.





Basic components of a plate-fin heat exchanger
 a) Plate or parting sheet; b) Fin; c) Side bar



Escolha de um Trocador de Calor

Estes critérios não são excludentes pois mais de um trocador pode ser projetado para uma dada aplicação.

O custo de um trocador depende de muitos fatores além do material e da mão de obra. Por exemplo, um trocador bi-tubular pode pesar mais e ocupar uma área muito maior que que um trocador compacto de placas aletadas para um determinado desempenho e durabilidade. Entretanto, se o trocador tubular custar menos que o trocador de placas aletadas e o custo for um fator importante, o trocador tubular será provavelmente o escolhido para a operação.