

CAPÍTULO 2

EQUIPAMENTOS DE TROCA TÉRMICA

Os trocadores de calor são equipamentos que facilitam a transferência de calor entre dois ou mais fluidos em temperaturas diferentes. Foram desenvolvidos muitos tipos de trocadores de calor para emprego em diversos níveis de complicação tecnológica e de porte, como usinas elétricas a vapor, usinas de processamento químico, aquecimento e condicionamento de ar em edifícios, refrigeradores domésticos, radiadores de automóveis, radiadores de veículos espaciais, etc. Nos tipos comuns, como os trocadores de calor casco tubo e radiadores de automóveis, a transferência de calor se processa principalmente por condução e convecção, de um fluido quente para um fluido frio, separados por uma parede metálica. Nas caldeira e nos condensadores, a transferência de calor por ebulição e por condensação é de primordial importância. Em certos tipos de trocadores de calor, como as torres de resfriamento, o fluido quente (por exemplo, a água) é resfriado por mistura direta com o fluido frio (por exemplo, o ar); isto é, a água nebulizada, ou que cai em uma corrente induzida de ar, é resfriada por convecção e por vaporização. Nos radiadores para aplicações espaciais, o calor residual do fluido refrigerante é transportado por convecção e condução para a superfície de uma aleta e daí, por radiação térmica, para o espaço (vácuo).

O projeto de trocadores de calor é um assunto complexo. A transferência de calor e a perda de carga, o dimensionamento e a avaliação do desempenho, e os aspectos econômicos têm papéis importantes no projeto final. Por exemplo, embora sejam muito importantes as considerações de custo nas aplicações de grande porte como usinas geradoras de energia elétrica e de processamento químico, as considerações de peso e de dimensões são o fator dominante na escolha do projeto para aplicações espaciais e aeronáuticas.

Neste capítulo discutiremos a classificação dos trocadores de calor.

2.1 CLASSIFICAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR

Os trocadores de calor são construídos tipos, tamanhos, configurações e disposições de escoamento que uma classificação, mesmo arbitrária, é necessária para o seu estudo. Fraas e Ozisik (1965) e Kakaç, Shah e Bergles (1982) classificam os trocadores de calor. Discutiremos a classificação dos trocadores de calor de acordo com:

1. o processo de transferência de calor,
2. a compacticidade,
3. o tipo de construção,
4. a disposição das correntes, e
5. o mecanismo da transferência de calor

2.1.1 CLASSIFICAÇÃO PELO PROCESSO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Os trocadores de calor podem ser classificados como de *contato direto* e de *contato indireto*. No tipo de contato direto, a transferência de calor ocorre entre dois fluidos

imiscíveis, como um gás e um líquido, que entram em contato direto. As torres de resfriamento, condensadores com nebulização para vapor de água e outros vapores, utilizando pulverizadores de água, são exemplos típicos de trocadores por contato direto.

As torres de resfriamento são largamente empregadas para dispor do rejeito térmico dos processos industriais, lançando o calor na atmosfera, e não em um rio ou lago ou no oceano. Os tipos mais comuns incluem as torres de resfriamento com *tiragem natural* e as torres com *tiragem forçada*. No tipo com tiragem natural, mostrado na Figura 2.1, pulveriza-se a água na corrente de ar que ascende através da torre por convecção térmica.

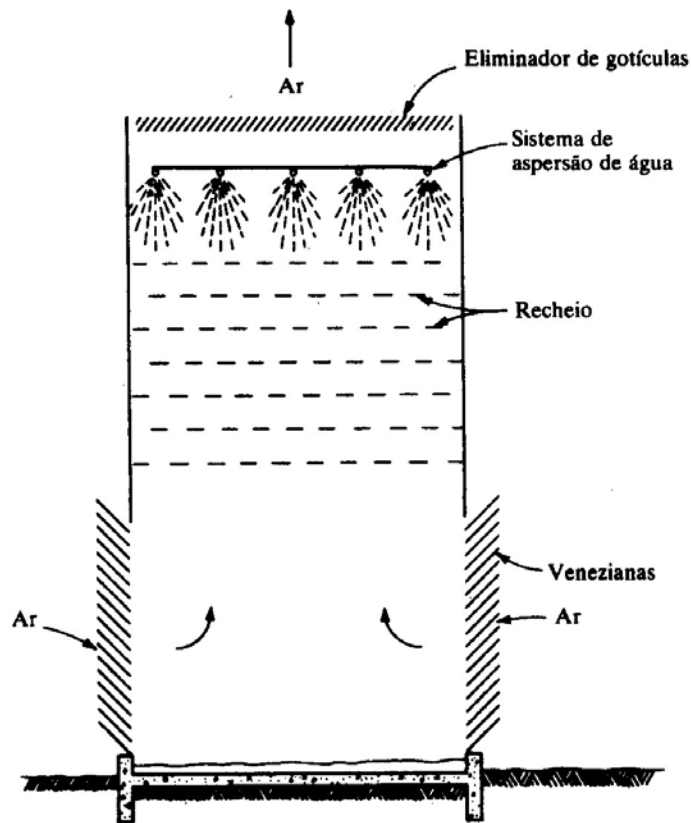


Figura 2.1 – Secção através de uma torre de resfriamento com convecção natural.
(de Özisik, 1990)

As gotículas cadentes de água são resfriadas pela convecção e pela evaporação da água. O recheio ou enchimento dentro da torre reduz a velocidade média de queda das gotículas e aumenta o tempo de exposição das gotículas à corrente de ar que as resfria, enquanto caem através da torre. Grandes torres de resfriamento de tiragem natural, com mais de 100 metros de altura, foram construídas para resfriar o despejo térmico das usinas de força. Numa torre de resfriamento com tiragem forçada, a água é pulverizada na corrente de ar que circula através da torre, impulsionada por um ventilador que pode ser montado no alto da torre, e aspira o ar para cima, ou do lado de fora da base, de modo a impelir o ar para a torre. A Figura 2.2 mostra uma secção através de uma torre de resfriamento com tiragem forçada e induzida por um ventilador. A circulação intensificada de ar aumenta a capacidade de transferência de calor da torre de resfriamento.

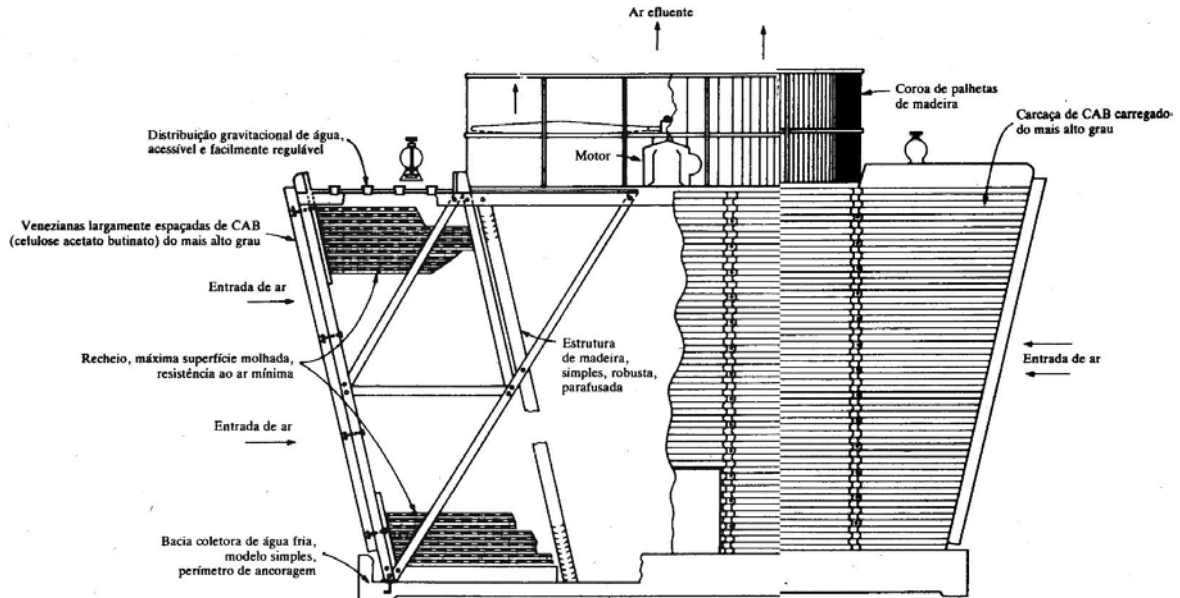


Fig. 11.2 Torre de resfriamento com tiragem forçada e induzida por um ventilador.

Figura 2.2 – Torre de resfriamento com tiragem forçada e induzida por um ventilador.
(de Özisik, 1990)

Nos trocadores de calor de contato indireto, como os radiadores de automóveis, os fluidos quente e frio estão separados por uma parede impermeável, e recebem o nome de trocadores de calor de superfície. Não há mistura dos fluidos, existe uma parede entre elas, que possui forma especial, em função do tipo de operação que se realiza.

A operação de troca térmica é muito ampla, porém podemos destacar os seguintes aspectos relativos ao processo de transferência de calor:

- **permuta** – troca de calor sensível entre duas correntes de processo.
- **aquecimento** – cessão de calor sensível a uma corrente de processo através de um meio quente; vapor, fluido térmico, excluído o fogo direto.
- **resfriamento** – retirada de calor sensível de uma corrente de processo, através de um meio frio; água, fluido refrigerante (neste caso a operação é chamada refrigeração).
- **condensação** – retirada do calor latente da mudança de fase de corrente de processo com auxílio de um meio frio; usualmente utilizada em conjunto com a operação de destilação.
- **vaporização** – cessão de calor latente da mudança de fase de corrente de processo com auxílio de um meio quente; usualmente utilizada em conjunto com a operação de destilação.

2.1.2 CLASSIFICAÇÃO DE ACORDO COM O TIPO DE CONSTRUÇÃO

Os trocadores de calor podem ser classificados de acordo com as características construtivas. Os principais tipos de trocadores de calor são os tubulares, de tubo aletado, de placa, de placa aletada, e regenerativos.

2.1.2.1 Trocadores de calor tipo duplo tubo

Os trocadores de calor tipo duplo tubo ou duplacanalização, como o próprio nome sugere, são constituídos de dois tubos, um inserido dentro do outro, concentricamente, formando dois espaços de escoamento, um por dentro do tubo interno e outro pelo espaço anular entre os tubos interno e externo.

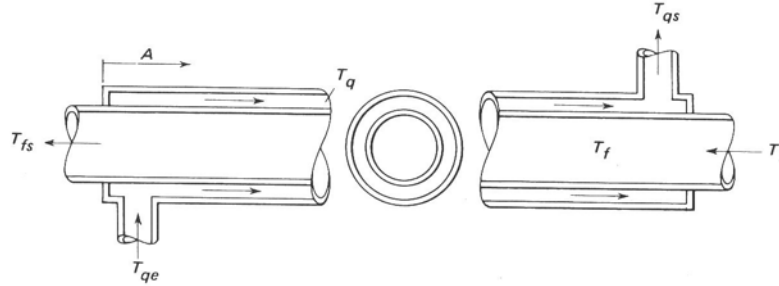


Figura 2.3 – Trocador de calor duplo tubo.
(de Kreith, 1977)

2.1.2.2 Trocadores de calor tipo casco e tubos

Os trocadores de calor tubulares são amplamente usados e fabricados em muitos tamanhos, com muitos arranjos de escoamento e em diversos tipos. Podem operar em extremo domínio de temperaturas e de pressões. A facilidade de fabricação e o custo relativamente baixo constituem a principal razão para seu emprego disseminado nas aplicações de engenharia. Um modelo comumente empregado, o trocador de casco e tubos, consiste em tubos cilíndricos montados em um casco cilíndrico, com os eixos paralelos ao eixo do casco. A Figura 2.4 ilustra este tipo de trocador de calor.

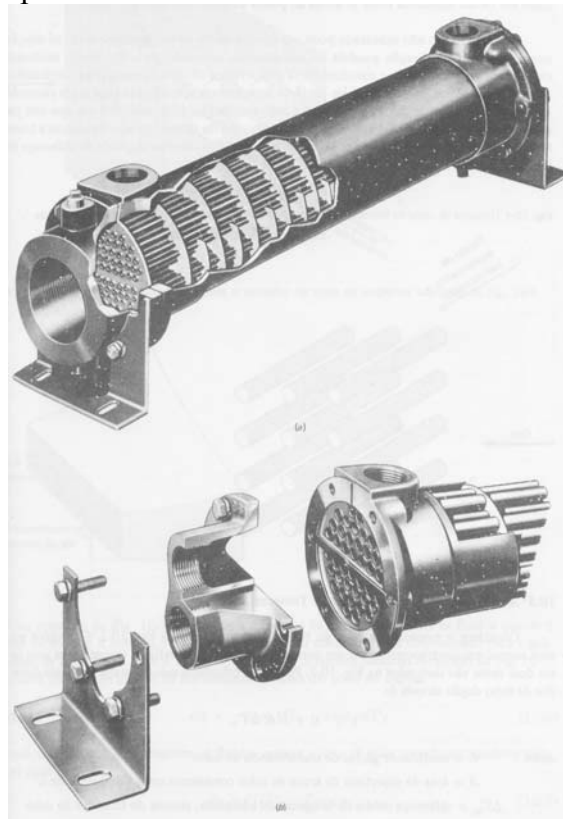


Figura 2.4 – Trocador de calor casco e tubos.
(de Holman, 1983)

Os trocadores de calor casco e tubo, também chamados de multi-tubulares, são constituídos de um feixe de tubos de pequeno diâmetro (em geral $\frac{1}{4}$ " a 1") por dentro dos quais escoam um dos fluidos. O feixe é envolvido por uma carcaça de forma usualmente cilíndrica, escoando o outro fluido externamente ao feixe através do espaço determinado pela carcaça.

Na Figura 2.5 são mostradas as principais partes componentes de um trocador casco e tubos. Os principais componentes são o feixe de tubos, o casco, os cabeçotes e as chicanas. As chicanas sustentam os tubos, dirigem a corrente do fluido na direção normal aos tubos e aumentam a turbulência do fluido no casco. Há vários tipos de chicanas, e a escolha do tipo de chicana, da geometria e do espaçamento depende da vazão, da perda de carga permitida no lado do casco, das exigências da sustentação dos tubos e das vibrações induzidas pelo escoamento. São disponíveis muitas variações do trocador de casco e tubos, as diferenças estão no arranjo das correntes do escoamento e nos detalhes de construção. Discutiremos esse assunto mais tarde, juntamente com a classificação dos trocadores de calor segundo o arranjo do escoamento.

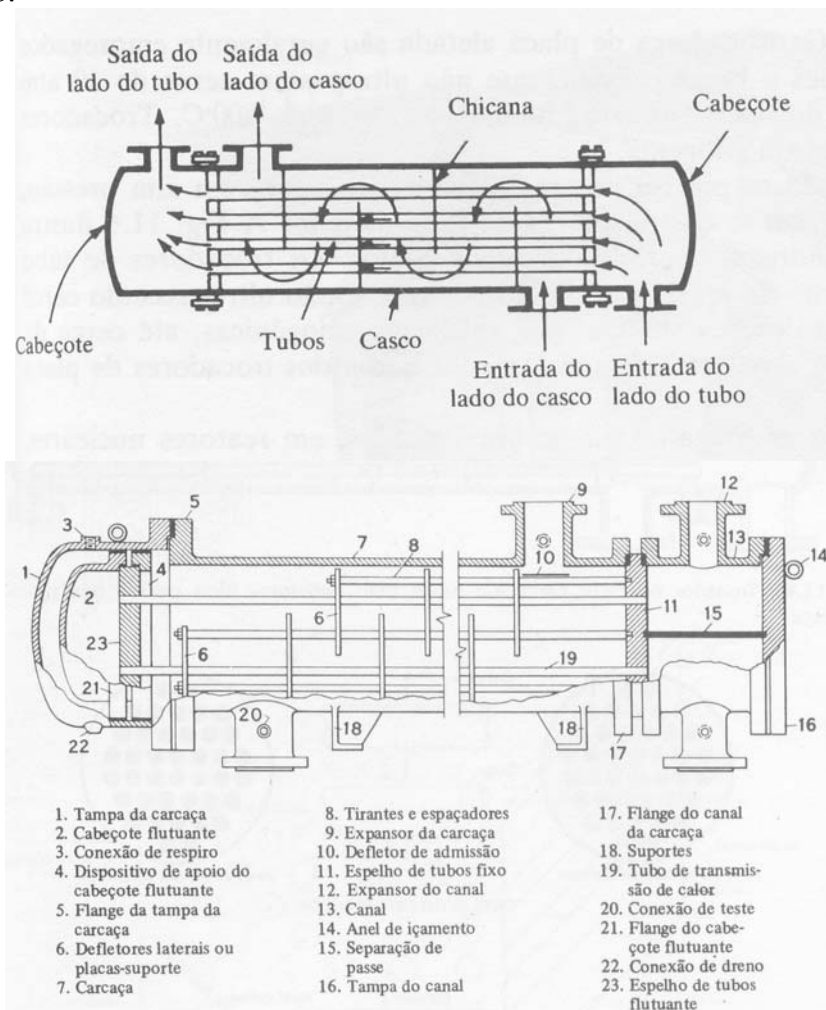


Figura 2.5 – Principais partes componentes de um trocador casco e tubos.

(de Özisik, 1990 e Kreith, 1977)

Quanto à espécie dos fluidos, podemos ter *líquido para líquido*, *líquido para gás* ou *gás para gás*. Os trocadores do tipo líquido para líquido são os de aplicação mais comum. Ambos os fluidos são bombeados através do trocador; a transferência de calor no lado dos tubos, e no lado do casco, ocorre por convecção forçada. Uma vez que o coeficiente de transferência de calor é alto com o fluxo do líquido, não há geralmente necessidade de aletas.

A disposição líquido para gás também é comumente empregada; nestes casos, usam-se em geral aletas no lado do tubo em que flui o gás, onde o coeficiente de transferência de calor é baixo.

Os trocadores do tipo gás para gás são adotados nos exaustores de gás e nos recuperadores de pré-aquecimento do ar nos sistemas de turbinas de gás, nos sistemas criogênicos de liquefação de gás, e nos fornos de aço. Geralmente se empregam aletas internas e externas nos tubos, para intensificar a transferência de calor.

2.1.2.3 Trocadores de calor de placa.

Como o nome indica, os trocadores de calor são geralmente construídos de placas delgadas. As placas podem ser lisas ou onduladas. Já que a geometria da placa não pode suportar pressões ou diferenças de temperaturas tão altas quanto um tubo cilíndrico, são ordinariamente projetados para temperaturas ou pressões moderadas. A compacticidade nos trocadores de placa se situa entre 120 e 230 m²/m³.

2.1.2.4 Trocadores de calor de placa aletada.

O fator de compacticidade pode ser aumentado significativamente (até cerca de 6.000 m²/m³) com os trocadores de calor de placa aletada. A Figura 2.6 ilustra configurações típicas de placas aletadas. As aletas planas ou onduladas são separadas por chapas planas. Correntes cruzadas, contracorrente, ou correntes paralelas são arranjos que podem ser obtidos com facilidade mediante a orientação conveniente das aletas em cada lado da placa. Os trocadores de placa aletada são geralmente empregados nas trocas de gás para gás, porém em aplicações a baixa pressão, que não ultrapassem cerca de 10 atm (isto é, 1.000 kPa). As temperaturas máximas de operação estão limitadas a cerca de 800°C. Trocadores de calor de placa aletada também são empregados em criogenia.

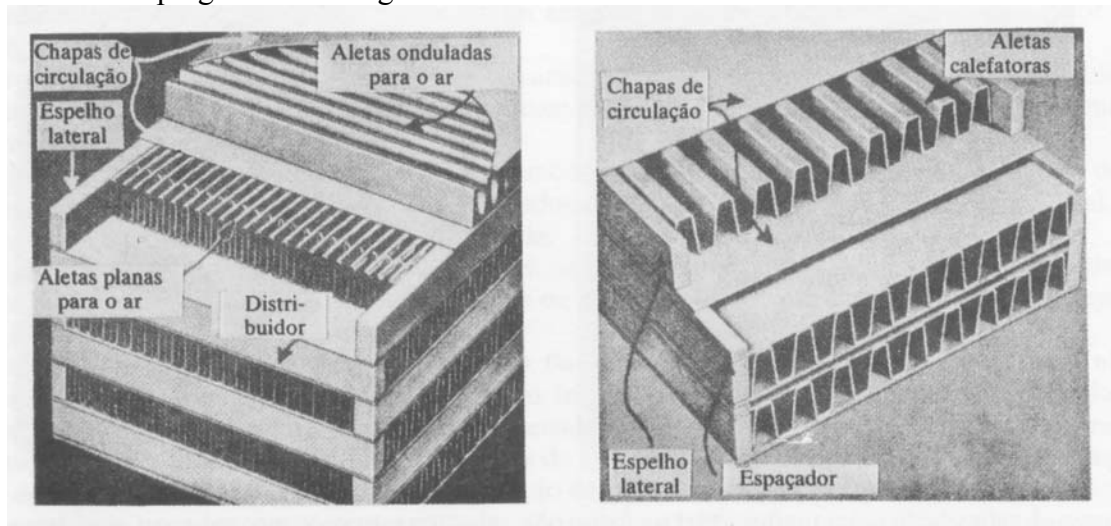


Figura 2.6 – Trocadores de calor de placa aletada.
(de Özisik, 1990)

2.1.2.5 Trocadores de calor de tubo aletado.

Quando se precisa de um trocador que opere em alta pressão, ou de uma superfície extensa de um lado, utilizam-se os trocadores de tubo aletado. A Figura 2.7 ilustra duas configurações típicas, uma com tubos cilíndricos e outra com tubos chatos. Os trocadores de tubo aletado podem ser utilizados em um largo domínio de pressão do fluido nos tubos, não ultrapassando cerca de 30 atm e operam em temperaturas que vão desde as baixas,, nas

aplicações criogênicas, até cerca de 870°C. A densidade máxima de compacticidade é cerca de 330 m²/m³, menor que a dos trocadores de placa aletada.

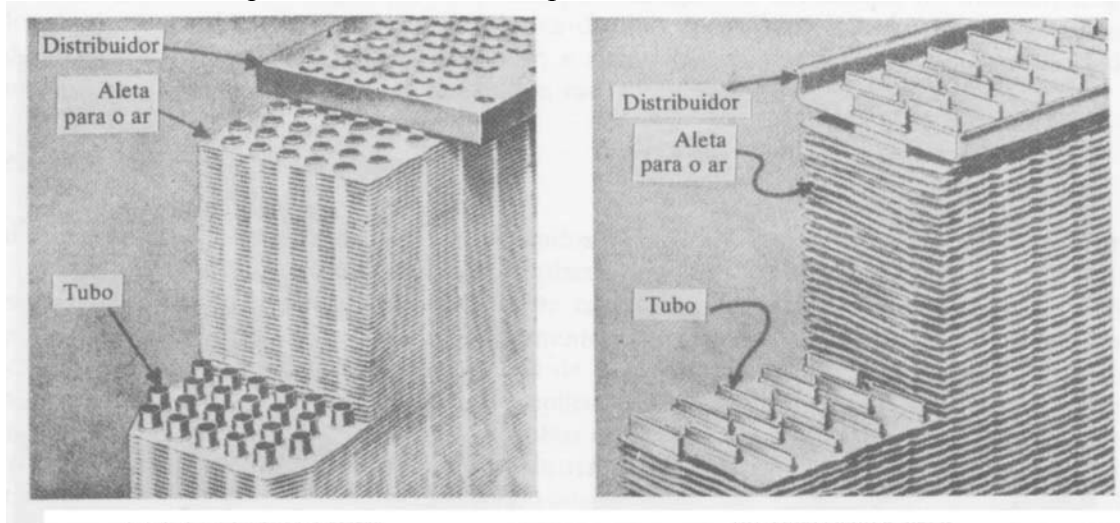


Figura 2.7 – Trocadores de calor de tubo aletado.
(de Özisik, 1990)

Os trocadores de calor de tubo aletado são empregados em turbinas de gás, em reatores nucleares, em automóveis e aeroplanos, em bombas de calor, em refrigeração, eletrônica, criogenia, em condicionadores de ar e muitas outras aplicações.

2.1.2.6 Trocadores de calor regenerativos.

Os trocadores de calor regenerativos podem ser ou estáticos ou dinâmicos. O tipo estático não tem partes móveis e consiste em uma massa porosa (por exemplo, bolas, seixos, pós etc.) através da qual passam alternadamente fluidos quentes e frios. Uma válvula alternadora regula o escoamento periódico dos dois fluidos. Durante o escoamento do fluido quente, o calor é transferido do fluido quente para o miolo do trocador regenerativo. Depois, o escoamento do fluido quente é interrompido, e inicia o escoamento do fluido frio. Durante a passagem do fluido frio, transfere-se calor do miolo para o fluido frio. Os regeneradores de tipo estático podem ser pouco compactos, para o uso em alta temperatura (900 a 1.50°C), como nos pré-aquecedores de ar, na fabricação de coque e nos tanques de fusão de vidro. Podem, porém, ser regeneradores compactos para uso em refrigeração, no motor Stirling, por exemplo.

Nos regeneradores do tipo dinâmico, o miolo tem a forma de um tambor que gira em torno de um eixo de modo que uma parte qualquer passa periodicamente através da corrente quente e, em seguida, através da corrente fria. O calor armazenado no miolo durante o contato com o gás quente é transferido para o gás frio durante o contato com a corrente fria. O exemplo típico de regenerador rotativo é o pré-aquecedor regenerativo de ar Ljungstrom, Figura 2.8. Os regeneradores rotativos podem operar em temperaturas até 870°C; miolos de cerâmica são utilizados em temperaturas mais altas. Os regeneradores rotativos só são convenientes para a troca de calor de gás para gás, pois somente com gases a capacidade calorífica do miolo, que transfere o calor, é muito maior do que a capacidade calorífica do gás escoante. Não é conveniente para a transferência de calor de líquido para líquido, pois a capacidade calorífica do miolo de transferência de calor é muito menor do que a capacidade calorífica do líquido.

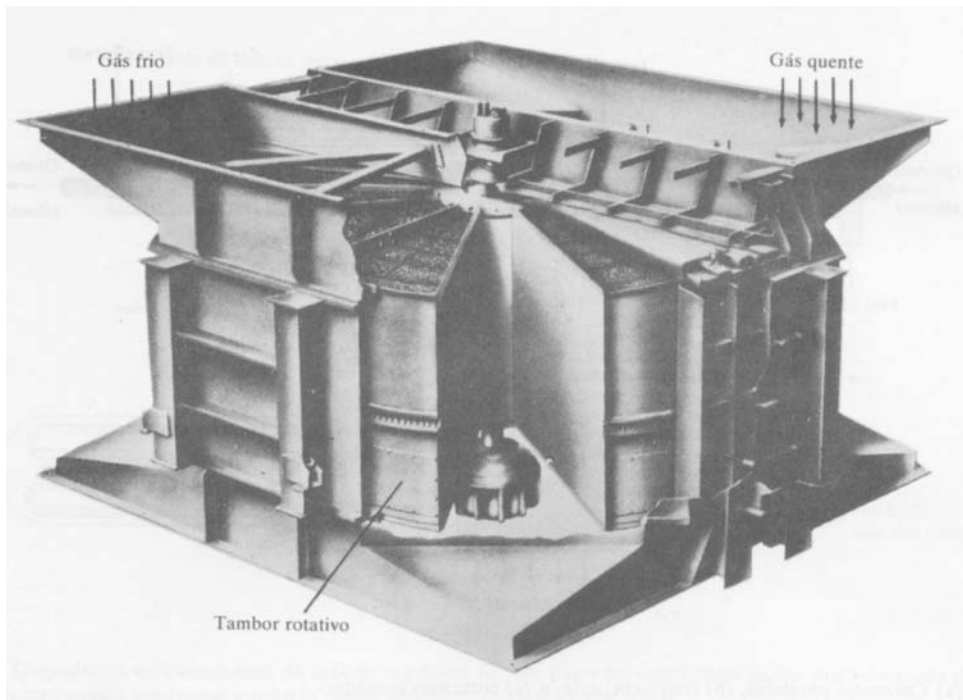


Figura 2.8 – Pré-aquecedor de ar Ljungstrom.
(de Özisik, 1990)

Uma vez que o miolo da transferência de calor gira, a temperatura dos gases e a da parede dependem do espaço e do tempo; como resultado, a análise da transferência de calor dos regeneradores é complexa, pois o fluxo periódico introduz diversas variáveis novas. Nos trocadores de calor convencionais, estacionários, é suficiente definir as temperaturas de entrada e de saída, as vazões, os coeficientes de transferência de calor dos dois fluidos e as áreas superficiais dos dois lados do trocador. No trocador de calor rotativo, entretanto, é necessário também relacionar a capacidade calorífica do rotor com a capacidade calorífica das correntes dos fluidos, com as vazões dos fluidos e com a velocidade de rotação.

2.1.3 CLASSIFICAÇÃO DE ACORDO COM A COMPACTICIDADE

A definição de compacticidade é tema bastante arbitrário. A razão entre a área da superfície de transferência de calor, num dos lados do trocador de calor, e o volume pode ser empregada como medida da compacticidade do trocador de calor. Um trocador de calor com densidade de área superficial, em um dos lados, maior do que cerca de $700 \text{ m}^2/\text{m}^3$, é classificado, arbitrariamente, como *trocador de calor compacto*, independentemente de seu projeto estrutural. Por exemplo, os radiadores de automóvel, com uma densidade de área superficial da ordem de $1.100 \text{ m}^2/\text{m}^3$, e os trocadores de calor de cerâmica vítrea, de certos motores a turbina de gás, que têm uma densidade de área superficial da ordem de $6.600 \text{ m}^2/\text{m}^3$, são trocadores de calor compactos.

No outro extremo da escala de compacticidade, os trocadores de calor do tipo tubular plano e os do tipo casco e tubos têm densidade da área superficial na faixa de 70 a $500 \text{ m}^2/\text{m}^3$, e não são considerados compactos.

O incentivo para se utilizar trocadores de calor compactos está em que um alto valor da compacticidade reduz o volume do trocador de calor para um desempenho especificado. Quando os trocadores de calor se destinam a automóveis, a motores marítimos, a aviões ou a veículos aeroespaciais, a sistemas criogênicos, a aparelhos de refrigeração ou de

condicionamento de ar, o peso e o volume – portanto, a compacticidade – são importantes. Para aumentar a eficiência ou a compacticidade dos trocadores de calor, empregam-se aletas. Num trocador de calor de gás para líquido, por exemplo, o coeficiente de transferência de calor do lado do gás é uma ordem de grandeza mais baixo do que o do lado do líquido. Por isso, usam-se aletas no lado do gás para se ter um projeto equilibrado; a superfície de transferência de calor do lado do gás torna-se muito mais compacta. A Figura 2.9 mostra um radiador de automóvel típico.

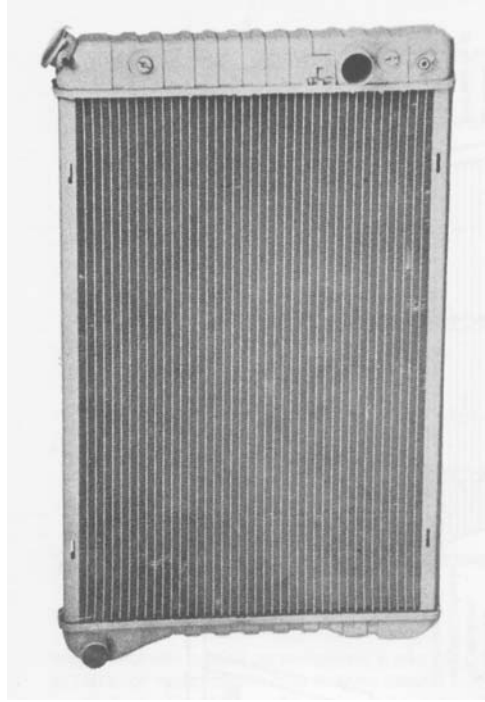


Figura 2.9 – Radiador de automóvel.
(de Özisik, 1990)

2.1.4 CLASSIFICAÇÃO SEGUNDO A DISPOSIÇÃO DAS CORRENTES

Existem numerosas possibilidades para a disposição do escoamento nos trocadores de calor. Vamos resumir aqui as principais.

2.1.4.1 Correntes paralelas.

Os fluidos quente e frio entram na mesma extremidade do trocador de calor, fluem na mesma direção, e deixam juntos a outra extremidade, como está na Fig. 2.10a.

2.1.4.2 Contracorrente.

Os fluidos quente e frio entram em extremidades opostas do trocador de calor e fluem em direções opostas, como está na Fig. 2.10b.

2.1.4.3 Correntes cruzadas.

No trocador com correntes cruzadas, em geral os dois fluidos fluem perpendicularmente um ao outro, como está na Fig. 2.10c. Na disposição com correntes cruzadas, o escoamento pode ser misturado ou não misturado, dependendo do projeto.

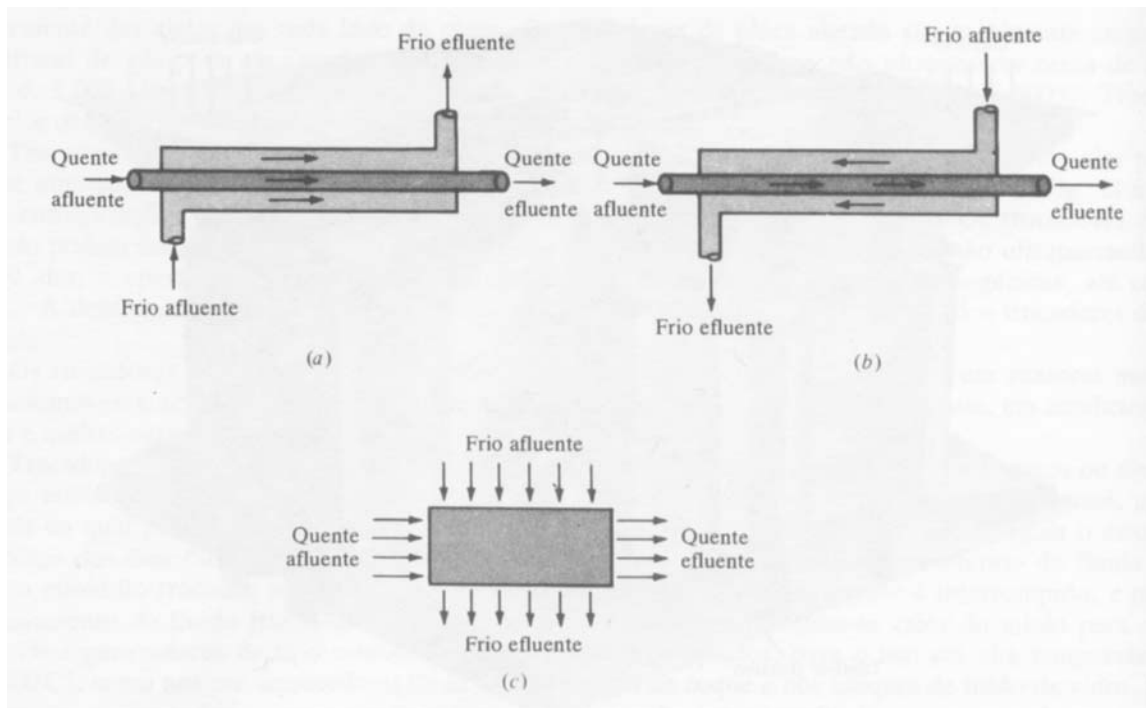


Figura 2.10 – (a) Correntes paralelas, (b) contracorrente, e (c) correntes cruzadas.
(de Özisik, 1990)

A Fig. 2.11a mostra uma disposição em que ambos os fluidos, quente e frio, fluem através de canais separados formados por ondulações; por isso, os fluidos não podem mover-se na direção transversal. Diz-se, então, que cada corrente do fluido está não-misturada.

A Fig. 2.11b ilustra o perfil típico de temperaturas, na saída, quando ambas as correntes são não-misturadas, como está na Fig. 2.11a. As temperaturas de entrada de ambos os fluidos são uniformes, mas as temperaturas de saída mostram variação transversal às correntes.

Na disposição do escoamento da Fig. 2.11c, o fluido frio flui no interior de tubos e assim não pode se mover na direção transversal. Por isso, o fluido frio está não-misturado. Entretanto, o fluido quente flui sobre os tubos e pode mover-se na direção transversal. Por isso, a corrente de fluido quente está misturada. A mistura tende a tornar uniforme a temperatura do fluido na direção transversal; por isso, a temperatura de saída de uma corrente misturada apresenta variação desprezível na direção cruzada.

Em geral, num trocador com correntes cruzadas, são possíveis três configurações idealizadas do escoamento: (1) ambos os fluidos estão não-misturados; (2) um fluido está misturado, e o outro está não-misturado; e (3) ambos os fluidos estão misturados. A última configuração não é usada comumente.

Em um trocador de casco e tubos, a presença de um grande número de chicanas serve para "misturar" o fluido no lado do casco, conforme se discutiu acima; isto é, a temperatura, tende a se tornar uniforme em qualquer seção transversal.

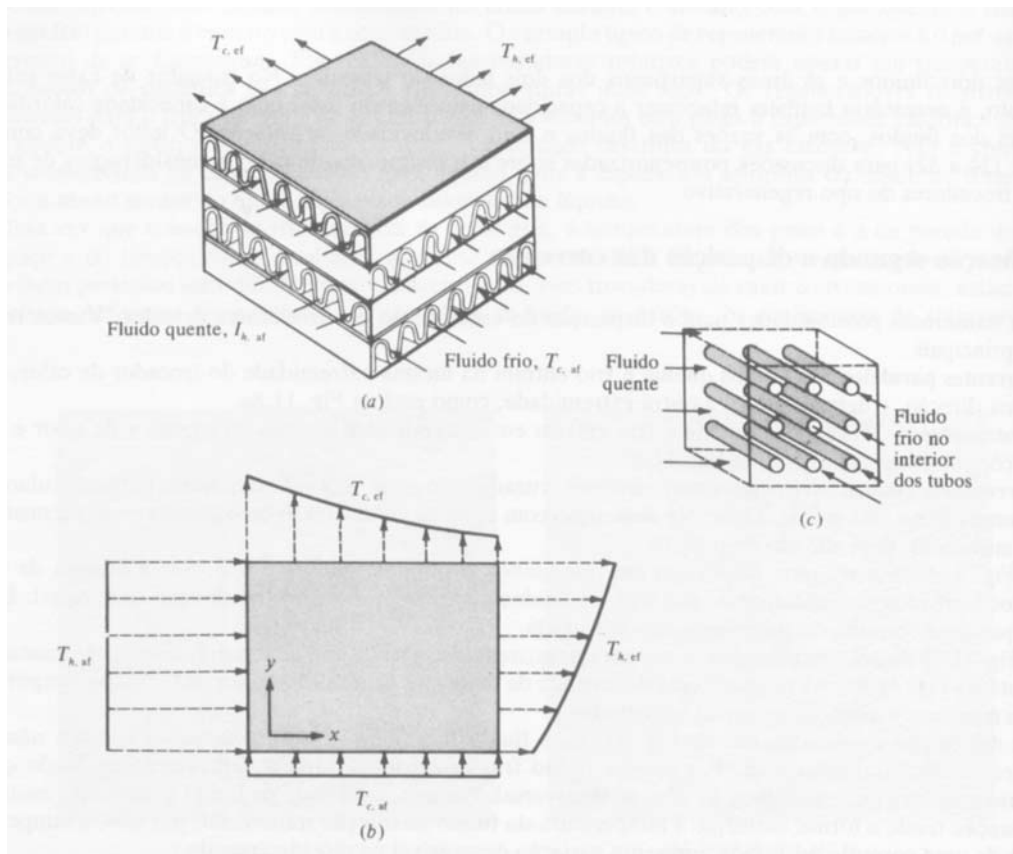


Figura 2.11 – Disposições com correntes cruzadas.

- (a) ambos os fluidos não-misturados,
- (b) perfil de temperaturas quando ambos os fluidos estão não-misturados,
- (c) fluido frio não-misturado, fluido quente misturado

(de Özisik, 1990)

2.1.4.4 Escoamento multipasse.

A configuração de escoamento com passes múltiplos é empregada freqüentemente no projeto de trocadores de calor, pois a multipassagem intensifica a eficiência global, acima das eficiências individuais. É possível grande variedade de configurações das correntes com passes múltiplos. A Fig. 2.12 ilustra disposições típicas. O trocador de calor da Fig. 2.12a tem *um passe no casco e dois passes nos tubos*, e recebe o nome de trocador de calor *um-dois*. A Fig. 2.12b mostra a configuração *dois passes no casco, quatro passes nos tubos*, e a Fig. 2.12c, a configuração *três passes no casco, seis passes no tubo*.

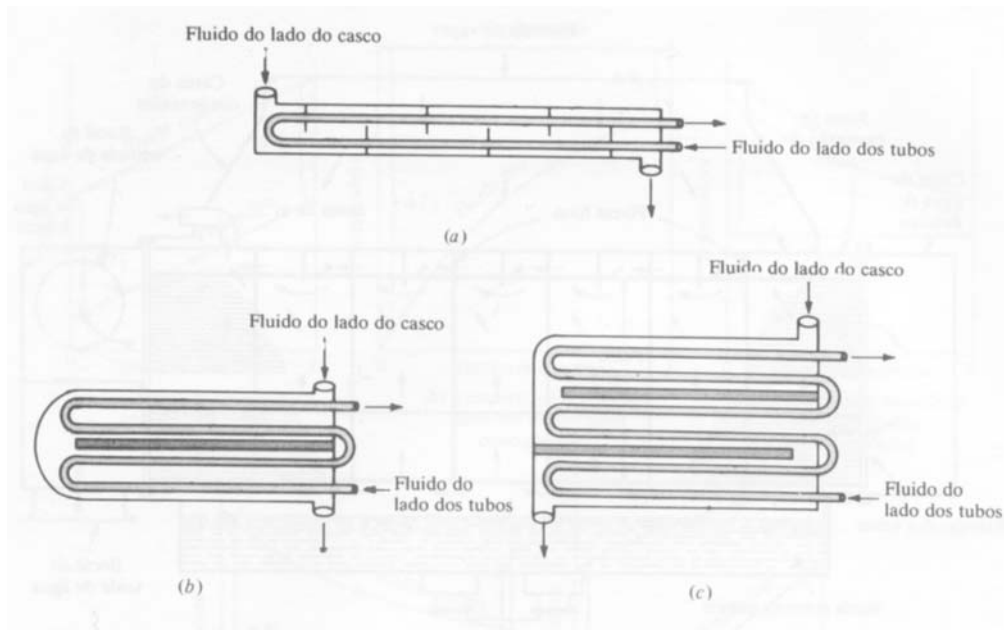


Figura 2.12 – Dispositivo de escoamento de múltiplos passes:

- (a) um passe no casco, dois passes nos tubos,
- (b) dois passes no casco, quatro passes nos tubos,
- (c) três passes no casco, seis passes nos tubos.

(de Özisik, 1990)

2.1.5 CLASSIFICAÇÃO PELO MECANISMO DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

As possibilidades para o mecanismo de transferência de calor incluem uma combinação de quaisquer dois entre os seguintes:

1. Convecção forçada ou convecção livre monofásica
2. Mudança de fase (ebulição ou condensação)
3. Radiação ou convecção e radiação combinadas

Em todos os casos discutidos anteriormente, consideramos a convecção forçada monofásica em ambos os lados do trocador de calor. Condensadores, caldeiras e radiadores de usinas de força espaciais incluem mecanismos de condensação, de ebulição e de radiação, respectivamente, sobre uma das superfícies do trocador de calor.

2.1.5.1 Condensadores.

Os condensadores são utilizados em várias aplicações, como usinas de força a vapor de água, plantas de processamento químico e usinas nucleares elétricas de veículos espaciais. Os principais tipos incluem os *condensadores de superfície*, os *condensadores a jato* e os *condensadores evaporativos*. O tipo mais comum é o condensador de superfície, que tem a vantagem de o condensado ser devolvido à caldeira através do sistema de alimentação de água. Uma vez que a pressão do vapor, na saída da turbina, é de somente 1,0 a 2,0 polegadas de mercúrio absolutas, a densidade do vapor é muito baixa, e a vazão do fluido é extremamente grande. Para minimizar a perda de carga, na transferência do vapor da turbina para o condensador, o condensador é montado ordinariamente abaixo da turbina e ligado a ela. A água de resfriamento flui horizontalmente no interior dos tubos, enquanto o vapor flui verticalmente para baixo, entrando por uma grande abertura na parte superior, e passa transversalmente sobre os tubos. Há um dispositivo de aspiração do ar, este dispositivo é

importante, pois a presença de gás não condensável no vapor reduz o coeficiente de transferência de calor na condensação.

2.1.5.2 Geradores de Vapor (Caldeiras).

As caldeiras a vapor de água constituem uma das primitivas aplicações dos trocadores calor. O termo *gerador de vapor* é muitas vezes aplicado às caldeiras nas quais a fonte de calor é uma corrente de fluido quente em vez de produtos da combustão.

Uma enorme variedade de caldeiras já foi construída. Existem caldeiras em pequenas unidades, para aquecimento doméstico, até unidades gigantescas, complexas e caras, para as modernas usinas de força.

2.1.5.3 Radiadores de usinas de força espaciais.

A rejeição do calor residual do condensador de uma usina de força cuja finalidade é produzir eletricidade para o equipamento de propulsão, de orientação ou de comunicação de um veículo espacial acarreta sérios problemas mesmo com a usina produzindo uns poucos quilowatts de energia elétrica. O único modo com que se pode dissipar o calor residual de um veículo espacial é radiação térmica, aproveitando a vantagem da relação de quarta potência entre a temperatura absoluta superfície e o fluxo de calor radiativo. Portanto, na operação de algumas usinas de força de veículos espaciais, o ciclo termodinâmico se processa em temperaturas tão altas que o radiador trabalha aquecido ao rubro. Mesmo assim, é difícil manter a dimensão do radiador dentro de um casco razoável, nos veículos de lançamento