

Capítulo 3

Princípios básicos de Termodinâmica

3.1 Primeira lei da Termodinâmica

Para compreendermos as transformações que a energia pode sofrer para realização de trabalho, precisamos conhecer alguma coisa sobre a primeira lei da Termodinâmica.

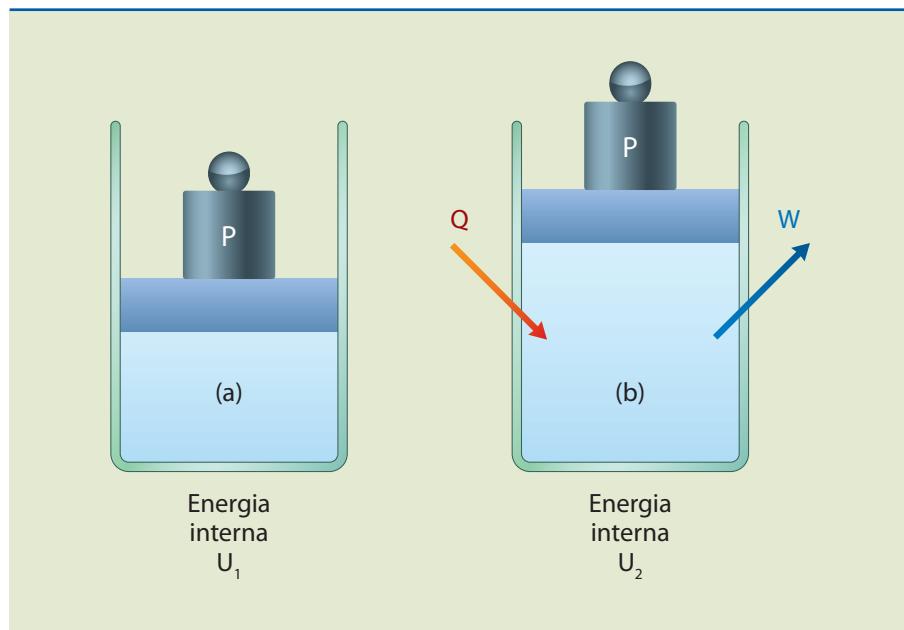
A primeira lei da Termodinâmica é o princípio da conservação da energia. A energia não pode ser criada nem destruída, apenas transformada de um tipo em outro. Em uma usina termoelétrica, por exemplo, queima-se combustível (gás natural, carvão etc.), que libera a energia química contida nas ligações moleculares, transformando essa energia em calor. Este, por sua vez, é absorvido pela água, que se converte em vapor de água e move uma máquina conhecida como turbina a vapor. Na sequência, a energia acumulada no vapor é transmitida à turbina, que movimenta um eixo (energia mecânica), e este simultaneamente gira um equipamento elétrico capaz de transformar a energia mecânica em energia elétrica.

Desse modo, a energia elétrica não foi criada “do nada” na usina termoelétrica: ela estava armazenada no combustível, na forma de ligações químicas, e, por uma série de transformações, converteu-se em energia elétrica.

Na figura 3.1, a força de um peso comprime uma massa de um gás no interior de um cilindro com êmbolo até a situação de equilíbrio. Nessa condição de operação, o sistema tem determinada energia interna U_1 .

Ao considerarmos que não há troca de calor com outros meios, se uma quantidade de calor Q é adicionada ao gás, ele se expande e o pistão levanta o peso até determinada altura, executando determinado trabalho W , conforme observado na situação b da figura. Nessa situação, a nova energia interna do sistema é U_2 .

Figura 3.1
Energia interna de
um sistema.



A primeira lei relaciona as grandezas anteriormente mencionadas:

$$\Delta U = Q - W \quad (3.1)$$

De acordo com a equação 3.1, a variação da energia interna de um sistema é igual à diferença entre o calor transferido para o sistema e o trabalho executado pelo sistema. Isso significa que a energia pode ser transformada em outra forma de energia, mas não ser criada nem destruída.

No Sistema Internacional (SI), a unidade de energia é o joule (J), seja ela energia interna, calor ou trabalho. Por tradição, há quem utilize calorias ou múltiplos como quilocaloria (kcal), megacaloria (Mcal); mas, sempre que possível, devemos evitar o uso dessas unidades. Uma caloria equivale a 4,1868 joules (número que é chamado equivalente mecânico do calor, conceito atribuído a Joule).

A grandeza $U + PV$ é denominada entalpia da massa, em que U é a energia interna; P , a pressão do sistema; e V , o volume.

É geralmente representada pela letra H . Assim:

$$H = U + PV \quad (3.2)$$

A entalpia tem a mesma unidade de energia, isto é, joule (J) no Sistema Internacional. E a entalpia específica h (entalpia por unidade de massa, J/kg) é definida de modo similar, com as demais grandezas na forma específica, ou seja, por unidade de massa:

$$h = \frac{H}{m} = \frac{U}{m} + P \frac{V}{m} = u_e + Pv_e \quad (3.3)$$

em que u_e é a energia interna específica (J/kg) e v_e é o volume específico (m^3/kg)

3.1.1 Calor específico

Para aumentar ΔT a temperatura de uma massa m de uma substância em uma situação em que não ocorra mudança de estado (líquido para vapor ou vapor para líquido), a experiência indica que a quantidade de calor necessária Q é proporcional à massa e à diferença de temperatura (ΔT):

$$Q = mc\Delta T \quad (3.4)$$

O coeficiente de proporcionalidade c é denominado calor específico da substância, cuja unidade no Sistema Internacional é $J/(kg \cdot K)$, sendo comumente indicado também por $J/(kg \cdot ^\circ C)$.

Lembramos, entretanto, que intervalos entre temperaturas em $^\circ C$ e em K são idênticos. No entanto, dados em algumas unidades em processo de obsolescência – $cal/(g \cdot ^\circ C)$ ou $kcal/(kg \cdot ^\circ C)$ – certamente ainda podem ser encontrados.

O calor específico varia com a temperatura e, portanto, a igualdade apresentada na equação 3.4 só permite resultados precisos em intervalos de temperatura relativamente pequenos.

Em cálculos mais exatos, deve ser levada em conta a variação do calor específico com a temperatura.

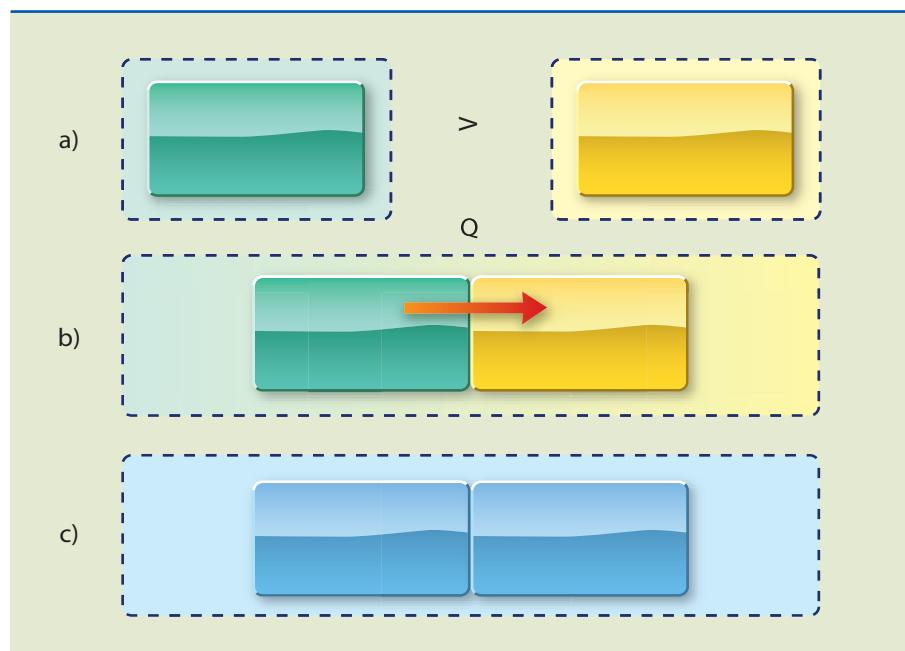
3.2 Segunda lei da Termodinâmica

A primeira lei da termodinâmica é fundamental para os processos energéticos, isto é, a energia não pode ser gerada ou desaparecer espontaneamente; na realidade, o que acontece é um balanço energético.

A segunda lei acrescenta restrições quanto ao modo de utilização e comportamento das transformações energéticas.

A segunda lei indica qual é o sentido correto de transferência de energia. Vejamos o exemplo da figura abaixo. Na situação a da figura 3.2, existem dois corpos isolados:

Figura 3.2
Transferência de calor entre dois corpos.



- **Corpo quente (verde)**, com temperatura T_A .
- **Corpo frio (laranja)**, com temperatura $T_B < T_A$.
- Por exemplo, a eficiência de uma máquina térmica seria ideal se todo calor Q_1 , proveniente da queima do combustível, fosse transformado em trabalho, figura 3.2a. Assim, a eficiência seria 100%, mas isso nunca acontece.
- Numa máquina real, sempre acontece uma troca de calor com uma fonte fria (muitas vezes o próprio ambiente) causando, assim, uma perda no rendimento.
- É impossível converter todo calor trocado com apenas uma fonte de trabalho.

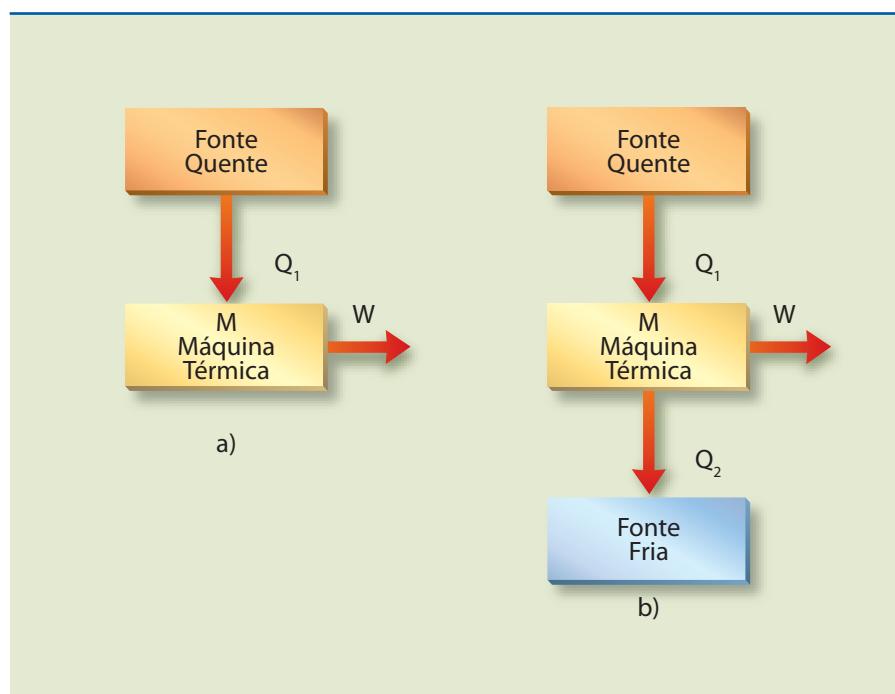
Se dois corpos estão em contato, em um sistema isolado, situação b da figura 3.1, a experiência mostra que a energia se transporta sob forma de calor do corpo com temperatura maior para o corpo com temperatura menor até que se estabeleça equilíbrio em uma condição (temperatura T_E), em que $T_A > T_E > T_B$.

Devemos levar em consideração que o calor nunca passa de um corpo frio para o quente (um dos enunciados da segunda lei da Termodinâmica).

Por exemplo, a eficiência de uma máquina térmica seria ideal se todo calor Q_1 , proveniente da queima do combustível, fosse transformado em trabalho, figura 3.2b. Assim, a eficiência seria de 100%, mas isso nunca acontece.

Numa máquina real, sempre acontece uma troca de calor com uma fonte fria, muitas vezes o próprio ambiente, causando, assim, uma perda no rendimento.

É impossível converter todo calor trocado com apenas uma fonte de trabalho.



Todo o calor Q_1 de uma fonte quente (exemplo: a queima de um combustível) seria transformado em trabalho W . Assim, $W = Q_1$, com eficiência $\eta = 1$ ou 100%. Mas nunca ocorre esse tipo de eficiência.

Uma máquina real trabalha como ilustrado na situação b da figura 3.3. Há sempre uma quantidade de calor Q_2 que é trocada com uma fonte fria (muitas vezes, o próprio ambiente).

Outra forma de apresentação da segunda lei é a que segue.

É impossível converter em trabalho útil todo o calor trocado com uma única fonte.

Figura 3.3
Eficiência de uma máquina térmica.

Quando dois corpos ou fluidos em diferentes temperaturas interagem, ocorre troca de energia interna entre eles até a temperatura atingir o equilíbrio.

Em um sistema isolado de outras formas de transferência de energia, a quantidade de energia transferida é a quantidade de calor trocado, enquanto houver diferença de temperatura.

Calor e trabalho não dependem apenas da diferença entre o estado inicial e o estado final do processo, dependem também do caminho e se o sistema se encontra em uma evolução reversível ou quase estática entre o estado inicial A e o estado final B.

3.2.1 Processos básicos pelos quais ocorrem transferências de calor

As transferências de calor se dão por condução, convecção ou radiação.

1. Condução – ocorre em um meio sólido ou em um meio fluido estacionário (figura 3.4).

2. Convecção – ocorre entre uma superfície e um fluido em movimento (figura 3.5).

3. Radiação – ocorre entre duas superfícies sem a necessidade de meio físico, exemplo: transmissão de energia do Sol para a Terra através do vácuo.

Figura 3.4

Transferência de calor por condução.

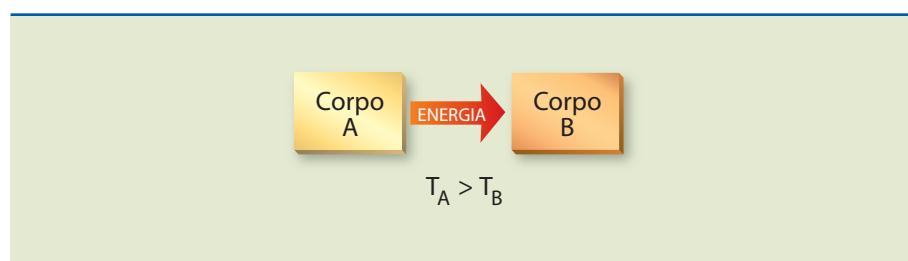
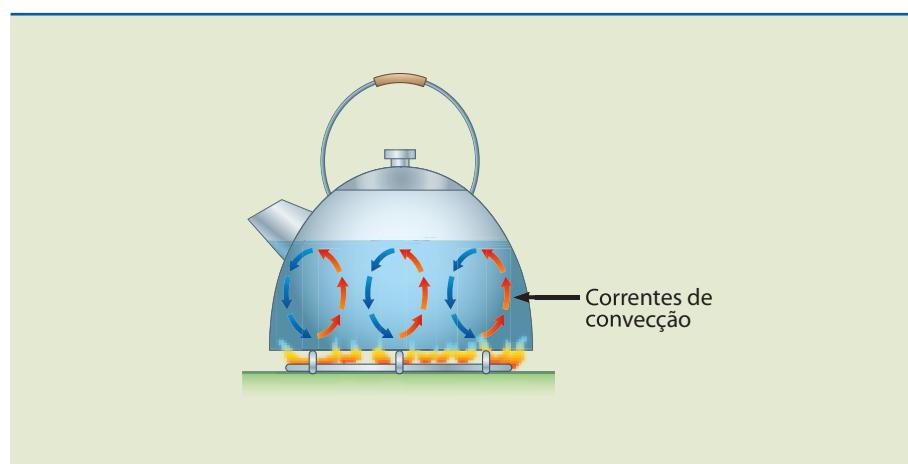


Figura 3.5

Correntes de convecção originadas por uma fonte de calor.



3.3 Gás ideal ou gás perfeito

Para facilitar o estudo da termodinâmica dos gases, consideramos inicialmente as transformações em um **gás perfeito** ou **gás ideal**, isto é, um gás de comportamento irreal, cujas moléculas não têm volume nem forças de repulsão ou atração.

Gases reais, como o hidrogênio e o hélio, apresentam comportamento bem próximo do gás ideal. Outros gases (ou misturas, como o ar), em pressões relativamente pequenas e temperaturas apropriadas, também oferecem aproximação razoável de um gás ideal.

3.3.1 Equação de estado para um gás ideal ou equação dos gases perfeitos

Uma equação de estado é uma equação matemática que relaciona, para uma substância pura, a temperatura (T), a pressão (P) e o volume (V). Existem diversas equações de estado. A equação de formulação matemática mais simples e também a mais conhecida é a equação de estado dos gases perfeitos:

$$P = \rho RT \text{ ou}$$

$$P = \frac{m}{V}RT \quad (3.5)$$

Na equação 3.5, P é a pressão medida na escala absoluta (ver equação 1.3); ρ , a densidade (definida na equação 1.1); R , uma constante particular do gás; e T , a temperatura na escala absoluta. A transformação da temperatura na escala Celsius para a escala Kelvin é:

$$T(K) = T(^{\circ}\text{C}) + 273,15 \quad (3.6)$$

A constante particular do gás é definida como:

$$R = \frac{\bar{R}}{M} \quad (3.7)$$

em que \bar{R} é a constante universal dos gases cujo valor é $8,3145 \text{ (N} \cdot \text{m})/(\text{mol} \cdot \text{K})$ e M , a massa molecular da substância em kg/mol. Como exemplo, podemos citar a constante particular do ar, que vale $287 \text{ (N} \cdot \text{m})/(\text{kg} \cdot \text{K})$, obtida, segundo a equação 3.7, como o quociente entre a constante universal dos gases e a massa molecular do ar de $M = 28,97 \cdot 10^{-3} \text{ kg/mol}$. A massa molecular das substâncias é facilmente obtida pela tabela periódica de elementos encontrada nos livros de Química.

Exemplo

Manter a correta pressão nos pneus do carro é absolutamente essencial para evitar seu desgaste excessivo ou aumento no consumo de combustível. Em geral,

nos postos de gasolina, há um manômetro para verificar a pressão do ar no interior dos pneus e também um compressor para enchê-los, caso seja necessário. O manômetro mede a pressão na escala efetiva.

Qual deve ser a massa de ar dentro de um pneu com pressão interna de 32 psi, cujo volume é de 35 litros? O posto de gasolina em que foi feita a conferência da pressão de 32 psi do pneu em questão está localizado em uma cidade litorânea e, no dia da leitura, a temperatura era de 24 °C.

Solução:

Inicialmente, deve-se transformar a pressão de 32 psi em Pa. Sabemos que psi é uma unidade de medida de pressão no Sistema Inglês e 1 psi = 1 lbf/in², ou seja, o resultado entre a divisão de libra-força por polegada ao quadrado. Sabemos que 1 lbf = 4,44822 N e 1 in = 25,4 mm. Desse modo:

$$P = 32 \text{ psi} = 32 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} = 32 \frac{(1\text{lbf})}{(1\text{in})^2} = 32 \frac{(4,44822 \text{N})}{(25,4 \cdot 10^{-3} \text{m})^2} = 220\,632,15 \text{Pa}$$

A pressão de 220 632,15 Pa está na escala efetiva, sendo necessário somar o valor da pressão atmosférica do local para obtenção da pressão na escala absoluta. Estando o posto de gasolina localizado em uma cidade litorânea, a pressão atmosférica do local pode ser considerada 101 325 Pa; assim, a pressão interna do pneu na escala absoluta é de 321 957,15 Pa abs. Usando a equação de estado dos gases perfeitos (equação 3.5), com a constante do ar como 287 (N · m)/(kg · K) e a temperatura de T = 24 + 273,15 = 297,15 K e lembrando que 1 000 L = 1 m³:

$$m = \frac{(321\,957,15 \text{Pa}) \cdot (0,035 \text{m}^3)}{\left(287 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) \cdot (297,15 \text{K})} = 0,132 \frac{\left(\frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right) \cdot (\text{m}^3)}{\left(\frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right) \cdot (\text{K})} = 0,132 \text{ kg} = 132 \text{ g}$$

3.3.2 Processos particulares para um gás ideal

Um sistema é definido como uma quantidade fixa de massa. Nesse sentido, se uma quantidade fixa de um gás ideal sofre um processo que o leve de uma condição 1 para uma condição 2, sabendo que, pela definição de sistema, a massa não varia, a equação 3.5 pode ser aplicada aos dois estados (1) e (2) e as massas igualadas nas duas condições:

$$\begin{aligned} P_1 &= \frac{m_1}{V_1} R T_1 \rightarrow m_1 = \frac{P_1 V_1}{R T_1} \\ P_2 &= \frac{m_2}{V_2} R T_2 \rightarrow m_2 = \frac{P_2 V_2}{R T_2} \end{aligned}$$

Igualando as massas e reorganizando a equação:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (3.8)$$

A equação 3.8 pode ser aplicada a um sistema contendo um gás ideal. Caso o processo $1 \rightarrow 2$, seja:

- Isotérmico (com temperatura constante):

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 \quad (3.9)$$

- Isobárico (com pressão constante):

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2} \quad (3.10)$$

- Isocórico (com volume constante):

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2} \quad (3.11)$$

3.4 Mudanças de estado físico

A mudança de estado físico, por exemplo, de líquido para vapor ou de vapor para líquido, ocorre por transferência de energia de uma fonte para a substância ou da substância para um sorvedouro. Durante o processo de mudança de fase, a pressão e a temperatura se mantêm constantes. A figura 3.6 indica o diagrama aproximado de um processo de fornecimento de energia a uma massa de 1 kg de água, sob pressão atmosférica de 101 325 Pa abs.

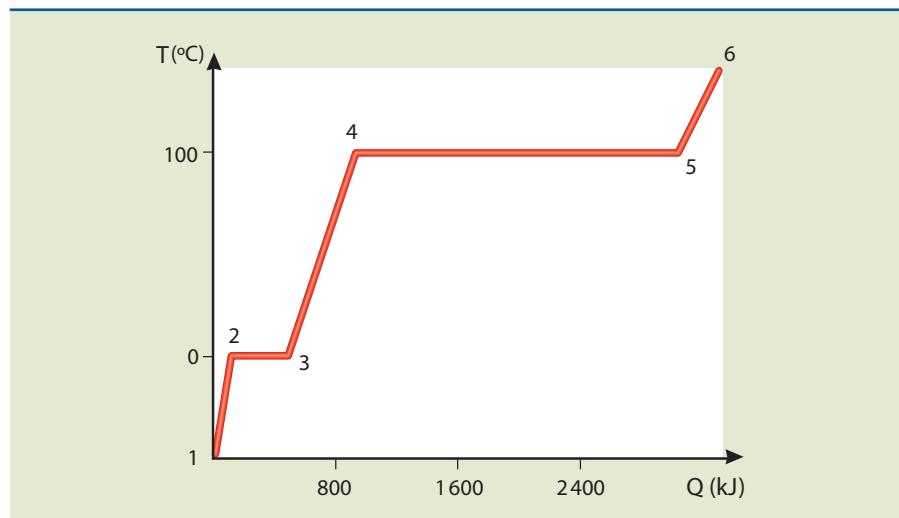


Figura 3.6

Energia sob a forma de calor versus temperatura em um processo isobárico (água em pressão de 101 325 Pa abs).

Na figura 3.6, entre os pontos indicados por 1 e 2, a água está no estado sólido, e a quantidade de calor (chamado calor sensível) absorvida pela substância para ir de 1 a 2 pode ser calculada pela equação 3.4:

$$Q = mc_m\Delta T \quad (3.4)$$

O índice m acrescentado no calor específico indica que ele deve ser usado como valor médio no intervalo de interesse de temperatura, tendo em vista que o calor específico é uma propriedade que varia com a temperatura.

Se continuarmos a fornecer calor após o ponto 2, inicia-se o processo de mudança de fase, de sólido para líquido (ou fusão) e a temperatura se mantém constante até que toda a massa de gelo seja transformada em líquido. Assim, denominamos de calor latente de fusão (L_f) a quantidade de calor por unidade de massa que funde determinada substância.

Dessa forma, a quantidade de calor para fundir uma massa m de determinada substância é dada por:

$$Q = mL_f \quad (3.13)$$

Para água sob pressão atmosférica normal, $L_f \approx 335 \text{ kJ/kg}$ (80 kcal/kg).

Na figura 3.6, de 3 até 4 a água está no estado líquido. Nessa condição, a equação do calor sensível (equação 3.4) apresentada anteriormente pode ser aplicada. Entretanto, o valor da propriedade calor específico para a água entre os estados 3 e 4 é muito diferente daquele usado entre os processos 1 e 2. De forma similar ao trecho de fusão, na figura 3.6, de 4 até 5, a temperatura se mantém constante, indicando que o fornecimento de calor é usado para vaporizar a água (transformá-la do estado líquido para o estado de vapor).

Essa quantidade de calor por unidade de massa é chamada calor latente de vaporização (L_v). Portanto, a quantidade de calor para vaporizar uma massa m de determinada substância é dada por $Q = mL_v$. Para água sob pressão normal, $L_v \approx 2\,260 \text{ kJ/kg}$ (540 kcal/kg).

Nos processos inversos – condensação (do estado 5 para o estado 4) e solidificação (do estado 3 para o estado 2) – valem os mesmos valores da vaporização e da fusão, se as demais condições são as mesmas. Porém, o sinal é negativo, pois há remoção e não fornecimento de calor.

3.4.1 Vapor e considerações sobre os estados da matéria

O estado físico (sólido, líquido, gás) em que uma substância se encontra depende basicamente das condições de pressão e temperatura. A figura 3.7 indica o diagrama esquemático (sem escalas) para a água.

As mudanças de estado físico, de sólido para líquido (fusão) ou de líquido para sólido (solidificação), de sólido para gás (sublimação) ou de gás para só-

lido (também conhecido como sublimação), de líquido para gás (vaporização) ou gás para líquido (condensação), são provocadas pelas mudanças de pressão e ou de temperatura.

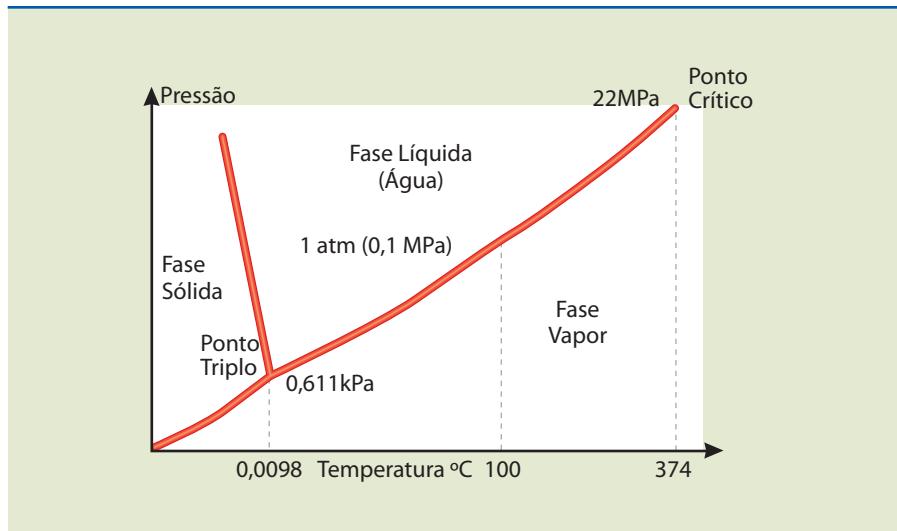


Figura 3.7

Diagrama de estado físico da água.

Na figura 3.7 as linhas cheias indicam as regiões fronteiriças entre os estados. Um processo termodinâmico qualquer (mudança de temperatura e pressão) pode cruzar as fronteiras e mudar o estado da substância. Uma condição em que a substância apresente condição de pressão e temperatura em um ponto exatamente sobre a linha divisória, por exemplo, sobre a linha divisória entre os estados de líquido e vapor, indica que as duas fases podem coexistir simultaneamente. Na figura 3.7, há um ponto chamado Ponto Triple, em que os três estados (sólido, líquido e vapor) coexistem.

Temperatura de saturação é aquela correspondente à transição de líquido para vapor em determinada pressão. Portanto, é na temperatura de saturação que ocorre o efeito do calor latente. Para água sob pressão normal (101 325 Pa abs), a temperatura de saturação é 100 °C, ou seja, temperatura na qual ocorre a ebulição da água.

A temperatura de saturação aumenta com a pressão, mas até um limite ao qual chamamos Ponto Crítico. A partir desse ponto, não há transição definida entre os dois estados em questão.

A coordenada do Ponto Crítico é obtida por meio da pressão crítica e da temperatura crítica. Acima da temperatura crítica, são necessários o aumento de pressão e também uma redução de temperatura para que um gás seja liquefeito.

Vamos verificar agora os termos gás e vapor. O vapor é o gás que está à temperatura inferior à crítica.

Vapor superaquecido é o vapor resultante do fornecimento de calor ao vapor saturado, com temperatura acima da temperatura de saturação.

3.4.2 Região de saturação líquido-vapor

Diagrama temperatura versus entalpia

A figura 3.8 indica em um gráfico aproximadamente a temperatura *versus* entalpia para a água. A região designada de saturação líquido mais vapor exprime condição em que há as duas fases coexistindo (líquido saturado e vapor saturado). A quantidade de vapor na “mistura” é indicada por uma variável denominada título ou qualidade do vapor, definida como:

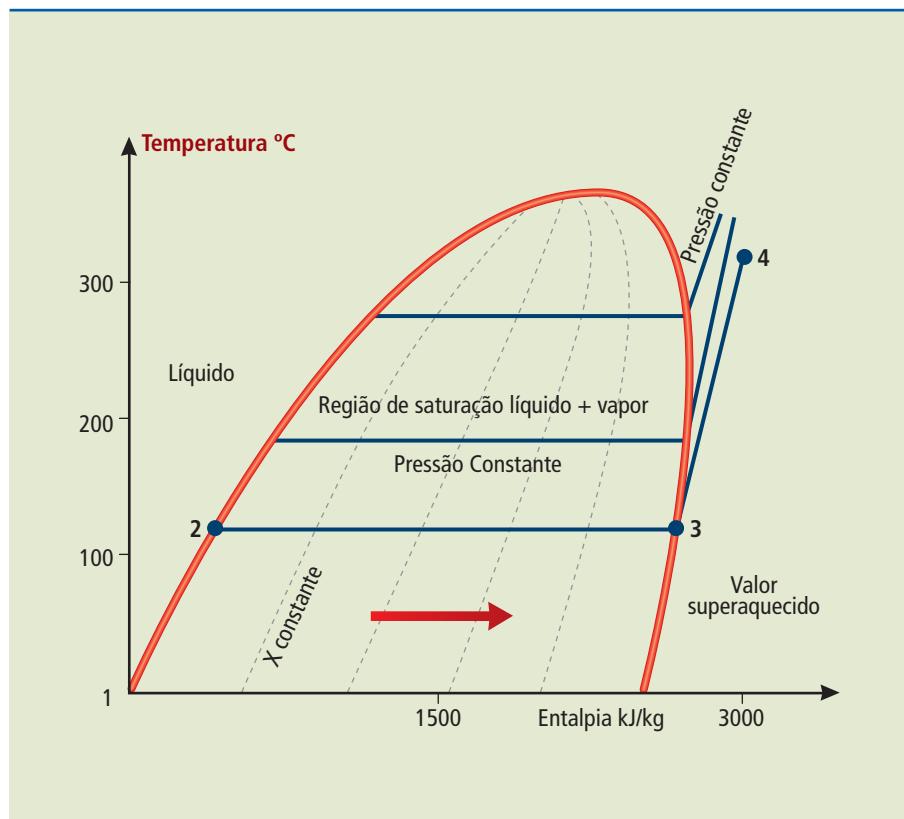
$$x = \frac{\text{massa}_{\text{vapor saturado}}}{\text{massa}_{\text{total}}} \quad (3.14)$$

O vapor é produzido por geradores de vapor, ou seja, as caldeiras, que são máquinas térmicas capazes de utilizar vários tipos de combustíveis. Após a produção do vapor nas caldeiras, sua distribuição se faz de forma bastante simples, por meio de tubulações. O que explica, entre outros motivos, a razão do amplo emprego desse equipamento na indústria, em hospitais e em hotéis.

Uma caldeira ideal deveria produzir o vapor superaquecido, ou, na pior das hipóteses, saturado com título unitário, mas, na prática, por uma série de fatores, em muitas situações, há líquido saturado com o vapor. Isso é prejudicial porque reduz a quantidade de vapor disponível e também provoca desgaste nos equipamentos que utilizam o vapor.

Figura 3.8

Diagrama temperatura versus entalpia para a água.



Na realidade, em uma instalação em bom estado, deve-se produzir vapor com $x \approx 0,95$, ou seja, cerca de 5% de líquido saturado.

Continuemos a análise do diagrama de temperatura *versus* entalpia, da figura 3.8, especialmente atentando para as linhas inicialmente na horizontal, que representam linhas isobáricas ou de pressão constante, e é por meio delas que analisamos a formação do vapor.

Supõe-se a água a uma pressão que se encontra na linha 1-2-3. Do ponto 1 até o ponto 2, o aquecimento eleva sua entalpia até o máximo possível do líquido para aquela pressão.

O ponto 2 indica a temperatura de saturação da água para a pressão considerada, ou seja, o início da vaporização. Na condição do ponto 2, a substância é conhecida como líquido saturado (com título igual a zero). Ao se continuar o fornecimento de calor para a água, inicia-se a evaporação (aumento progressivo do título) e a temperatura se mantém constante até o ponto 3 (com título unitário). No ponto 3, toda a água está no estado de vapor saturado. A diferença da **entalpia entre o ponto 3 e o ponto 2 é a entalpia de vaporização** da água. A partir de 3, mantido o aquecimento, tem-se então o vapor superaquecido.

Observamos que a expressão entalpia de vaporização equivale ao calor latente de vaporização anteriormente comentado (considerado por unidade de massa). Mas o conceito de entalpia é mais abrangente e, por isso, o termo é preferível. De forma similar, a diferença de entalpia do aquecimento entre os pontos 2 e 1 equivale ao calor sensível por unidade de massa.

3.5 Caldeiras

Caldeiras são equipamentos que produzem e acumulam vapor por meio do aquecimento da água, sob pressão (superior à atmosférica), utilizando fonte de energia diversificada.

O vapor saturado é o meio mais fácil de obter aquecimento em larga escala, sendo normalmente produzido por geradores de vapor, as caldeiras. As caldeiras podem ser projetadas para utilizar a fonte de energia mais conveniente ou a disponível dentro de um processo industrial. A distribuição do vapor é simples, pois usa tubulações que podem ser projetadas para atender todas as unidades produtivas de uma fábrica. Por esses e outros fatores, o vapor saturado e também o vapor superaquecido são amplamente empregados na indústria.

As caldeiras são utilizadas para alimentar máquinas térmicas, autoclaves para esterilização de materiais diversos, cozimento de alimentos pelo vapor ou calefação ambiental.

A primeira tentativa do ser humano de produzir vapor foi no século II a.C., quando Heron de Alexandria elaborou um artefato que vaporizava água e



movimentava uma esfera em torno de seu eixo. Esse foi o aparelho precursor das caldeiras e das turbinas a vapor.

Foi na Revolução Industrial que o vapor sob pressão teve ampla aplicação para movimentar máquinas. Cientistas, artífices e operários trabalharam por muitos anos na evolução dos geradores de vapor.

Os principais trabalhos nesse campo se devem a Denis Papin (França), a James Watt (Escócia) e a Wilcox e Babcock (Estados Unidos). Por volta de 1835, cerca de mil teares eram movidos a vapor. Mas o emprego desse tipo de energia só se ampliou após a Primeira Guerra Mundial.

Nessa época, as caldeiras começaram a ser utilizadas para gerar energia elétrica. No início do século passado, as caldeiras foram adequadas para suportar maiores temperaturas e pressões de trabalho e passaram a utilizar diferentes tipos de combustível.

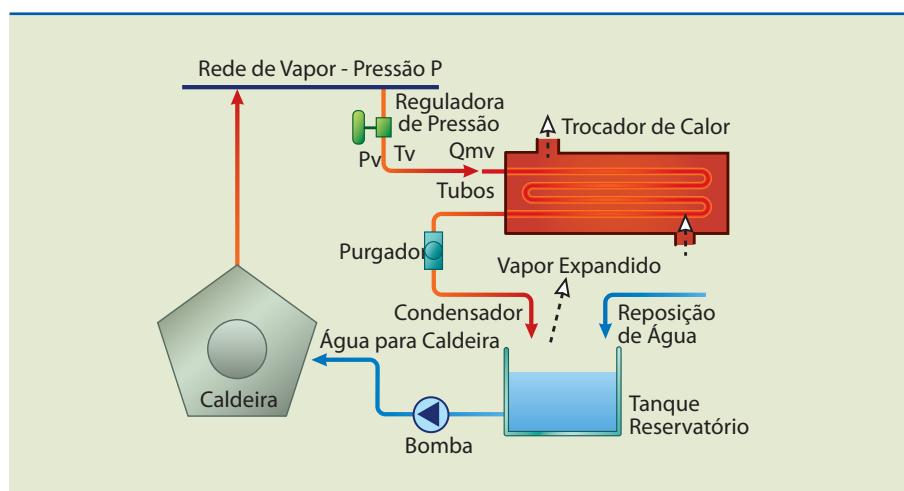
Atualmente, existem caldeiras com capacidade para produzir centenas de toneladas de vapor por hora, e sabe-se que o fator limitante dessa característica é o tamanho da unidade. A limitação das pressões relaciona-se às propriedades metalúrgicas dos materiais empregados. No entanto, existem caldeiras que operam a pressões acima de 200 atmosferas (20,265 MPa), ou seja, relativamente próximas do valor da “pressão crítica” da água (22,12 MPa), no qual se igualam determinadas características da água nas fases líquida e de vapor.

As indústrias químicas, petroquímicas, metalúrgicas, metalomecânicas, eletrônicas, entre outras, têm o vapor como principal fonte de aquecimento em diversos processos.

A figura 3.9 mostra o esquema bastante simplificado de uma aplicação típica. Após a troca de calor no trocador, a água condensada é dirigida a um reservatório e, por bombeamento, retorna para a caldeira. Naturalmente, há necessidade de reposição de água para compensar perdas e vazamentos.

Figura 3.9

Aplicação típica do uso do vapor:



O vapor saturado mantém a temperatura constante durante a condensação, quando se mantém a pressão constante.

Uma maneira de controlar a pressão é pelo uso de sistemas mecânicos. É bem mais simples controlar a pressão do que a temperatura. Dessa forma, a pressão de condensação do vapor saturado é usada para controlar indiretamente a temperatura dos processos.

Até 170 °C, utiliza-se vapor saturado até 10 atmosferas, sua temperatura de saturação é 183 °C, e é nessa faixa que se encontra a maioria de pequenos e médios consumidores de vapor. Temperaturas maiores são obtidas com o aumento da pressão de saturação, o que corresponde a maior investimento, pois há a necessidade de maior resistência mecânica da caldeira, como mais rigor em sua fabricação e inspeção. O limite da temperatura de vapor saturado é o ponto crítico, a 374 °C e pressão de aproximadamente 218 atm.

Não se utiliza, na maioria dos casos, vapor superaquecido em processos que requerem temperaturas mais altas. É bastante difícil manter o controle da temperatura sendo que a distribuição de energia por unidade de massa ou volume de vapor diminui drasticamente.

Na indústria, as caldeiras são classificadas, em relação à pressão de trabalho, em:

- Caldeiras de baixa pressão, para pressões de até 10 atm.
- Caldeiras de média pressão, para pressões entre 11 e 40 atm.
- Caldeiras de alta pressão, para pressões maiores que 40 atm.

Essa classificação é arbitrária, mas representa a faixa de utilização de vapor na indústria. Caldeiras de grande porte, empregadas tanto para acionamento de turbinas quanto para processos de aquecimento, podem trabalhar com pressões de até 100 atm. Existem caldeiras de maiores pressões, que representam um número reduzido de unidades. São usadas em geração de energia ou em grandes complexos industriais.

Essa tentativa de classificação nos mostra a enorme dificuldade de classificar esse tipo de equipamento. As caldeiras possuem formas, capacidades de produção de vapor e tamanhos bastante diferenciados, tornando difícil encontrar uma forma de classificação única. A uniformização da classificação das caldeiras já vem sendo tentada desde a utilização do vapor como forma de produzir trabalho.

3.5.1 Tipos de caldeiras

- Flamotubulares

Os gases de combustão circulam por dentro de tubos e a água circula por fora destes tubos, sendo então vaporizada.

- Aquatubulares

Os gases circulam por fora dos tubos e a água circula por dentro desses tubos, onde é vaporizada.

As flamotubulares são utilizadas para pequenas capacidades de produção de vapor, até 10 toneladas por hora, e para baixas pressões, até 10 atmosferas e, em alguns casos, de 15 a 20 atmosferas.

Caldeiras flamotubulares

A maioria das caldeiras é do tipo flamotubular. Elas são utilizadas para pequenas capacidades de produção de vapor (da ordem de até 10 ton/h) e baixas pressões (até 10 atmosferas), chegando algumas vezes a 15 ou 20 atmosferas.

A caldeira flamotubular horizontal é constituída de um vaso de pressão cilíndrico na horizontal. Nele, existem dois ou três tâmpos planos, chamados espelhos. Nestes espelhos, estão afixados os tubos e a fornalha.

As caldeiras modernas são conhecidas como caldeiras de passes de gases, e nelas existe uma fornalha que possui dois passes de gases. Na saída da fornalha, há uma câmara de reversão que pode ser recoberta com refratários, ou ainda, ser constituída de parede metálica molhada. Esta última possui água que troca calor quando atinge o meio externo.

As câmaras do tipo de reversão molhadas são mais eficientes e apresentam melhor rendimento térmico. Porém, têm construção mais complicada, são mais caras e perdem mais calor para o ambiente.

A fornalha da caldeira flamotubular deve ser dimensionada para que a combustão ocorra completamente em seu interior, a fim de evitar a reversão da chama, que pode atingir os espelhos, diminuindo a vida útil desse tipo de caldeira. A fornalha é constituída de um corpo cilíndrico e está imersa em água.

As caldeiras flamotubulares modernas só queimam combustíveis líquidos ou gassosos, pois existe grande dificuldade construtiva para instalar as grelhas quando se usam combustíveis sólidos. Algumas caldeiras flamotubulares de pequena capacidade são adaptadas com grelhas na fornalha para a queima de combustível sólido, porém, são limitadas ao tamanho necessário à área de grelha. Na verdade, para combustíveis sólidos, em caldeiras de pequena capacidade, a opção é pelas caldeiras mistas.

Desde as primeiras caldeiras dos primórdios da Revolução Industrial até hoje, as caldeiras flamotubulares foram sucessivamente aprimoradas até alcançarem a atual concepção de fornalha, com mais de dois passes de gases de combustão. A sua aceitação como detalhe construtivo para caldeiras de pequenas capacidades se deu pelo baixo custo de construção em comparação com uma caldeira do tipo aquatubular de mesma capacidade. Por outro lado, as pressões de trabalho e a qualidade do vapor saturado são limitadas por motivo de segurança.

No corpo da caldeira fica um acúmulo de água. Quando súbitas flutuações de demanda acontecem com pouca queda de pressão da rede de vapor, essa água acumulada pode funcionar como um pulmão de vapor, respondendo rapidamente ao sistema. Por isso, esse tipo de caldeira é usado para aplicações em que o consumo é variável ou em que se requer condições de emergência.

As caldeiras flamotubulares têm eficiência térmica que varia de 80 a 90%, e valores maiores são limitados pela dificuldade de adicionar equipamentos de recuperação de calor (economizadores).

Caldeiras aquatubulares

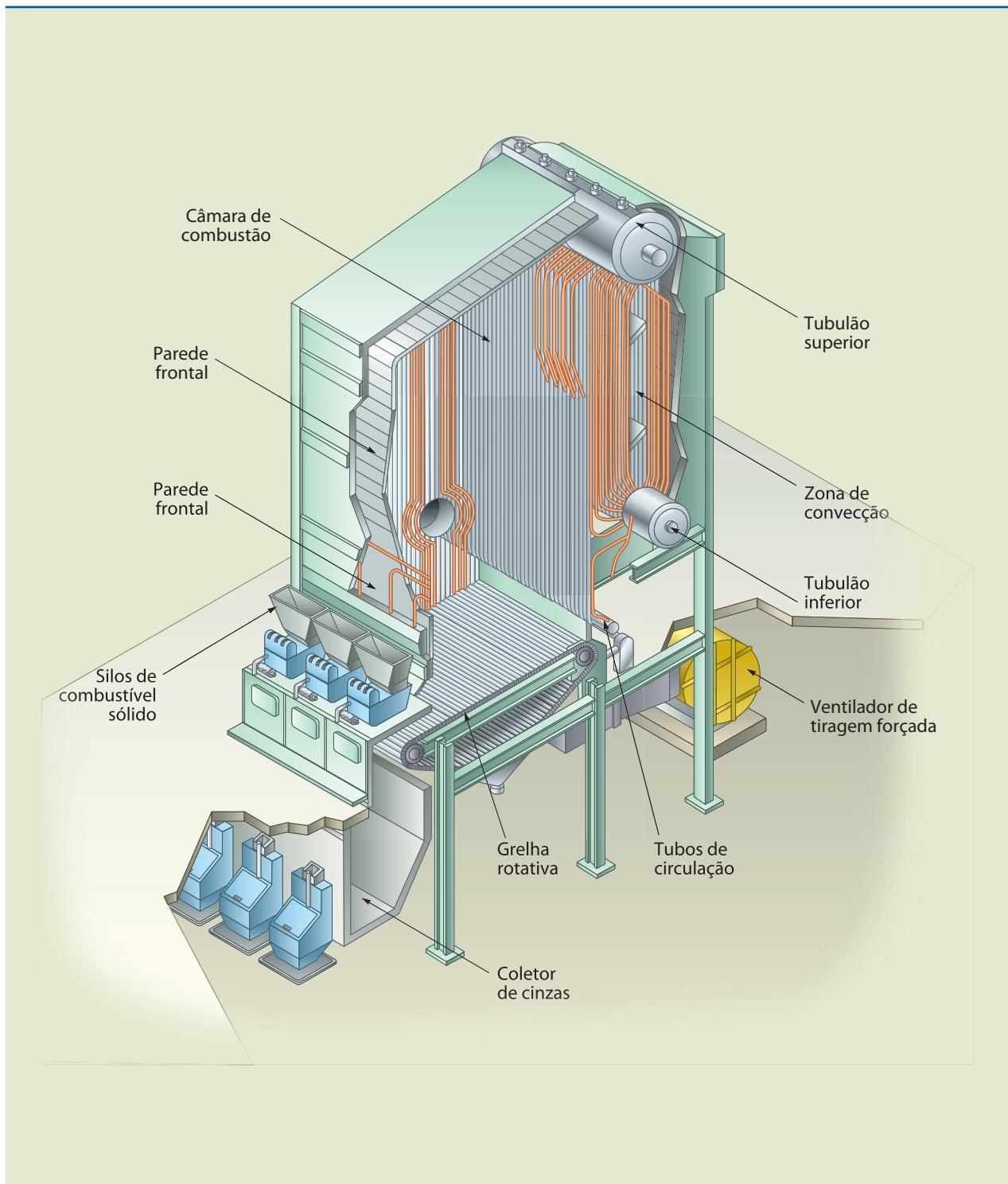
As caldeiras aquatubulares caracterizam-se pela circulação externa dos gases de combustão, enquanto os tubos conduzem massa de água e vapor. Esses tubos interligam dois ou mais reservatórios cilíndricos horizontais: o tubulão superior, onde ocorre a separação da fase líquida do vapor, e o inferior, no qual ocorre a decantação e a separação dos sólidos que estão em suspensão.

As primeiras caldeiras desse tipo usavam apenas tubos retos, mas, apesar de algumas vantagens (facilidade na limpeza, por exemplo), hoje essa construção não é mais utilizada.

Nas caldeiras em que os tubos curvos interligam os balões, as câmaras de combustão são fechadas por paredes de água.

Nas caldeiras aquatubulares (figura 3.10) que operam com combustíveis líquidos ou gasosos, o queimador é instalado na parte frontal da fornalha ou da câmara de combustão. Nessa câmara, a troca de calor ocorre sobretudo por **radiação luminosa** e, nas partes posteriores da caldeira (caixas de reversão e tubos), a troca de calor se processa essencialmente por **radiação gasosa** e **convecção**. As caldeiras aquatubulares são as mais utilizadas quando a produção do vapor e da pressão requeridos são maiores, pois o custo de fabricação das flamotubulares fica mais alto nestas condições.

A transferência de calor no interior da caldeira ocorre em duas secções: a de radiação, por radiação direta da chama com os tubos por onde passa a água, os quais geralmente delimitam a câmara de combustão; e a de convecção, por convecção forçada, utilizando os gases quentes provenientes da câmara de combustão, que atravessam um banco de tubos de água.

**Figura 3.10**

Caldeira aquatubular de grande porte com combustível sólido.

Caldeiras mistas

A solução de caldeiras híbridas (mistas) se deve ao fato da utilização de combustíveis sólidos para caldeiras de pequena capacidade. Na realidade, essas caldeiras são flamotubulares com uma antecâmara de combustão que tem suas paredes revestidas de tubos de água.

Os sólidos ficam depositados em grelhas na antecâmara, onde acontece a combustão. Desta forma, sólidos como lenha em toras, cavacos, bagaço podem ser utilizados e a retirada das cinzas é efetuada por baixo das grelhas.

As caldeiras mistas não são vantajosas quando se trata de segurança e eficiência térmica como as aquatubulares, mas é uma solução prática quando se tem o combustível sólido a baixo custo.

Este tipo construtivo ainda tem a possibilidade de queimar combustível líquido ou gasoso em paralelo com sólidos quando são instalados queimadores apropriados.

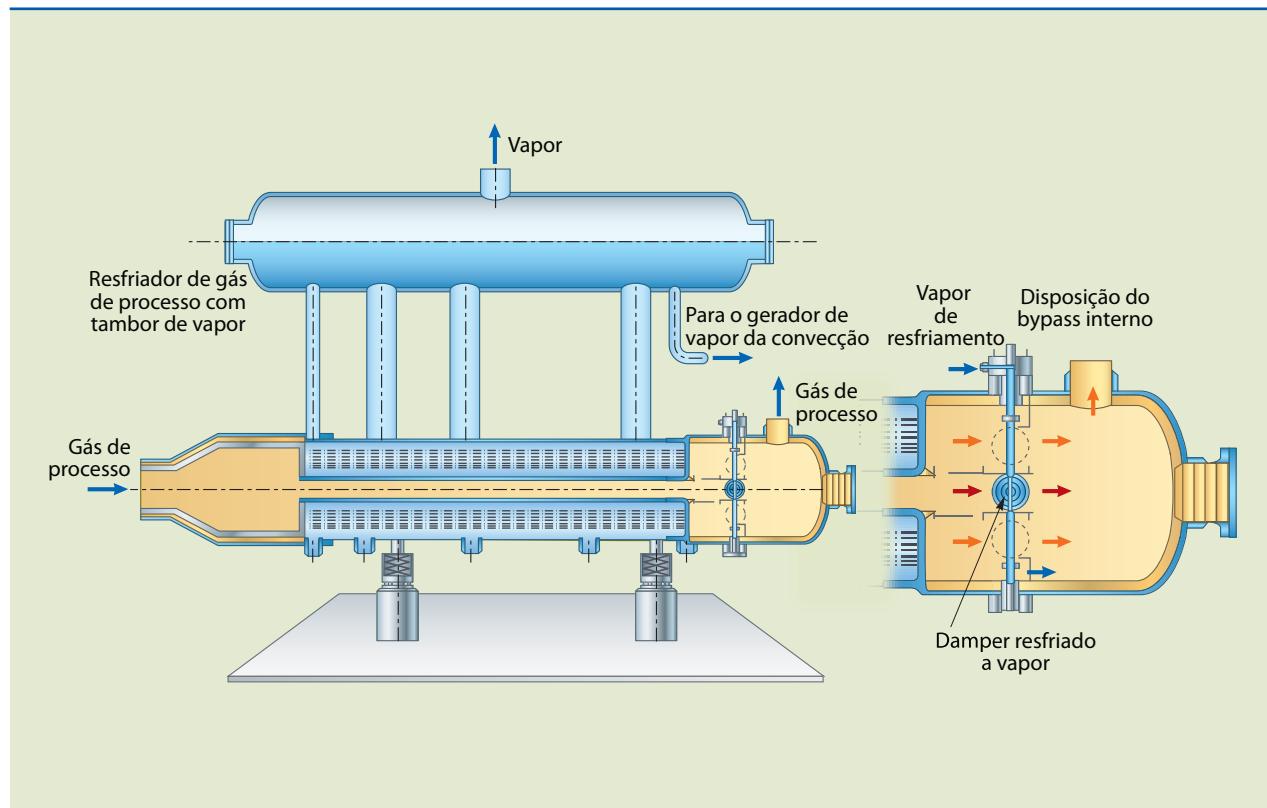
O rendimento é menor comparado com as flamotubulares, pois a perda de calor na antecâmara é grande. E, na maioria dos casos, as paredes frontal e traseira não possuem tubos em razão do pequeno tamanho dessas caldeiras e das dificuldades construtivas.

Caldeiras de recuperação de calor

Alguns processos de fabricação, como gases de alto forno, produtos de combustão de incineradores e fornos de alta temperatura, entre outros, geram gases de processo (ou de combustão) com temperatura suficientemente alta para recuperar calor (figura 3.11). Nesses casos, tanto a caldeira aquatubular quanto a flamotubular podem ser utilizadas, mas, em geral, a escolha recai sobre a aquatubular quando há menor demanda na produção do vapor.

Figura 3.11

Caldeira de recuperação de calor de gás de processo.



3.5.2 Outras classificações de caldeiras

As caldeiras ainda podem ser classificadas:

Quanto à energia empregada para o aquecimento

O tipo mais comum é o de caldeiras que queimam combustíveis:

- Líquidos (óleos combustíveis, principalmente).
- Gasosos (gás liquefeito de petróleo GLP, embora esse tipo de combustível seja hoje utilizado apenas em caldeiras de pequeno porte). O GLP e os combustíveis líquidos de modo geral estão sendo substituídos por gás natural.
- Sólidos (carvão, lenha, cavacos, bagaços etc.).

Quanto ao fluido que contêm

As caldeiras vaporizam água, mas existem as que vaporizam outros líquidos, como o mercúrio, líquidos térmicos.

Quanto à montagem

Normalmente, as caldeiras flamotubulares (tipo compacto) são pré-montadas, isto é, saem prontas das fábricas e instaladas no local de operação.

As caldeiras aquatubulares, além do tipo compacto, podem ser do tipo “montadas em campo”. Nesse caso, seu porte justifica a construção no local de operação. Por exemplo, uma caldeira de 33 metros de altura. Esse tipo de caldeira se caracteriza pela estrutura que a suporta, como:

- **Caldeira auto-sustentada**, quando sua estrutura é constituída pelos próprios tubos e tubulões.
- **Caldeira suspensa**, quando exige a construção de uma estrutura à parte.
- **Caldeira mista**, quando tem essas duas formas básicas de sustentação.

Quanto à circulação de água

Para que ocorra o fornecimento homogêneo de calor à água, é necessário que haja a circulação da água. Quando essa circulação é mantida pelas diferenças de densidade entre água quente e água menos quente, a circulação da água é dita “natural”.

Já as caldeiras de circulação forçada são as que possuem sistemas de coletores que dão impulso à água.

Quanto ao sistema de tiragem

O combustível é queimado na fornalha, e os gases quentes provenientes dessa queima percorrem o circuito destinado aos gases, a fim de melhor aproveitamento do calor, sendo, finalmente, lançados à atmosfera pelas chaminés.

Para que haja essa movimentação, é preciso que ocorram diferenças de pressão. Tais diferenças promovem a retirada dos gases queimados e possibilitam a entrada de nova quantidade de ar e combustível. Distinguem-se dois tipos:

- **Caldeiras de tiragem natural**, quando a tiragem se estabelece por meio de chaminés.
- **Caldeiras de tiragem artificial (mecânica ou forçada)**, quando, para produzir a depressão, empregam-se ventiladores ou ejetores.

Nota-se que existem vários critérios para a classificação de caldeiras, variando não apenas de um país para outro como também de acordo com as diferentes abordagens.

3.5.3 Componentes de uma caldeira

As caldeiras aquatubulares produzem maior quantidade de vapor com as maiores pressões disponíveis, na condição de vapor saturado ou superaquecido; isso faz com que esse tipo de caldeira seja considerado o mais importante entre todos. Sendo o mais importante, vamos conhecer com mais detalhes seus componentes.

Encontramos nessas caldeiras, em geral, os seguintes componentes:

Câmara de combustão – É a região onde acontece a queima do combustível, com a produção dos gases de combustão que fornecem calor à água. É, também, onde ocorrem as maiores taxas de absorção de calor e as maiores temperaturas. As câmaras de combustão devem ter um volume capaz de garantir que toda a queima se efetue em seu interior, assegurar que o posicionamento dos maçaricos e das superfícies de transferência de calor deva ser tal que não haja contato entre a chama e os tubos, e possuir superfície dos tubos para absorção do calor gerado com suficiência para que não ocorra vaporização nos tubos de subida.

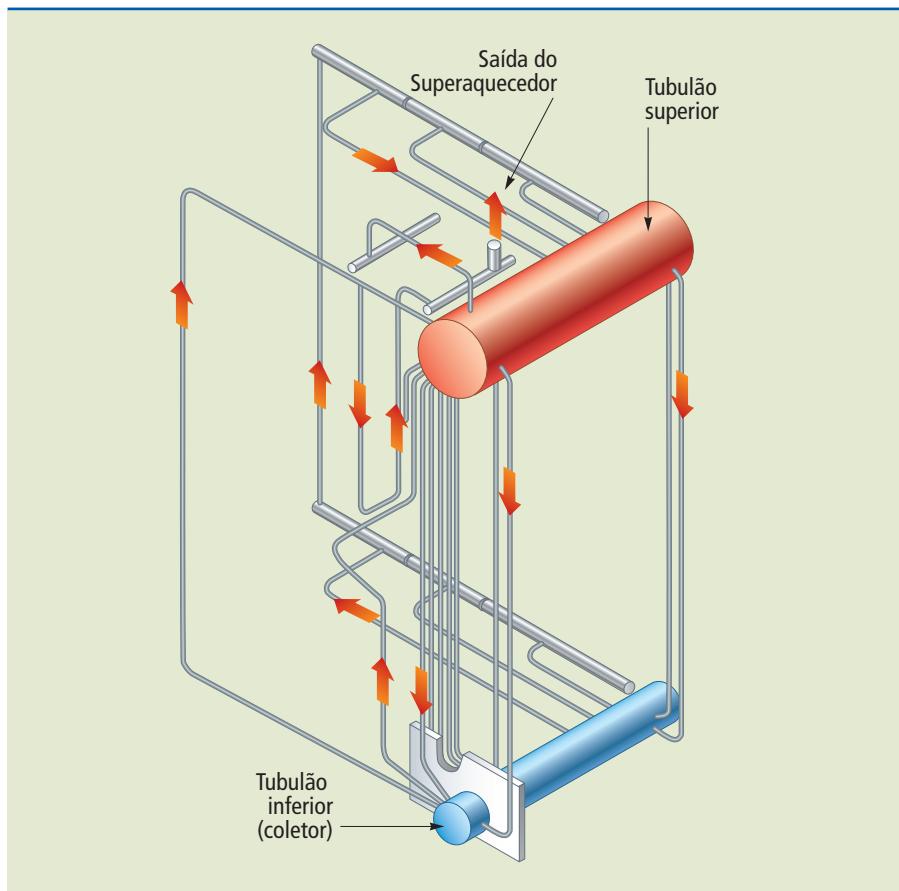
Tubos – Neles se realiza a circulação de vapor e água dentro da caldeira, processo que permite a troca de calor entre os gases quentes de combustão e a água ou o vapor.

Tubulão – É um tambor horizontal situado no ponto mais alto do corpo principal da caldeira (tubulão superior). A ele se conectam, por meio de tubos, os coletores, também chamados tubulões inferiores, que se encontram em níveis diferentes dentro da caldeira. A água circula várias vezes através do conjunto tubulão-coletores, descendo pelos tubos externos e retornando pelos internos (figura 3.12). Essa circulação natural é promovida pela diferença de pressão exercida pelas colunas líquidas e pelas correntes de convecção formadas. A coluna externa formada apenas por água é mais pesada que a coluna interna, a qual contém também vapor de água. Essa diferença no peso provoca a circulação. A parte vaporizada vai para o tubulão superior, enquanto o líquido volta a circular.

Além de acumular o vapor, o tubulão superior recebe também a água de alimentação, que vem do economizador. O espaço acima do nível da água no tubulão chama-se espaço de vapor.

Figura 3.12

Circulação de água e vapor através dos tubos da caldeira.



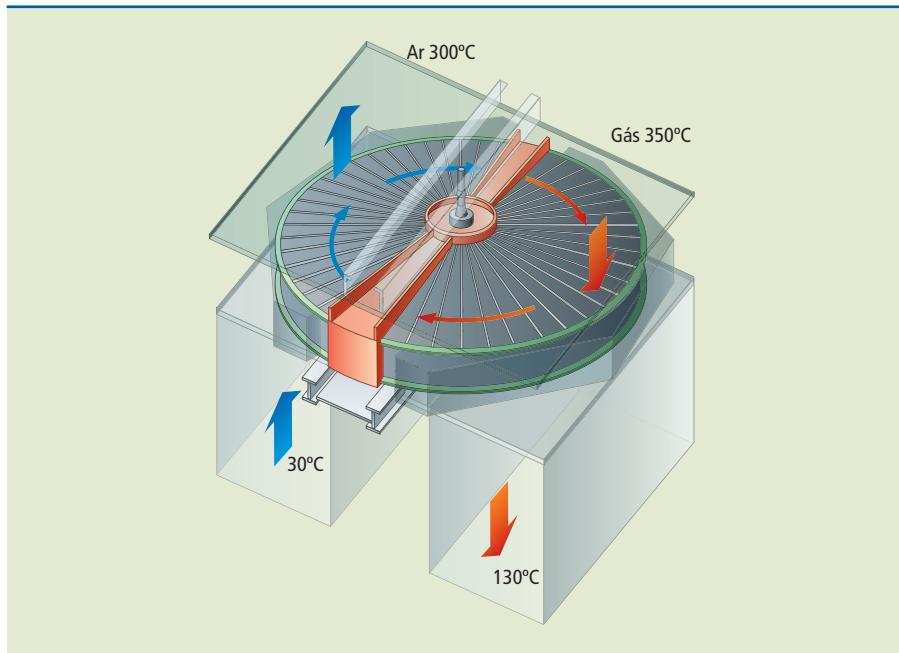
Chicanas – São defletores instalados no espaço de vapor para evitar o arraste de partículas de líquido com o vapor.

Superaquecedor – É um conjunto de serpentinas que conduz o vapor saturado separado no tubulão para coletores de vapor situados na zona de radiação ou de convecção, conforme o grau de superaquecimento para o qual as caldeiras são projetadas. Esse superaquecimento aumenta a energia interna do vapor e consequentemente sua entalpia.

Preaquecedor de ar – É um dispositivo (figura 3.13) utilizado para aproveitar parte do calor dos gases residuais de combustão, aquecendo o ar de alimentação das chamas; é geralmente instalado na saída dos gases na chaminé.

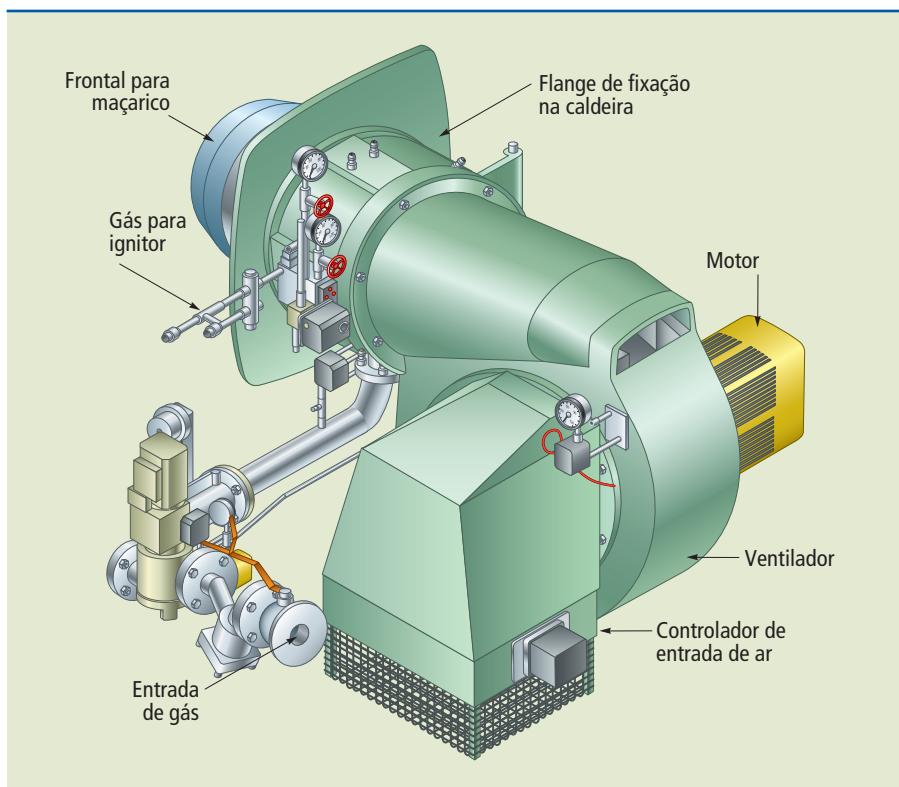
Economizador – É um conjunto de serpentinas ou um feixe tubular cuja finalidade é preaquecer a água de alimentação, aproveitando também o calor dos gases residuais da combustão, para depois seguir para o tubulão com maior temperatura, que representa uma economia de energia.

Tijolos refratários – As paredes da caldeira são revestidas internamente de tijolos ou concretos refratários, resistentes a altas temperaturas. Esses materiais protegem as estruturas metálicas da deterioração por alta temperatura ao mesmo tempo que refletem o calor da chama e permitem a distribuição homogênea do calor.

**Figura 3.13**

Preaquecedor de ar rotativo.

Maçaricos – Utilizados em uma caldeira, têm por finalidade converter o combustível líquido a ser queimado em gás (figura 3.14). Essa conversão se dá, em alguns casos, após a entrada do combustível na fornalha e, em outros casos, ainda no próprio queimador. Os maçaricos das caldeiras são, muitas vezes, semelhantes aos dos fornos e podem operar também com gases ou, ainda, com sólidos finamente particulados.

**Figura 3.14**

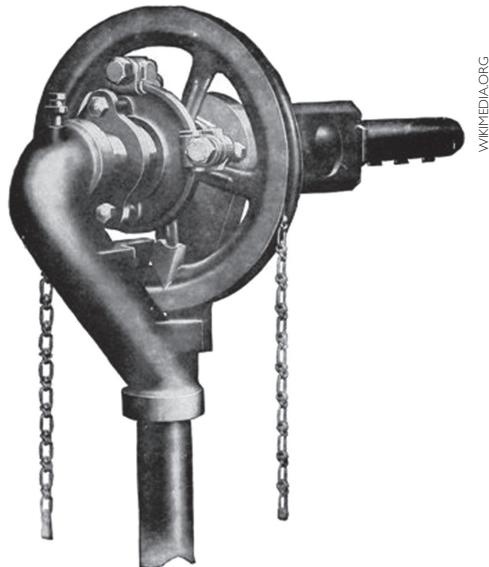
Maçarico para queima de gás.

Ignitor – Sua função é fornecer uma chama adequada para o acendimento de um maçarico, seja ele de óleo diesel, nafta, gás, ou óleo combustível. Um maçarico nunca pode ser aceso com a chama de outro maçarico, mas somente com a chama do ignitor correspondente. O ignitor, por sua vez, também necessita de uma fonte de calor para seu acendimento, que, no caso, é uma centelha proveniente de uma vela de ignição elétrica, a qual recebe tensão de um transformador. Essa centelha não é constante e permanece operante por alguns segundos. Se o ignitor não acender enquanto o transformador está energizado, será necessária nova operação para acendimento. Normalmente, os ignitores são instalados ao lado dos maçaricos ou tangencialmente a eles.

Soprador de fuligem – A fuligem aparece nos tubos das caldeiras durante seu funcionamento. Os sopradores têm a função de removê-la. Eles atuam em tempos preestabelecidos injetando vapor para remover a fuligem criada no processo. A alimentação para os sopradores é ligada a um sistema de geração de vapor independente do sistema da caldeira. São constituídos de tubos inseridos em posição transversal em relação aos tubos da serpentina. Os tubos do soprador são dotados de vários orifícios por onde sai o vapor responsável pela limpeza dos tubos da caldeira. Com o objetivo de atingir maior área de limpeza, esses sopradores, em geral, possuem movimento de rotação. O posicionamento e a quantidade de sopradores de fuligem variam de acordo com o tipo de caldeira e do combustível utilizado. Podem ser usados na câmara de combustão, no superaquecedor, nos aquecedores de ar e nas zonas de convecção, e seu acionamento pode ser realizado manual ou automaticamente. Veja uma foto de um soprador de fuligem na figura 3.15.

Figura 3.15

Soprador de fuligem manual.



WIKIMÉDIA.ORG

Ventilador – Tem a finalidade de impulsionar o ar de combustão até os maçaricos na câmara de combustão, e os gases da câmara de combustão até a chaminé.

Dois tipos de ventiladores são encontrados no mercado:

- O de tiragem forçada (utiliza o ar atmosférico e o envia para os maçaricos).
- O de tiragem induzida (suciona os gases de combustão e os conduz até a chaminé).

Chaminé – É a parte que conduz os gases de combustão para a atmosfera.

Válvulas de segurança – São instaladas no tubulão com a função de dar escape ao vapor, no caso de este atingir uma pressão superior à pressão máxima admitida de operação da caldeira (figura 3.16). Essas válvulas são calibradas para obedecer a uma sequência de funcionamento predeterminada, para garantir que situações de emergência não venham a acontecer, se ocorrer alguma falha mecânica ou insuficiência de operação.

A calibração dessas válvulas é feita com precisão, e seu funcionamento deve ser monitorado de modo permanente. Além disso, devem ser testadas periodicamente, objetivando perfeitas condições de funcionamento.

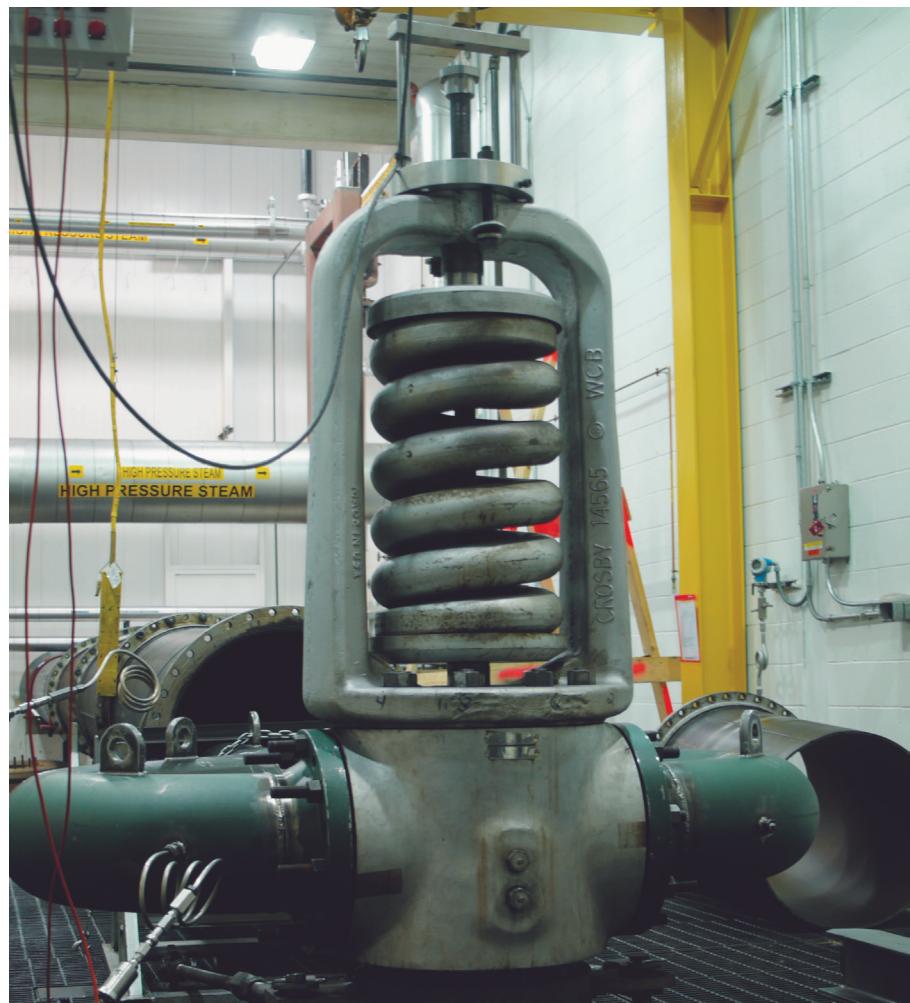


Figura 3.16

Válvula de segurança típica.

O projeto de caldeiras de médio e grande porte leva em consideração as vazões de vapor através de todas as válvulas de segurança. A soma das capacidades de vazão dessas válvulas deve ser igual ou superior à vazão máxima de vapor produzido pela caldeira. Dessa forma, o equipamento fica protegido no caso de sobrepressão, garantindo a integridade e a segurança dos operadores da caldeira.

3.5.4 Tratamento da água para as caldeiras

A água obtida na natureza é chamada água bruta e não serve para ser utilizada diretamente em uma caldeira, porque, em sua composição, encontra-se uma série de constituintes em suspensão ou dissolvidos, que podem ser sólidos ionizados, gases dissolvidos, particulados, micro-organismos e matéria coloidal. Devem ser extraídos da água por causa dos efeitos danosos que podem provocar, como corrosão, incrustação, depósitos nas superfícies internas dos tubos ou contaminação do vapor produzido. Esses problemas estão relacionados com a natureza das águas usadas para a produção de águas de alimentação e compensação.

Convém lembrar que nenhum processo de remoção de impurezas é perfeito. Isso porque, após o tratamento, a água permanece com contaminantes que poderão ser nocivos ao processo.

As caldeiras de baixa pressão são menos exigentes, e a simples redução da salinidade (ou abrandamento) e a clarificação da água satisfazem a produção de vapor com custos baixos. Caldeiras de média e alta pressão já necessitam de água desmineralizada ou destilada, além de adequado controle da concentração de sólidos e da remoção do oxigênio da água de alimentação, ajuste do pH etc.

O tratamento da água para alimentar uma caldeira é feito com base na qualidade do vapor a ser gerado e nas condições gerais das superfícies internas dos tubos. Para cada tipo de aplicação da caldeira, temos um tipo de tratamento de água adequado. Além disso, outros aspectos devem ser considerados, como a origem da água utilizada, o regime operacional, os tipos de materiais aplicados nas caldeiras, as condições de pressão e temperatura do vapor produzido, entre outros.

3.5.5 Aspectos legais relacionados à segurança operacional

As altas pressões e temperaturas envolvidas na operação das caldeiras faz com que haja necessidade de medidas para garantir a segurança em sua utilização.

O histórico de acidentes fatais provocados por falhas nas operações em caldeiras exigiu uma regulamentação dos parâmetros de segurança em todo o mundo. No Brasil, temos a NR-13, uma norma regulamentadora do MTE (Ministério do Trabalho e Emprego), que determina os parâmetros de segurança para caldeiras e vasos de pressão.

Diferentemente da classificação arbitrária já vista, a NR-13 classifica as caldeiras em três categorias (ver também a figura 3.17):

- Caldeira categoria A:** cuja pressão de operação é igual ou maior que 1 960 kPa.
- Caldeira categoria C:** pressão de operação igual ou inferior a 588 kPa com volume interno igual ou menor que 100 litros.
- Caldeira categoria B:** todas as que não estão nas categorias A e C.

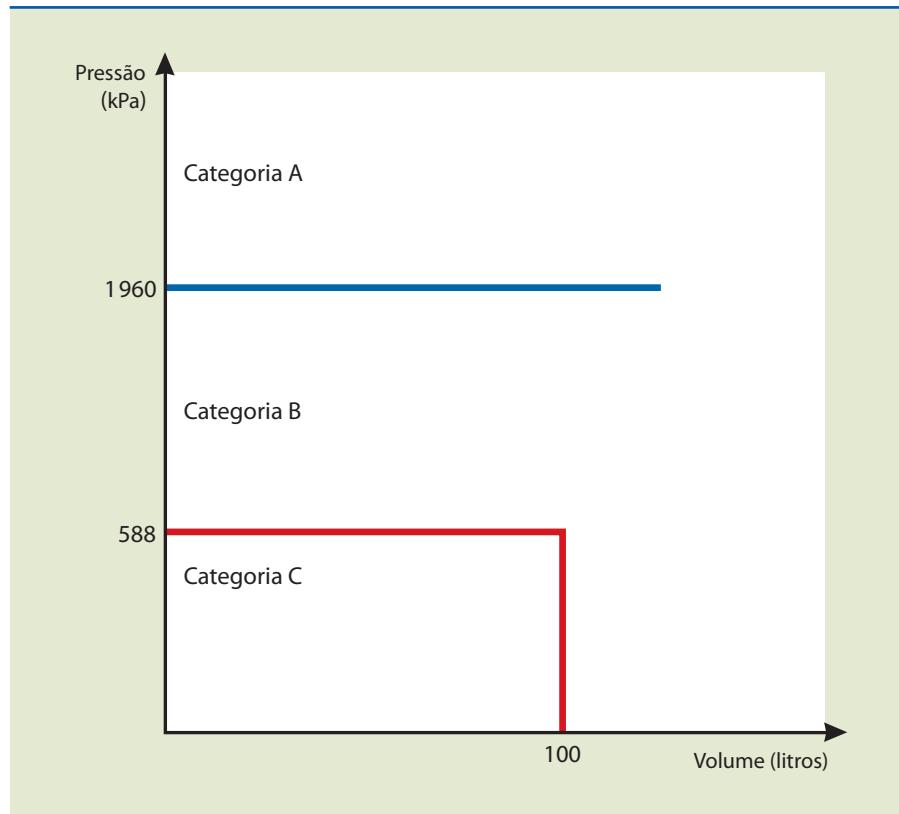


Figura 3.17

Classificação das caldeiras segundo a NR-13.

Na NR-13, centrada na inspeção de segurança de caldeiras estacionárias a vapor, são apresentadas várias regulamentações, entre elas a do profissional habilitado. Profissional habilitado, segundo a NR-13, é aquele que tem a competência legal para o exercício da profissão de engenheiro habilitado nas atividades de projeto de construção, acompanhamento de operação e manutenção, inspeção e supervisão de inspeção de caldeiras.

Outros pontos importantes regulamentados pela NR-13 são a obrigatoriedade de as caldeiras serem submetidas à inspeção de segurança, interna e externamente, nas seguintes oportunidades:

- Antes de entrarem em funcionamento, quando novas, no local de operação.
- Após reforma ou modificação, ou após terem sofrido qualquer acidente.
- Periodicamente, pelo menos uma vez ao ano.

A NR-13 prevê ainda que toda caldeira deve possuir, no estabelecimento onde estiver instalada, uma sequência de documentos atualizados:

a) “Prontuário da Caldeira”, contendo as seguintes informações:

- Código de projeto e ano de edição.
- Especificação dos materiais.
- Procedimentos utilizados na fabricação, montagem, inspeção final e determinação da Pressão Máxima de Trabalho Admissível.
- Conjunto de desenhos e demais dados necessários para o monitoramento da vida útil da caldeira.
- Características funcionais.
- Dados dos dispositivos de segurança.
- Ano de fabricação.
- Categoria da caldeira.

b) “Registro de Segurança”.

c) “Projeto de Instalação”.

d) “Projetos de Alteração ou Reparo”.

e) “Relatórios de Inspeção”.

Os instrumentos e sistemas de controle das caldeiras, a qualidade da água e seus tratamentos, bem como treinamento dos operadores, também são contemplados por essa norma regulamentadora. É ressaltada a importância do elemento humano na segurança de operações de caldeiras, não só como responsável pelo projeto, pelas especificações de materiais na construção de caldeira, pela escolha de instrumentos, mas também na condução do equipamento, ou seja, na operação propriamente dita.

Os operadores e supervisores das caldeiras devem ser treinados (por orientação da NR-13) para desenvolvimento de suas atividades rotineiras, que exigem habilidade e prática. Os riscos de acidentes na operação de caldeiras, portanto, são controláveis pela prática da técnica correta em todas as fases: projeto, construção, controle de qualidade, operação, manutenção e inspeção.

3.6 Trocadores de calor

Trocador ou permutador de calor é um equipamento usado para realizar o processo da troca térmica entre dois fluidos. É muito comum na engenharia, quando se quer efetuar a troca de calor entre fluidos que se encontram em diferentes temperaturas. Os trocadores de calor podem ser utilizados tanto para aquecimento e resfriamento de ambientes, quanto para condicionamento de ar, produção de energia, recuperação de calor e em processos químicos.

São fabricados de diversas formas, de acordo com suas aplicações. Normalmente, os fluidos envolvidos na troca térmica são separados por superfícies de troca, ou seja, por paredes sólidas. Mas ocorrem casos em que os fluidos são imiscíveis e, assim, as paredes sólidas podem ser dispensadas. Nesses casos, são denominados permutadores de contato direto.



3.6.1 Classificação dos trocadores de calor

Os trocadores de calor são classificados da maneira descrita a seguir.

Pelo arranjo do escoamento

1. Trocadores de calor de correntes paralelas.

Normalmente, são associados a trocadores tipo duplo tubo. Neles, o fluido quente e o frio entram pelo mesmo lado do trocador e escoam no mesmo sentido. À medida que escoam, há a transferência de calor do fluido quente para o frio (figura 3.18).

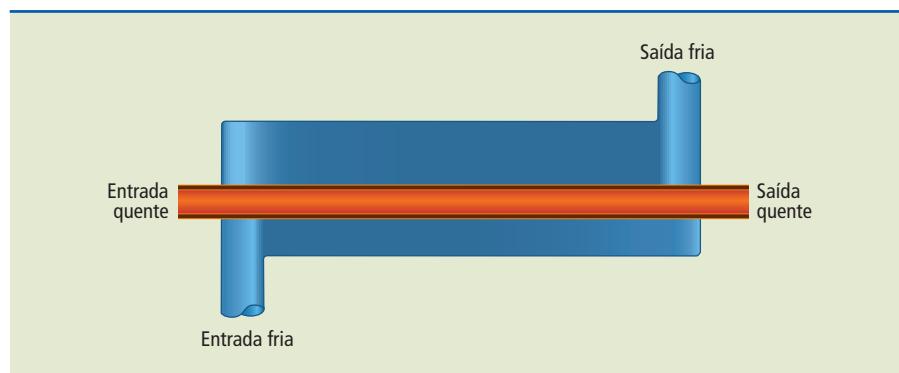


Figura 3.18

Trocador de calor com correntes paralelas.

2. Trocadores de calor de correntes contrárias ou opostas.

Apresentam maior eficiência global quando comparados com os de corrente paralela. Nesses trocadores, o fluido quente entra por um lado e o frio entra pelo lado oposto, e o escoamento ocorre em sentidos opostos (figura 3.19).

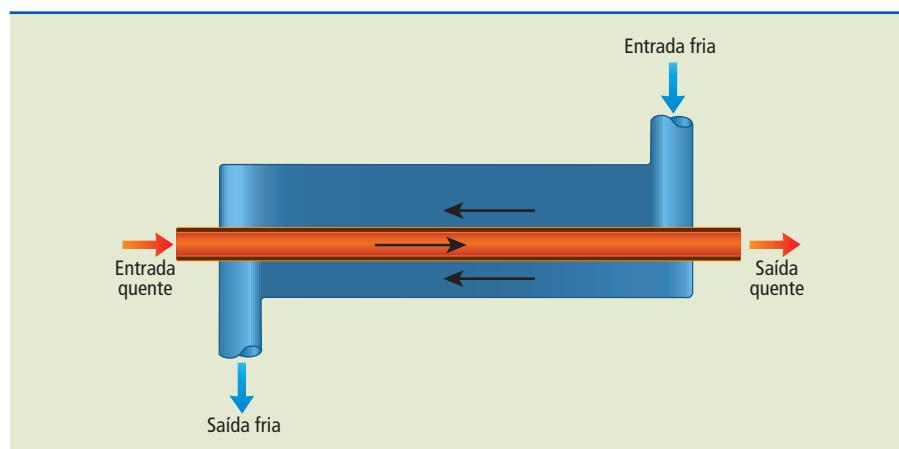


Figura 3.19

Trocador de calor com correntes opostas.

3. Trocadores de calor de correntes cruzadas.

Nesse tipo, os escoamentos são perpendiculares entre si. O escoamento pode ser misturado ou não, o que pode influenciar significativamente o desempenho do trocador de calor.

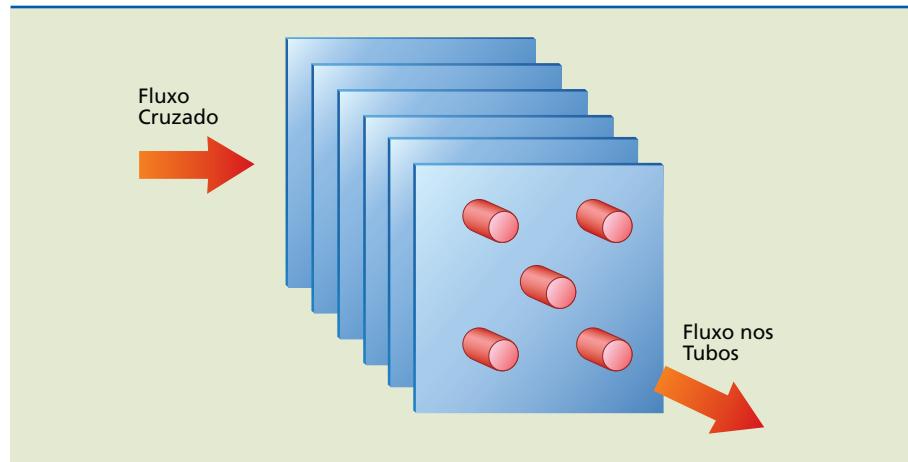


a) Correntes cruzadas com fluidos não misturados.

Nesses trocadores, existem aletas que inibem o movimento do fluxo cruzado na direção do escoamento (figura 3.20).

Figura 3.20

Trocador de calor com correntes cruzadas com fluidos não misturados.

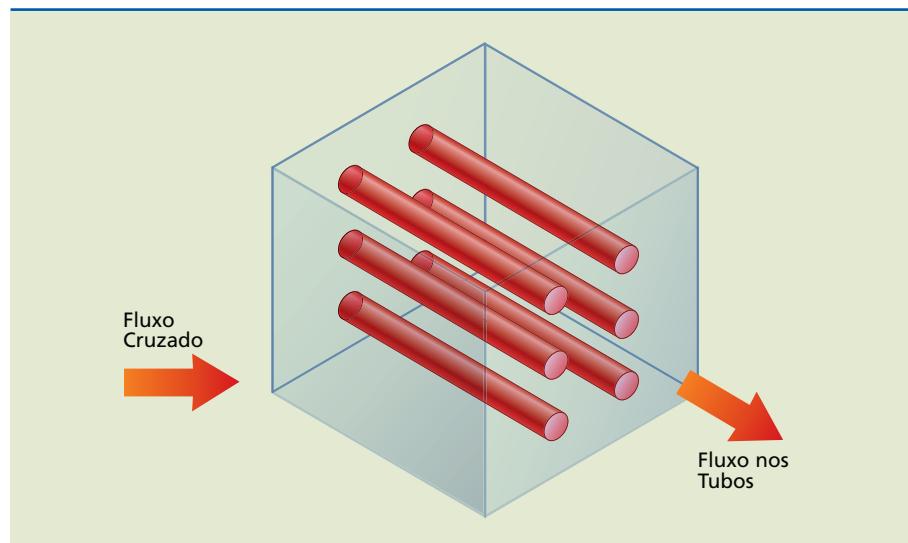


b) Correntes cruzadas com fluidos misturados.

Nesse tipo de trocador, o fluido pode escoar em todas as direções (figura 3.21).

Figura 3.21

Trocador de calor com correntes cruzadas com fluidos misturados.



Pelo tipo construtivo

Os trocadores de calor, pelo tipo construtivo, podem ser:

- De duplo tubo.
- De casco tubo.
- De placas.
- Compactos.
- De tubos aletados.

Pelo tipo de possibilidade de contato entre os fluidos

Os trocadores podem ser:

- Separados por parede.
- Com contato direto.

Trocadores de calor de casco e tubos

São o tipo mais comum de trocador nas indústrias (figura 3.22). Têm simplicidade de operação, construção e manutenção. São compostos por um grande tubo externo e um feixe de tubos externos. Em alguns casos, são adicionados deflectores para melhorar as características de troca térmica. Podem ser de passes simples (figura 3.22) ou múltiplos (figura 3.23).

Figura 3.22

Trocador de calor de casco e tubos.

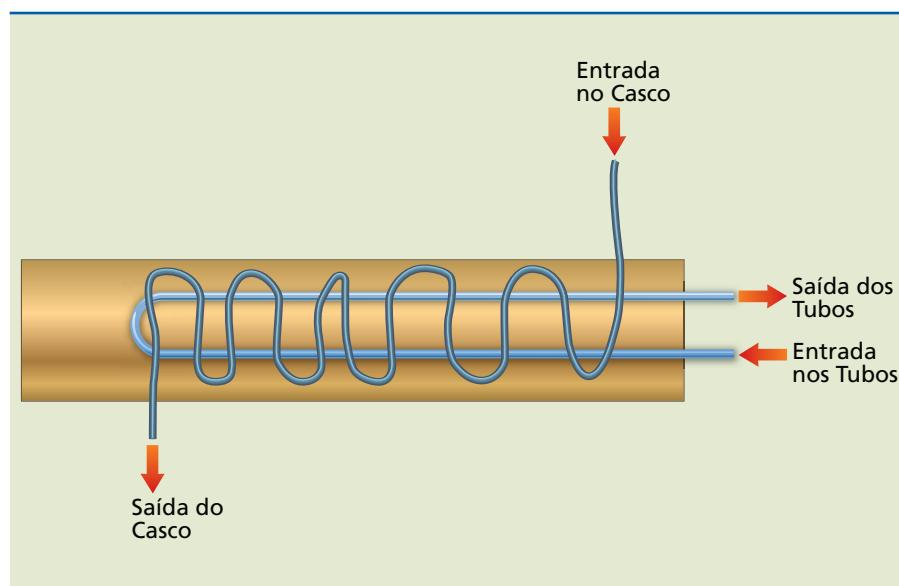
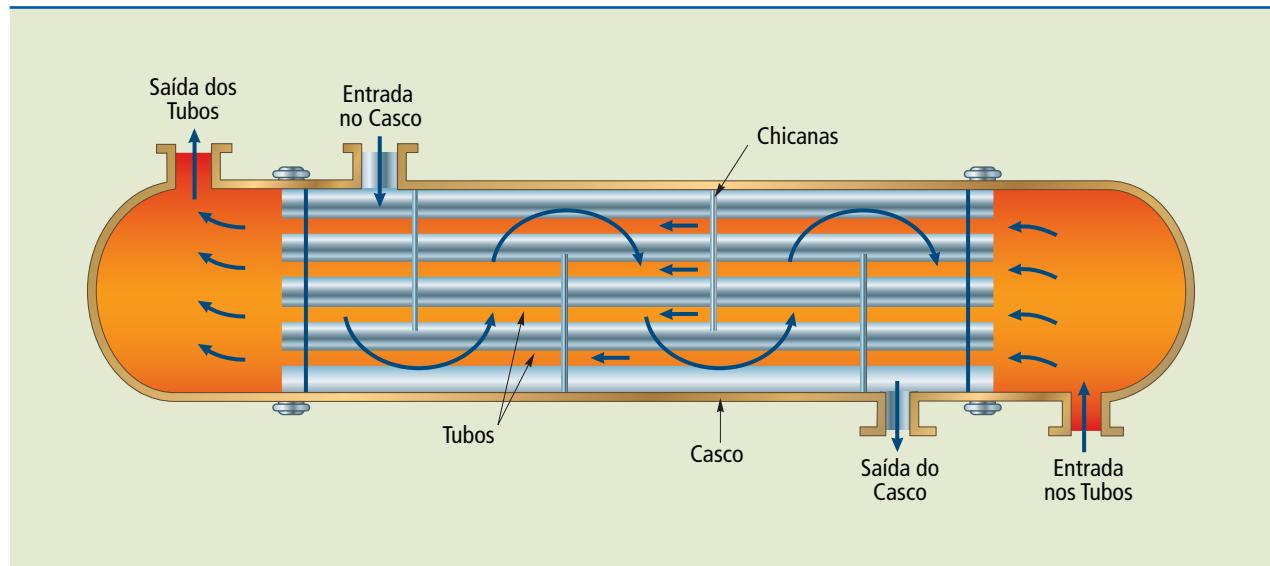
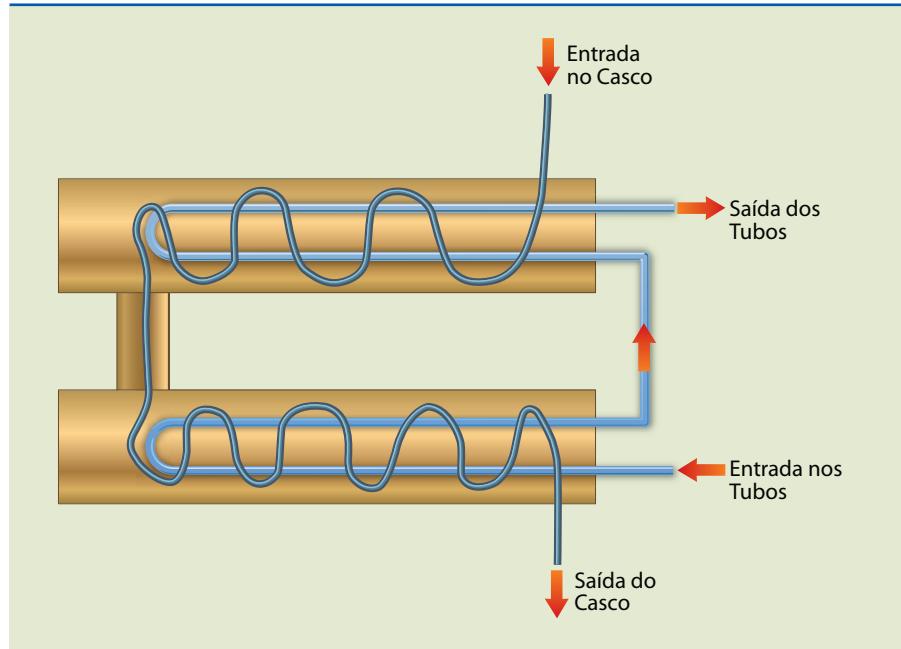


Figura 3.23

Trocador de calor casco e tubo de passe simples.

Figura 3.24

Trocador de calor casco e tubo passes múltiplos.



Trocadores de calor de placas

Nesses trocadores, os canais são formados por placas paralelas separadas por aletas. Há diferentes configurações desse tipo de trocador porque cada configuração tem aplicação específica.

Trocadores de calor de tubos aletados

São constituídos de tubos com aletas, internas ou externas. As aletas são superfícies estendidas com finalidade de aumentar a área de troca de calor.

Trocadores de calor compactos

São tipicamente usados quando um dos fluidos é gás. Possuem grande área de troca ocupando um pequeno volume.