



INSTITUTO FEDERAL
SANTA CATARINA
Campus Araranguá

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS ARARANGUÁ

MÁQUINAS TÉRMICAS

Prof.: Daniel João Generoso

QUARTO MÓDULO
CURSO TÉCNICO EM ELETROMECAÂNICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA – CAMPUS ARARANGUÁ
2011 – 1



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE SANTA CATARINA
CAMPUS DE ARARANGUA

Apostila de Máquinas Térmicas elaborada para o quarto módulo do curso Técnico em Eletromecânica, com base em apostilas de outros cursos e bibliografia da área específica.

Introdução

A palavra *termodinâmica* teve origem na junção de dois vocábulos gregos, *therme* (calor) e *dynamis* (força), que têm a ver com as primeiras tentativas para transformar calor em trabalho e que constituíram o objetivo primordial desta ciência.

A ciência da termodinâmica surgiu pela necessidade de aperfeiçoar o funcionamento das primeiras máquinas a vapor, de que é exemplo a máquina de Newcomen construída no princípio do século XVIII.

Atualmente a termodinâmica não se ocupa apenas das transformações onde ocorrem trocas de calor e de trabalho mas estendeu-se a todas as outras formas de energia e suas transformações, podendo dizer-se que a termodinâmica é a ciência que estuda a energia nas suas diversas formas.

Uma das leis fundamentais da Natureza é a lei da **conservação da energia**. Estabelece que, durante qualquer interação, a energia pode mudar de forma, mas a quantidade total de energia mantém-se constante, isto é, não se pode criar, nem destruir, energia. Como mais tarde se verá o **primeiro princípio da termodinâmica** é, apenas, uma expressão desta lei afirmando, ainda, que a energia é uma propriedade termodinâmica da matéria.

O **segundo princípio da termodinâmica** afirma que nem todas as transformações em que a energia se conserva podem ocorrer. Algumas transformações da Natureza dificilmente ocorrem nos dois sentidos.

Sabe-se que a matéria é constituída por um número muito grande de *moléculas*. Naturalmente, as propriedades de uma substância dependem do comportamento das moléculas que a constituem. Por exemplo, a pressão de um gás em um reservatório é o resultado da transferência da quantidade de movimento entre as moléculas do gás e as paredes do reservatório no momento em que as primeiras chocam com as segundas. No entanto não é necessário conhecer o comportamento destas moléculas para determinar a pressão do gás. É suficiente ligar o reservatório a um aparelho que mede a pressão chamado manômetro. Esta abordagem do estudo da termodinâmica que não necessita conhecer o comportamento das partículas elementares que constituem a matéria é denominada **termodinâmica clássica**. Fornece uma resolução direta e fácil dos problemas que surgem em engenharia. Uma abordagem mais complicada, baseada no comportamento médio de um grande número de partículas elementares, é

designada **termodinâmica estatística**. Como quase todos os assuntos que interessam a um engenheiro dizem respeito a interações entre energia e matéria é difícil conceber uma área de engenharia que não esteja relacionada com a termodinâmica, em algum aspecto.

Não é preciso procurar muito para encontrar áreas de aplicação da termodinâmica. Por exemplo, a termodinâmica tem um papel essencial no projeto e análise de motores de automóveis e de aviões a jato, de centrais térmicas convencionais e nucleares, de sistemas de ar condicionado, de máquinas frigoríficas, etc. Por isso, um bom entendimento dos princípios da termodinâmica tem sido uma parte essencial da formação dos engenheiros.

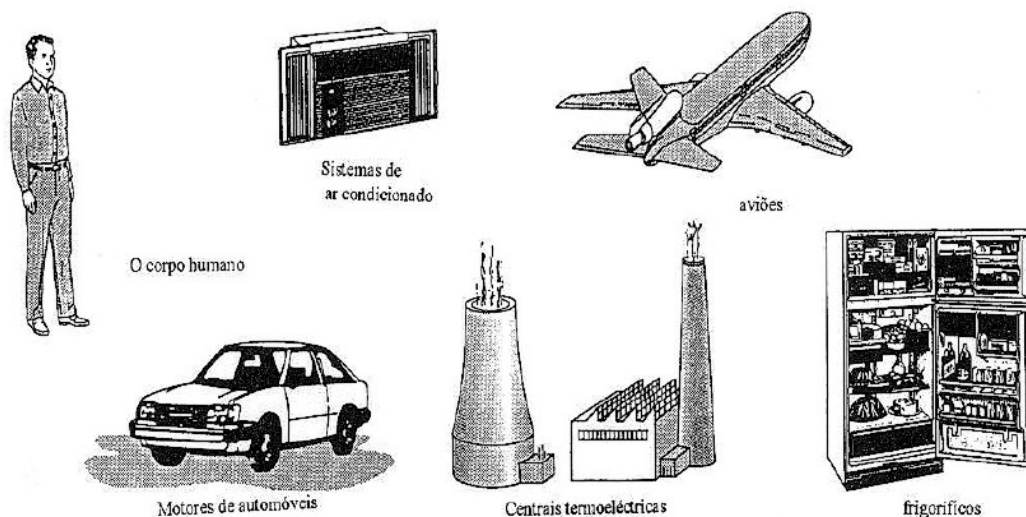


Figura 1.1 – Algumas aplicações práticas da termodinâmica.

ENERGIA

A energia é uma das grandezas físicas fundamentais da natureza. Pode-se até dizer que o constituinte básico do universo é a energia. A própria matéria, constituída de microscópicas partículas denominadas átomos, pode ser considerada uma manifestação de energia. A maior fonte de energia, no planeta Terra, é o sol.

Se analisar de onde provém a gigantesca quantidade de matéria que o sol diariamente irradia para o espaço, nota-se que ela é originária da destruição de matéria em seu interior.

Esta destruição se dá através de reações nucleares (como nas bombas H), nas quais a transformação de pequenas quantidades de matéria produz quantidades gigantescas de energia.

Só para se ter uma idéia, se fosse possível transformar toda a matéria de uma formiga em energia, ela seria suficiente para fazer ferver a água de uma piscina. Diariamente defronta-se com formas mais “brandas” de energia, diferentes das altamente destrutivas reações nucleares.

Alguns fatos fundamentais devem ser conhecidos a respeito da energia com a qual normalmente trabalha-se.

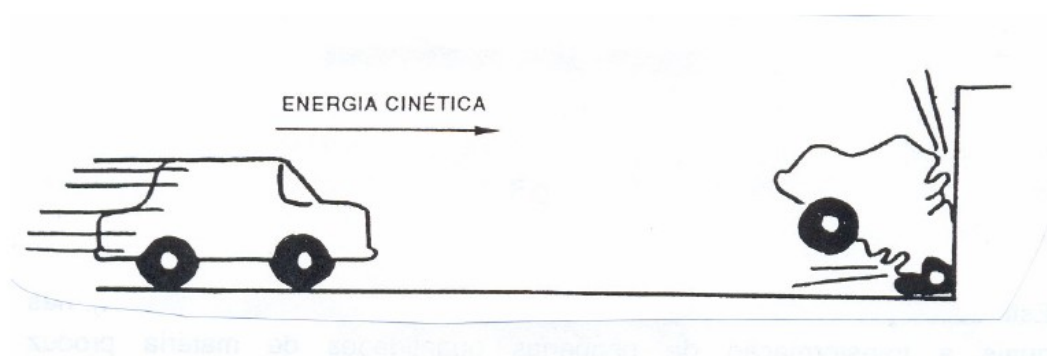
Ela pode assumir diferentes formas e, ao longo de certos processos, pode-se transformar de uma forma para outra.

TIPOS DE ENERGIA

Energia Cinética

Todo corpo em movimento possui este tipo de energia, que, quanto maior for a velocidade e a massa do corpo, maior ela será.

Quando um carro dá uma batida, por exemplo, o estrago é produzido pela energia cinética que o carro tinha por estar em movimento. Por isso o estrago aumentará quanto maior for a velocidade no momento da batida.

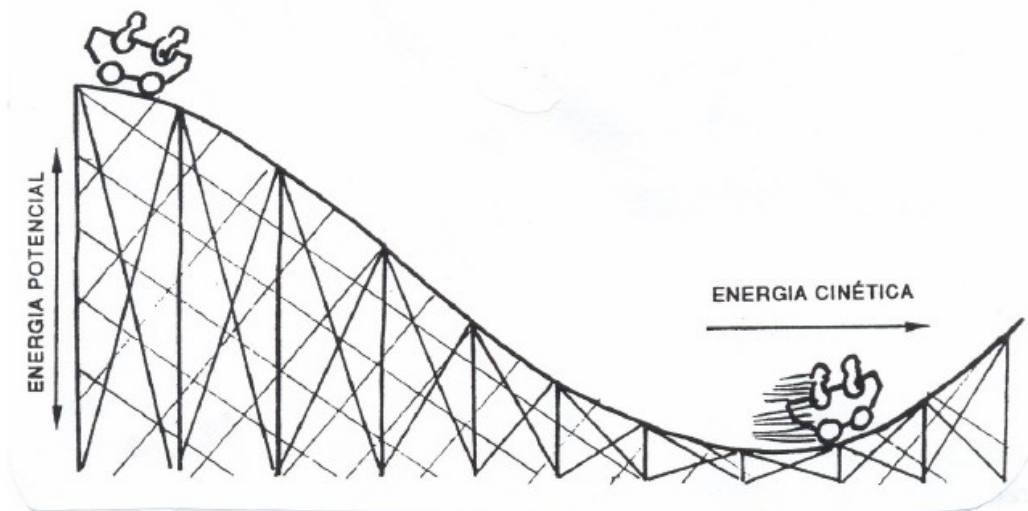


Energia Potencial

É a energia que os corpos têm devido à sua posição. Ela não é tão óbvia quanto a energia cinética mas, lembrando que uma forma de energia pode se transformar em outra, nota-se facilmente pelos seus efeitos.

Imagine um corpo, situado a uma certa altura, que é abandonado até se chocar com o chão. A energia potencial que ele tinha pelo fato de estar a uma certa altura se transforma, durante a queda, em energia cinética, que acaba sendo percebida pelo estrago da pancada.

Pode-se perceber, intuitivamente, que a energia potencial do corpo é tanto maior quanto maior for sua massa e a altura a que ele se encontra.



Esse tipo de energia potencial é também chamado de energia potencial gravitacional, pois está associado à força da gravidade da terra. Um outro tipo de energia potencial é a elástica, relacionada a corpos que estejam ligados a molas ou corpos elásticos.

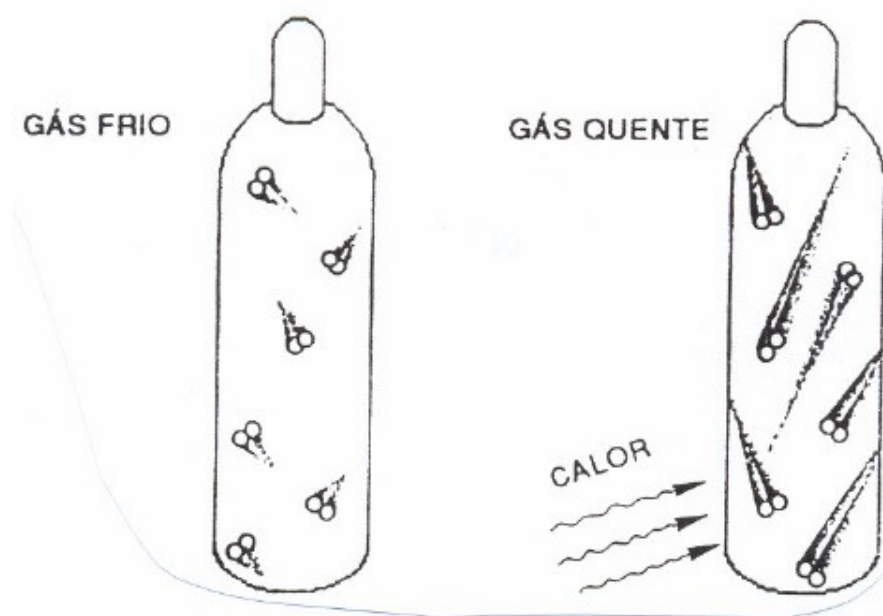
Se você, por exemplo, comprimir um corpo contra uma mola, ao abandonar o sistema verá a energia potencial elástica se transformar em cinética. A soma da energia potencial com a cinética é denominada energia mecânica do corpo.

Num motor elétrico, por exemplo, a energia elétrica é transformada em energia mecânica.

ENERGIA TÉRMICA

Este tipo de energia nos interessa de um modo especial. Todo o sistema de refrigeração se baseia em transporte de energia térmica. Imagine um recipiente contendo um gás. Se fosse possível ver as microscopias moléculas do gás, perceberíamos que elas se movimentam ao acaso com grandes velocidades (as moléculas do ar que respiramos têm uma velocidade média de quase 1.000km/h.).

Esse movimento denominado de agitação térmica se dá ao acaso e em todas as direções. Daí a característica dos gases serem voláteis.



Se aquecermos o gás, a energia que ele recebe é transformada em energia cinética microscópica de suas moléculas. Quanto mais quente o gás ficar, mais rápido suas moléculas se movimentarão. Como vimos, então, a energia térmica é uma forma de energia cinética microscópica. Apesar de o corpo como um todo poder estar parado, ao receber energia térmica, suas moléculas passarão a ter uma maior energia cinética.

MUDANÇA DE ESTADO

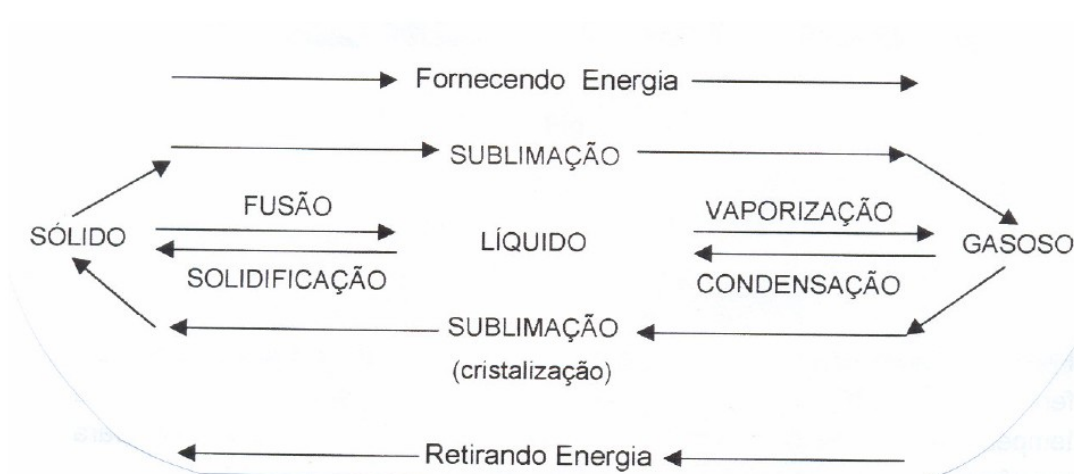
Como já vimos, a matéria é constituída de átomos – moléculas. Quando estas partículas estão ligadas entre si de maneira tão forte que não permitem mudanças

de forma do material, dizemos que ele está no estado sólido. Para desfazer estas ligações, deve-se fornecer energia ao corpo. Assim fazendo, os laços rígidos entre as partículas se enfraquecem e, apesar de o material continuar agregado, elas passam a “escorregar” umas em relação às outras. O material não consegue mais manter uma forma própria, assumindo a do recipiente que o contém. Neste caso, diz-se que o material está no estado líquido.

Se continuar a fornecer energia térmica ao material, as ligações entre as partículas ficam ainda mais fracas e passam a se mover livremente pelo espaço a seu redor. Neste caso, diz-se que o material está no estado de vapor ou gasoso.

| ESTADO | FORMA | VOLUME |
|---------|---------------|---------------|
| Sólido | Própria | Próprio |
| Líquido | Do recipiente | Próprio |
| Gasoso | Do recipiente | Do recipiente |

As mudanças de estado de agregação recebem nomes particulares:

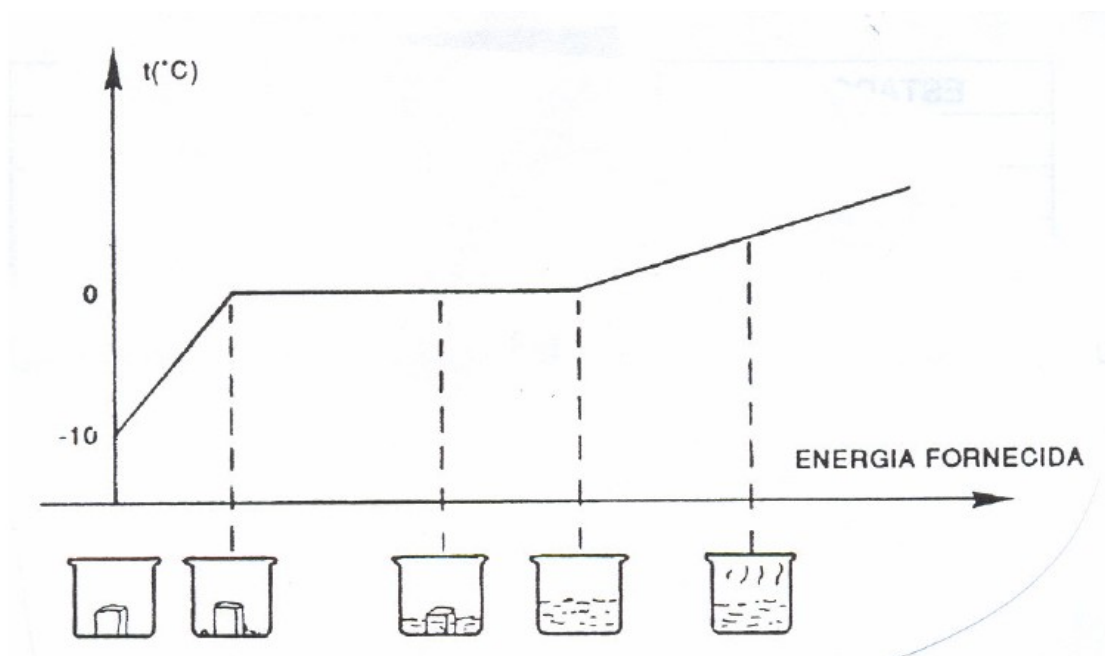


Para cada substância, as mudanças de estado ocorrem em temperaturas fixas, desde que não se altere a pressão.

Se você fornecer energia térmica a um bloco de gelo que estava, por exemplo, a -10°C , notará o gelo aquecer até que sua temperatura chegue a 0°C .

Neste momento, todo fornecimento de energia térmica será usado, não mais para aumentar a temperatura, mas sim para desfazer as ligações que mantêm o gelo sólido.

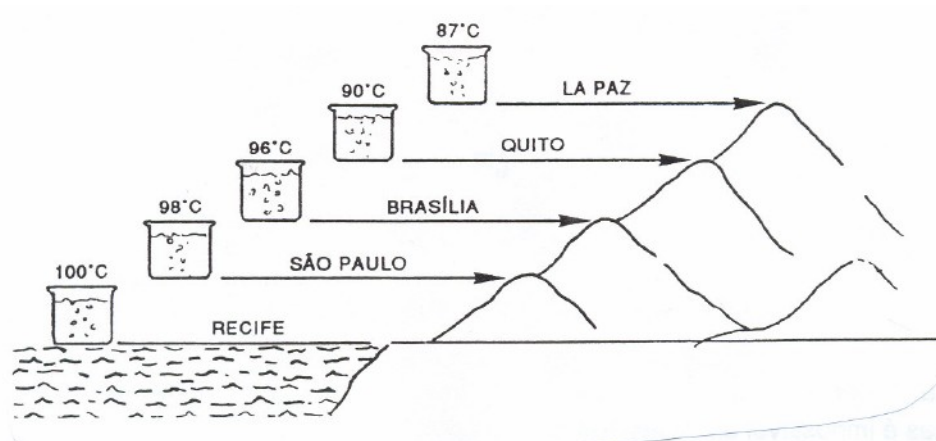
Nota-se que o gelo começa a fundir, mas o fornecimento adicional de energia não resultará em aumento da temperatura. Enquanto todo o gelo não se transformar em água, a temperatura do sistema se manterá em 0°C . Só depois de completada a fusão é que a energia adicional que está sendo fornecida será consumida para o aumento da energia cinética das moléculas da água. A partir daí, a água resultante da fusão começará a aquecer, aumentando sua temperatura.



Fenômeno análogo ocorre na ebulição da água. Ao nível do mar ela começa a ferver aos 100°C e, por mais que se forneça energia ao sistema, a temperatura não passará disso: toda a energia está sendo consumida para transformar a água em vapor.

Se realizar esta experiência em uma cidade com maior altitude, veremos que a temperatura de ebulição se mantém fixa, mas num valor menor.

O macarrão, por exemplo, só cozinha acima dos 94°C . Se tentar cozinhar macarrão em La Paz, na Bolívia, obteremos uma gosma intragável, pois neste local a água ferve 87°C .



CALOR

Quando coloca-se um corpo quente em contato com um corpo frio, nota-se, depois de um certo tempo, que eles atingem um equilíbrio térmico, ou seja, passam a ter a mesma temperatura.

Há uma transferência de energia térmica do mais quente para o mais frio. A energia que, por causa da diferença de temperatura, foi transferida de um corpo para o outro, é denominada calor.

Antes de prosseguir, é importante fazer duas observações:

Calor é energia em trânsito: um corpo pode “receber calor” ou “ceder calor”, mas é impossível um corpo “ter calor”;

Calor vai sempre do corpo de maior temperatura (mais quente) para o de menor temperatura (mais frio). Isso não significa que ele seja obrigado a ir do que tem mais energia para o que tem menos energia.

Se você entrar numa piscina de água fria, o calor irá do seu corpo para a água. No entanto, se somar toda energia cinética das moléculas de água, se verá que o total é bem maior do que a energia cinética das moléculas do seu corpo. O que interessa é que suas moléculas têm maior energia cinética média. Nem sempre o corpo que tem maior temperatura tem maior energia total. O que é maior é a energia média (por molécula).

UNIDADE DE CALOR

Por motivos históricos, apesar de o calor ser uma forma de energia, ele não costuma ser medido em joules, mas sim em calorias.

Calorias (cal)

Uma caloria é definida como sendo a quantidade de calor que deve-se ceder a um grama de água para fazer sua temperatura subir de 1°C. A correspondência entre o joule e a caloria é:

$$1 \text{ caloria} = 4,18 \text{ joules}$$

Quilocaloria (kcal)

Usa-se muito, também, a quilocaloria (kcal), equivalente a 1.000 cal. A quilocaloria é a quantidade de calor que produz a elevação de 1°C na temperatura de 1kg de água.

British Thermal Unit (BTU)

Nos países de língua inglesa é muito freqüente a utilização desta unidade para se medir quantidade de calor. Uma BTU é definida como sendo a quantidade de calor necessária para elevar de 1° F a temperatura de uma libra de água. A correspondência aproximada entre a kcal e a BTU é:

$$1 \text{ kcal} = 4 \text{ BTU}$$

EFEITOS DO CALOR

Pode-se perceber o fato de um corpo estar recebendo ou cedendo calor, através de 2 possíveis efeitos:

- Mudança de temperatura;

- Mudança de estado de agregação.

Quando a troca de calor produz uma alteração na temperatura do corpo, este calor é chamado de calor sensível e pode ser medido pela equação:

$$Q_s = m C \Delta T$$

Onde:

Q_s - Quantidade de calor medida em cal

m - Massa do corpo medida em g

T - Variação da temperatura em °C

C - Calor específico, característico da substância que compõe o corpo, medido em cal/g°C

Quando a troca de calor produz uma alteração no estado de agregação do corpo, este calor é chamado de calor latente e pode ser medido pela equação:

$$Q_L = mL$$

Onde:

Q_L - Quantidade de calor medida em cal

m - Massa do corpo medida em g

L - Calor latente, característico da substância que compõe o corpo e da mudança de fase, medido em cal/g

Com base no conceito de calor latente, existe uma unidade muito usada em refrigeração que é a tonelada de Refrigeração, definida como sendo a quantidade de calor absorvida pela fusão de uma tonelada de gelo inicialmente a 0°C em 24h.

Note que:

$$1 \text{ TR} = 12.000 \text{ BTU/h}$$

LEIS DA TERMODINÂMICA

A termodinâmica é baseada em leis estabelecidas experimentalmente:

A Lei Zero da Termodinâmica determina que, quando dois corpos têm igualdade de temperatura com um terceiro corpo, eles têm igualdade de temperatura entre si. Esta lei é a base para a medição de temperatura empírica.

A Primeira Lei da Termodinâmica fornece o aspecto quantitativo de processos de conversão de energia. É o princípio da conservação da energia e da conservação da massa, agora familiar: "A energia do Universo é constante".

A Segunda Lei da Termodinâmica determina o aspecto qualitativo de processos em sistemas físicos, isto é, os processos ocorrem numa certa direção mas não podem ocorrer na direção oposta. Enunciada por Clausius da seguinte maneira: "A entropia do Universo tende a um máximo".

A Terceira Lei da Termodinâmica estabelece um ponto de referência absoluto para a determinação da entropia, representado pelo estado derradeiro de ordem molecular máxima e mínima energia. Enunciada como "A entropia de uma substância cristalina pura na temperatura zero absoluto é zero". É extremamente útil na análise termodinâmica das reações químicas, como a combustão, por exemplo.

CALORIMETRIA

Calorimetria é a parte da física que estuda as trocas de energia entre corpos ou sistemas, quando essas trocas se dão na forma de calor. Calor significa uma transferência de energia térmica de um sistema para outro, ou seja: pode-se dizer que um corpo recebe calor, mas não que ele possui calor.

CALDEIRAS

Caldeira ou Gerador de vapor é um equipamento que se destina a gerar vapor através de uma troca térmica entre o combustível e a água. Isto é feito por um equipamento construído com chapas e tubos cuja finalidade é fazer com que a água se aqueça e passe do estado líquido para o gasoso, aproveitando o calor liberado pelo combustível que faz com as partes metálicas da mesma se aqueça e transfira calor à água produzindo o vapor.

A finalidade de se gerar o vapor veio da revolução industrial e os meios da época que se tinha era de pouca utilização. O vapor no início aplicava-se na movimentação de máquinas e locomotivas e em turbinas para geração de energia. Com a industrialização de alimentos se fez necessário à cocção, higienização e fabricação de alimentos e alta escala, tornando necessário à evolução das caldeiras.

Atualmente utiliza-se o vapor em laticínios, fábricas de alimentos (extrato de tomate, doces), gelatinas, curtumes, frigoríficos, indústrias de vulcanização, usinas de açúcar e álcool, tecelagem, fábricas de papel e celulose entre outras.

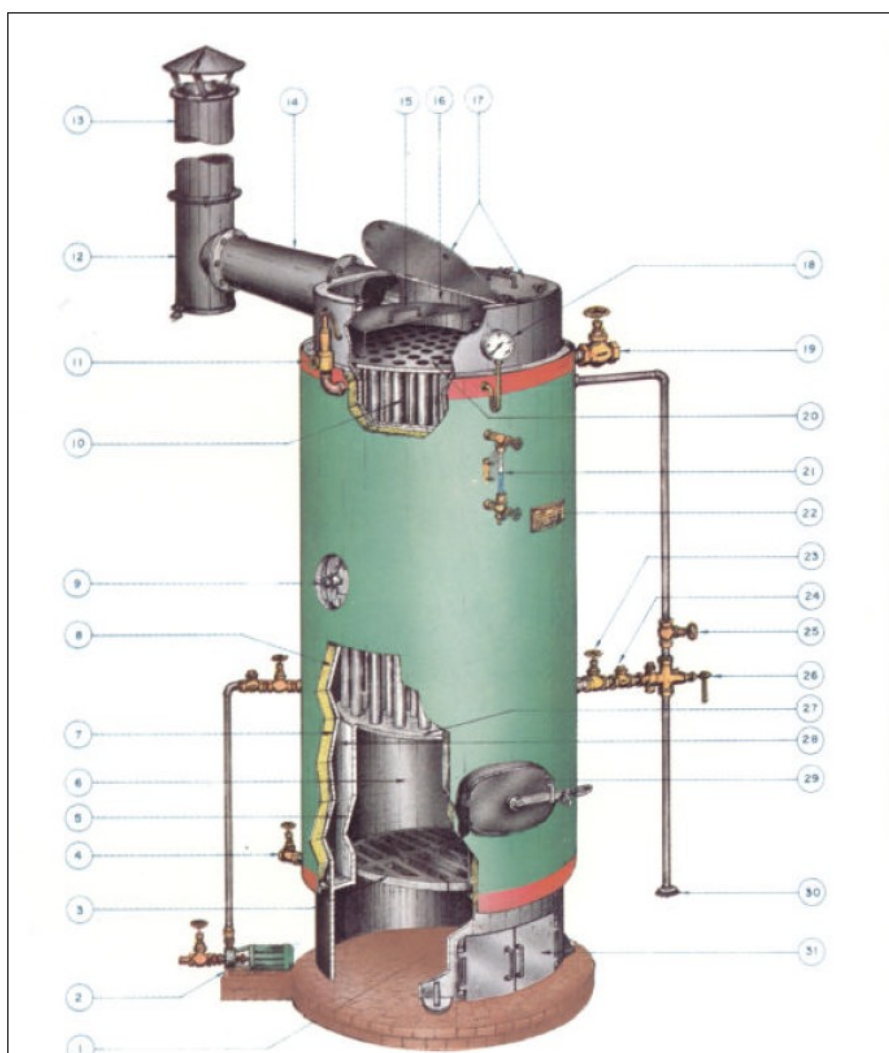
Classificação

Conforme o tipo, as caldeiras podem ser classificadas em:

- Flamotubulares;
- Aquotubulares.

Caldeiras flamotubulares

Neste tipo de equipamento, os gases quentes passam por dentro de tubos, ao redor dos quais está a água a ser aquecida e evaporada. Os tubos são montados à maneira dos feixes de permutadores de calor, com um ou mais passos dos gases quentes através do mesmo. Na figura, podemos ver em corte uma caldeira deste tipo. As caldeiras flamotubulares são empregadas apenas para pequenas capacidades e quando se quer apenas vapor saturado de baixa pressão.



| Descrição | |
|---------------------------------------|---|
| 1. Cinzeiro | 17. Tampas de limpeza |
| 2. Bomba de água | 18. Manômetro com sifão |
| 3. Grelha plana | 19. Válvula principal de vapor |
| 4. Registro de purga | 20. Espelho superior |
| 5. Parede interna | 21. Visor de nível |
| 6. Fornalha imersa | 22. Placa de identificação |
| 7. Casco cilíndrico | 23. Registro de alimentação de água |
| 8. Isolamento térmico (lã de rocha) | 24. Válvula de retenção |
| 9. Tampa de inspeção | 25. Registro de vapor |
| 10. Tubos de gases | 26. Injetor de água a vapor |
| 11. Válvula de segurança com alavanca | 27. Espelho inferior |
| 12. Coletor de fuligem | 28. Câmara de água |
| 13. Chaminé | 29. Tampa de carga |
| 14. Duto de gases | 30. Peneira de sucção |
| 15. Defletor de gases | 31. Porta do cinzeiro (regulador de ar) |
| 16. Coletor de gases | |

Caldeiras aquotubulares

É o sistema mais empregado, como o próprio nome indica, tem circulação de água por dentro dos tubos e os gases quentes envolvendo-os. São usados para instalações de maior porte e na obtenção de vapor superaquecido.

Sendo este tipo o mais importante, veremos com mais detalhes seus componentes.

Componentes

Encontramos nestas caldeiras, geralmente, os seguintes componentes:

- **Câmara de combustão:** A câmara de combustão é a região onde se dá a queima do combustível, com produção dos gases de combustão que fornecem calor à água.
- **Tubos:** Os tubos servem para a circulação de vapor e água dentro da caldeira, a fim de permitir a troca de calor entre os gases quentes de combustão e a água ou vapor.
- **Coletores:** Os coletores são peças cilíndricas, às quais chegam e saem conjuntos de tubos, cuja finalidade, como o próprio nome indica, é coletar água ou vapor.
- **Tubulão:** É um tambor horizontal, situado no ponto mais alto do corpo principal da caldeira, no qual estão conectados, através de tubos, os coletores, que se encontram em níveis diferentes dentro da caldeira.
- **Superaquecedor:** local onde o vapor saturado separado no tubulão passa para obter o seu superaquecimento. As serpentinas do superaquecedor têm suas extremidades ligadas a dois coletores de vapor. O superaquecedor pode situar-se na zona de radiação ou convecção, conforme o grau de superaquecimento para o qual as caldeiras são projetadas.
- **Sopradores de fuligem:** Os sopradores de fuligem são tubos providos de orifícios, inseridos transversalmente aos tubos das serpentinas, em diversos locais da

caldeira. São ligados, externamente à caldeira, ao sistema de vapor. Durante a operação da caldeira, há deposição de fuligem nos tubos, o que dificulta a transferência de calor. De tempos em tempos, então, é injetado vapor através deste sistema com a finalidade de remover a fuligem. Para melhorar a atuação dos mesmos, os sopradores geralmente têm movimento de rotação, atuando assim em maior área.

- Pré-aquecedor de ar: O pré-aquecedor de ar é utilizado para, aproveitando parte do calor dos gases residuais de combustão, aquecer o ar de alimentação das chamas.

- Economizador: No economizador, a água de alimentação passa por uma serpentina ou feixe tubular, a fim de aproveitar também o calor dos gases residuais da combustão, para depois ir, então, ao tubulão já pré-aquecido, o que representa uma economia de energia.

- Alvenaria (refratários): As paredes da caldeira são revestidas internamente de tijolos refratários, resistentes a altas temperaturas, que protegem as partes metálicas estruturais da caldeira contra deterioração por alta temperatura e produzem homogeneização da temperatura por reflexão do calor das chamas.

- Queimadores: variam de acordo com o combustível usado.

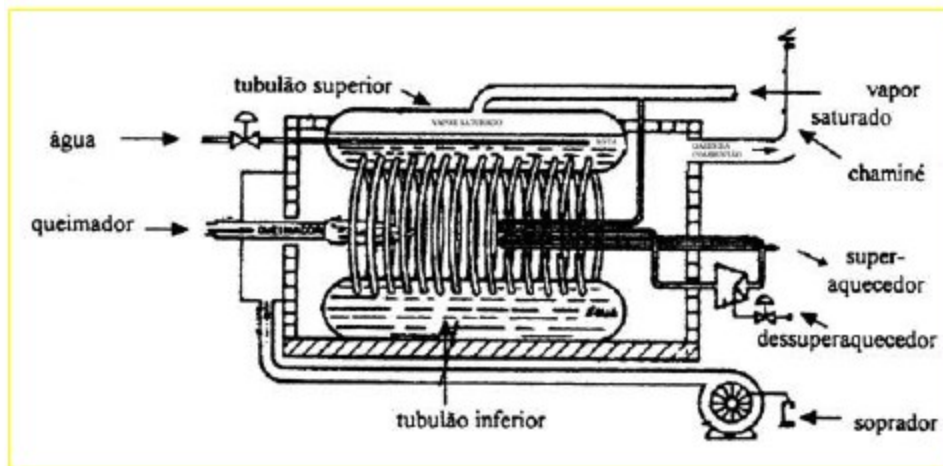
- Ventiladores: Os ventiladores têm a finalidade de movimentar o ar de combustão até os queimadores na câmara de combustão e os gases da câmara de combustão até a chaminé. Existem dois tipos funcionais de ventiladores: de tiragem forçada, que apanha o ar atmosférico e o envia através dos dutos da caldeira para os queimadores e o de tiragem induzida, instalado na saída da caldeira, que succiona os gases de combustão de dentro da câmara e os conduz à chaminé.

- Chaminé: A chaminé é a parte que conduz os gases de combustão à atmosfera (em altura suficientemente grande para que não venham a ser danosos ao meio ambiente).

- **Válvulas:** têm como função interromper ou regular a passagem de um fluido.

Tipos de Válvulas:

- **De retenção:** colocadas nas linhas de vapor e óleo para evitar o refluxo;
- **De extração de fundo (dreno):** permite a retirada de impurezas da água que se depositam no fundo do tambor de vapor;
- **De descarga lenta:** tem como função assegurar uma perfeita vedação no sistema;
- **Solenóide:** comandada eletricamente, abre ou fecha a passagem de um fluido;
- **De alívio:** para retirar o excesso de pressão no aquecedor de óleo das caldeiras;
- **De segurança:** são válvulas especiais, instaladas no tubulão, cuja finalidade é dar saída ao vapor no caso deste atingir uma pressão superior a o máximo admitido pelas condições de segurança operacional.



Conforme a pressão de trabalho e a produção de vapor requerido, pode-se classificar as caldeiras em:

- caldeiras de baixa pressão: geralmente são caldeiras flamotubulares e têm baixa produção de vapor;

- caldeiras de média pressão: podem ser tanto caldeiras flamotubulares como aquatubulares;
- caldeiras de alta pressão: geralmente são caldeiras aquatubulares e têm alta produção de vapor.

Corrosão

É um dos entraves mais sérios em sistemas geradores de vapor, pois pode ocasionar acidentes, perda de material e parada do equipamento para a manutenção.

A corrosão é um processo eletroquímico capaz de se desenvolver em meio ácido, neutro ou alcalino, na presença ou não de aeração.

Tipos de Corrosão

- corrosão uniforme;
- corrosão localizada;
- corrosão por metais dissimilares;
- corrosão por tensão (“stress”);
- corrosão por aeração diferencial devido à formação de depósitos;
- corrosão por ácido carbônico.

Causas, Mecanismos e Conseqüências

Corrosão Uniforme e Localizada: Ocorrem em qualquer seção de qualquer gerador de vapor. A principal causa de ocorrência deste tipo corrosão deve-se a existência de áreas anódicas e catódicas sob diferença de potencial; tais áreas podem se formar nas seguintes condições:

- anomalias na composição granular ou metálica;
- impurezas no metal;

- células de corrosão por aeração diferencial;
- tensão no metal ("stress");

Corrosão por Metais Dissimilares: Ocorre como uma corrosão localizada, devido à diferença de potencial existente entre dois metais diferentes em contato direto numa água contendo sais dissolvidos (eletrólitos), sendo que o metal menos nobre se comporta como um ânodo e se corrói. A severidade de tal corrosão pode ser minimizada pelo uso de metais dissimilares de potenciais de eletrodo próximos e pela separação física destes metais pelo uso de um isolador. Tal fenômeno ocorre mais comumente na seção pós-caldeira de geradores de vapor, operando nas mais variadas pressões.

Corrosão por Tensão ("stress"): Pode ser devida a falhas no projeto da caldeira e de um tratamento térmico inadequado das chapas e tubos metálicos; por exemplo, pontas de tubos de caldeira, nas quais nenhum cuidado relativo a expansão ou contração dos mesmos tenham sido tomadas, se tornam áreas sob "stress" e se corroem anodicamente; outras áreas suscetíveis à corrosão são regiões de alta transferência de calor em zonas de combustão, tubos soldados, tubos mal laminados e com fendas, extremidade de tubos repuxados, tubos incrustados, etc..

Corrosão pela Formação de Depósitos: Entre as possíveis causas da corrosão pode-se citar a presença de tensões localizadas e concentrações salinas sob depósitos; neste caso, o mecanismo provável de corrosão é devido a formação de células de aeração diferencial, onde a área anódica se situa sob os depósitos.

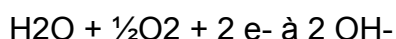
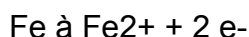
Corrosão por Ácido Carbônico: A solubilização de gás carbônico do ar, bem como a decomposição pelo calor de carbonatos e bicarbonatos e a presença de contaminantes na água de alimentação da caldeira, libera o dióxido de carbono que é arrastado para a seção pós-caldeira, juntamente com o vapor saturado, baixando em consequência o pH do condensado formado e atacando a camada protetora de

óxido de ferro, provocando uma corrosão grave e generalizada nas linhas de vapor e retorno do condensado.

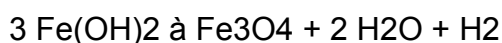
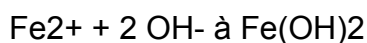
O hidrogênio ácido acelera o processo corrosivo, provocando uma corrosão uniforme.

Os contaminantes principais são ácidos fracos e sais que se hidrolisam, produzindo o ion H^+ .

Meio Neutro ou Básico Aerado

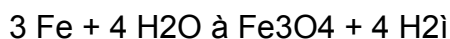


Para temperaturas acima de $60^\circ C$, ocorrem as reações:



Meio Não Aerado

Na ausência de oxigênio, em temperaturas superiores a $220^\circ C$, o ferro é termodinamicamente instável como segue:



Normalmente, o material de construção dos tubos da caldeira é o aço carbono e mesmo sendo instável a temperaturas acima de $220^\circ C$, a camada uniforme de magnetita (Fe_3O_4) formada é altamente protetora. Caso os tubos não estejam protegidos, ocorrerá uma corrosão localizada do tipo pite ou alveolar. Estes tipos de falhas nos tubos geralmente ocorrem nas zonas mais quentes da caldeira.

Outros Fatores que provocam Corrosão

Entre outros fatores que podem causar ou acelerar o processo corrosivo, pode-se citar:

a - **Oxigênio dissolvido:** O oxigênio é um agente corrosivo, principalmente nas tubulações superiores das caldeiras fogotubulares (flamotubulares) com reaquecedores e linhas de condensado (processo corrosivo por aeração, onde a região com menor teor de oxigênio é anódica, sendo corroída).

b - **Teores elevados de Cloro:** Em concentrações altas, reagem rapidamente com o ferro.

c - **Presença de Cobre e Níquel:** sua presença é responsável pela formação de pilhas galvânicas, principalmente oxidando o ferro pela redução dos óxidos de cobre e de níquel e formando magnetita.

d - **Sólidos em Suspensão:** Estes se depositam facilmente, de forma não aderente, em regiões estagnantes e de alta transferência de calor, produzindo os tipos de corrosão já mencionados.

e - **Choques Térmicos:** Devido às condições de trabalho, a temperatura dos tubos da caldeira pode variar consideravelmente e em consequência das dilatações térmicas diferenciais pode ocorrer um rompimento entre a camada protetora de magnetita e o aço, provocando em decorrência corrosões localizadas.

f - **Combustível Residual:** As impurezas deste podem causar problemas de corrosão nas seções de superaquecedor, economizador e pré-aquecedor de ar de um sistema gerador de vapor.

Alguns Métodos de Prevenção de Corrosão

Para um controle preventivo da mesma, é indispensável que uma corrosão ligeira ocorra, pois, desta forma, favorece-se a formação de um filme protetor de óxido metálico (Fe_3O_4 ou magnetita).

Entre as medidas usuais, pode-se citar:

- a. desmineralização da água por meio de resinas catiônicas e aniônicas.
- b. desaeração mecânica da água por intermédio de desaeradores trabalhando com vapor em contracorrente.
- c. desaeração química da água usando sulfito de sódio catalisado ou hidrazina.
- d. correção do pH da água para a faixa alcalina, a fim de evitar corrosão ácida e acelerar a formação do filme de óxido de ferro protetor.
- e. tratamento do vapor condensado para neutralizar ácido carbônico e eliminar ataque ao ferro pelo cobre e níquel.

f. resfriamento lento da caldeira, quando a mesma é retirada de operação, a fim de evitar choques térmicos.

g. em caldeiras de baixa pressão, com temperaturas inferiores a 200°C, pode-se eliminar a desmineralização e desaeração em muitos casos não dispensando, todavia, o uso de água.

BIBLIOGRAFIA

Allan Sven Sarev. Apostila de Máquinas Térmicas I Características e Tratamento da Água para GERADORES DE VAPOR. UNIJUI

Nilson Ribeiro Leite, Renato de Abreu Militão - ENGENHEIRO DE SUPRIMENTOS DISCIPLINA DE FABRICAÇÃO E MONTAGEM DE CALDEIRAS E TROCADORES DE CALOR. **TIPOS E APLICAÇÕES DE CALDEIRAS** agosto/setembro de 2008 Escola Politécnica – Depto. Enga. Mecânica .