

5 – Máquinas Térmicas: Conversão de energia térmica em mecânica

Neste capítulo, trataremos do assunto central da termodinâmica clássica, que é a conversão de energia térmica em mecânica. Vale lembrar que Carnot é considerado o pai da termodinâmica e devotou seu trabalho ao entendimento das máquinas a vapor que impulsionavam a revolução industrial da época. Além disso, o conteúdo abordado aqui é fundamental para entendermos os motores dos automóveis, as turbinas dos aviões, os processos das termelétricas, dentre várias outras tecnologias onipresentes.

5.1 – O que é energia térmica?

Qual é a diferença entre um copo de água quente e um copo de água fria? Por ser uma manifestação específica da energia, a energia térmica é menos controversa em sua definição do que a energia em si. É comum lermos nos livros que energia térmica de um corpo é decorrente da agitação das partículas (íons, moléculas, etc) que o compõe. Esse modelo de energia térmica tem um poder explicativo muito grande como veremos nesse capítulo e no próximo sobre as leis da termodinâmica. Quando dizemos agitação, estamos associando energia térmica ao movimento dessas partículas, isto é, estamos dizendo que energia térmica é uma forma de energia cinética. Dependendo das características do corpo em questão, essa energia pode se manifestar na forma de translação das partículas (predominante nos gases monoatômicos), rotação das moléculas (presente também nos gases poliatômicos) e vibracional (gases poliatômicos e parte da energia térmica dos sólidos¹). Quando consideramos as vibrações, significa que a energia não é puramente cinética, mas existe uma componente potencial (muitos modelos vibracionais consideram sistemas análogos ao “massa e mola”).

Considere uma bola de baseball. De acordo com a discussão do parágrafo anterior existem duas formas de se fornecer energia cinética a essa bola. Podemos lançá-la de forma que ela adquira translação e rotação, ou podemos aquecê-la. Note que no primeiro caso, desprezando efeitos secundários como resistência do ar, troca de calor com a mão do arremessador etc, a bola se move, mas permanece em equilíbrio térmico com o ambiente. Das duas formas, a bola estará imbuída de energia cinética. Mas somente no segundo caso consideramos é essa energia cinética se manifesta da forma térmica. Qual é a diferença? Costumamos dizer que a característica térmica de um corpo está associada ao caráter aleatório, ou randômico do movimento das partículas do sistema. Por outro lado, quando a bola é lançada, todas as partículas do sistema apresentam um movimento coerente de translação e rotação. Isso faz com que a bola possa ser tratada como “um corpo”. Isso é o que fazemos em mecânica, onde, em muitos casos uma bola em movimento pode ser reduzida a “um ponto material de massa m ”. Já no caso da manifestação térmica, cada partícula se move por si de forma aleatória. Uma bola de baseball possui muitas partículas. Estamos falando de moles de partículas, e não temos condições de seguir uma-a-uma. Por isso, a física térmica faz tratamentos estatísticos.

¹ Sendo a outra parte atribuída de forma bem simplificada ao “gás de elétrons” do sólido.

No entanto, nem todo modelo de física térmica precisa ser estatístico. Como vimos, a termodinâmica surgiu na época em que o conceito de calórico ainda era prevalente e se utilizava parâmetros macroscópicos como temperatura, pressão, volume etc. A física estatística é uma área moderna da ciência, que veio na esteira dos trabalhos de personalidades como Joule e Kelvin e teve participação de cientistas como Boltzmann, Gibbs e Einstein. De fato, antes de publicar seus famosos trabalhos em relatividade e quântica, Einstein publicou na área de física estatística e chegou a trocar correspondências com Boltzmann. Um aspecto importante da agenda científica de muitos cientistas da época era demonstrar a natureza corpuscular da matéria, uma vez que as evidências da existência do átomo eram poucas (clivagem de cristais, movimento browniano, os experimentos em torno da hipótese de Avogadro, por exemplo) e essa questão estava longe de ser consenso. Não por acaso, evidências dessa essência corpuscular da natureza surgiram em grande número no início do séc. XX, com os trabalhos da mecânica quântica como o tratamento da radiação térmica de Planck, o modelo atômico de Bohr (na esteira de Rutherford), o efeito fotoelétrico e o modelo estatístico para o movimento browniano, ambos de Einstein.

Por fim, vale recordar, como vimos no Cap. 3, que muitos fenômenos térmicos podem estar relacionados com a radiação eletromagnética, no contexto da radiação térmica.

Nesse capítulo, focaremos nas manifestações macroscópicas da física térmica e trataremos a abordagem microscópica de forma qualitativa. Mais sobre esse assunto será tratado no Cap. 6.

5.2 – O Aproveitamento da Energia Térmica

Iniciaremos aqui uma jornada que partirá de uma bexiga inflada, passará pela máquina a vapor e chegará às turbinas de aviões e motores de automóveis.

Quem pratica esporte, como futebol ou ciclismo, anda de carro ou ônibus, possui um bom conhecimento tácito relacionado com movimento, inércia e energia cinética e suas inter-relações. Por outro lado, a familiaridade tácita das pessoas da inter-relação entre calor, pressão e movimento não é desenvolvida no mesmo nível. É por isso que a mecânica é mais intuitiva que a física térmica. Nesse sentido, propomos que o leitor faça um experimento muito simples, que será muito útil para a construção conceitual das máquinas térmicas, mesmo que tacitamente.

Infle uma bexiga até o tamanho aproximado de uma maçã, de forma que você possa segurar a bexiga praticamente envolvendo-a, como na Fig. 5.1a. Acenda o fogão, com cuidado para não se queimar, e segurando a bexiga posicione-a sobre o fogo a uma distância de aproximadamente meio metro (50 cm).

Você observará e sentirá três efeitos: o calor proveniente da chama do fogão, o aumento do volume da bexiga assim como o aumento da pressão das paredes da bexiga contra sua mão. Isso equivale a sentir “na pele” o que descreve a lei dos gases ideais:

$$PV = nRT \quad (5.1)$$

onde P , V e T são a pressão do ar, o volume e a temperatura do interior da bexiga respectivamente, n é o número de moles, R é a constante dos gases. Na prática, a quantidade nR representa a quantidade de ar restrita dentro da bexiga, que é fixa. Uma vez que a bexiga recebe calor da chama, a temperatura do ar aumenta. Como consequência, tanto o volume quanto a pressão aumentam. Esses efeitos podem ser vistos e sentidos no experimento.

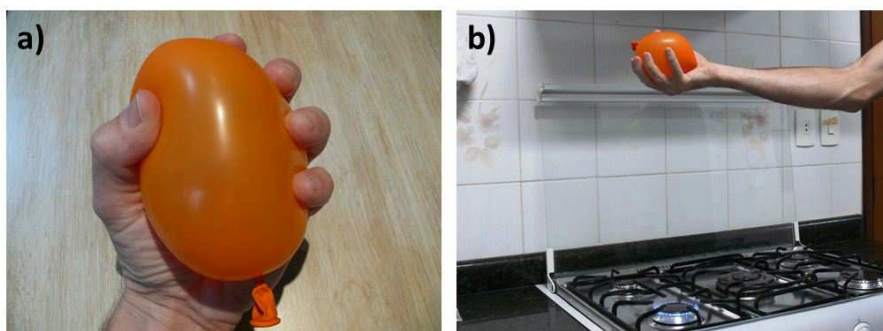


Fig. 5.1: Fotos ilustrativas do experimento da bexiga no fogão.

Remova a bexiga da região sobre a chama e o efeito contrário é observado: a temperatura diminui, assim como o volume e a pressão. Repita o procedimento quantas vezes forem necessárias até adquirir familiaridade com o fenômeno.

Vemos, nesse experimento, como uma variação de temperatura de um fluido (gás) pode gerar força (pressão) e movimento (alteração de volume). Essa é a essência das máquinas térmicas.

O experimento do fogão correlaciona bem as variáveis macroscópicas associadas à lei dos gases ideais. Mas o que ocorre no ponto de vista microscópico? Por simplicidade, a Fig. 5.2 ilustra a diferença de um gás monoatômico confinado em uma bexiga em baixa e alta temperatura. Segundo a interpretação estatística, no caso mais quente, as partículas apresentam colisões mais energéticas e frequentes, e isso é sentido como aumento da pressão na mão e também como um aumento do volume.

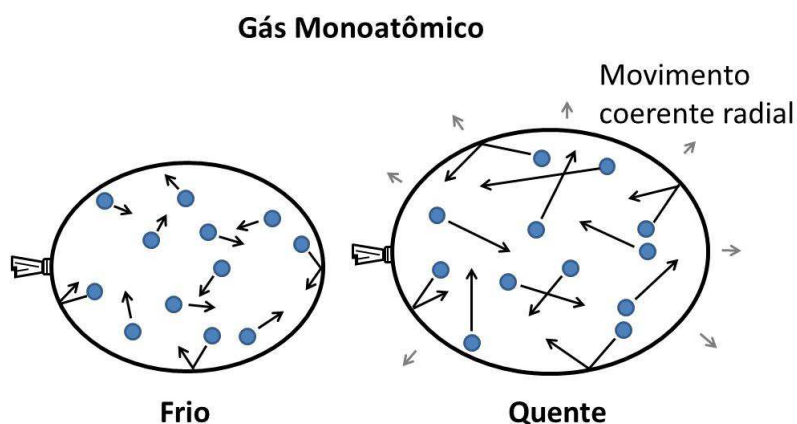


Fig. 5.2: Representação microscópica das partículas de um gás confinado em uma bexiga nos estados frio e quente.

É importante notar um efeito muito interessante e sutil do ponto de vista conceitual nesse experimento da bexiga: uma variação no comportamento aleatório na transição do estado frio para o quente resultou em um movimento coerente radial das paredes da bexiga no sentido de expandir seu volume. Note que esse movimento acontece em todas as direções. Essa transição entre a manifestação aleatória (térmica) e o movimento coerente (mecânico) pode ser acentuada se, ao invés de usarmos uma bexiga, usarmos um sistema composto por um cilindro e um pistão (êmbolo). Nesse sistema, ilustrado na Fig. 5.3, o movimento coerente resultante é limitado pela geometria do sistema a ocorrer apenas em uma direção e sentido, acentuando a amplitude desse movimento.

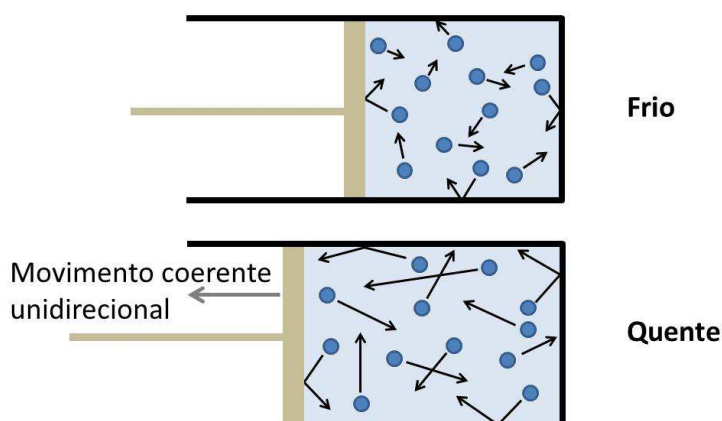


Fig. 5.3: De forma análoga ao sistema do gás confinado na bexiga, o aumento da energia térmica das partículas do gás resulta em colisões mais frequentes e energéticas com as paredes do cilindro e do pistão. O movimento do pistão ocorre em apenas uma direção e sentido. A essência de uma máquina térmica está representada nessa figura e ela será referenciada várias vezes ao longo do texto.

Em contraste com o processo expansivo, no experimento com a bexiga você pôde notar que no momento em que ela é afastada do fogo, a temperatura diminui, bem como o volume e a pressão exercida contra sua mão. Nesse sentido, é fácil de perceber que um processo repetitivo de aquecimento e resfriamento do sistema cilindro-pistão resultaria em um movimento recíprocante (“vai-vem”) do pistão, como ilustrado na Fig. 5.4.

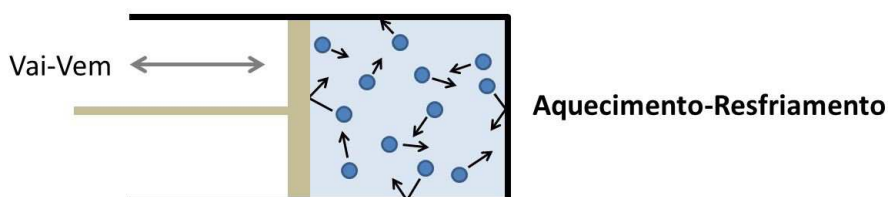


Fig. 5.4: Representação esquemática do movimento recíprocante resultante do processo de aquecimento e resfriamento do sistema cilindro-pistão.

Vemos então, de uma maneira bastante simples, como podemos obter um movimento recíprocante a partir de um processo térmico cíclico de aquecimento e resfriamento. Note que, enquanto o movimento mecânico for desejado, o processo térmico cíclico deve ser continuado. Essa é uma característica de grande parte das máquinas térmicas. Sendo assim,

podemos perceber a grande relevância dos chamados ciclos térmicos na termodinâmica. Nesse capítulo veremos vários desses ciclos com mais detalhes.

Uma máquina térmica realizada da forma como descrita aqui implicaria em aquecer e resfriar todo o sistema composto por cilindro, pistão e gás a cada ciclo, o que resultaria em uma máquina bastante ineficiente. De fato, as primeiras máquinas térmicas², desenvolvidas por Savery e Newcomen no séc. XVIII sofriam dessa deficiência. No fim, o que importa é o aquecimento e o resfriamento do gás, que é bem menos massivo do que o restante do sistema e a energia térmica usada para aquecer o cilindro e o pistão não são aproveitados para a geração do movimento mecânico³. Mais adiante nesse capítulo, veremos os desenvolvimentos realizados com diferentes abordagens para melhorar essa eficiência.

5.3 – Do movimento recíprocante ao movimento linear

Frequentemente se diz que uma das principais funções da ciência e tecnologia é entender e controlar os fenômenos naturais em proveito do ser humano. Na sessão anterior, vimos como obter um movimento recíprocante a partir de um processo cíclico de aquecimento e resfriamento. Veremos nessa sessão como podemos tirar proveito disso.

O movimento recíprocante em si é muito útil, sendo largamente utilizado para tecnologias de bombeamento de fluídos gasosos e líquidos, por exemplo. Com a simples adição de elementos como válvulas, o movimento recíprocante pode resultar em um movimento em um único sentido (ou a atuação de uma força em um único sentido) destes fluídos. Note como as bombas comumente usadas para encher bolas e pneus de bicicleta são compostas basicamente por um cilindro com um pistão. A Fig. 5.5 mostra a bomba desenvolvida por Thomas Newcomen no séc. XVIII e a bomba cabeça de cavalo ainda muito usada na indústria petrolífera.

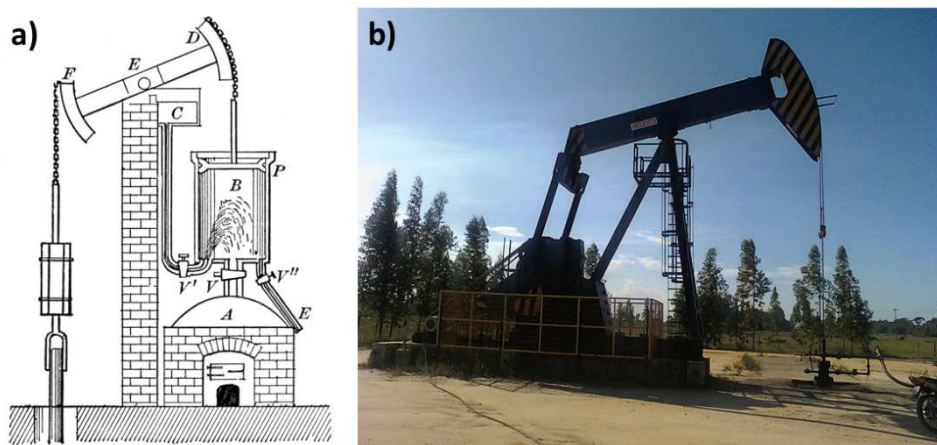


Fig. 5.5: a) Diagrama esquemático da máquina térmica de Thomas Newcomen de 1712, muito utilizada para o bombeamento de água de minas de carvão. b) Foto de uma bomba cabeça de cavalo (*pumpjack*) da indústria petrolífera.

² No caso eram máquinas a vapor, que possuem um funcionamento um pouco distinto do que descrito até agora, mas possuindo basicamente os mesmos princípios. Detalharemos sobre o caso das máquinas a vapor nas próximas páginas.

³ Note que, quando construímos uma máquina térmica simples, passo a passo, é natural que passemos pela sequência de limitações conceituais que apareceram historicamente.

Além das válvulas, existem outras formas de se transformar um movimento recíprocante em um movimento em sentido único. A Fig. 5.6 mostra uma forma de converter movimento recíprocante em um movimento circular, muito utilizada em diferentes tecnologias, desde as mais históricas como as locomotivas a vapor como mais atuais, como os automóveis.

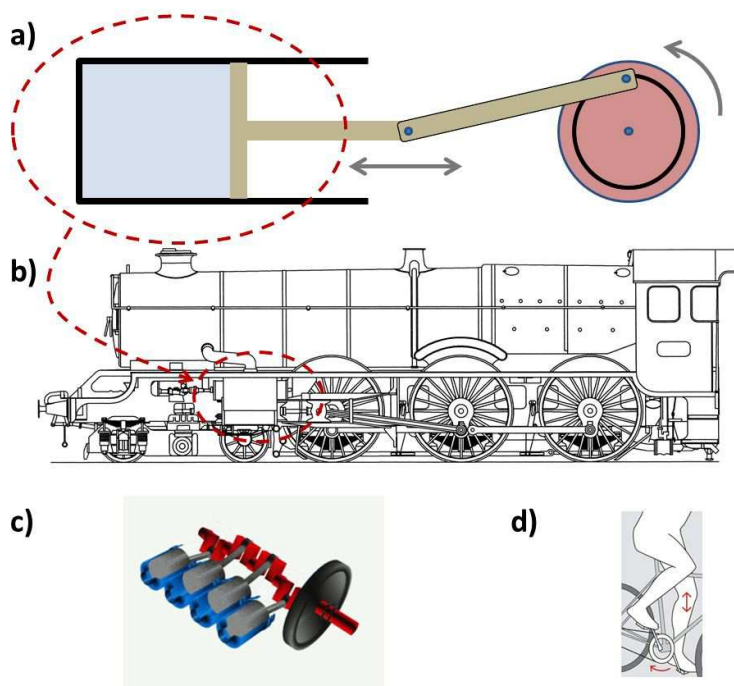


Fig. 5.6: **a)** Diagrama esquemático da conversão de movimento recíprocante em circular. **b)** O conceito ilustrado em (a) utilizado na locomotiva a vapor. **c)** Representação do mesmo conceito como ocorre nos motores de automóveis, onde estão representados quatro cilindros, o virabrequim e o volante de inércia (disco preto). **d)** O conceito ilustrado na atividade de andar de bicicleta.

Nesse contexto, é importante destacar a relevância de um conceito matemático envolvido nas funções trigonométricas seno e cosseno. Estas funções conectam os movimentos oscilatórios a movimentos circulares de uma forma fundamental. Tanto movimentos circulares quanto oscilatórios, tais como o pêndulo e o sistema massa-mola (os chamados osciladores harmônicos), podem ser descritos por meio destas funções (Fig 5.7).

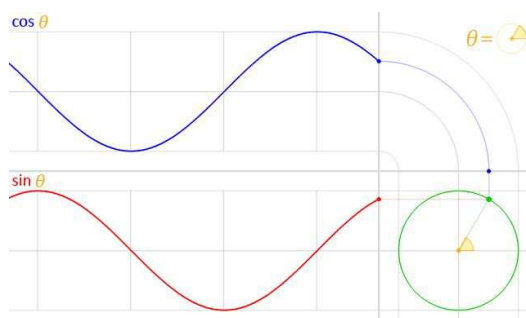


Fig. 5.7: Diagrama ilustrativo da relação entre as funções trigonométricas seno e cosseno com o movimento circular. Veja o gif animado em https://en.wikipedia.org/wiki/Sine#/media/File:Circle_cos_sin.gif

Há, porém, uma sutileza em relação aos mecanismos que transformam movimento recíproco em movimento circular ilustrados na Fig. 5.6, que é especialmente evidente na Fig. 5.6a. Note que o processo é simétrico com relação ao sentido de rotação da roda, de forma que poderia ser tanto no sentido anti-horário (como indicado na figura) como no sentido horário. Do ponto de vista mecânico isso pode ser problemático, pois nos pontos de máximo e mínimo deslocamento do pistão, o movimento circular pode ser revertido. Para prevenir isso, todos os motores recíprocos se utilizam de um elemento inercial denominado volante de inércia.



Fig. 5.8: Foto de uma roda de oleiro. Note o volante de inércia na parte inferior.

O volante de inércia já era muito utilizado em civilizações antigas e seu princípio de funcionamento e aplicabilidade permanecem atuais. A Fig. 5.8 mostra uma roda de oleiro, instrumento usado para trabalhar argila na confecção de potes e jarros. Essa arte milenar permaneceu praticamente inalterada até hoje, onde a argila é moldada sobre uma mesa girante que pode ser observada na parte superior do equipamento mostrado na imagem. Por meio de um eixo, essa mesa é conectada a uma grande roda maciça localizada na parte inferior que é impulsionada com os pés de forma a adquirir o movimento rotacional desejado. A roda inferior possui duas funções importantes: ela serve de plataforma para permitir a ação dos pés e, por ser maciça, contribui para que o movimento seja razoavelmente uniforme mesmo que os impulsos realizados pelos pés do operador sejam intermitentes. A roda inferior é um volante de inércia, que é fisicamente interpretado como um acumulador de momento angular e energia cinética.

Voltemos à discussão com relação ao sistema mostrado na Fig. 5.6a, onde discutimos um potencial problema de uma possível reversão do sistema nos pontos de máximo e mínimo deslocamento do pistão. É fácil de perceber que um a ação inercial de um volante de inércia associado a esse dispositivo garantiria que este sempre gire no mesmo sentido.

Sendo assim, podemos concluir que o volante de inércia tem duas funções principais nos sistemas de conversão do movimento recíprocante em circular:

- Garantir que o movimento circular permaneça em um único sentido
- Impor um ritmo razoavelmente homogêneo do mecanismo

A Fig. 5.9 mostra a presença do volante de inércia em dois motores com aplicações distintas. O volante de inércia também está representado em preto no sistema mostrado na Fig. 5.6c e de fato está presente nos motores dos carros, caminhões, ônibus etc.

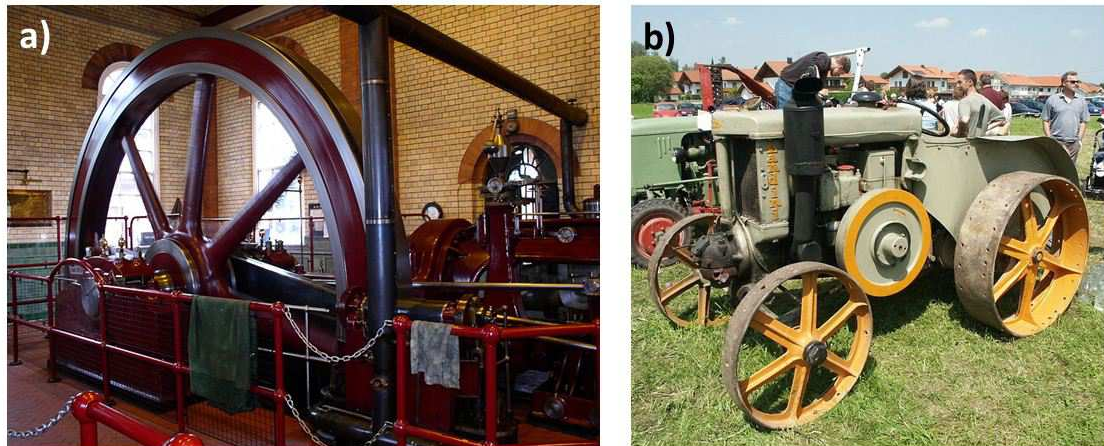


Fig. 5.9: Os volantes de inércia estão bem evidentes nas fotos acima. **a)** uma estação de bombeamento e **b)** um trator Landini antigo.

5.4 – Aprimorando a máquina térmica

Com o que vimos até agora, já temos todas as condições básicas para construir uma máquina térmica simples, baseado no aquecimento e resfriamento cíclico de um sistema cilindro-pistão, e transformar esse movimento recíprocante em um movimento circular (e até mesmo linear aproveitando-se o movimento circular). Mas, como já foi discutido, esse sistema simples seria bastante ineficiente, assim como eram ineficientes as primeiras máquinas de Thomas Savery do séc. XVIII (Fig. 5.5a), principalmente porque desperdiçamos muita energia térmica aquecendo e resfriando o sistema cilindro pistão como um todo. Como vimos, o importante é que o gás do interior do sistema seja aquecido e resfriado. Ao longo da história, diferentes propostas foram implementadas para diminuir esse problema.

Imagine se pudéssemos ter um sistema cilindro pistão mais alongado, onde uma parte do cilindro permaneceria sempre quente e outra parte sempre fria. Bastaria apenas mover o gás sucessivamente da parte quente para a fria para que obtivéssemos o efeito sucessivo de expansão e contração deste. A Fig. 5.10 mostra esse conceito de uma forma mais esquemática. Na Fig. 5.10a podemos observar dois cilindros distintos, porém conectados de forma que a pressão dentro deles é a mesma. O cilindro da esquerda é chamado de cilindro de força, pois nele está o pistão a partir do qual o trabalho da máquina pode ser aproveitado. O cilindro da direita é chamado de cilindro de deslocamento onde o aquecimento e resfriamento do gás é realizado. Na parte da direita do cilindro de deslocamento há uma chama que mantém essa extremidade quente. A parte da esquerda não é aquecida e possui um sistema que dissipa a

parte do calor que provém da chama por meio da condução térmica do cilindro, mantendo essa porção fria. Na situação mostrada na Fig. 5.10a, há um êmbolo (em marrom claro) posicionado na região fria do cilindro, fazendo com que a maior parte do volume do gás esteja na parte quente. Nessa situação, o gás adquire energia térmica da chama de forma que sua temperatura se eleva, gerando expansão e o consequente movimento do pistão para fora do cilindro. Quando isso ocorre, o êmbolo então é deslocado para a região quente do cilindro de deslocamento (como mostrado na Fig. 5.10b) fazendo com que a maior parte do gás esteja na região fria, causando a contração do gás e ocasionando o movimento do pistão para dentro⁴. Note que nesse sistema, apenas o gás é aquecido e resfriado ciclicamente. As regiões quente e fria do cilindro de deslocamento permanecem nessa condição permanentemente, não havendo o custo energético de aquecer e resfriar o cilindro (e o pistão) a cada ciclo, tornando essa proposta mais eficiente do que a mostrada na Fig. 5.4.

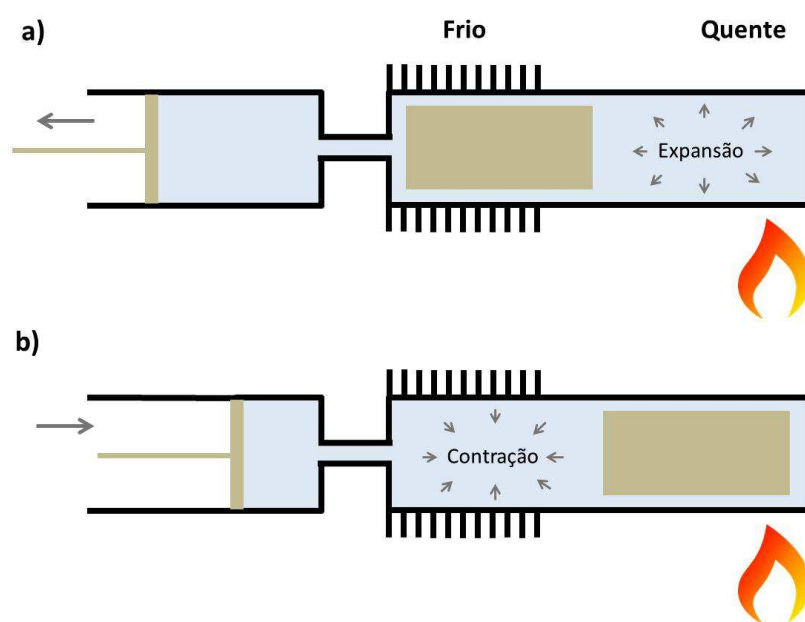


Fig. 5.10: Aprimoramento da máquina térmica inicialmente proposta na Fig. 5.4. Nessa máquina, apenas o gás de trabalho sofre aquecimento e resfriamento, e não há o desperdício de energia térmica com o aquecimento e resfriamento sucessivo do sistema cilindro pistão.

5.5 – O motor de Stirling

Conceitualmente falando, a Fig. 5.10 representa o motor de Stirling que funciona de acordo com o ciclo de Stirling (a descrição dos ciclos em detalhes será feita mais adiante). Como material suplementar deste livro, veja um vídeo no *youtube*⁵ onde o movimento recíproco pode ser observado em uma implementação didática do conceito da Fig. 5.10.

A Fig. 5.11 mostra uma representação esquemática mais técnica de uma configuração possível de um motor de Stirling. Um exercício interessante é localizar os elementos presentes

⁴ O mecanismo com o qual este êmbolo é movido de um lado para outro é uma técnica desimportante nesse momento.

⁵ https://www.youtube.com/watch?v=0hidN_R5tq0 Motor de Stirling desenvolvido pelo aluno Lucas Gonçalves Abex como atividade complementar da disciplina Bases Conceituais da Energia.

na Fig. 5.10 no esquema mostrado na Fig. 5.11. Uma das características principais do motor de Stirling é que o gás de trabalho fica sempre confinado no interior do motor e este é ciclicamente aquecido e resfriado para a obtenção de trabalho mecânico.

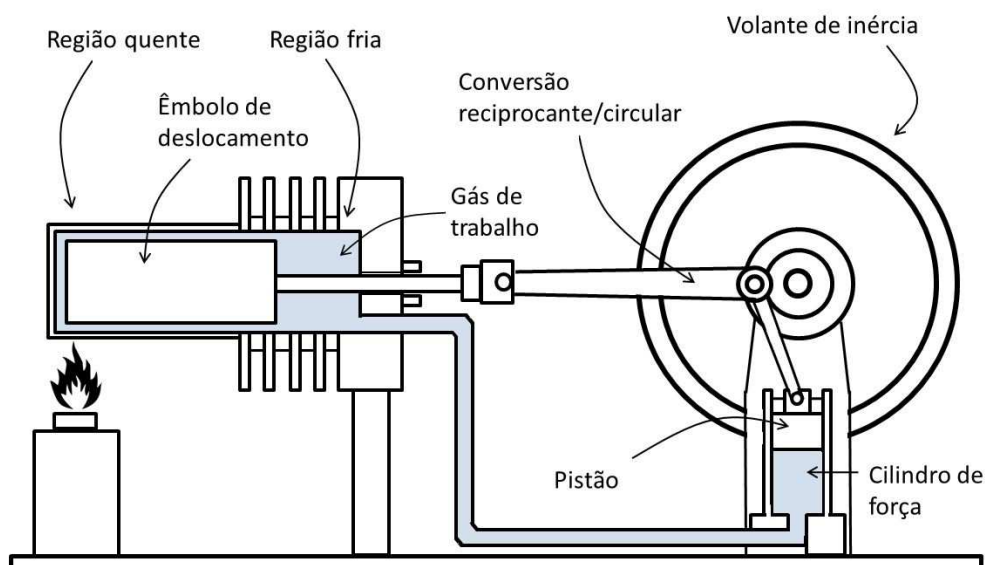


Fig. 5.11: Representação esquemática de um motor de Stirling. Essa é uma das configurações possíveis, denominada “gama”.

A Fig. 5.12 mostra uma foto de um motor de Stirling com a configuração semelhante ao esquema mostrado na Fig. 5.11.

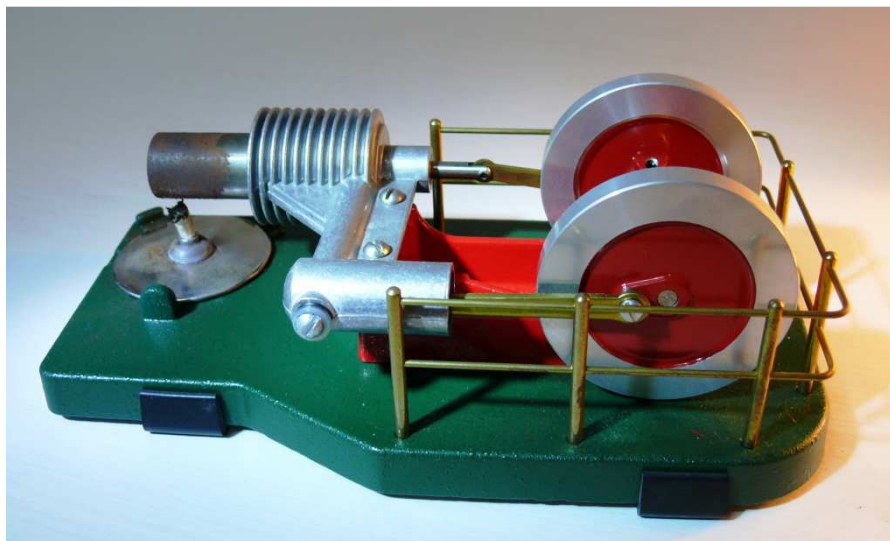


Fig. 5.12: Fotografia de um motor de Stirling gama utilizado para demonstração e fabricado pela Solar Engines com objetivo de demonstração.

A configuração mostrada na Fig. 5.11 é apenas uma de uma grande variedade, e é denominada “gama” por ter o cilindro de força separado do cilindro de deslocamento. Escolhemos esta para discutir o motor de Stirling por motivos didáticos. A Fig. 5.13 mostra

outras configurações comuns denominadas “alfa” e “beta”. O cilindro de força separado, presente na configuração gama, resulta em um volume específico maior, resultando em uma taxa de compressão um pouco menor. Ou seja, a configuração gama tende a ser menos eficiente do que as configurações alfa e beta, mais utilizadas em situações práticas. Note que os movimentos do pistão de força e de deslocamento estão atrelados de forma específica ao eixo de rotação do volante de inércia. Esse ajuste é feito de forma que imediatamente antes do processo de aquecimento, o gás de trabalho é comprimido, sofrendo a expansão máxima imediatamente antes do processo de resfriamento. O resultado é uma aumento na eficiência do motor.

No motor de Stirling, a fonte de calor é externa à câmara onde ocorre a expansão do gás de trabalho. Essa característica costuma ser designada como “motor de combustão externa”, como mostra claramente a Fig. 5.11. Isso traz uma vantagem ao motor de Stirling, pois muitos combustíveis diferentes podem ser utilizados em muitos casos sem nenhuma adaptação do dispositivo. Na prática, não é necessário haver uma chama, bastando haver o aquecimento da extremidade do cilindro de deslocamento. Há propostas de se utilizar a radiação solar para essa finalidade.

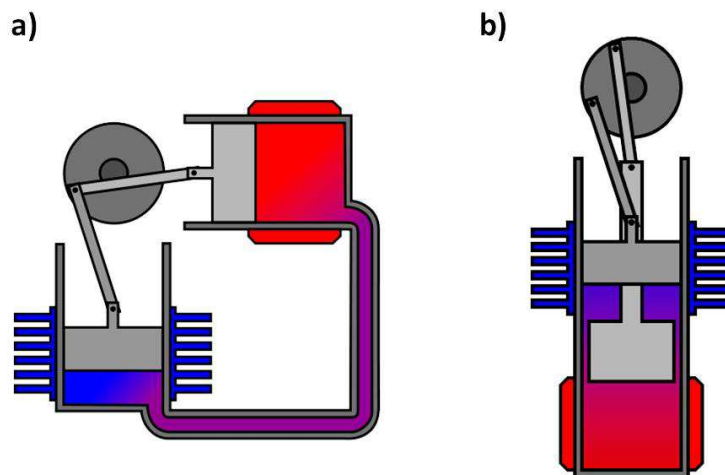


Fig. 5.13: Outras configurações comuns do motor de Stirling a) alfa e b) beta.

Outras considerações sobre o motor de Stirling serão discutidas mais adiante no contexto comparativo com outros motores e ciclos. Em resumo, do que foi visto até agora sobre o motor de Stirling, podemos destacar os seguintes aspectos principais:

- Podemos identificar uma “parte quente” e uma “parte fria”
- É um motor de combustão externa
- Alta versatilidade na utilização de fontes de energia térmica
- O fluido permanece sempre confinado no interior do cilindro
- O fluido permanece sempre no estado gasoso

5.6 – Turbinas

Até agora discutimos a implementação de uma máquina térmica por meio de um sistema “cilindro-pistão”. Isso, como vimos, dá a origem a um motor reciprocante. Existe, porém outro sistema capaz de obter trabalho mecânico a partir do deslocamento de um fluido que é denominado turbina⁶. A maior parte das pessoas associa esse nome aos ruidosos motores que equipam os aviões comerciais. Mas o que é uma turbina?

A palavra “turbina” vem do latim “turbo” que significa “vórtice”. Pode-se dizer que uma turbina aproveita do movimento circular de um elemento, normalmente equipado com aletas ou pás coletoras, para obter trabalho mecânico a partir do movimento de um fluido. A Fig. 5.14 mostra dois exemplos de turbinas antigas, na forma de uma roda d’água e um moinho de vento. Esses dois moinhos não são classificados como máquinas térmicas⁷, mas ilustram bem o conceito de uma turbina.



Fig. 5.14: Exemplos de turbinas antigas. **a)** a roda d’água e **b)** o moinho de vento.

Da Fig. 5.3 até a Fig. 5.11 procuramos construir conceitualmente, passo-a-passo um motor reciprocante térmico. Por motivos didáticos ilustramos essa construção com o motor de Stirling. Mais adiante veremos outros casos de motores reciprocantes, como os motores de automóveis. Aqui nessa sessão, construiremos conceitualmente uma turbina térmica de forma análoga.

A Fig. 5.15 mostra um diagrama esquemático que procura ilustrar o conceito de uma turbina térmica de maneira semelhante à proposta feita na Fig. 5.3 para os motores reciprocantes. Nessa figura aproveitamos o mesmo cilindro da Fig. 5.3, porém substituímos o pistão (êmbolo) pelas lâminas de uma turbina (como as pás de um cata-vento) de forma que estas mantenham certo volume de gás confinado. Sabemos que este confinamento não é efetivo como no caso do êmbolo, mas mesmo assim podemos considerar que o gás está

⁶ A maior parte das máquinas térmicas pode ser classificada como reciprocantes ou turbinas, embora haja máquinas com características intermediárias, como as quasiturbinas ou o motor de Wankel.

⁷ Embora discutimos no Cap. 2, como o ciclo hidrológico e o princípio dos ventos estão relacionados com a energia térmica do Sol.

confinado entre o cilindro e as lâminas de certa forma. Ao aquecermos o gás, ele expandirá de forma que terá que passar pelas lâminas da turbina fazendo-a girar. Novamente vemos como a geometria do sistema é importante fazendo com que a expansão de um gás, que em princípio ocorre em todas as direções, resulte em um fluxo em uma direção específica. Claro que a efetividade de uma máquina como essa seria bastante limitada, mas a Fig. 5.15 tem como objetivo principal ilustrar o conceito de uma turbina térmica. Assim como fizemos como o motor recíprocante, podemos acrescentar elementos ao dispositivo de forma a melhorar sua efetividade.

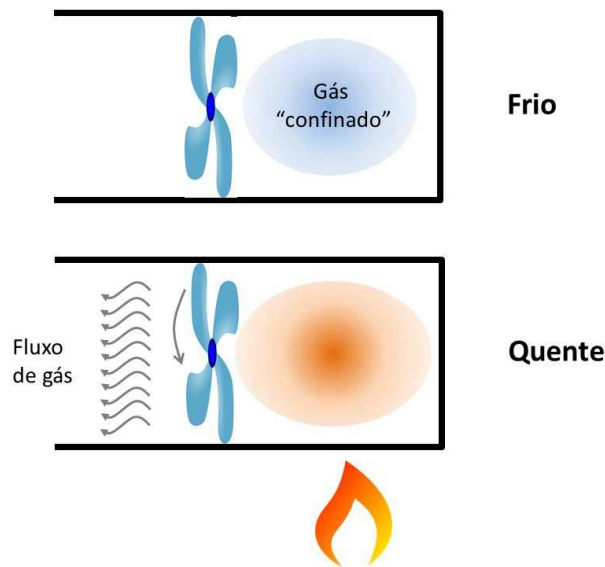


Fig. 5.15: Diagrama rudimentar ilustrando o conceito de uma turbina térmica em analogia ao diagrama ilustrado na Fig. 5.3 em relação ao motor recíprocante.

Vimos que uma turbina procura extrair trabalho mecânico a partir de um fluxo contínuo de um fluido. No caso da Fig. 5.15, esse fluxo de gás ocorre somente enquanto a temperatura do gás se eleva, e não temos condições de elevar essa temperatura indefinidamente. Portanto, o próximo passo seria acrescentar uma forma de haver um fluxo contínuo na turbina. A Fig. 5.16 apresenta uma forma de se fazer isso.

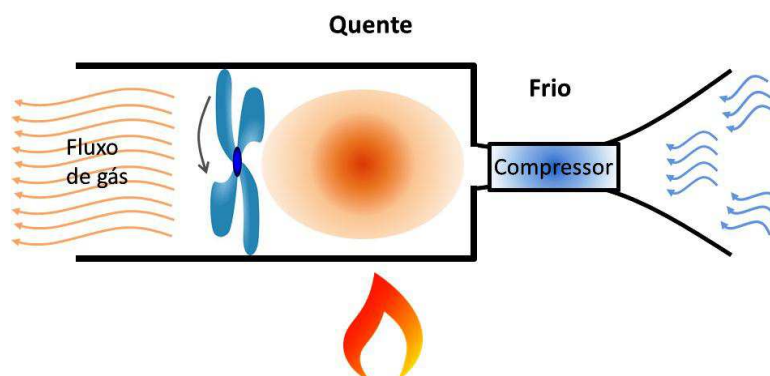


Fig. 5.16: Diagrama conceitual de uma turbina térmica onde há a introdução de um compressor de forma a viabilizar um fluxo contínuo de gás de trabalho.

Nesse caso, temos um compressor que tem a função de captar o gás do ambiente (ar, por exemplo) e introduzi-lo na região de alta temperatura da turbina. Não é necessário aqui especificar o mecanismo do compressor, apenas o consideramos como um dispositivo que “bombeia” o ar de fora para dentro do cilindro. Note que o compressor é necessário, não sendo suficiente haver apenas uma abertura. Isso porque a região de alta temperatura é também uma região de alta pressão e o gás tenderia a escapar pela abertura ao invés de adentrar o cilindro na ausência do compressor.

Alguém poderia objetar, dizendo que é necessário fornecer energia para movimentar o compressor, o que seria um contrassenso em uma máquina projetada para obtenção de energia. De fato, a atuação do compressor consome energia, e é esse tipo de fator, além de outros, que faz com que as máquinas térmicas não sejam 100% eficientes. Mas em uma máquina bem desenhada, a presença da fonte de energia (a chama do desenho), que aquece a porção quente do cilindro, garante que o trabalho mecânico obtido na turbina é maior do que a energia utilizada no compressor.

Restringimo-nos aqui apenas em uma discussão mais conceitual de uma turbina térmica. Nas outras sessões discutiremos sobre as implementações mais práticas desse conceito.

5.7 – A máquina a vapor

Quando mencionamos “máquina a vapor” normalmente nos vem a imagem da Maria-Fumaça em nossas mentes. As locomotivas a vapor foram as locomotivas mais comuns até a segunda guerra mundial. Historicamente, as máquinas a vapor foram muito importantes na Europa possibilitando a revolução industrial, bombeando água de minas, e dessa forma aumentando a produção de carvão mineral, facilitando o transporte com as locomotivas e embarcações a vapor e movimentando a indústria.

Porém engana-se quem pensa que a relevância da máquina a vapor se restringe ao passado. Atualmente, turbinas a vapor são responsáveis por cerca de 80% da produção da energia elétrica no mundo. O Brasil é uma exceção nesse caso, dependendo das hidrelétricas prioritariamente. Em todo caso, entender o funcionamento de máquinas a vapor é relevante e atual.

Em princípio, a máquina a vapor se assemelha ao motor de Stirling em vários aspectos: trabalho mecânico é obtido a partir do aquecimento e expansão de um fluido, podemos identificar a “parte quente” e a “parte fria” da máquina, a combustão é externa e várias fontes de energia térmica podem ser usadas, desde combustíveis fósseis, energia solar e até nucleares.

Porém há diferenças importantes. A principal delas é que o fluido usado é o vapor, que na maior parte dos casos é o vapor d’água. Existe um motivo forte para isso.

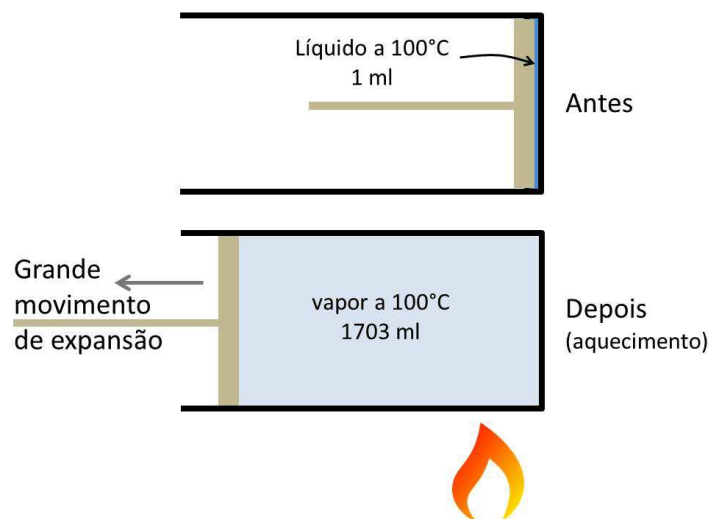


Fig. 5.17: Essência de funcionamento da máquina a vapor. A pressão de uma atmosfera, 1 ml de água se transforma em 1703 ml de vapor, resultando em um grande aproveitamento da expansão do fluido de trabalho. Uma máquina térmica poderia ser construída executando ciclos de evaporação e condensação da água presente no cilindro.

Nas sessões anteriores vimos que as máquinas térmicas se aproveitam da expansão (contração) de um gás quando este é aquecido (resfriado) para aproveitar a energia mecânica gerada. Nesse sentido, vamos retornar ao sistema ilustrado na Fig. 5.3, mas nesse caso, na situação inicial em que o fluido está frio, vamos substituir o gás por um pequeno volume de água, 1 ml por exemplo, no estado líquido. Para efeito de argumento, vamos supor que esse volume de água esteja a uma temperatura $T = 100^{\circ}\text{C}$ ao nível do mar⁸. Na mesma abordagem da Fig. 5.3, vamos fornecer energia térmica para esse sistema. Sabemos que a água, nessas condições, inicia o processo de evaporação, mantendo-se a 100°C até que toda a massa seja transformada em vapor. Esse processo é ilustrado na Fig. 5.17 onde podemos notar que, devido a transformação de fase, de líquido para gasoso (vapor), a expansão volumétrica é muito grande, atingindo 3 ordens de grandeza (1703 vezes, no caso calculado para essas condições). Isso, mantendo-se o sistema a 100°C . Pode-se obter expansões ainda maiores elevando-se a temperaturas em torno de 560°C , que são as temperaturas típicas das máquinas a vapor atuais.

Da mesma forma que a Fig. 5.3 e a Fig. 5.15, a Fig. 5.17 apenas ilustra o conceito essencial de uma máquina a vapor. Na prática, a implementação é feita de outras formas para garantir aplicabilidade e eficiência. Uma máquina executando o processo como descrito na Fig. 5.17 seria pouco eficaz⁹.

⁸ Ou seja, a uma pressão de 1 atm, para que possamos fazer comparações com parâmetros de referência.

⁹ Lembre-se que na sessão 5.2 mencionamos que a máquina de Thomas Newcomen era pouco eficaz, pois era necessário aquecer e resfriar todo o sistema “cilindro-pistão-fluido” a cada ciclo. Apesar de termos citado essa limitação da máquina de Newcomen enquanto caminhávamos conceitualmente na direção do motor de Stirling, ela era de fato uma máquina a vapor seu funcionamento possui aderência com o conceito apresentado na Fig. 5.17. No contexto da discussão apresentada na sessão 5.2, o argumento é válido e foi incluído por motivos didáticos.

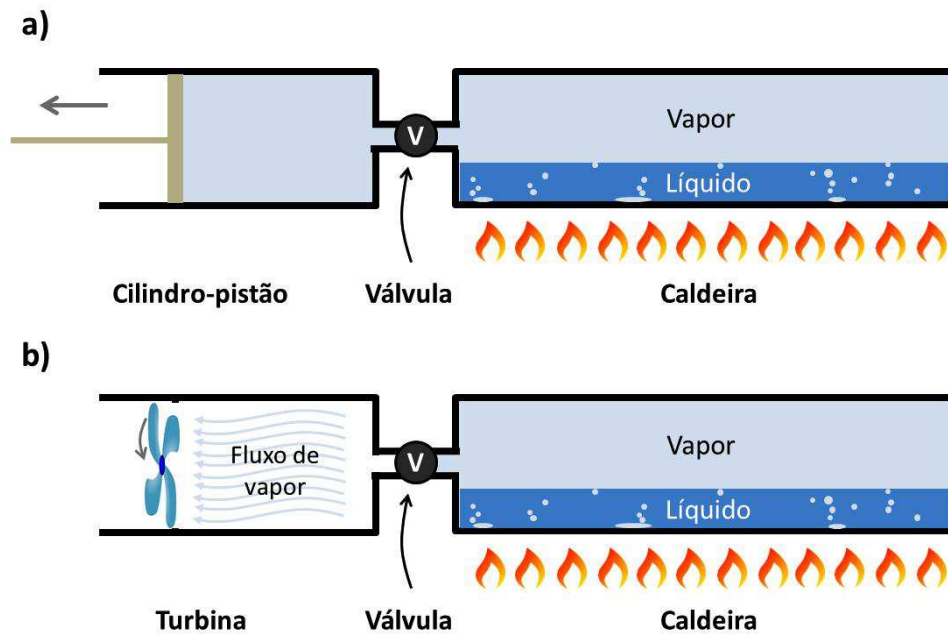


Fig. 5.18: Aprimoramento conceitual da máquina a vapor, separando-se a parte onde se obtém energia mecânica do reservatório onde ocorre a transformação de fase. Dois casos são apresentados: a) onde a energia mecânica é obtida por meio de um sistema cilindro-pistão, utilizado nas locomotivas a vapor e b) onde a energia mecânica é obtida por meio de uma turbina.

Podemos trabalhar conceitualmente na ideia apresentada na Fig. 5.17 de forma a aproximarmos um pouco mais das máquinas a vapor atuais. Note que, quando fizemos isso no caso da Fig. 5.3, caminhando na direção do motor de Stirling, um dos primeiros passos foi separar o cilindro onde o gás é aquecido e resfriado do cilindro de força, o que poderia ser feito analogamente na Fig. 5.17 da forma apresentada na Fig. 5.18.

Nesse caso, separamos a parte onde se obtém energia mecânica, que pode ser tanto pelo sistema cilindro-pistão como por uma turbina, do reservatório onde ocorre a transformação de fase, que podemos chamar de caldeira. Este último pode conter uma quantidade considerável de água, portanto havendo possibilidade de grande aproveitamento da expansão de volume do fluido. Por isso, normalmente se inclui uma válvula para que o fluxo de vapor possa ser controlado.

Apesar de a caldeira poder armazenar uma quantidade razoável de água, ela é finita e os sistemas da Fig. 5.18 não representam um processo contínuo, embora já caminhem nessa direção em relação à fig. 5.17. A fig. 5.19 apresenta um sistema onde novos elementos foram adicionados de forma a garantir um ciclo completo, conhecido como ciclo de Rankine, garantindo que a máquina a vapor funcione enquanto houver uma fonte de calor para a caldeira. Para isso é necessário repor na caldeira a água transferida para a turbina na forma de vapor. Assim, após expandir pela turbina e gerar trabalho mecânico, o vapor é condensado e armazenado na forma líquida e em baixa pressão, e esta mesma água é reconduzida à caldeira. Mas isso não é tão simples, pois a caldeira apresenta uma alta pressão associada a sua alta temperatura, sendo necessário um compressor para bombear a água do reservatório de baixa pressão para a caldeira. Note que, naturalmente, chegamos ao mesmo conceito da turbina

ilustrado na fig. 5.16, onde podemos identificar uma “parte quente” e uma “parte fria” do dispositivo. O compressor se encontra na parte fria e a expansão do fluido ocorre na parte quente. A fig. 5.19 ilustra as máquinas térmicas responsáveis pela geração de 80% da energia elétrica no mundo¹⁰, que são conhecidas aqui no Brasil como termelétricas.

Quando discutimos sobre turbinas, foi levantado o argumento de que o compressor (bomba) consome energia, diminuindo a eficiência da máquina. Há uma sutileza muito importante na máquina a vapor, que está representado na Fig. 5.19: a bomba trabalha com a água no estado líquido que possui um volume da ordem de 1000 vezes menor do que volume do vapor expandido na turbina (claro que depende com o que é tomado como comparação, se é antes ou depois da turbina). Por isso, o trabalho realizado pela bomba é desprezível quando comparada ao trabalho obtido pela turbina. Como foi dito, muito da máquina térmica depende da perspicácia da sua concepção e construção.

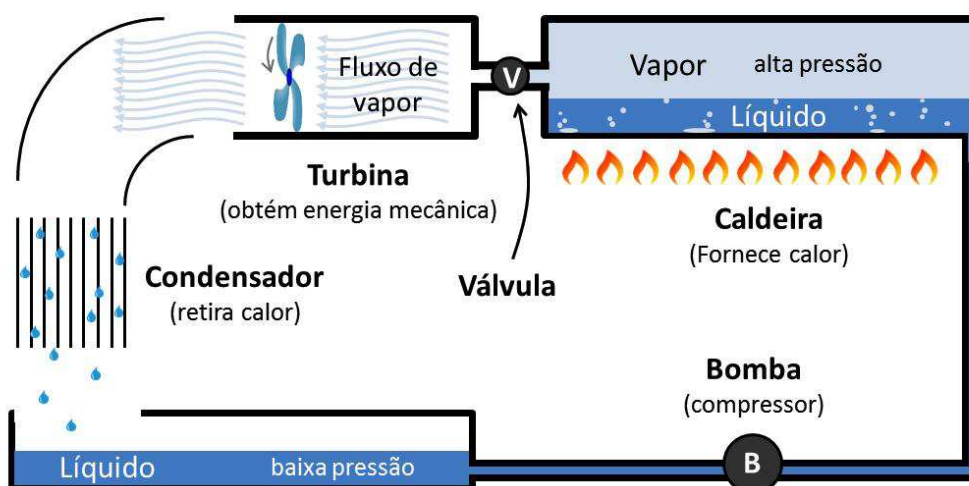


Fig. 5.19: Os elementos básicos de uma máquina a vapor. O ciclo representado aqui é conhecido como ciclo de Rankine.

O funcionamento de uma usina termelétrica, representado na Fig. 5.20 pode ser descrito da seguinte forma: o carvão é conduzido por uma esteira (14) a partir de um reservatório externo e moído em um pó fino por um moedor (16). Ali ele é misturado com ar pré-aquecido proveniente do soprador de ar de combustão (20). A mistura de carvão e ar é forçada em alta pressão dentro da câmara de combustão (caldeira) onde é queimada rapidamente. Água de alta pureza flui em tubos alinhados verticalmente na caldeira, onde é convertida em vapor, e é conduzida pela câmara de separação de líquido/vapor de forma que apenas o vapor siga. O vapor então é conduzido pelo superaquecedor (19), onde a temperatura e a pressão se elevam para 200 atm e 570 °C respectivamente. Essa temperatura já é suficiente para que os tubos apresentem um fraco brilho avermelhado¹¹. De lá, o vapor é enviado para a turbina de alta pressão (11), o primeiro estágio de um sistema composto de 3

¹⁰ No caso, a energia mecânica obtida da turbina é convertida em elétrica por meio de um gerador. Veremos como isso é feito em outro capítulo.

¹¹ Veremos radiação térmica no Cap. 3.

turbinas. Uma válvula reguladora de pressão (10) permite o controle manual e automático do regime de operação da turbina. O vapor sai da turbina de alta pressão com a temperatura e pressão diminuídas, sendo conduzida de volta para o reaquecedor (21). O vapor reaquecido é enviado para a turbina de pressão intermediária (9), e de lá passa diretamente pela turbina de baixa pressão (6). O vapor que sai desse estágio está apenas ligeiramente acima do ponto de condensação e é levado para o condensador (8) onde em contato térmico com água fria bombeada da torre de resfriamento (1), e é transformada em água líquida novamente, criando uma zona de baixíssima pressão na outra extremidade do conjunto de turbinas, auxiliando o processo de extração de trabalho mecânico. A água passa então pela bomba de extração do condensado (7) e conduzida para o desaerador (12), de onde vai para a bomba de alimentação (28) e pré-aquecida, primeiro pelo aquecedor de alimentação (13) depois pelo economizador (23), antes de entrar na câmara de separação líquido/vapor. A água de resfriamento do condensador é pulverizada dentro da torre de resfriamento (1), criando uma nuvem de vapor antes de ser bombeada de volta para o condensador (8) no ciclo de resfriamento da água.

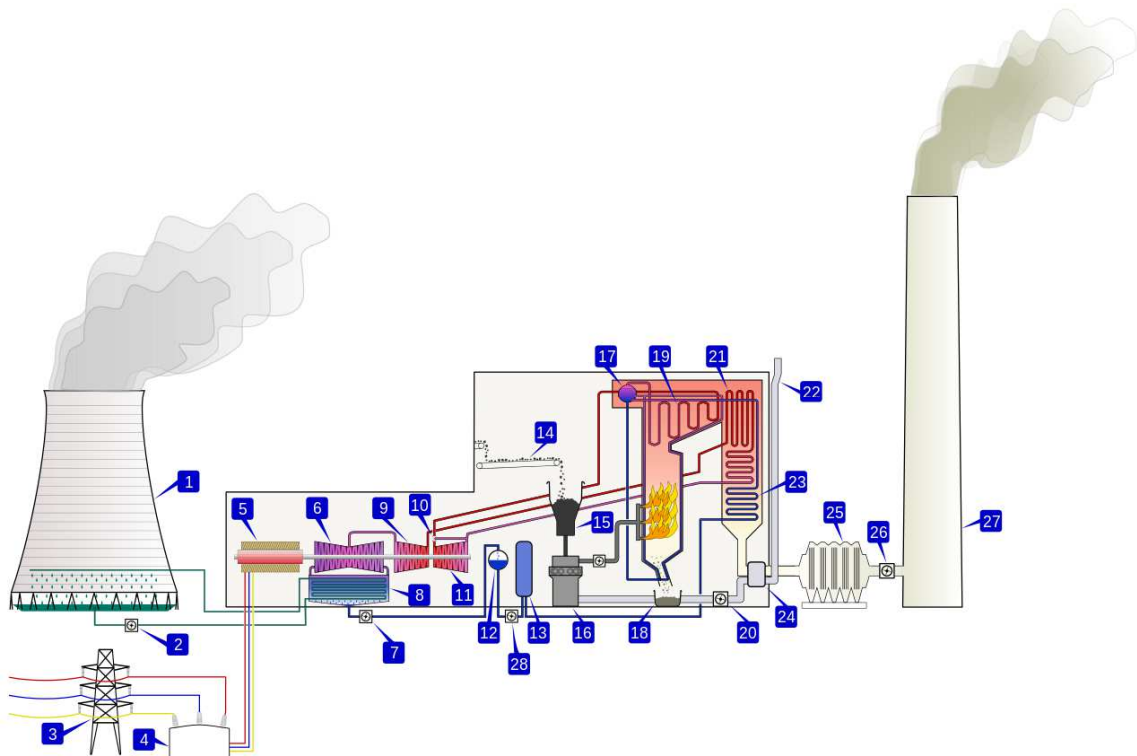


Fig. 5.20: Diagrama esquemático de uma estação térmica para produção de energia elétrica, ou seja, uma termelétrica, movida a carvão neste caso. Identificação das partes: 1. Torre de resfriamento. 2. Bomba de água de resfriamento do condensador. 3. Linha de transmissão (trifásico). 4. Transformador (trifásico). 5. Gerador elétrico (trifásico). 6. Turbina de baixa pressão. 7. Bomba de extração do condensado. 8. Condensador. 9. Turbina de pressão intermediária. 10. Válvula reguladora de pressão. 11. Turbina de alta pressão. 12. Desaerador. 13. Aquecedor de alimentação. 14. Esteira de alimentação de carvão. 15. Coletor de carvão. 16. Moedor de carvão. 17. Câmara separação líquido/vapor. 18. Coletor de cinzas. 19. Superaquecedor. 20. Soprador de ar de combustão. 21. Reaquecedor. 22. Tubulação de admissão de ar. 23. Economizador. 24. Préaquecedor de ar. 25. Precipitador. 26. Soprador de corrente de ar induzida. 27. Chaminé. 28. Bomba de alimentação da caldeira.

O trabalho mecânico extraído do sistema de turbinas é utilizado para mover um gerador elétrico (5), convertendo energia mecânica em elétrica. Um transformador (4) converte essa energia em uma forma adequada para a transmissão pela rede elétrica (3).

O gás resultante da queima na caldeira é arrastado pelo soprador de corrente de ar induzido (26) até o precipitador eletrostático (25) e depois é liberado pela chaminé (27).



Fig. 5.21: a) Usina termelétrica Drax na Inglaterra. b) Técnicos montando uma turbina a vapor.

5.8 – Turbinas a gás

Como um exemplo do cotidiano, podemos dizer que as turbinas a gás são as responsáveis pela propulsão dos grandes aviões e dos caças de guerra, gerando um ruído forte e bastante característico. Mas elas também podem ser utilizadas para propulsão de outros veículos como helicópteros, tanques de guerra e até mesmo carros, além da produção de energia elétrica. Embora seu princípio de funcionamento seja simples, compreender sua aplicabilidade e eficácia envolve algumas sutilezas.

O objetivo de uma turbina de avião é gerar propulsão, ou seja, uma gerar força que “empurre” o avião para frente. Considere a situação, por exemplo, em que uma bexiga é inflada e solta em seguida. O jato de ar que sai do bico da bexiga gera a propulsão do voo descontrolado que segue. A física da propulsão dos aviões é semelhante. O objetivo das turbinas é gerar um jato de gás bastante intenso para trás, gerando como reação, um impulso ao avião para frente. Daí o termo “propulsão a jato”.



Fig. 5.22: A propulsão a jato gerada pela bexiga quando inflada e solta.

No caso das turbinas a gás, essa propulsão é gerada termicamente. Vamos retornar ao conceito de turbina apresentado na Fig. 5.15 e reapresentar essa figura de uma forma um

pouco mais contextualizado para essa sessão, onde as duas aplicações principais das turbinas a gás são ilustradas: a geração de energia elétrica e a propulsão a jato.

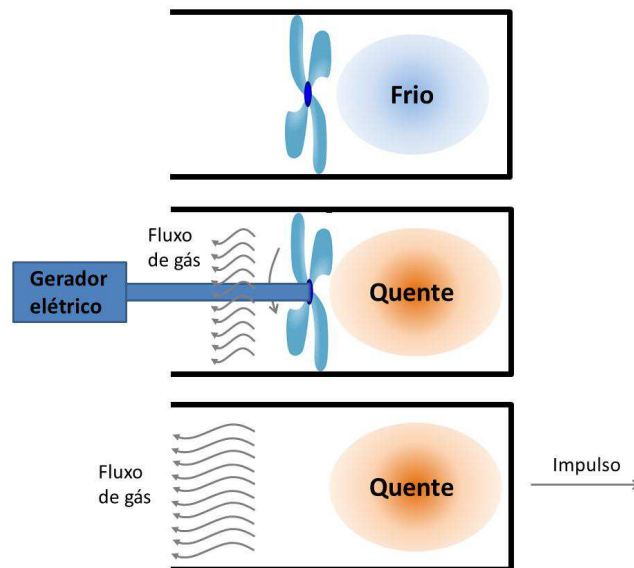


Fig. 5.23: Diagrama rudimentar ilustrando o conceito de uma turbina térmica, assim como mostrado na Fig. 5.15, contextualizado para as duas principais aplicações das turbinas a gás: geração de energia elétrica e propulsão a jato.

No entanto, quando discutimos sobre as turbinas na sessão 5.6, salientamos que elas funcionam com um fluxo contínuo de fluido de trabalho. Nesse sentido, adicionamos um compressor para que este estabelecesse esse fluxo, coletando ar do ambiente, comprimindo e introduzindo na parte quente do dispositivo (Fig. 5.16).

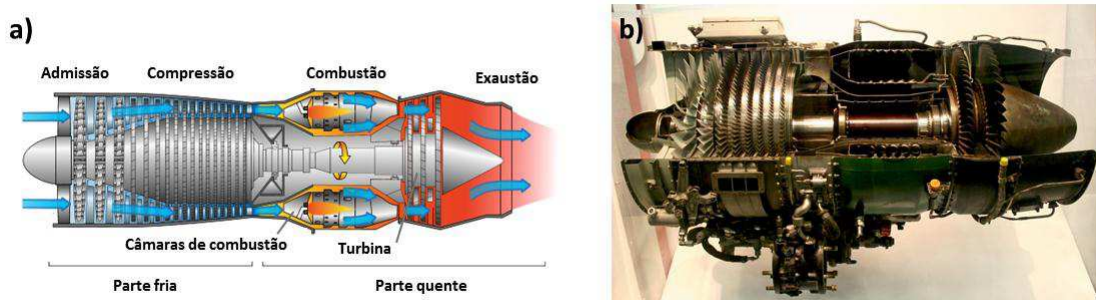


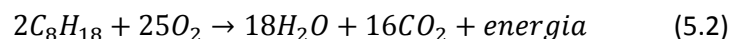
Fig. 5.24: a) Diagrama esquemático de uma turbina a gás. b) Foto de uma turbina a gás da General Electric modelo J85, cortada para que suas partes internas sejam vivíveis.

Observando a Fig. 5.24a é possível entender o funcionamento de uma turbina a gás. Na parte frontal da turbina (lado esquerdo) o ar é admitido e comprimido por uma série de aletas (o compressor no caso) que vai compactando o ar captado em volumes cada vez menores. Na porção mais compactada, o ar possui tipicamente uma pressão de 11 a 16 vezes maior do que a pressão externa à turbina. Na sequência, esse ar é levado até a câmara de combustão onde combustível é queimado. Nesse momento, a temperatura aumenta e o gás se expande,

aumentando também a pressão, fazendo com que este escape como um forte jato de gás na parte oposta do dispositivo. Esse processo, bem como toda a análise termodinâmica associada a ele, é conhecido como ciclo de Brayton.

Como discutido no contexto da Fig. 5.16, o compressor que atua na parte fria do dispositivo necessita de energia para operar. Essa energia é obtida do próprio fluxo de gás gerado na parte quente do dispositivo por meio de uma turbina (hélice), como indicado na Fig. 5.24a. Note que a taxa de compressão (entre 11 e 16 tipicamente) é fundamental para o aumento da eficiência do dispositivo como um todo, mas parte da energia do fluxo de gás produzida é consumida para o próprio funcionamento do compressor.

Há outra sutileza importante a ser considerada, não só na turbina a gás, mas em todos os motores de combustão interna. Embora a maior parte dos textos devotados à explicação do funcionamento destes motores foque no efeito térmico para explicar a expansão e aumento de pressão do fluido de trabalho, existe outro fator relevante: o combustível queimado. A eq. 5.2 representa a reação típica da queima da gasolina (o caso do octano).



Em massa, o combustível representa tipicamente 7% do material contido na câmara de combustão. Antes da combustão, o combustível está na forma de gotículas líquidas que representam um estado bastante concentrado de matéria. Após a combustão, o combustível é convertido em moléculas que irão compor o gás (CO_2 e H_2O) que ocuparão um volume tipicamente 2000 vezes maior que o líquido original, e 600 vezes superior descontando-se o consumo de O_2 do gás durante a combustão. Dessa forma, assim como no caso da máquina a vapor, onde destacamos a relevância da transformação de fase da água de líquido para vapor em relação ao volume ocupado, temos um efeito similar em relação ao combustível no caso dos motores de combustão interna, onde o processo de combustão o faz ocupar um volume ordens de grandeza superior ao que ocupava em seu estado ao ser introduzido na região de alta pressão do dispositivo. Ou seja, a combustão possui dois papéis: fornecer energia térmica ao fluido de trabalho e adicionar partículas a esse fluido, exacerbando o efeito de expansão deste.

5.9 – Motores de Automóveis

Assim como as turbinas a gás, os motores dos automóveis são motores de combustão interna e funcionam com o mesmo princípio básico: comprimem uma mistura de ar e combustível, queimam o combustível e aproveitam a energia mecânica produzida pela expansão do gás aquecido. Mas nesse caso, isso ocorre em um sistema cilindro-pistão ao invés de uma turbina, resultando em um motor reciprocante.

A Fig. 5.25 mostra o diagrama esquemático do sistema cilindro-pistão típico de um motor de combustão interna reciprocante (motor de automóvel). Esse tipo de motor é descrito pelo ciclo de Otto, conhecido como também como motor de quatro tempos. Esses “tempos” se referem aos processos de expansão e contração do volume definido pelo sistema cilindro-pistão no sentido de que o ciclo precisa de uma sequência de “expansão-contração-expansão-contração” para realizar toda a sequência. Na primeira expansão, o sistema admite a mistura

de ar e combustível. Na sequência, a contração comprime a mistura. Quando essa atinge a condição de compressão máxima a vela realiza a ignição e há ocorrência da queima do combustível. Como discutido na sessão anterior sobre as turbinas a gás, no contexto geral de motores a combustão interna, a queima do combustível fornece calor ao gás ao mesmo tempo em que aumenta significativamente o número de partículas desse gás gerando um considerável aumento da pressão interna do sistema. Nesse momento ocorre o terceiro “tempo” do ciclo onde o sistema expande, aproveitando a expansão do fluido aquecido para realizar trabalho mecânico. O último “tempo” consiste na contração do sistema, em um processo de exaustão da mistura já queimada.

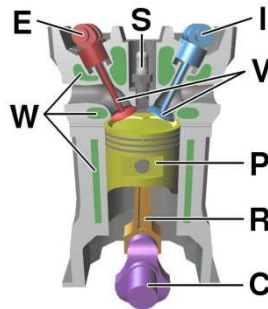


Fig. 5.25: Diagrama esquemático do sistema cilindro-pistão típico de um motor de combustão interna recíprocante (motor de automóvel). As partes indicadas são: **C** – virabrequim. **E** – comando de válvula de exaustão. **I** – comando de válvula de admissão. **P** – pistão. **R** – barra de conexão. **S** – vela. **V** – válvulas. **W** – aberturas para fluxo de água de arrefecimento. Estrutura cinzenta: bloco do motor.

Estes motores têm relação com as turbinas a gás no sentido de serem também motores de combustão interna. Mas também podemos traçar paralelos com outro motor recíprocante estudado. Assim como o motor de Stirling, o motor dos automóveis comprime um gás e fornece calor em seu estágio máximo de compressão, aproveitando para obter trabalho mecânico a partir do processo de expansão do gás aquecido dentro de um sistema cilindro-pistão.

Em geral, os motores dos carros possuem uma série de quatro cilindros para que cada um esteja em um “tempo” distinto em um dado instante, deixando o funcionamento geral do motor mais uniforme. Isso não exclui a possibilidade de se construir motores com diferentes quantidades de cilindros. Motores de 3, 6, 8 e 12 cilindros também são razoavelmente comuns.

Os motores a diesel que equipam os caminhões, ônibus e outros veículos de carga possuem uma diferença em relação aos outros motores dos automóveis. O processo de ignição do combustível é feito apenas com a compressão da mistura, ocorrendo de forma independente da faísca da vela. Por isso, os motores a diesel são compreendidos a partir de um ciclo termodinâmico distinto denominado ciclo de Diesel.

5.10 – Semelhanças e diferenças entre as máquinas térmicas

Até agora, tivemos a oportunidade de estudarmos as principais máquinas térmicas: o motor de Stirling, as máquinas a vapor, as turbinas a gás e os motores dos automóveis. Elas possuem muitas características em comum:

- Transformam parte da energia térmica fornecida em energia mecânica aproveitável. Outra parte é perdida na forma de energias dissipativas resultando em uma eficiência sempre inferior a 100%. O limite máximo da eficiência de uma máquina térmica é determinado pela eficiência de Carnot.
- Dependem de um contraste térmico entre uma “parte quente” e uma “parte fria”, embora a distinção dessas partes não seja sempre evidente no dispositivo em questão.
- Aproveitam-se da expansão e do aumento de pressão de um fluido quando quanto este adquire energia térmica, embora este fluido nem sempre possa ser identificado como um gás. Nas máquinas a vapor, por exemplo, parte do processo é realizada com o fluido no estado líquido, enquanto que nos motores de combustão interna, o fluido é uma mistura com diferentes fases.

Podemos também destacar as principais diferenças entre as máquinas por meio de uma tabela.

Tabela 5.1: Comparação entre características das principais máquinas térmicas.

	Cilindro-Pistão ou turbina	Ciclo Aberto ou Fechado	Combustão interna ou externa	Transformação de fase do fluido de trabalho
Stirling	Cilindro-pistão	Fechado	Externa	Não há
Máquinas a vapor	Ambos	Fechado*	Externa	Sim – física (evaporação-condensação)
Turbinas a gás	Turbina	Aberto	Interna	Sim – química (combustão)
Motores de automóveis	Cilindro-pistão	Aberto	Interna	Sim – química (combustão)

* Nas turbinas a vapor para geração de energia elétrica, utiliza-se água de alta pureza e esta é reaproveitada em um ciclo fechado. Nos trens a vapor (maria-fumaça) o ciclo era aberto.

5.11 – Os ciclos termodinâmicos

Paralelamente ao desenvolvimento das máquinas térmicas, houve o desenvolvimento da ciência das máquinas térmicas. Como já foi dito, Carnot é considerado o pai da termodinâmica, pois se dedicou a entender as máquinas a vapor que revolucionaram o ambiente econômico da época. Ele foi revolucionário em vários aspectos, chamando a atenção, por exemplo, da relação entre os sistemas térmicos e o ambiente, e modelando a máquina térmica por meio de uma sequência cíclica de processos: o ciclo de Carnot.

Atualmente, o ciclo de Carnot é considerado um ciclo ideal representativo de uma “máquina térmica perfeita”. Nesse sentido, a chamada eficiência de Carnot é considerada como a eficiência máxima que uma máquina térmica pode adquirir dada a diferença de temperatura entre a “parte quente” e a “parte fria” do sistema. Além disso, o ciclo de Carnot não é associado diretamente a nenhuma máquina térmica específica.

atingidas. Há correlações entre etapas do processo e partes do sistema, como a “bomba” e a “turbina”. É interessante notar que o ciclo de Rankine é muitas vezes apresentado como a versão “aplicada” do ciclo de Carnot uma vez que é responsável por cerca de 80% da produção de energia elétrica no mundo.

Como dissemos na sessão 5.8, as turbinas a gás são descritas pelo ciclo de Brayton. É interessante notar que George Brayton inventou o motor de combustão interna recíprocante de pressão constante em 1872 e o vendeu para vários usos como bombear água de minas, e para moagem de grãos, por exemplo. Em 1878, George B. Selden inventou o primeiro automóvel de combustão interna, usando o motor de Brayton. Houve disputa de propriedade intelectual com Henry Ford em relação ao seu automóvel. Este último venceu, pois argumentou que seu automóvel usava um motor diferente, de quatro tempos (ciclo de Otto). Hoje em dia, motores recíprocentes baseados no ciclo de Brayton são incomuns, sendo este ciclo associado majoritariamente às turbinas a gás.

Apesar dos ciclos termodinâmicos de Rankine, Brayton, Otto, Diesel e Stirling estarem associados a dispositivos reais, deve-se levar em conta que estes também são bastante idealizados. A Fig. 5.27 mostra a comparação do ciclo de Otto, associado aos motores de automóvel (exceto os movidos a Diesel que são associados ao ciclo de Diesel) e uma representação do que seria, se as mesmas variáveis fossem medidas em laboratório com o motor em funcionamento.

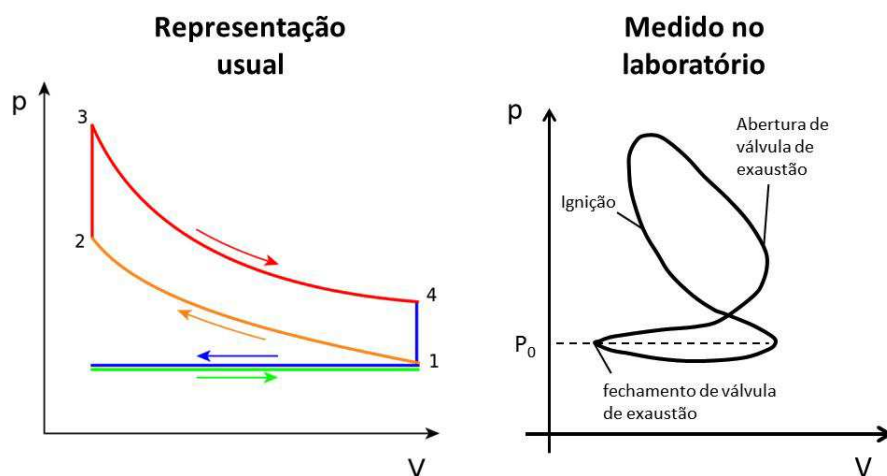


Fig. 5.27: Comparação entre a representação usual do ciclo de Otto e o que é medido em laboratório (apresentado aqui de forma esquematizada) com um motor de combustão interna recíprocante real em funcionamento.

Note que existe uma diferença significativa entre o ciclo idealizado e o processo que ocorre de fato. Portanto, os ciclos devem ser interpretados como um indicativo conceitual referente aos processos das máquinas térmicas, mas de forma alguma pode ser tomado como uma descrição fiel destes processos.

Questionário:

- 1 – O que é um volante de inércia? Qual é sua função nas máquinas térmicas atuais?
- 2 – Pesquise sobre a locomotiva a vapor (Maria-Fumaça). Que ciclo termodinâmico descreve seu funcionamento? O ciclo é aberto ou fechado? Usa turbina ou cilindro-pistão? Identifique as principais partes.
- 3 – Qual é a diferença entre um motor reciprocante e uma turbina?
- 4 – Considere as máquinas térmicas associadas aos ciclos de Carnot, Stirling, Rankine, Brayton, Otto, Diesel.

Para cada uma especifique as seguintes características

- a) Combustão interna ou externa?
- b) O fluido de trabalho sofre uma transformação de fase durante o ciclo? Se sim, de qual tipo, física ou química (combustão).
- c) Turbina ou pistão (ou ambos)?

- 5 – Dos ciclos Diesel, Otto, Rankine, Brayton e Stirling,

- a) Qual é o mais utilizado para a geração de energia elétrica? Por quê?
- b) Qual, ou quais são os mais utilizados para veículos automotivos? Por quê?

- 6 – Considere o ciclo de Otto

- a) Faça um diagrama PV (Pressão em função do volume) do ciclo idealizado, identificando as curvas das diferentes etapas do ciclo.
- b) Faça um diagrama PV do ciclo como medido em laboratório.
- c) Discuta os possíveis fatores que acarretam nas diferenças encontradas entre os dois diagramas.

- 7 – O que todos os ciclos termodinâmicos das questões 4 e 5 têm em comum?

- 8 – Considere os motores a combustão interna que equipam os carros de passeio. Seu funcionamento é descrito pelo ciclo de Otto. Quando pisamos no acelerador, o que ocorre no motor é o aumento da admissão de ar no cilindro em cada ciclo e consequentemente o aumento da quantidade de combustível de tal forma que a proporção entre ar e combustível seja mantida próximo do ideal. Diz-se que a proporção em massa de ar:combustível ideal é 14,7:1. De onde vem esse número? Justifique.

- 9 – O ciclo de Carnot está atrelado a alguma máquina térmica específica? Explique.

- 10 – A figura 5.17 mostra o potencial expansivo da transformação de fase da água e ajuda a entender a eficiência das máquinas a vapor. Justifique o volume de 1703 ml da figura por meio dos cálculos adequados.

- 11 – A figura 5.21a mostra uma foto da usina termelétrica de Drax na Inglaterra. Identifique os gases emitidos pela usina e suas respectivas chaminés.

12 – O que é eficiência de Carnot de uma máquina térmica? Como calcular? Uma termelétrica aquece vapor até uma temperatura de 540°C. A temperatura da torre de resfriamento é de 20°C. Calcule a eficiência de Carnot dessa termelétrica.

13 – Na sessão 5.11 vimos as diferenças entre a representação usual do ciclo de Otto e uma representação do que seria medido em laboratório com o motor de combustão interna recíprocante com faísca em funcionamento. Pesquise sobre o ciclo de Diesel e suas representações “usual” e “real”. O que você pode concluir?

Créditos das figuras

Fig 5.5

- a) Diagram of the Newcomen steam engine – Domínio público – disponível em https://en.wikipedia.org/wiki/Newcomen_atmospheric_engine
- b) "Bomba Cabeça de Cavalo" por Thiagonegris - Obra do próprio (see also later uploaded on <http://www.panoramio.com/photo/54636574> (by "Thiago." = Thiagonegris). Licenciado sob CC BY 3.0, via Wikimedia Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Bomba_Cabe%C3%A7a_de_Cavalo.jpg#/media/File:Bomba_Cabe%C3%A7a_de_Cavalo.jpg

Fig 5.6:

- a) Arte própria
- b) "AutoCAD drawing of a Great Western King" by AutoCAD_drawing_of_a_Great_Western_King.jpg: Stavros1Original uploader was Stavros1 at en.wikipediaderivative work: Ariadacapo (talk) - AutoCAD_drawing_of_a_Great_Western_King.jpg. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:AutoCAD_drawing_of_a_Great_Western_King.png#/media/File:AutoCAD_drawing_of_a_Great_Western_King.png
- c) [Cshaft.gif](#) - domínio público – disponível em <https://en.wikipedia.org/wiki/Crankshaft>
- d) Fonte: <http://www.atiracing.com/products/dampers/101/>

Fig. 5.7:

Domínio público – disponível em https://en.wikipedia.org/wiki/Sine#/media/File:Circle_cos_sin.gif

Fig. 5.8:

Domínio público – disponível em https://en.wikipedia.org/wiki/Potter%27s_wheel

Fig. 5.9

- a) Licença CC-BY-SA-3.0 - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ashton_Frost_engine_flywheel.jpg (obs – não havia instruções específicas de como referenciar a imagem)
- b) Domínio público – disponível em https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ashton_Frost_engine_flywheel.jpg

Fig. 5.10

Arte própria

Fig. 5.11

Arte própria

Fig. 5.12

Arte própria – Motor de Stirling de demonstração da empresa *Solar Engines*

Fig. 5.13

- a) "Alpha Stirling frame 12" by Alpha_Stirling_frame_12.png: Original uploader was Zephyris at en.wikipediaderivative work: M0tty (talk) - Alpha_Stirling_frame_12.png. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Alpha_Stirling_frame_12.svg#/media/File:Alpha_Stirling_frame_12.svg
- b) "Beta Stirling frame 12" by Zephyris at the English language Wikipedia. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Beta_Stirling_frame_12.png#/media/File:Beta_Stirling_frame_12.png

Fig. 5.14

- a) Livre para uso. Disponível em <https://www.flickr.com/photos/75894308@N03/7657361676/in/photostream/>
- b) Livre para uso. Disponível em https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/17/Netherlands%2C_Warmond%2C_windmill_%27De_Kok%27.JPG

Fig. 5.20

Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:PowerStation2.svg>

Fig. 5.21

- a) Copyright Dave Pickersgill and licensed for reuse under this [Creative Commons Licence](http://www.geograph.org.uk/reuse.php?id=3250473) available at <http://www.geograph.org.uk/reuse.php?id=3250473>
- b) "Dampfturbine Montage01" by Siemens Pressebild - http://www.siemens.com/index.jsp?sdc_p=cfi1075924l0mno1130262ps5uz3&sdc_bcpaht=1327899.s_5%2C%3A1176453.s_5%2C&sdc_sid=31880989447&. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Dampfturbine_Montage01.jpg#/media/File:Dampfturbine_Montage01.jpg

Fig. 5.24

- a) By Jeff Dahl CC-BY-SA-3.0-2.5-2.0-1.0. Disponível em http://cset.mnsu.edu/engagethermo/components_gasturbine.html
- b) "J85 ge 17a turbojet engine" by Sanjay Acharya - Own work. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:J85_ge_17a_turbojet_engine.jpg#/media/File:J85_ge_17a_turbojet_engine.jpg

Fig. 5.25

"Four stroke engine diagram". Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Four_stroke_engine_diagram.jpg#/media/File:Four_stroke_engine_diagram.jpg

Fig. 5.26

Carnot: licensed under the CC-BY-SA-4.0. available at https://commons.wikimedia.org/wiki/File:T-s_diagram_Carnot_cycle.svg
Rankine: "Rankine cycle Ts" by English Wikipedia user Andrew.Ainsworth. Licensed under CC BY-SA 3.0 via Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Rankine_cycle_Ts.png#/media/File:Rankine_cycle_Ts.png

5.27

Ideal "P-V Otto cycle" by Luc1992 - Own work. Licensed under CC BY-SA 4.0 via Commons - https://commons.wikimedia.org/wiki/File:P-V_Otto_cycle.svg#/media/File:P-V_Otto_cycle.svg

Medido no Laboratório: arte própria, baseado no material disponível em <http://web.mit.edu/16.unified/www/FALL/thermodynamics/notes/node26.html>