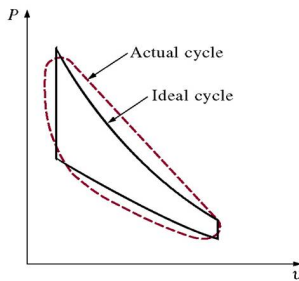
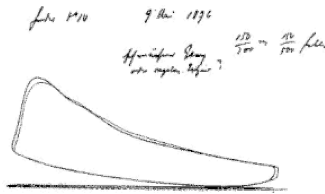


Os ciclos termodinâmicos reais são geralmente complexos (há atrito entre o fluido e as tubulações, essas podem não ser termicamente isoladas, os processos não são quase-estáticos, podem ocorrer mudanças de fase, desvio do comportamento de gás ideal, combustão não uniforme, viscosidade, etc). Para analisá-los, em geral, é preciso simplificar e idealizar os processos:



Exemplo 29:

O ciclo que está presente nos motores a quatro tempos foi idealizado por Nikolaus Otto em 1876 e leva seu nome. Esses quatro tempos são: admissão, compressão, potência, e exaustão.



- **Admissão:** durante a fase de admissão, o pistão se move para baixo, trazendo uma mistura, vaporizada, de ar e pequenas gotas de combustível.
- **Compressão:** O pistão se move para cima pela inércia do movimento, comprimindo a mistura combustível/ar.
- **Potência:** No topo da fase de compressão, a vela emite uma faísca, acendendo o combustível comprimido. À medida que o combustível queima, ele se expande, empurrando o pistão para baixo.
- **Exaustão:** A válvula de exaustão se abre, e o movimento para cima do pistão expulsa o combustível queimado para fora do cilindro.

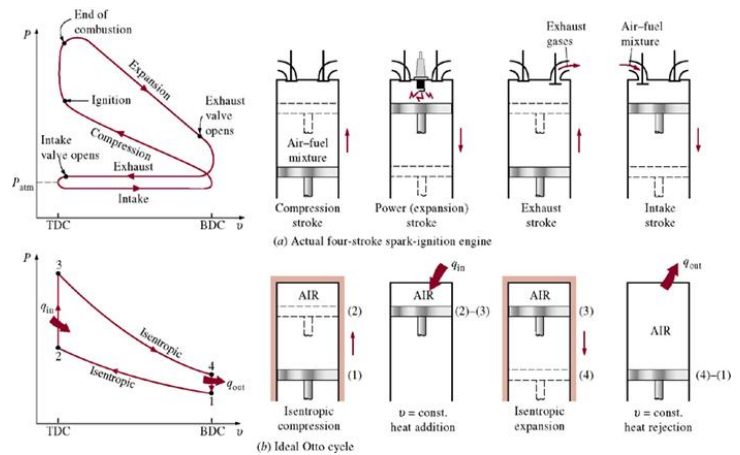
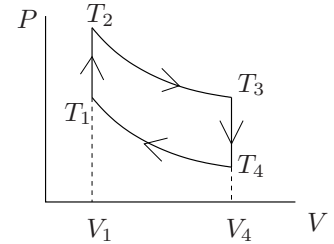
Nenhuma das melhorias encontradas nos modernos motores a quatro tempos (mais de um cilindro, injeção de combustível, turbinas, etc) altera a operação básica do motor.

⁶⁶No ciclo original, não idealizado, a exaustão é isobárica, pois a válvula está aberta. Depois, nova mistura de ar e gasolina é injetada, também isobaricamente (a válvula está aberta, mas o movimento para baixo do pistão faz com que a pressão seja um pouco menor do que a pressão atmosférica).

⁶⁷Maximizar a eficiência pode não ser o único objetivo. Por exemplo, podemos também minimizar os resíduos descartados ou aumentar a potência.

⁶⁸Note que esta definição é geral, vale para ciclos reversíveis e irreversíveis.

No ciclo Otto idealizado, aproximamos os processos de expansão e compressão, por serem rápidos, como sendo adiabáticos. Temos uma compressão adiabática (4 → 1), seguida da explosão (1) em que a pressão aumenta muito por causa da energia liberada, antes de aumentar de volume (1 → 2). O sistema se expande (2 → 3), produzindo trabalho. O gás queimado é então expelido⁶⁶ (3 → 4).



Uma **máquina térmica** (motor) produz trabalho a partir de calor (energia), o qual é absorvido de uma ou mais fontes térmicas e parcialmente aproveitado⁶⁷, o processo sendo repetido ciclicamente. Existem vários ciclos, como os de **Otto**, **Diesel**, **Carnot**, **Stirling**, etc. Se o ciclo da máquina térmica for reversível (cada etapa pode ser efetuada no sentido inverso), ela pode funcionar também como **refrigerador**, retirando calor de um sistema. Neste caso, o calor removido, combinado com o trabalho (energia) usado para operar o refrigerador, são despejados em algum reservatório (e.g., ambiente).

O investimento em energia térmica fornecida é Q_1 . O trabalho útil obtido é W . O calor Q_2 é um subproduto não aproveitado (pode ser dissipado na atmosfera, por exemplo). Então, podemos definir a **eficiência** do motor térmico por⁶⁸:

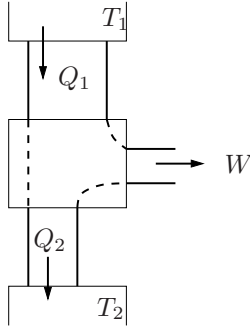
$$\eta = \frac{W}{|Q_1|} = \frac{\text{trabalho produzido}}{\text{calor fornecido}} \quad (54)$$

Pela primeira lei, $|Q_1| = W + |Q_2|$. Logo:

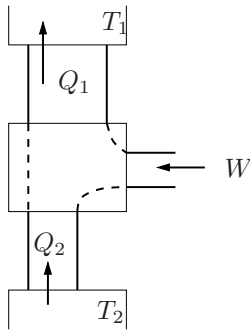
$$\eta = \frac{|Q_1| - |Q_2|}{|Q_1|} = 1 - \frac{|Q_2|}{|Q_1|} \quad (55)$$

Diminuindo a quantidade de calor rejeitado $|Q_2|$, aumentamos a eficiência, cujo valor máximo, portanto, é 1.

Podemos representar esquematicamente uma máquina térmica (diagrama de fluxo) atuando entre **duas** fontes ($T_2 < T_1$):



Um **refrigerador** pode ser pensado como um motor térmico funcionando ao contrário. O objetivo, neste caso, é remover calor Q_2 de um reservatório térmico (fonte fria) à temperatura T_2 , transferindo calor Q_1 para uma fonte quente à temperatura T_1 .⁶⁹ Para efetuar a operação é necessário que o trabalho W seja feito **sobre** o refrigerador, $|Q_1| = W + |Q_2|$. Como o rendimento, por definição, é o que é obtido dividido pelo custo, no caso de um refrigerador seria $|Q_2|/W$, e quanto maior é esse valor, melhor é o refrigerador pois menos trabalho é necessário para fazê-lo funcionar. Esquematicamente:



Exemplo 30: Calcular a eficiência da idealização do **ciclo Otto**, usado em **motores de quatro tempos** e constituído de duas isocóricas e duas adiabáticas⁷⁰.

Para o trabalho total contribuem os processos adiabáticos:

$$W = \frac{NR}{1-\gamma}[(T_3 - T_2) + (T_1 - T_4)].$$

As etapas onde há troca de calor são $1 \rightarrow 2$ e $3 \rightarrow 4$. Na primeira, calor é absorvido (o volume é mantido constante enquanto a pressão aumenta), ao passo que na segunda, é liberado. Então, o calor absorvido é

$$Q_{12} = N \frac{fR}{2}(T_2 - T_1).$$

Lembrando que

$$\gamma = 1 + \frac{2}{f} \rightarrow \frac{1}{1-\gamma} = -\frac{f}{2},$$

a eficiência é⁷¹:

$$\eta = \frac{W}{Q_{12}} = 1 - \frac{T_3 - T_4}{T_2 - T_1} = 1 - \frac{T_3 - T_4}{T_1 \left(\frac{T_3}{T_4} - 1 \right)} = 1 - \frac{T_4}{T_1},$$

onde usamos que nesses processos adiabáticos, $TV^{\gamma-1} = \text{cte}$ e, portanto, $T_2/T_1 = T_3/T_4$.

⁶⁹No caso do ar condicionado, este pode ser usado tanto para esfriar quanto esquentar a sala. O esquema ainda é o mesmo, mas num caso a sala corresponde ao reservatório 2 e no outro, ao 1.

⁷⁰Substituindo as adiabáticas por isotermas, temos o **ciclo Stirling**.

⁷¹Usando $P_2V_1^\gamma = P_3V_4^\gamma$ e $P_1V_1^\gamma = P_4V_4^\gamma$, a eficiência pode ser escrita em função da razão entre os volumes extremos, $r \equiv V_4/V_1$ (fator de compressão):

$$\eta = 1 - \frac{P_3 - P_4}{P_2 - P_1} \frac{V_4}{V_1} = 1 - r^{\gamma-1}.$$