Física II

4302112

Lucy V. C. Assali

Escritório: Edifício Alessandro Volta, Bloco C, sala 210.
Fone: 3091-7041
e-mail: lassali@if.usp.br

Termodinâmica

4ª Parte

Segunda lei da termodinâmica - 1

Lucy V. C. Assali

A Segunda Lei da Termodinâmica

1ª Lei da Termodinâmica: incorpora ao princípio de conservação de energia o calor como forma de energia: $d\bar{U} = \bar{d}Q - \bar{d}W$ (qualquer processo em que a energia total do sistema se conserva é compatível com esta lei)

- Não faz distinção se os processos que ocorrem na natureza são reversíveis ou não. A experiência mostra que na natureza os processos observados na escala macroscópica tendem a ocorrer em um só sentido: *são irreversíveis*, mesmo não violando a 1ª Lei da Termodinâmica.

Exemplos:

$\Rightarrow$ Expansão livre: o gás se expande até preencher todo o espaço, quando a válvula é aberta, mas não volta espontaneamente.

$\Rightarrow$ Elevação de 1ºC de temperatura de 1ℓ de água gastamos 1kcal, mas não extraímos 1 kcal esfriando a água de 1ºC

A Segunda Lei da Termodinâmica

Exemplos:

⇒ Na experiência de Joule, quando os pesos são soltos, eles caem e a água se aquece pelo atrito com as pás, convertendo energia mecânica em energia térmica. Não é possível que a água esfrie espontaneamente, levantando as massas.

⇒ Dois corpos em contato: o calor flui do mais quente para o mais frio, mas nunca o inverso. A 1ª Lei da Termodinâmica só permite concluir que a energia térmica perdida por um corpo é ganha pelo outro.

⇒ Atrito sempre tende a frear os objetos em movimento, convertendo energia cinética em calor, nunca acelera os corpos com resfriamento do meio ambiente

A resposta do porque da não reversibilidade destes processos está relacionada com a 2ª Lei da Termodinâmica

Lucy V. C. Assali

A Segunda Lei da Termodinâmica

Histórico: Formulação da 2ª Lei da Termodinâmica era um problema de engenharia, ligado com a eficiência das máquinas a vapor, na conversão de energia interna em energia mecânica.

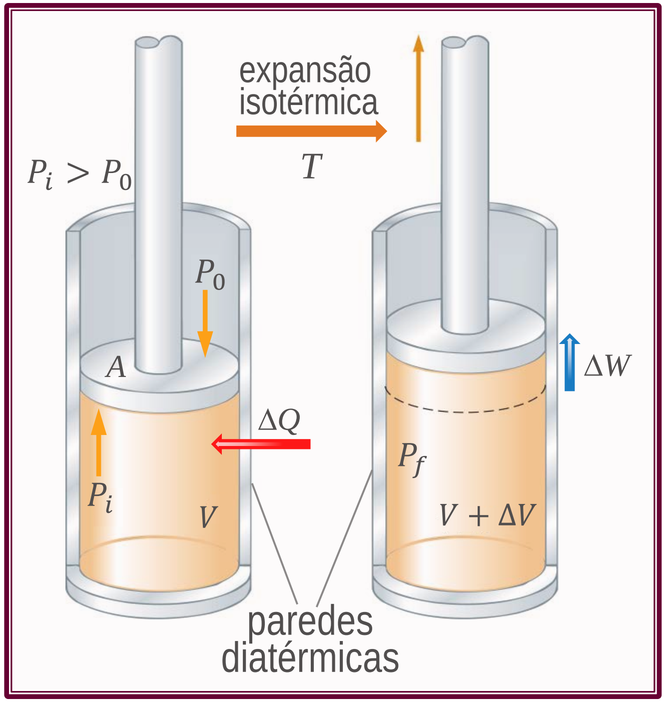
A ***2ª Lei da Termodinâmica*** diz que uma máquina capaz de converter completamente energia interna em outras formas de energia, em um processo cíclico, não pode ser construída.

Máquina térmica: dispositivo que converte energia interna em energia mecânica. Por exemplo, um processo típico pelo qual uma usina elétrica produz eletricidade é através da queima de carvão ou outro tipo de fluido. Os gases produzidos nesta queima, a altas temperaturas, são utilizados para converter água em vapor. Este vapor é direcionado para as pás de uma turbina, pondo-a em rotação. A energia mecânica associada a esta rotação é usada para acionar um gerador elétrico. Outro exemplo é o motor de combustão interna de um automóvel, que usa energia a partir da queima de um combustível para executar um trabalho que resulta no movimento do automóvel.

Lucy V. C. Assali

A Segunda Lei da Termodinâmica

Enunciados de Clausius e Kelvin da Segunda Lei



$$\Delta T = 0 \Rightarrow \Delta U = 0 \Rightarrow \Delta Q = \Delta W$$

$\Longrightarrow$ todo calor absorvido da atmosfera transforma-se em trabalho! Mas $P_f < P_i$ e $\therefore$ o processo pára quando $P_f = P_0$ e só pode ser executado uma vez $\Longrightarrow$ máquina térmica necessita que o processo seja cíclico

Se pudéssemos ter um ciclo em que todo calor se transformasse em trabalho, teríamos realizado um "moto perpétuo" (não conhecido) $\Rightarrow$ Enunciado de Kelvin

Lucy V. C. Assali

A Segunda Lei da Termodinâmica

⇒ ***Enunciado de Kelvin (K)**: É impossível realizar um processo cujo <u>único</u> efeito seja remover calor de um reservatório térmico e produzir uma quantidade equivalente de trabalho ("motor miraculoso")*

consequências

1. Geração de calor por atrito a partir do trabalho mecânico é *irreversível*
2. A expansão livre de um gás é um processo *irreversível*
3. <u>A condução de calor é *irreversível* pois se dá sempre no sentido de um corpo mais quente para um corpo mais frio</u>

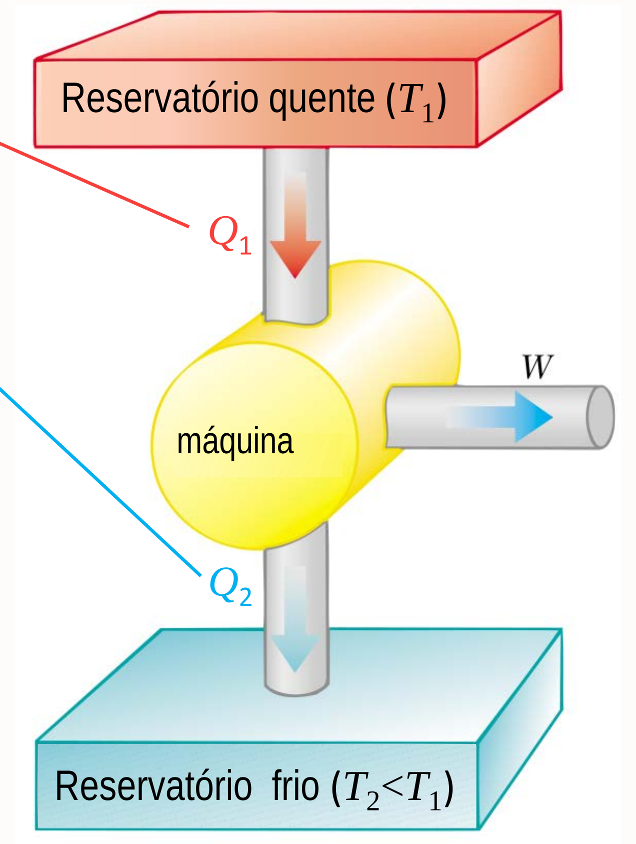
⇒ ***Enunciado de Clausius (C)**: É impossível realizar um processo cujo <u>único</u> efeito seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente ("refrigerador miraculoso")*

A Segunda Lei da Termodinâmica

Máquina Térmica: produz trabalho a partir de calor, operando ciclicamente ($\Delta U = 0$) com pelo menos 2 reservatórios térmicos (fontes) ($T_1 > T_2$):

$Q_1 \Rightarrow$ calor fornecido ao sistema pelo reservatório T_1 (absorvido da fonte quente)

$Q_2 \Rightarrow$ calor fornecido pelo sistema ao reservatório T_2 (transferido à fonte fria)



$$\boxed{W = Q_1 - Q_2}$$

Trabalho efetuado pelo motor térmico é igual ao calor líquido fluindo através dele (1ª Lei da Termodinâmica)

A energia térmica fornecida (Q_1) é o investimento na máquina, que fornece o trabalho útil (W), e o calor Q_2 é a energia não aproveitada (subproduto).

Lucy V.C. Assali

A Segunda Lei da Termodinâmica

Máquina Térmica:

$$\boxed{W = Q_1 - Q_2}$$

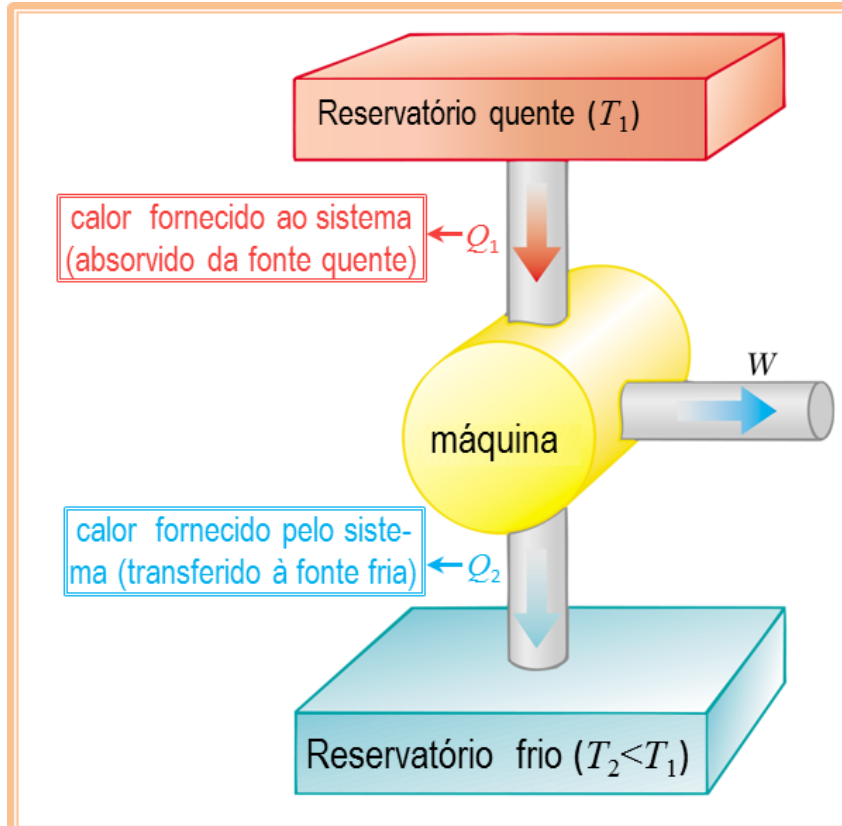
Estamos assumindo $Q_2 > 0$ (fornecida pelo sistema) contrária à convenção (> 0 $\Rightarrow$ fornecida ao sistema)

Trabalho efetuado pelo motor térmico

O rendimento, ou eficiência, η da máquina (motor) é

$$\boxed{\eta = \frac{W}{Q_1} = \frac{\text{trabalho fornecido}}{\text{calor consumido}}}$$

$$\boxed{\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} < 1}$$

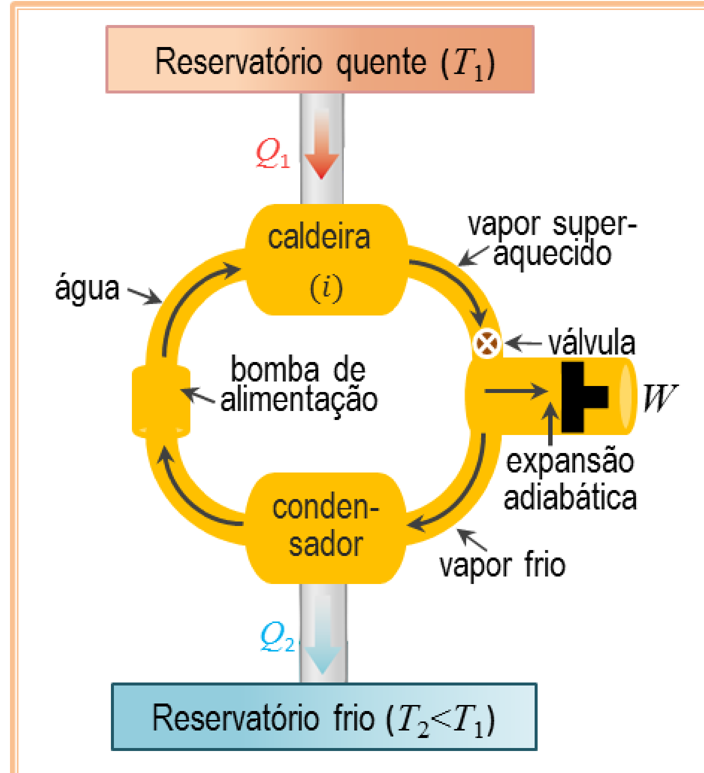


Lucy V. C. Assali

A Segunda Lei da Termodinâmica

Máquina à Vapor (agente é a água):

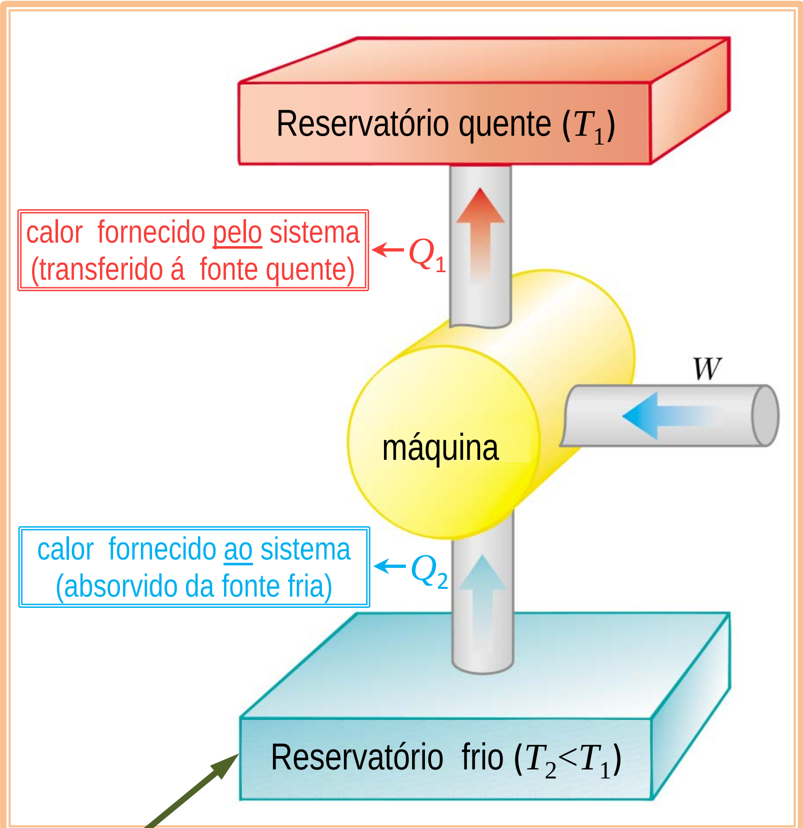
é uma máquina térmica onde a água é convertida em vapor na caldeira, absorvendo calor Q_1 do reservatório quente (fornalha). O vapor superaquecido passa por um cilindro, onde se expande de forma praticamente adiabática, produzindo trabalho W pelo deslocamento do pistão. A expansão adiabática resfria o vapor, que passa para o condensador, onde se liquefaz pelo contato com o reservatório frio (ar atmosférico ou água corrente). O calor Q_2, cedido à fonte fria é, neste caso, o calor latente de condensação, produzido pela condensação do vapor quando se converte em água. Finalmente, a água é aspirada por uma bomba e levada de volta à caldeira, fechando o ciclo.



A Segunda Lei da Termodinâmica

Refrigerador (agente é o refrigerante, substância com calor latente de vaporização elevado, como amônia ou freon): remover calor Q_2 de uma fonte fria, à temperatura T_2 (p.e., interior da geladeira), transferindo calor Q_1 para uma fonte quente, à temperatura T_1 (p.e., atmosfera à temperatura ambiente). Não é possível que $Q_1 = Q_2 \Rightarrow$ É indispensável fornecer trabalho W, para que o processo se realize, com

$$\boxed{Q_1 = W + Q_2}$$



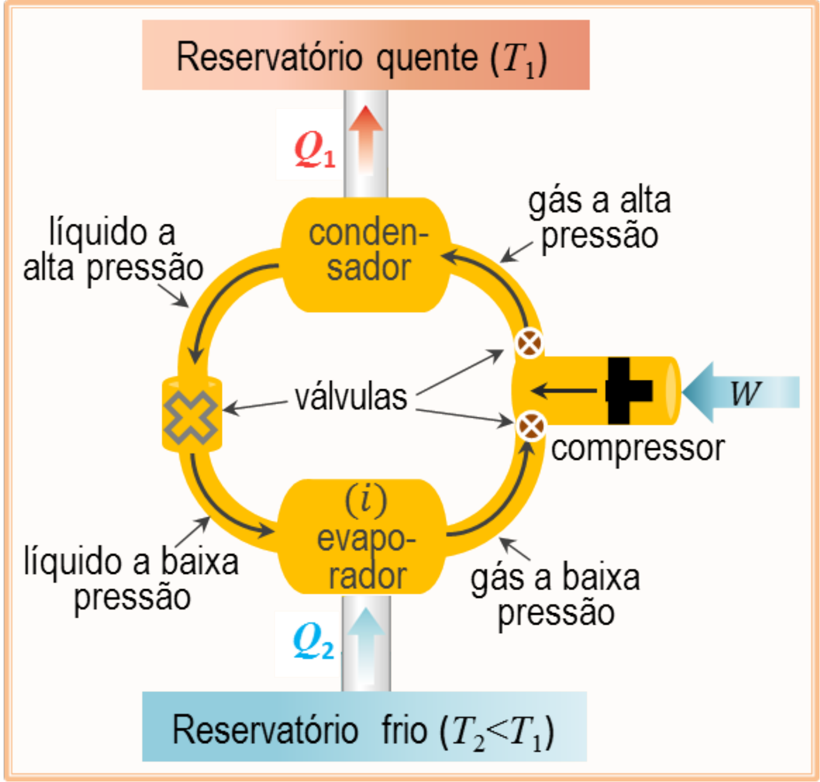
é como se fosse um motor térmico funcionando ao contrário

O refrigerante remove calor do reservatório frio, evaporando-se (calor latente de vaporização) e transfere calor ao reservatório quente, condensando-se (calor latente de liquefação). Como a temperatura de vaporização diminui com a pressão, então, para que a substância se vaporize a uma temperatura mais baixa e se liquefaça a temperatura mais elevada, é preciso que ela se liquefaça a alta pressão e se vaporize a baixa pressão. É dessa forma que o trabalho W é introduzido.

Lucy V. C. Assali

A Segunda Lei da Termodinâmica

Refrigerador: o líquido refrigerante, a baixa pressão, remove calor da fonte fria (temperatura T_2), vaporizando-se no evaporador (serpentina). Após ser isolado do evaporador (válvula), o gás é comprimido (pelo trabalho W efetuado sobre o sistema pelo compressor) até uma pressão alta o suficiente para, passando por outra válvula, atingir o condensador e liquefazer-se, cedendo calor à fonte quente (temperatura T_1). Para fazer o líquido, a alta pressão, passar ao líquido a baixa pressão, para ser re-injetado no evaporador, fechando o ciclo, ele passa através de uma válvula onde sofre um processo do tipo Joule-Thomson (expansão através de uma parede porosa, que reduz a pressão do gás, em regime estacionário, $Q = 0$).



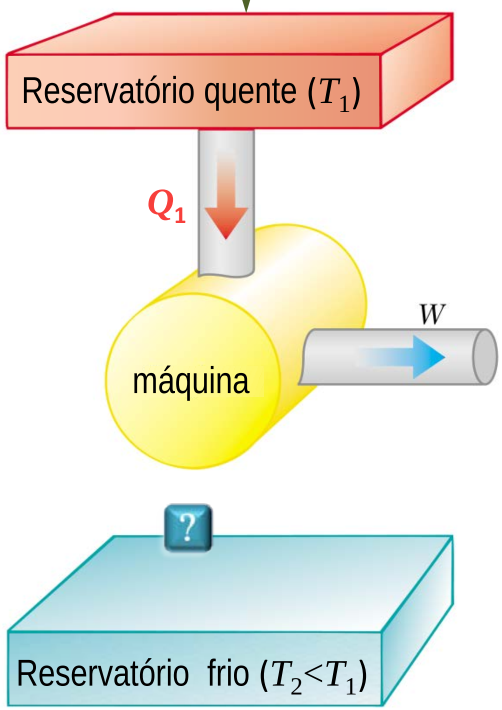
Lucy V. C. Assali

A Segunda Lei da Termodinâmica

Enunciados de Kelvin e Clausius

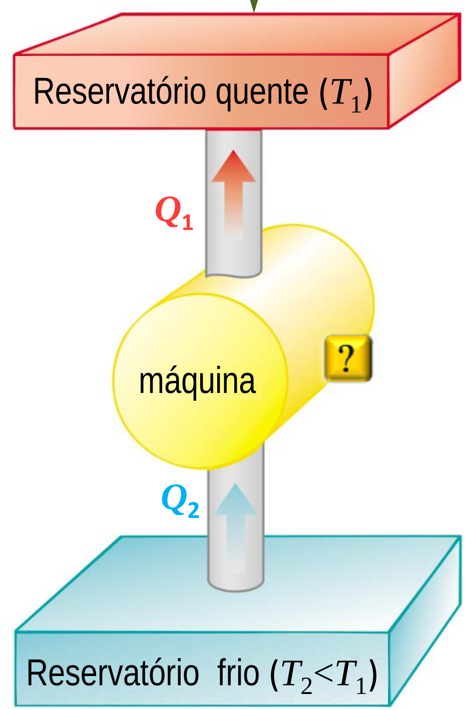
Kelvin:
Não existe um "motor miraculoso"
$\Rightarrow Q_1 \neq W$

Não é possível construir uma máquina térmica que, operando em um ciclo, tenha como *único efeito* absorver energia de um reservatório e produzir uma quantidade equivalente de trabalho.



Máquina térmica impossível

Clausius:
Não existe um "refrigerador miraculoso"
$\Rightarrow Q_1 \neq Q_2$



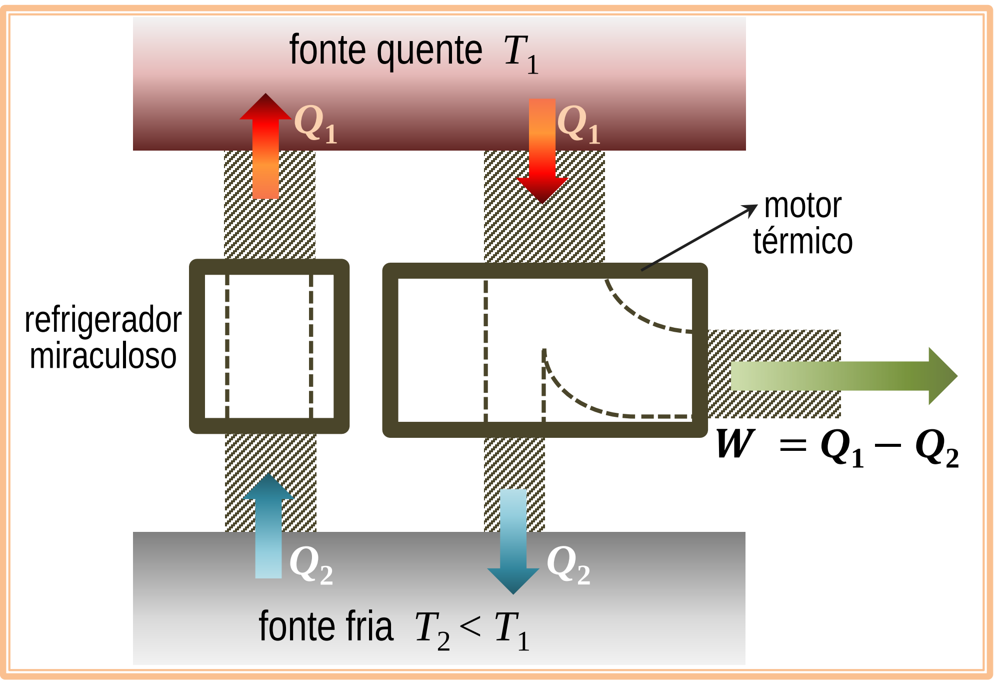
Refrigerador impossível

Não é possível construir uma máquina cíclica cujo *único efeito* é transferir continuamente energia de um objeto para outro, a temperatura mais alta, sem que se forneça energia através de trabalho

Lucy V. C. Assali

O Enunciado de Kelvin (K) implica no Enunciado de Clausius (C)

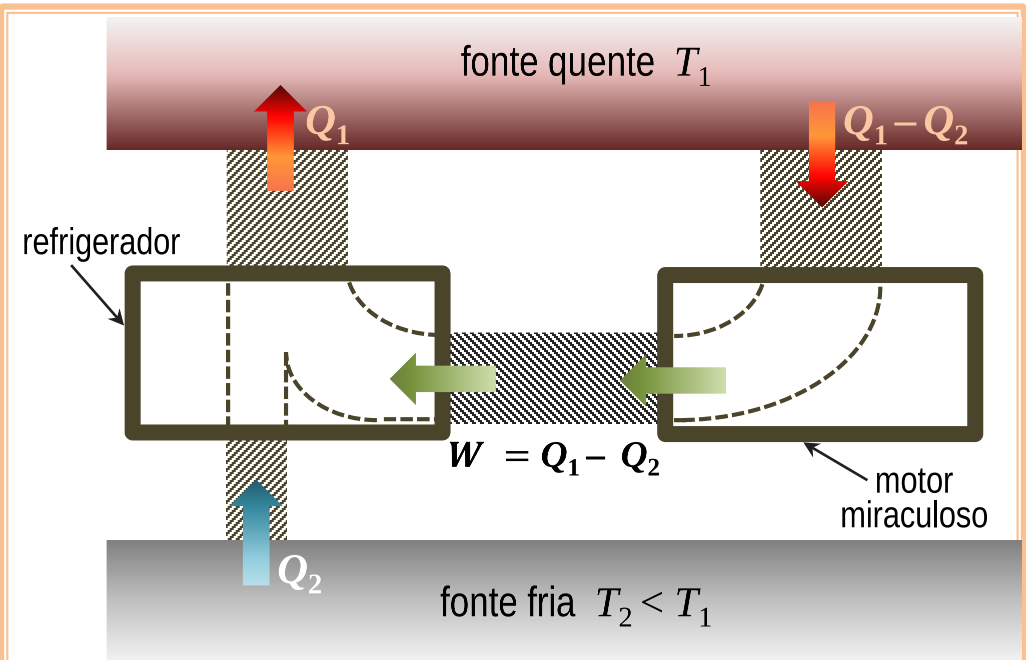
Se (K) não implicasse (C), um motor térmico real poderia ser acoplado com um refrigerador "miraculoso" (já que o enunciado de Clausius (C) não seria válido), o qual *devolveria* à fonte quente o calor Q_2 transferido à fonte fria pelo motor térmico. O resultado líquido seria remover calor $Q_1 - Q_2$ da fonte quente e convertê-lo *inteiramente* em trabalho W, ou seja, seria equivalente à existência de um motor "miraculoso", contradizendo a hipótese da validade de (K).



Lucy V. C. Assali

O Enunciado de Clausius implica no Enunciado de Kelvin

Se (C) não implicasse (K), um refrigerador real poderia ser acoplado com um motor "miraculoso" (já que (K) não seria válido), o qual <u>*converteria*</u> totalmente em trabalho W a diferença $Q_1 - Q_2$ entre o calor cedido à fonte quente e o calor absorvido da fonte fria pelo refrigerador real. Esse mesmo trabalho W <u>*alimentaria*</u> o refrigerador real. O resultado líquido do ciclo seria a transferência integral do calor Q_2 da fonte fria à fonte quente, sem qualquer outro efeito, ou seja, seria equivalente à existência de um refrigerador "miraculoso", contradizendo a hipótese da validade de (C).



Lucy V. C. Assali

A Segunda Lei da Termodinâmica

⇒ <u>**Enunciado de Kelvin (K)**</u>: *É impossível realizar um processo cujo <u>único</u> efeito seja remover calor de um reservatório térmico e produzir uma quantidade equivalente de trabalho ("motor miraculoso")*

consequências

1. Geração de calor por atrito a partir do trabalho mecânico é *irreversível*
2. A expansão livre de um gás é um processo *irreversível*
3. <u>A condução de calor é *irreversível* pois se dá sempre no sentido de um corpo mais quente para um corpo mais frio</u>

⇒ <u>**Enunciado de Clausius (C)**</u>: *É impossível realizar um processo cujo <u>único</u> efeito seja transferir calor de um corpo mais frio para um corpo mais quente ("refrigerador miraculoso")*

A Segunda Lei da Termodinâmica: O ciclo de Carnot

<u>Carnot</u>: Dadas uma fonte quente e uma fonte fria, qual é o máximo rendimento que se pode obter de uma máquina térmica operando entre essas duas fontes?

1. O processo deve ser *<u>cíclico</u>* e *<u>reversível</u>*
2. A absorção de calor da fonte quente (T_1) deve ser feita *<u>isotermicamente</u>*
3. O calor cedido para a fonte fria (T_2) deve ser feito *<u>isotermicamente</u>*
4. Nas porções do ciclo em que há variação de temperatura $(T_1 \rightarrow T_2$ ou $T_2 \rightarrow T_1)$, os processos devem ocorrer sem troca de calor, ou seja, devem ser *<u>processos adiabáticos reversíveis</u>*

*<u>Ciclo reversível com duas fontes</u>: duas porções de isotermas ligadas por duas porções de adiabáticas $\Rightarrow$ **Ciclo de Carnot***

Lucy V. C. Assali

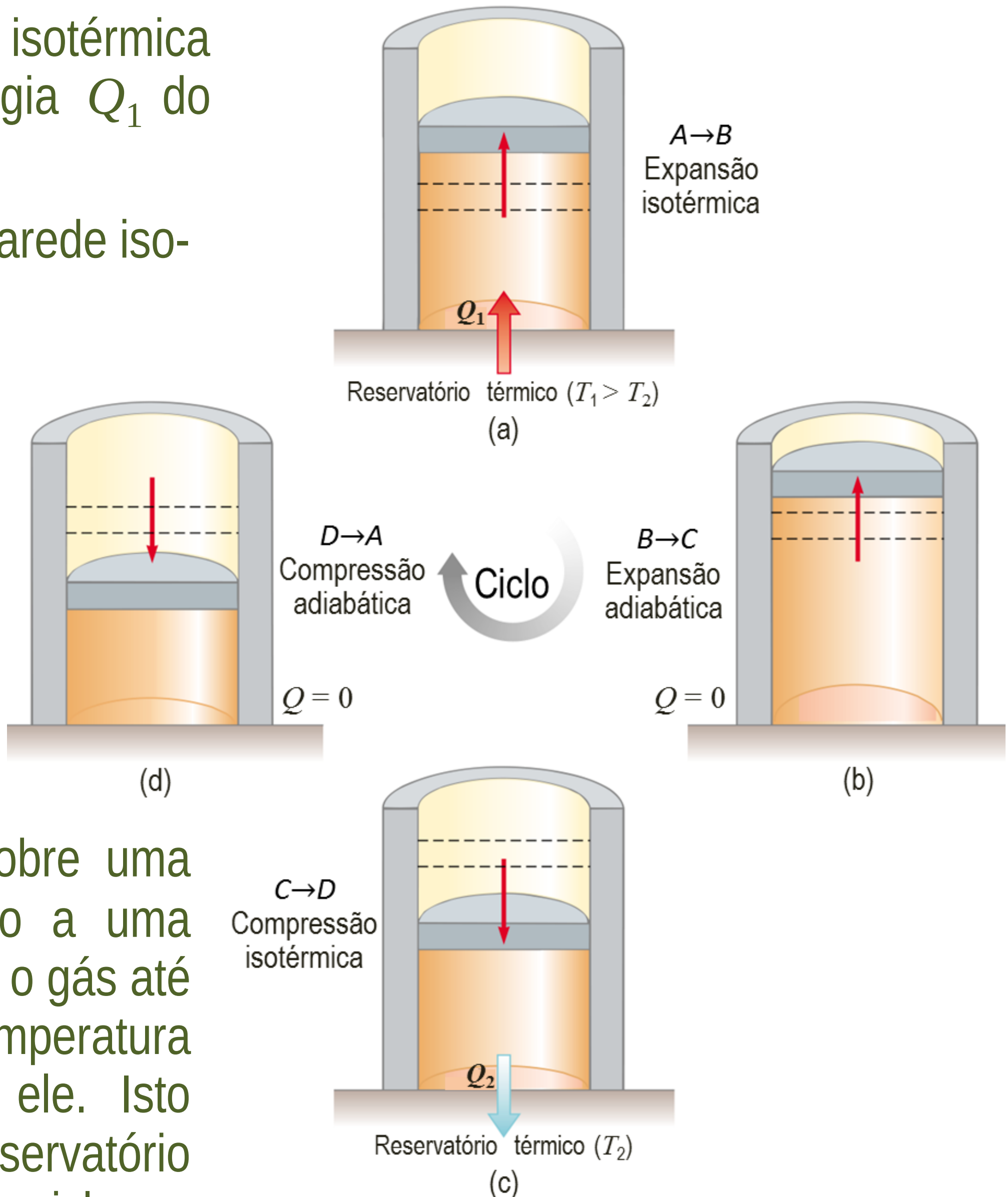
O ciclo de Carnot

<u>$A \rightarrow B$</u>: O gás é posto em contato térmico com um reservatório (quente) e sofre uma expansão isotérmica reversível à temperatura T_1, absorve energia Q_1 do reservatório e realiza um trabalho W_{AB}.

<u>$B \rightarrow C$</u>: A base do cilindro é trocada por uma parede isolante e o gás sofre uma expansão adiabática reversível e sua temperatura decresce de T_1 para T_2 e realiza trabalho W_{BC}.

<u>$C \rightarrow D$</u>: O gás é posto em contato térmico com um reservatório (frio) e sofre uma compressão isotérmica reversível à temperatura T_2, trabalho W_{CD} é feito sobre o gás, que cede calor Q_2 para o reservatório.

<u>$D \rightarrow A$</u>: A base do cilindro é recolocada sobre uma parede isolante e o sistema é submetido a uma compressão adiabática reversível, aquecendo o gás até que sua temperatura cresça e retorne à temperatura T_1, através do trabalho W_{DA} feito sobre ele. Isto permite recolocar o gás em contato com o reservatório térmico (T_1), voltando ao ponto A e fechando o ciclo.

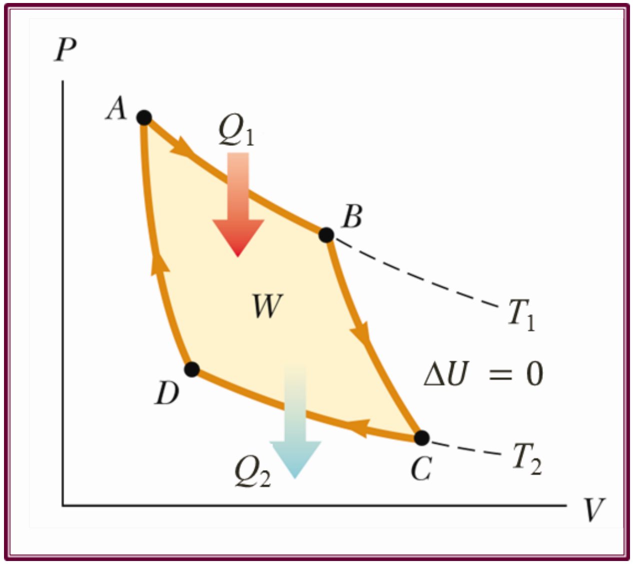


Lucy V. C. Assali

O ciclo de Carnot

No diagrama $P \times V$ do ciclo de Carnot temos que o trabalho total realizado pelo sistema, no decorrer de um ciclo, é $\boxed{W = Q_1 - Q_2}$, representado pela área contida na curva fechada. Como o ciclo é percorrido no sentido horário, $W > 0$. O rendimento, ou eficiência térmica, de uma máquina de Carnot é

$$\boxed{\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}}$$



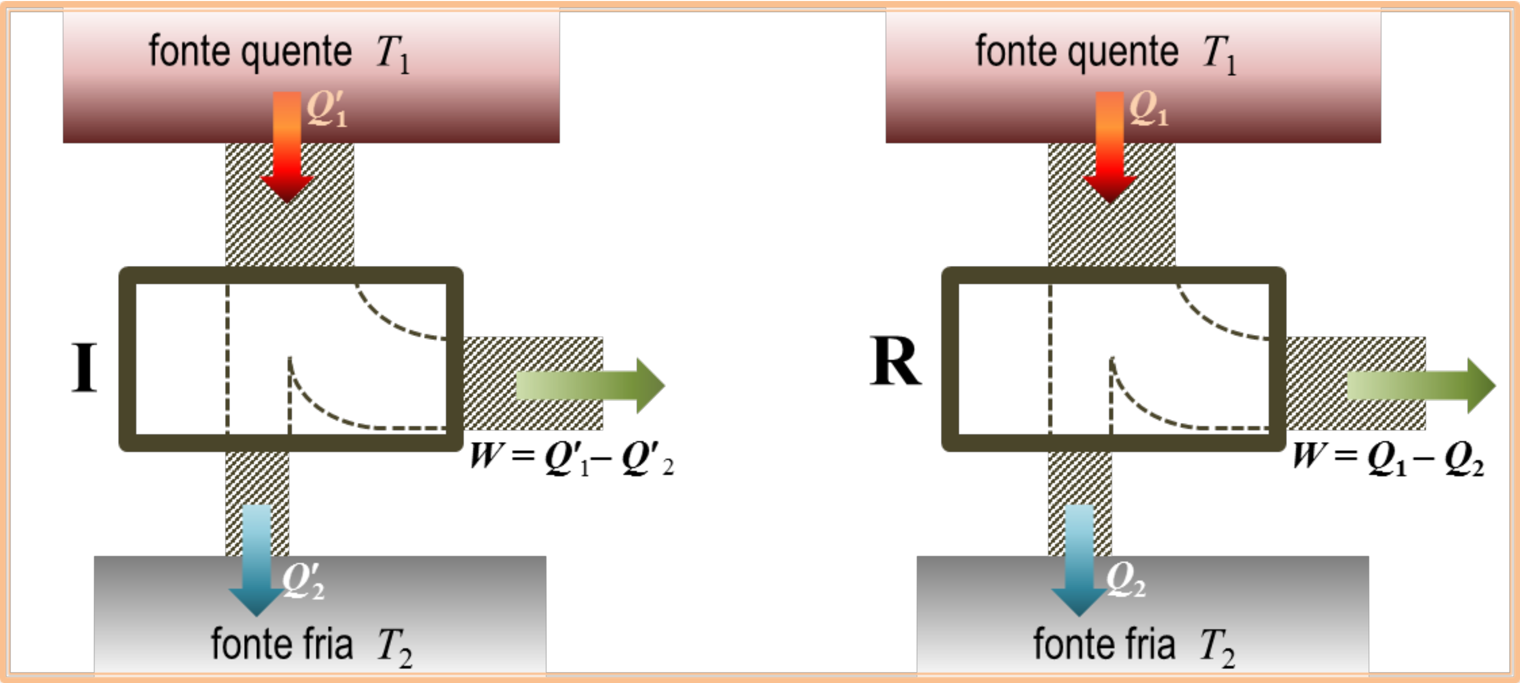
Uma vez que o ciclo de Carnot é reversível, ele pode ser descrito no sentido inverso e, neste caso temos $W < 0$, ou seja, precisamos realizar trabalho sobre o sistema para que ele remova calor Q_2 do reservatório frio e forneça calor Q_1 ao reservatório quente $\Rightarrow$ em lugar de um motor térmico a máquina de Carnot corresponde a um refrigerador.

Lucy V. C. Assali

Teorema de Carnot

1) Nenhuma máquina térmica que opere entre uma dada fonte quente (T_1) e uma dada fonte fria (T_2) pode ter rendimento, ou eficiência, superior ao de uma máquina de Carnot

Sempre podemos ajustar os ciclos de duas máquinas para que as duas produzam a mesma quantidade de trabalho W, em função das quantidades de calor trocadas com as duas fontes. Seja **R** um motor térmico de Carnot e seja **I** outro motor térmico qualquer, ambos operando entre as mesmas duas fontes térmicas:



Lucy V. C. Assali

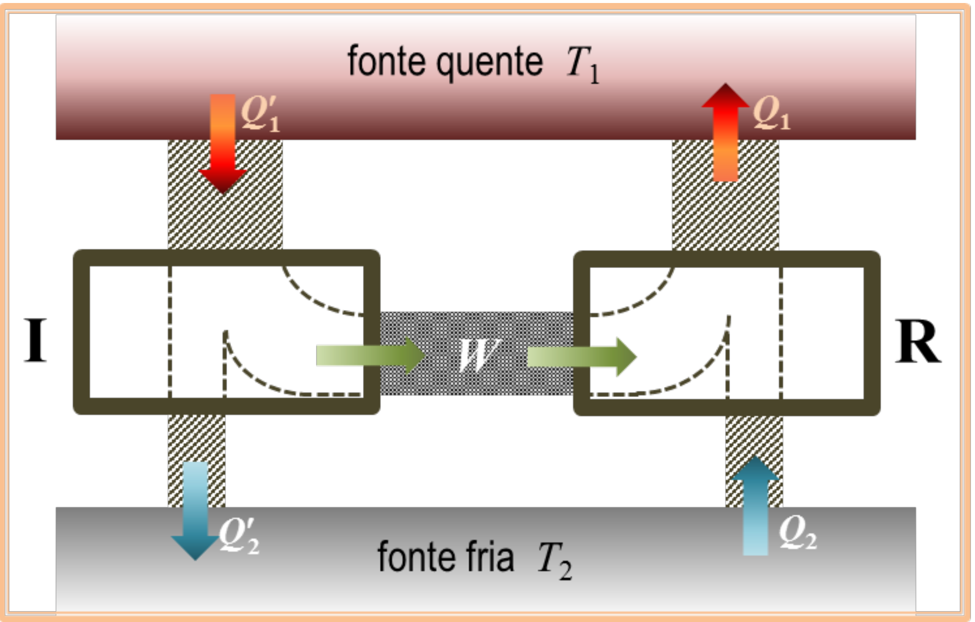
Teorema de Carnot

O rendimento de cada uma dessas máquinas é: $\eta_{\mathbf{R}} = \dfrac{W}{Q_1}$ e $\eta_{\mathbf{I}} = \dfrac{W}{Q'_1}$

Supondo que possamos ter, contrariamente ao teorema,

$$\boxed{\eta_{\mathbf{I}} > \eta_{\mathbf{R}}} \Longrightarrow Q'_1 < Q_1 \ \text{ ou } \ Q'_1 - W = Q'_2 < Q_2 = Q_1 - W$$

Como o ciclo de Carnot **R** é reversível, poderíamos utilizar o trabalho W produzido pela máquina **I**, funcionando como um motor térmico, para acionar **R**, funcionando como um refrigerador, com $W = Q'_1 - Q'_2 = Q_1 - Q_2$.



O resultado líquido do acoplamento de **R** com **I** seria equivalente, em cada ciclo, a <u>transferir calor da fonte fria para a fonte quente sem nenhum outro efeito</u>, $Q_2 - Q'_2 = Q_1 - Q'_1 > 0$, violando o enunciado de Clausius. Logo, devemos ter que

$$\boxed{\eta_{\mathbf{I}} \le \eta_{\mathbf{R}}} \ \checkmark$$

Lucy V.C. Assali

O Ciclo de Carnot e a Escala de Temperatura

O rendimento de uma máquina de Carnot, operando entre duas fontes, deve representar uma função universal de T_1 e T_2, independente das propriedades do sistema ou do agente empregado, uma vez que as únicas características que entram no ciclo são as temperaturas T_1 e T_2, que especificam as isotermas utilizadas. Vamos tomar, por simplicidade, como agente da máquina, um gás ideal. Assim:

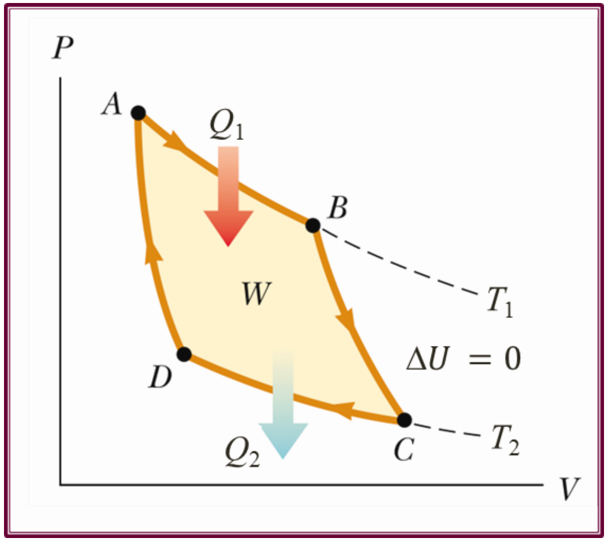
<u>*A→B:*</u> Expansão isotérmica $\Rightarrow \Delta U = 0 \therefore W_{AB} = Q_1$

$$Q_1 = W_{AB} = nRT_1 \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)$$

<u>*C→D:*</u> Compressão isotérmica $\Rightarrow \Delta U = 0 \therefore W_{CD} = Q_2$

$$Q_2 = W_{CD} = nRT_2 \ln\left(\frac{V_C}{V_D}\right)$$

$$\therefore \quad \boxed{\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1 \ln\left(\frac{V_B}{V_A}\right)}{T_2 \ln\left(\frac{V_C}{V_D}\right)}} \quad \mathbf{(1)}$$



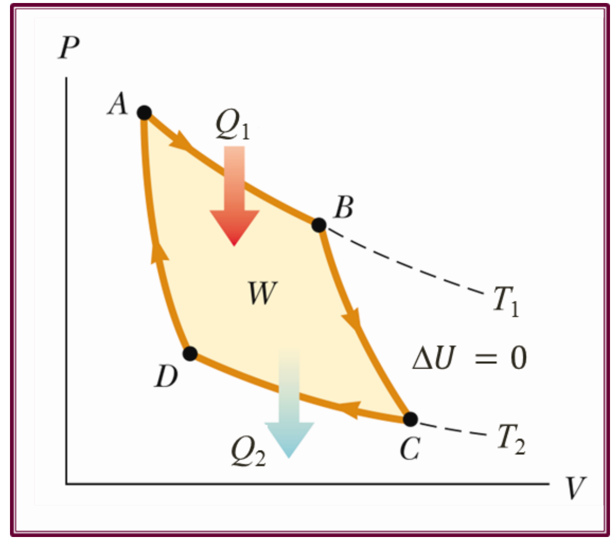
Lucy V. C. Assali

O Ciclo de Carnot e a Escala de Temperatura

$\underline{B \rightarrow C}$: Expansão adiabática ($Q = 0$) $\therefore\ V_C^{\gamma-1} T_2 = V_B^{\gamma-1} T_1$

$\underline{D \rightarrow A}$: Compressão adiabática ($Q = 0$) $\therefore\ V_D^{\gamma-1} T_2 = V_A^{\gamma-1} T_1$

$$\therefore \quad \boxed{\frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}} \qquad (2)$$



Das equações (1) e (2) temos:

$$\boxed{\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2}}$$

Para definir a escala absoluta, basta medir as quantidades de calor trocadas com fontes a essas temperaturas em um ciclo de Carnot, tomando o gelo como referência.

Teorema de Carnot

Utilizando a relação entre as quantidades de calor trocadas no <u>ciclo de Carnot</u> e as temperaturas das fontes, temos que o rendimento de uma <u>máquina de Carnot</u> é

$$\boxed{\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1}}$$

Se T_1 e T_2 são as temperaturas absolutas das fontes quente e fria, o máximo rendimento de um motor térmico operando entre elas é o rendimento de uma máquina de Carnot

A eficiência é nula se $T_1 = T_2$ e cresce se T_2 diminui e T_1 aumenta. Em geral, $T_2 \approx 300K$ e as tentativas de aumentar a eficiência das máquinas está em conseguir aumentar a temperatura (T_1) do reservatório quente. No entanto, ela pode ser igual à unidade (100%) se $T_2 = 0K$, o que não é possível $\Rightarrow$ *3ª Lei da Termodinâmica:* <u>Não é possível, por qualquer série finita de processos, atingir a temperatura zero absoluto</u>

Lucy V. C. Assali

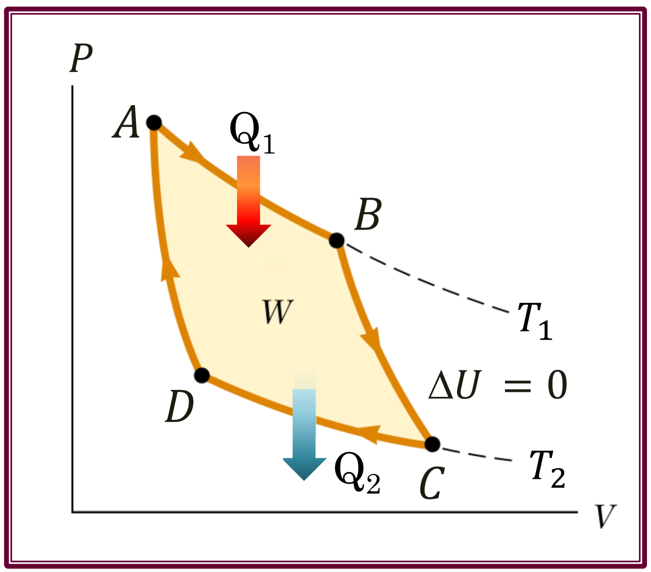
O Ciclo de Carnot: Eficiência Máxima

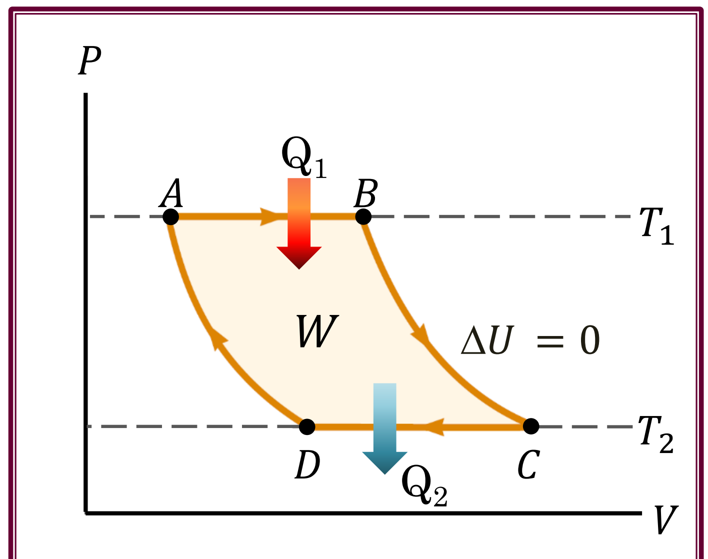
Máquina à vapor ideal de eficiência máxima: utiliza um ciclo de Carnot onde os agentes são uma mistura de líquido e vapor em equilíbrio:

Vaporização: se dá à temperatura de ebulição e à pressão constante (pressão do vapor), e a absorção de calor é utilizada para aumentar a proporção de vapor na mistura (calor latente de vaporização), até que todo o líquido esteja vaporizado.

Condensação: se dá à temperatura de liquefação e à pressão constante (pressão de vapor), e a perda de calor é utilizada para aumentar a proporção de líquido na mistura (calor latente de liquefação), até que todo vapor esteja liquefeito.

O diagrama P x V do ciclo de Carnot, com este sistema, apresenta as isotermas com pressão constante.



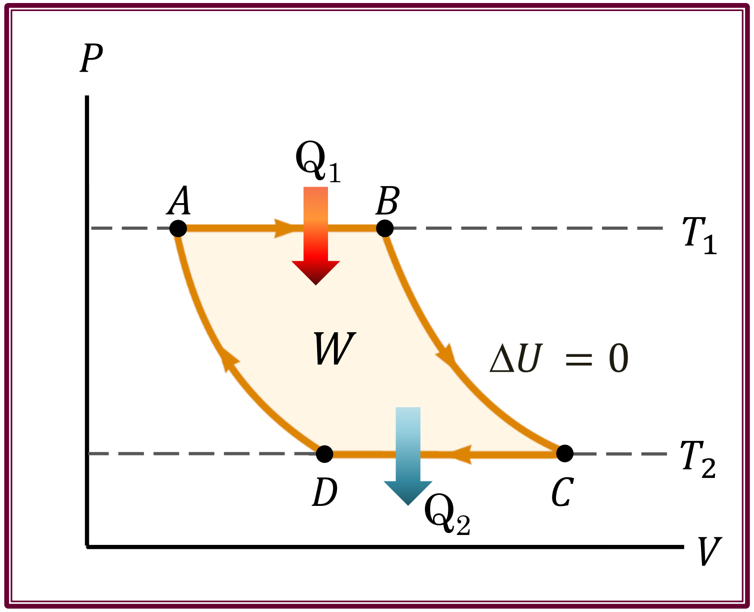


Lucy V. C. Assali

O Ciclo de Carnot: Eficiência Máxima

$\underline{A \to B}$: Vaporização isotérmica à temperatura constante T_1 e pressão (constante) de vapor P_1 (por exemplo: vaporização na caldeira)

$\underline{C \to D}$: Condensação isotérmica à temperatura constante T_2 e pressão (constante) de vapor P_2 (por exemplo: condensação no condensador)



$\underline{B \to C}$: Expansão adiabática

$\underline{D \to A}$: Compressão adiabática

Em uma máquina à vapor real, a porção $\underline{D \to A}$ é substituída pela transferência do condensador à caldeira, produzida pela bomba de alimentação, após o que a água ainda tem que ser aquecida na fornalha até a temperatura T_1. Esse processo é irreversível, bem como muitos outros que não foram levados em conta, como, por exemplo, o atrito entre o pistão e o cilindro e a condução de calor, de modo que *o* *__rendimento da máquina é muito inferior ao ideal__*.

Lucy V. C. Assali

O Ciclo de Carnot: Exemplos

Suponha que a caldeira de uma máquina à vapor esteja a 180ºC (T_1 = 453K) e que o vapor escape diretamente para a atmosfera, como no caso de uma locomotiva à vapor, de modo que a pressão de vapor P_2 é igual à pressão atmosférica. Como a temperatura de ebulição da água é T_2 = 100ºC = 373K, o rendimento ideal máximo seria

$$\boxed{\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{80}{453} = 0,18}$$

indicando que de cada 100 calorias geradas na caldeira, apenas 18 calorias, <u>no máximo</u>, estariam gerando trabalho útil. Na prática, seria pouco mais da metade deste valor. A vantagem do condensador em uma máquina à vapor é não somente evitar que o vapor se perca na atmosfera, permitindo reciclá-lo em circuito fechado, mas também permitir que ele seja resfriado (água corrente em uma serpentina) a uma temperatura $T_2 \approx 300$ K, próxima da temperatura ambiente, aumentando o rendimento ideal da máquina.

Lucy V. C. Assali

O Ciclo de Carnot: Exemplos

Assim, se $T_2 = 300$ K, o rendimento ideal aumenta (quase duplica), e temos

$$\boxed{\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{153}{453} = 0,33}$$

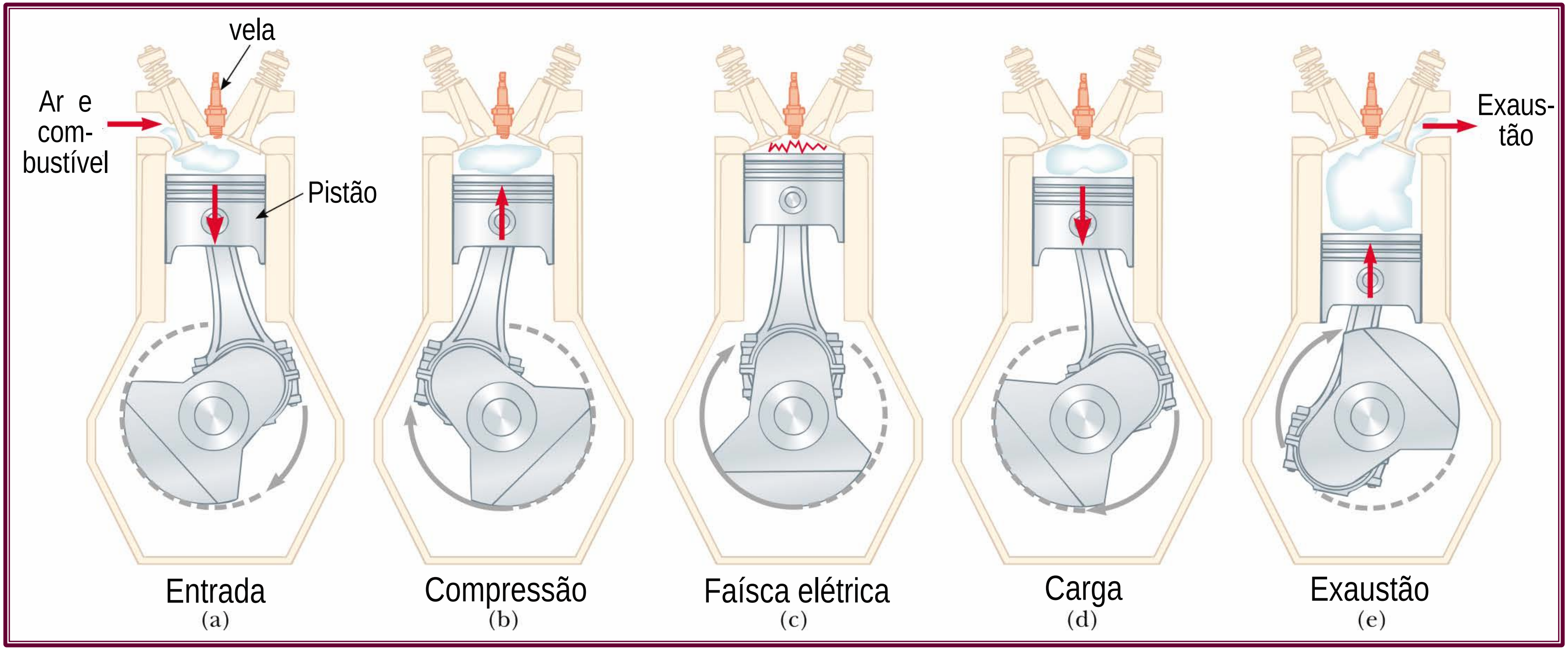
Como é difícil utilizar uma fonte fria com temperatura menor que a ambiente, o rendimento da máquina pode aumentar por elevação da temperatura da fonte quente. Elevando-a para $T_1 = 400$ºC (673K), o rendimento ideal é

$$\boxed{\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} = \frac{370}{673} = 0,55}$$

Hoje em dia, com turbinas a vapor especialmente projetadas, atingem-se rendimentos próximos de 50%. O rendimento de um motor de automóvel a gasolina é da ordem de ~25% e de um motor a diesel é ~40%.

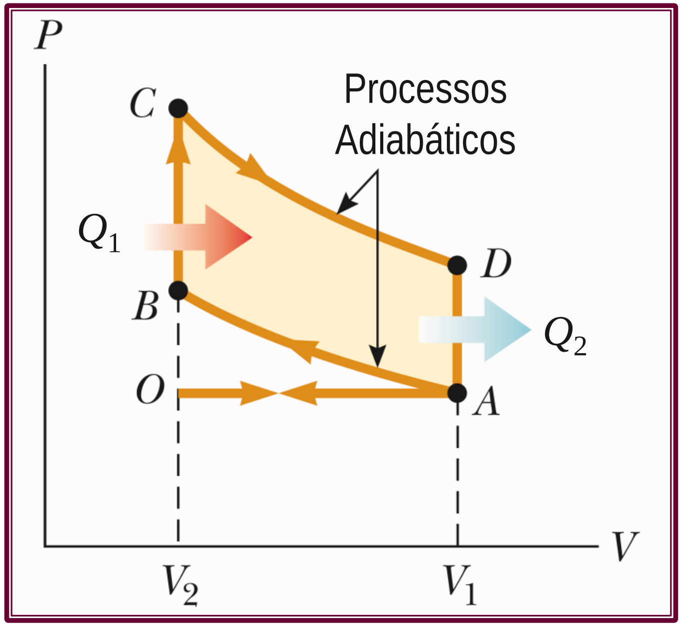
O Motor a Gasolina: Ciclo de Otto

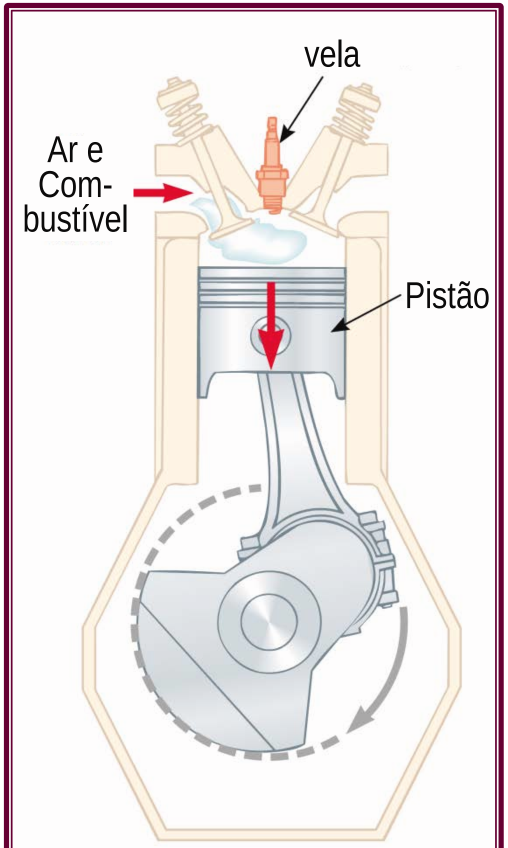
Em um motor a gasolina, seis processos ocorrem em cada ciclo, cinco dos quais estão na figura abaixo, onde consideramos o sistema sendo o interior de um cilindro acima do pistão. Em um ciclo, o pistão se move duas vezes para cima e para baixo. Este processo, em um diagrama P x V pode ser aproximado por um ciclo chamado ***Ciclo de Otto*** (idealização de um motor de quatro tempos)



O Motor a Gasolina: Ciclo de Otto

$\underline{O \rightarrow A}$: (a) O pistão se move para baixo e uma mistura de ar e gasolina, a pressão atmosférica, entra no cilindro (sistema). Neste processo o volume aumenta de V_2 para V_1. Esta é a parte de entrada de energia no ciclo do sistema, carregada com a massa de combustível (energia interna).





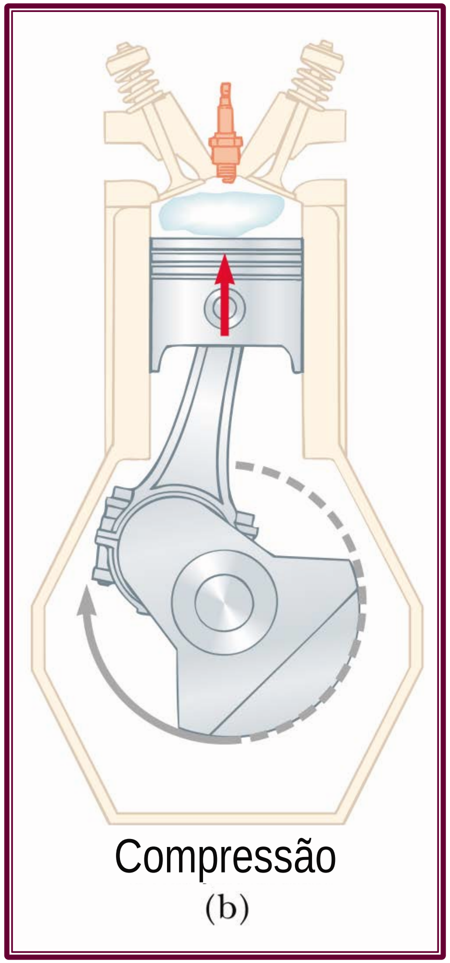
Entrada

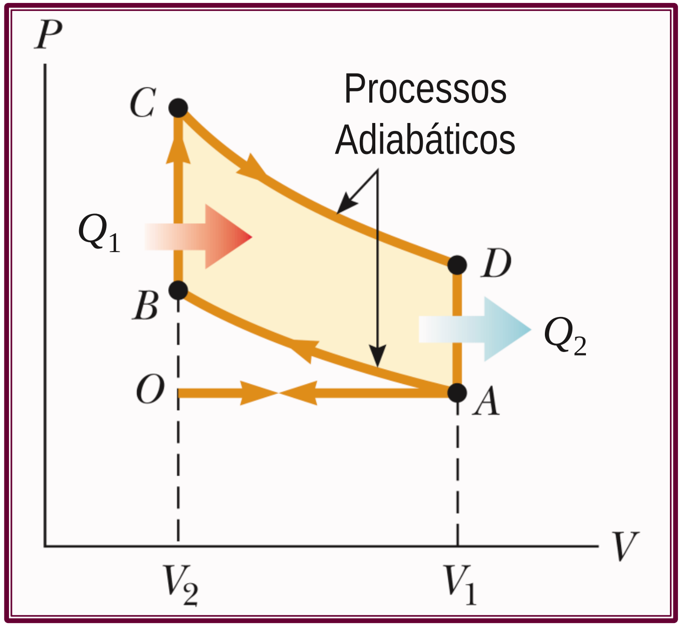
(a)

Lucy V. C. Assali

O Motor a Gasolina: Ciclo de Otto

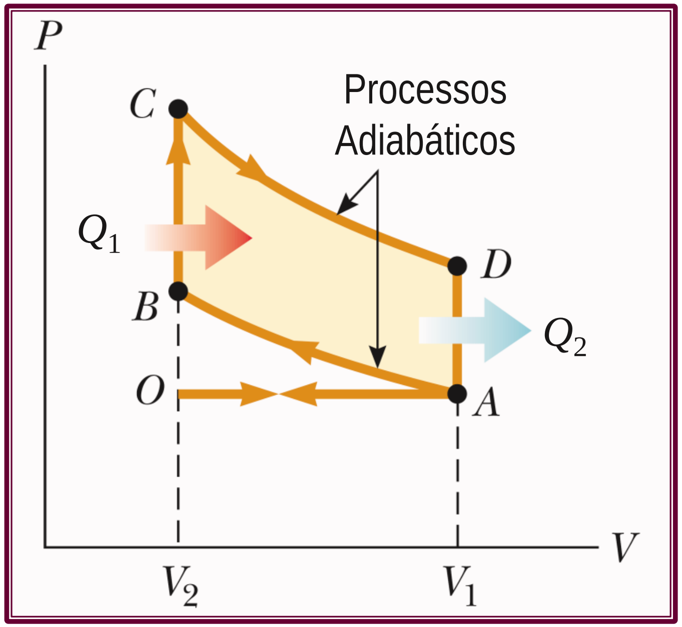
$\underline{A \rightarrow B}$: (b) O pistão se move para cima e a mistura de ar e combustível sofre uma compressão adiabática de V_1 para V_2 e a temperatura cresce de T_A para T_B. O trabalho efetuado pelo gás (W_{AB}) é negativo e seu valor é a área sob a curva AB do gráfico.

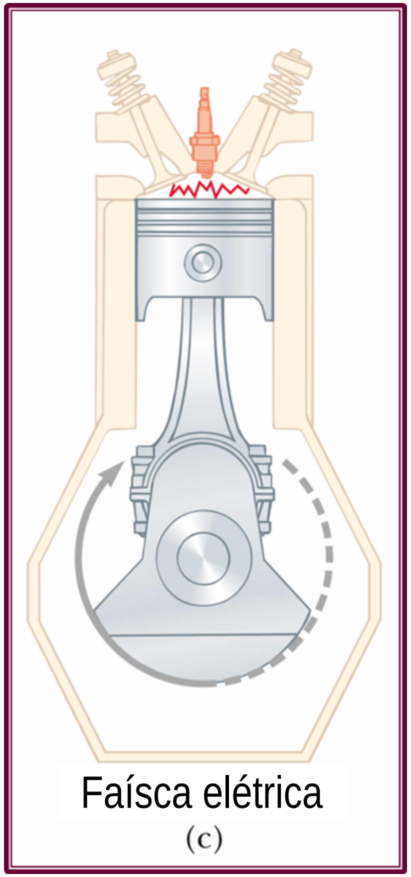




O Motor a Gasolina: Ciclo de Otto

$\underline{B \to C}$:(c) A combustão ocorre quando a faísca elétrica é acionada, e não faz parte do ciclo porque ocorre em um período de tempo muito curto, enquanto o pistão está em sua posição mais alta. A combustão representa uma transformação rápida da energia interna armazenada nas ligações químicas do combustível, que está relacionada com a temperatura. Neste período de tempo a pressão e a temperatura cilindro crescem rápidamente, com a temperatura variando de T_B para T_C. O volume permanece praticamente constante e nenhum trabalho é efetuado pelo gás. No gráfico, esta parte do processo pode ser representada como se uma quantidade de calor Q_2 entrasse no sistema (na realidade é só uma transformação de energia que já estava no cilindro)



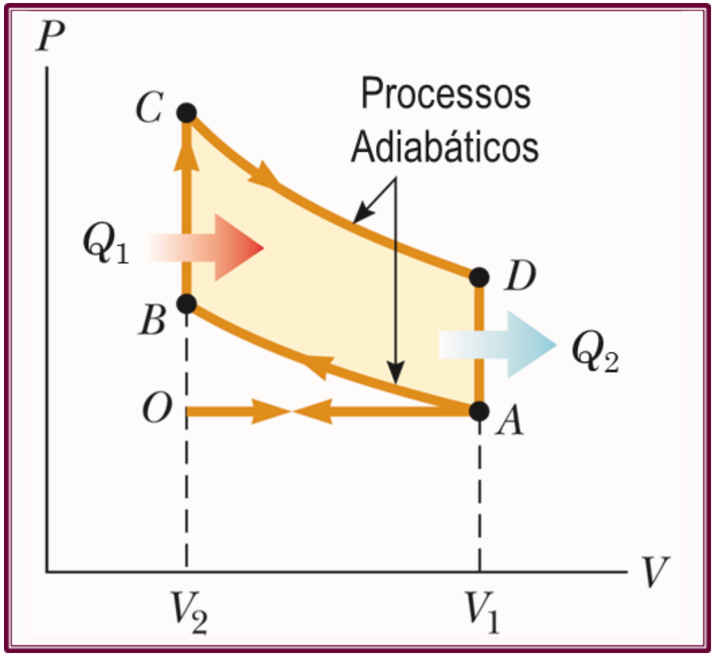


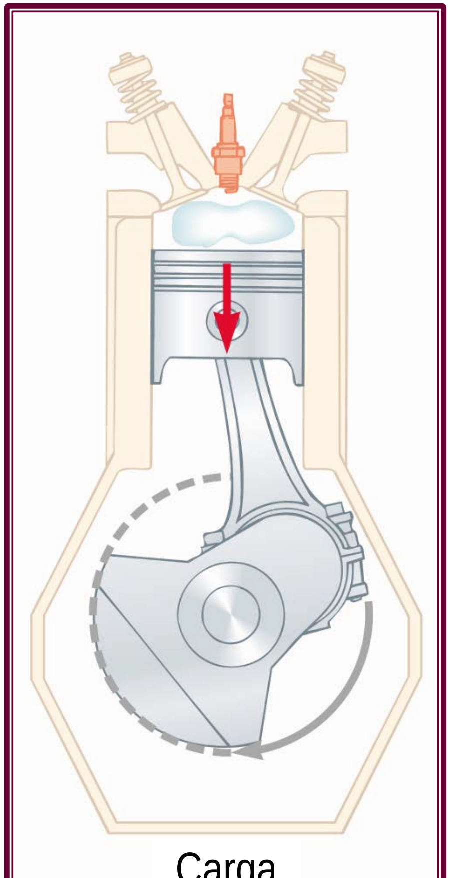
(c)

Lucy V. C. Assali

O Motor a Gasolina: Ciclo de Otto

$C \rightarrow D$: (d) Expansão adiabática do gás de V_2 para V_1. Essa expansão causa uma diminuição da temperatura de T_C para T_D. O trabalho efetuado pelo gás W_{CD} empurra o pistão para baixo e seu valor é a área sob a curva CD do gráfico (positivo).



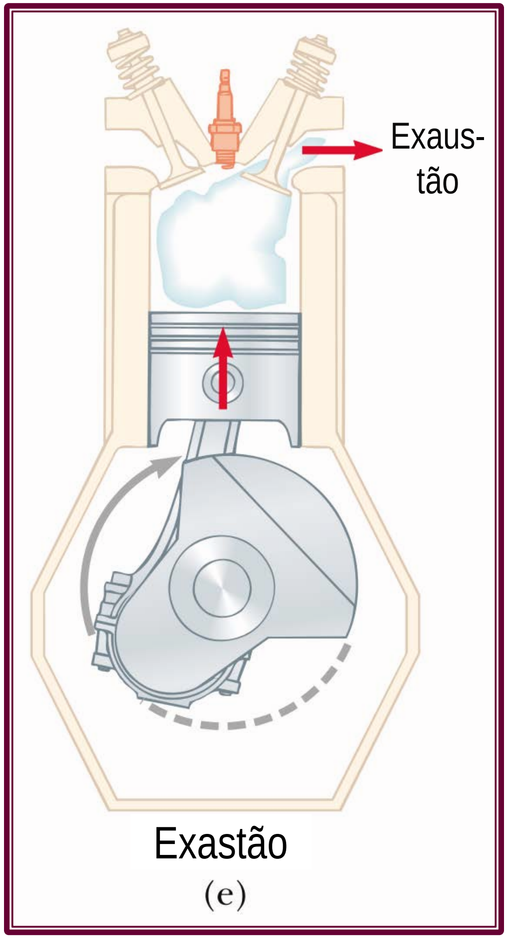


(d)

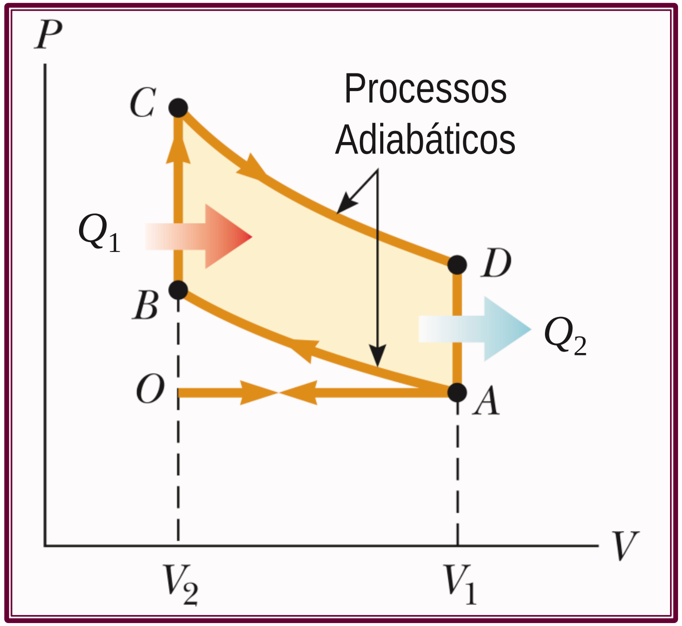
Lucy V. C. Assali

O Motor a Gasolina: Ciclo de Otto

<u>$D \rightarrow A$</u>: (Não mostrado na figura) A válvula de exaustão é aberta e a pressão rapidamente decresce. Durante este período de tempo muito curto, enquanto o pistão está em sua posição mais baixa, o volume é praticamente constante e energia é expelida do interior do cilindro, continuando a ser expelida na próxima etapa.



<u>$A \rightarrow O$</u>: (e) O pistão se move para cima enquanto a válvula de exaustão permanece aberta. Gases residuais são expulsos a pressão atmosférica e o volume decresce de V_1 para V_2. O ciclo é, então, repetido.



Lucy V. C. Assali

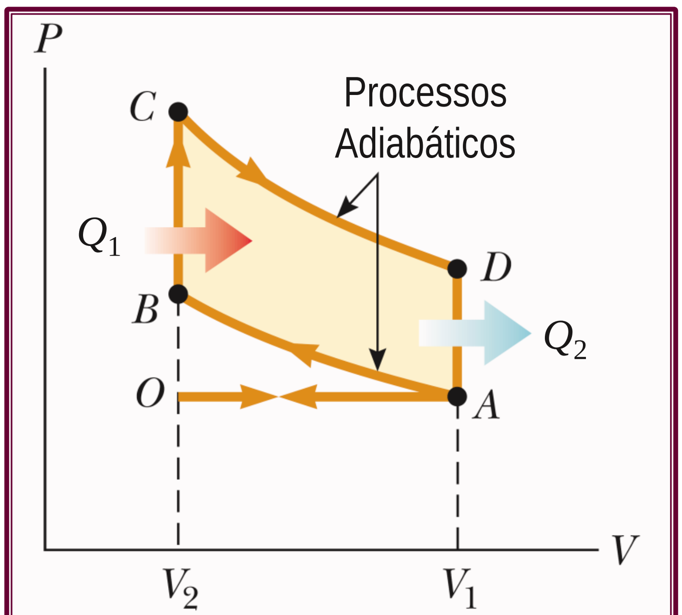
O Motor a Gasolina: Ciclo de Otto

Assumindo que a mistura ar-combustível é um *gás ideal*, podemos calcular o rendimento ideal de uma máquina operando no ciclo de Otto. Pela 1ª Lei da Termodinâmica:

$$W = Q_1 - Q_2$$

Os processos $B \rightarrow C$ e $D \rightarrow A$ acontecem a volume constante (isócoros) e

$$Q_1 = nC_V(T_C - T_B) \;\; e \;\; Q_2 = nC_V(T_D - T_A)$$



Assim, obtemos para o rendimento térmico:

$$\eta = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{(T_D - T_A)}{(T_C - T_B)}$$

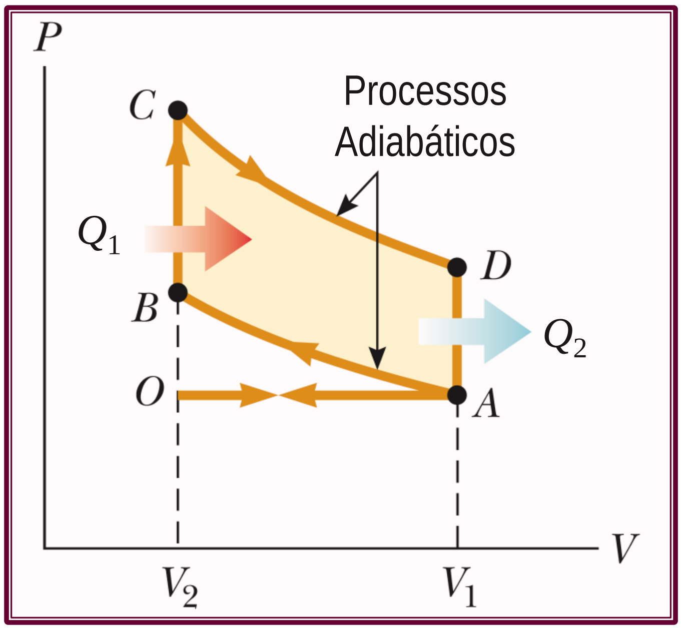
Lucy V. C. Assali

O Motor a Gasolina: Ciclo de Otto

Os processos $A \rightarrow B$ e $C \rightarrow D$ são adiabáticos ($Q = 0$) e, portanto obedecem a relação $TV^{\gamma-1} =$ constante, e para estes processos temos que

$$A \rightarrow B: \quad T_A V_A^{\gamma-1} = T_B V_B^{\gamma-1}$$

$$C \rightarrow D: \quad T_C V_C^{\gamma-1} = T_D V_D^{\gamma-1}$$



Como $V_A = V_D = V_1$ e $V_B = V_C = V_2$ temos

$$T_A = T_B \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} \quad e \quad T_D = T_C \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1}$$

E o rendimento térmico é

$$\boxed{\eta = 1 - \frac{1}{(V_1/V_2)^{\gamma-1}}}$$

onde $V_1/V_2 \Longrightarrow$ razão de compressão

Lucy V. C. Assali

O Motor a Gasolina: Ciclo de Otto

A eficiência, ou rendimento, do motor cresce com o aumento da razão de compressão V_1/V_2. Um valor típico para esta razão é 8 e tomando γ=1,4, temos

$$\eta = 1 - \frac{1}{(V_1/V_2)^{\gamma-1}} = 1 - 8^{0,4} \approx 0,57$$

mostrando que o rendimento de um motor operando em um ciclo de Otto idealizado é de 57%, muito maior que os ~25% alcançados em motores reais, devido aos efeitos de atrito, de condução de calor através das paredes do cilindro e de uma incompleta combustão da mistura ar-gasolina. Os motores a diesel operam em um ciclo similar ao de Otto, mas não utilizam a faísca elétrica para iniciar a combustão. A razão de compressão V_1/V_2 para estes motores é muito maior do que a dos motores a gasolina e somente ar está presente no cilindro no início do processo de compressão. Assim, a compressão do ar, no cilindro, é feita em um volume muito pequeno e, como consequência, a temperatura do cilindro acaba sendo muito alta. Neste estágio, o combustível é injetado no cilindro. A temperatura é alta o suficiente para que a ignição na mistura ar-combustível aconteça, sem a necessidade da faísca elétrica. Os motores a diesel são mais eficientes (~40%) por causa de sua maior razão de compressão, resultando em maiores temperaturas de combustão.

Lucy V. C. Assali