TRABALHO E CALOR

DEFINIÇÃO DE TRABALHO

O trabalho é usualmente definido como uma força *F* agindo através de um deslocamento *x,* sendo este deslocamento na direção da força.

Isto é:

$$W = \int_1^2 F\,dx$$

Essa relação é muito útil porque nos permite determinar o trabalho necessário para levantar um peso, esticar um fio, ou mover uma partícula carregada através de um campo magnético.

Definição:

Um sistema realiza trabalho se o único efeito sobre o meio (tudo externo ao sistema) **puder ser** o levantamento de um peso.

A definição não afirma que um peso foi levantado ou que uma força agiu através de uma distância dada, mas que o único efeito externo ao sistema poderia ser o levantamento de um peso.

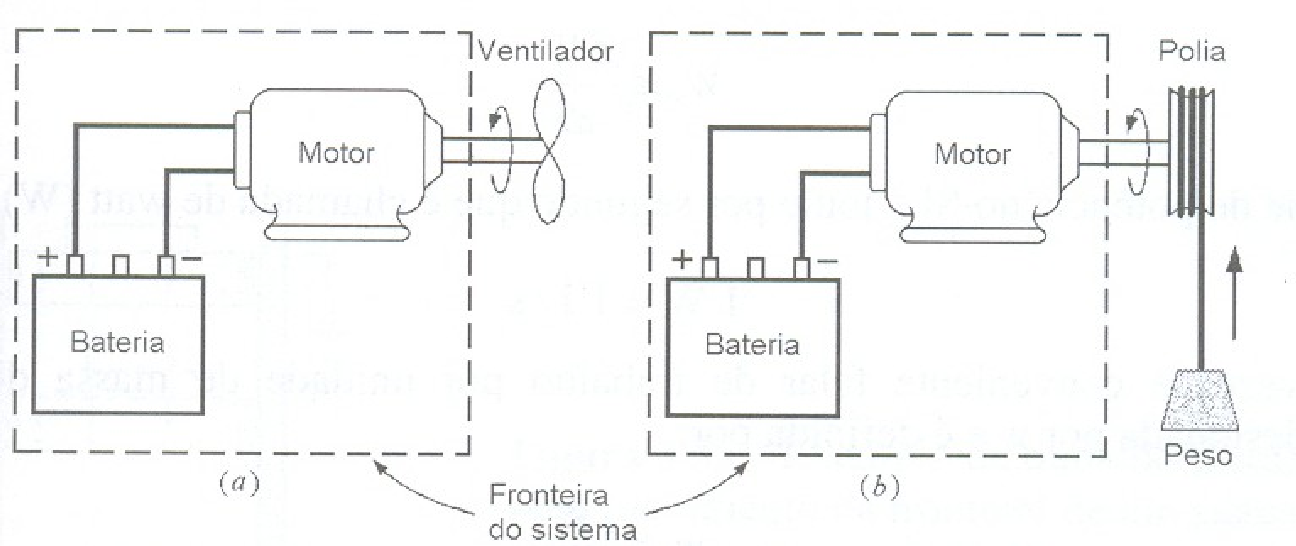
O trabalho realizado por um sistema é considerado positivo e o trabalho realizado sobre um sistema é considerado negativo.

O símbolo *W* designa o trabalho realizado por um sistema.

O trabalho é uma forma de transferência de energia.

MEC 011

MÁQUINAS TÉRMICAS



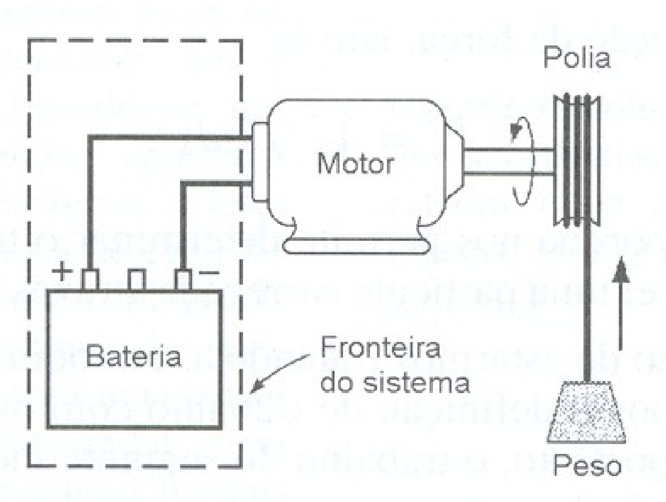
Consideremos como um sistema a bateria e o motor e façamos com que o motor acione um ventilador. Trabalho atravessa a fronteira do sistema? Para responder a essa questão, usando a definição de trabalho dada acima, façamos com que o ventilador seja substituído pela combinação de polia e peso.

Com a rotação do motor, o único efeito externo ao sistema é o levantamento de um peso.

Assim, para o nosso sistema original concluímos que trabalho atravessa a fronteira do sistema.

MEC 011

MÁQUINAS TÉRMICAS



A fronteira do sistema é alterada de modo que passe a incluir apenas a bateria. Trabalho cruza a fronteira do sistema?

Ao responder essa questão, estaremos respondendo a uma outra mais geral, isto é, constitui trabalho o fluxo de energia elétrica através da fronteira de um sistema?

O único fator limitante, para se ter como único efeito externo o levantamento de um peso, e a ineficiência do motor. Assim, quando projetarmos um motor mais eficiente, com menor perdas de mancal e elétricas, reconhecemos que poderemos nos aproximar da condição que satisfaz a exigência de se ter o levantamento de um peso como único efeito externo.

Conclusão: quando há um fluxo de eletricidade através da fronteira de um sistema trata-se de trabalho.

UNIDADES DE TRABALHO

Como já foi observado, consideramos que o trabalho realizado por um sistema, tal como o realizado por um gás em expansão contra um êmbolo, é positivo, e que o trabalho realizado sobre um sistema, tal como o realizado por um êmbolo ao comprimir um gás, é negativo.

O trabalho positivo significa que sai energia do sistema e trabalho negativo significa que é acrescentada energia ao sistema.

A nossa definição de trabalho envolve o levantamento de um peso, isto é, o produto de uma unidade de força (1 newton) atuando através de uma distância unitária (1 metro). Essa unidade de trabalho no SI é chamada de joule (J).

$$1\ J = 1\ N.m$$

Potência é o trabalho realizado por unidade de tempo:

$$Potência \rightarrow \dot{W} = \frac{\delta W}{\delta t}$$

A unidade de potência no SI é joule por segundo que é chamada de watt (W).

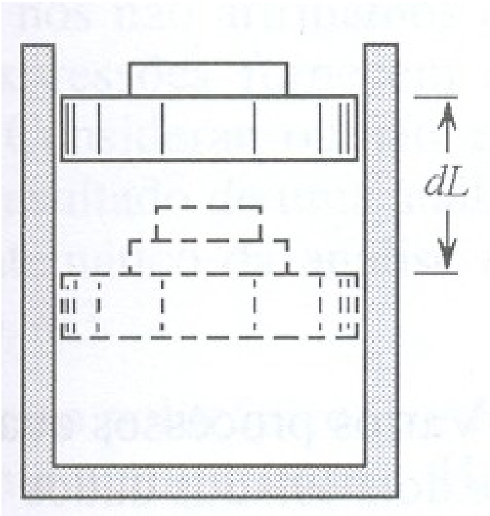
$$1W=1J/s$$

Muitas vezes é conveniente falar de trabalho por unidade de massa do sistema. Essa quantidade é designada por w e é definida por:

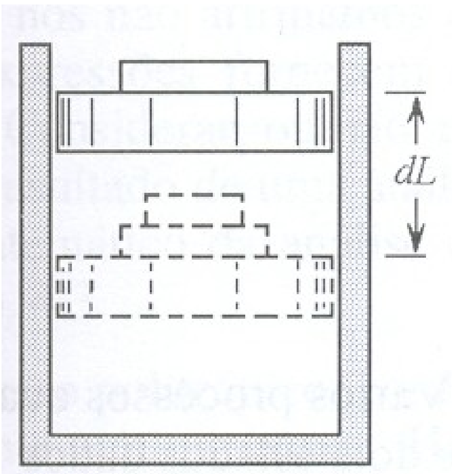
$$w \equiv \frac{W}{m}$$

TRABALHO REALIZADO NUM SISTEMA COMPRESSÍVEL SIMPLES DEVIDO AO MOVIMENTO DE FRONTEIRA

Já observamos que um sistema pode realizar trabalho, e também que o trabalho pode ser realizado sobre o sistema, de vários modos diferentes.
Estas formas de trabalho incluem aquele realizado por um eixo rotativo, o trabalho elétrico e o trabalho realizado devido ao movimento da fronteira do sistema (tal como o efetuado pelo movimento do êmbolo num cilindro).
Vamos considerar com algum detalhe, o trabalho realizado pelo movimento da fronteira de um sistema compressível simples durante um processo quase-estático.



Considere o gás contido num cilindro com êmbolo como sistema.
Vamos retirar um dos pequenos pesos localizados sobre o êmbolo e, assim, provocaremos um movimento do embolo para cima (a distância percorrida pelo êmbolo é *dL).*
Este processo pode ser considerado quase-estático e vamos calcular o trabalho *W,* realizado pelo sistema, durante este processo.



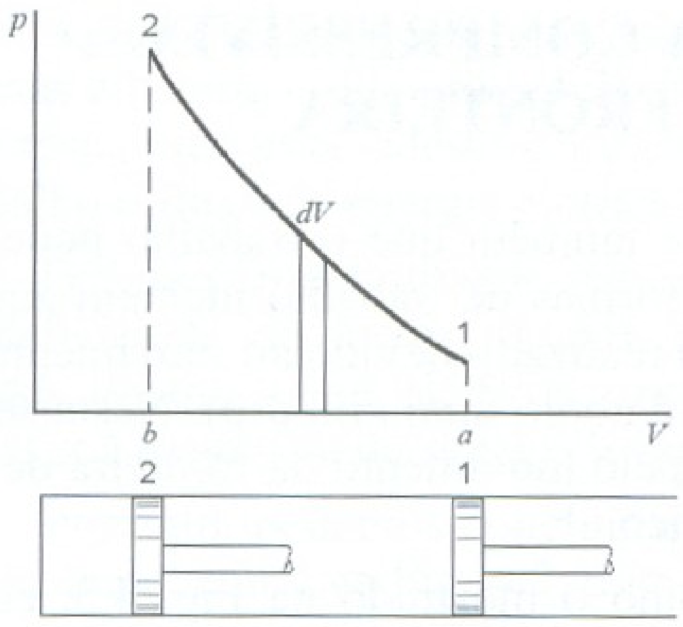
A força total sobre o êmbolo é pA , onde p é a pressão no gás e A é a área do êmbolo. Assim, o trabalho δW é:

$$\delta W = p\,A\,dL$$

porém, $A\,dL = dV$, que é a variação de volume do gás.
Portanto:

$$\delta W = p\,dV$$

O trabalho realizado pelo sistema, devido ao movimento da fronteira, durante um processo <u>quase-estático</u>, pode ser determinado pela integração de $\delta W = p\,dV$.
Entretanto, essa integração somente pode ser efetuada se conhecermos a relação entre p e V durante esse processo.
Essa relação pode ser expressa na forma de uma equação ou na forma de um gráfico.



$$ {}_1W_2 = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 p\, dV $$

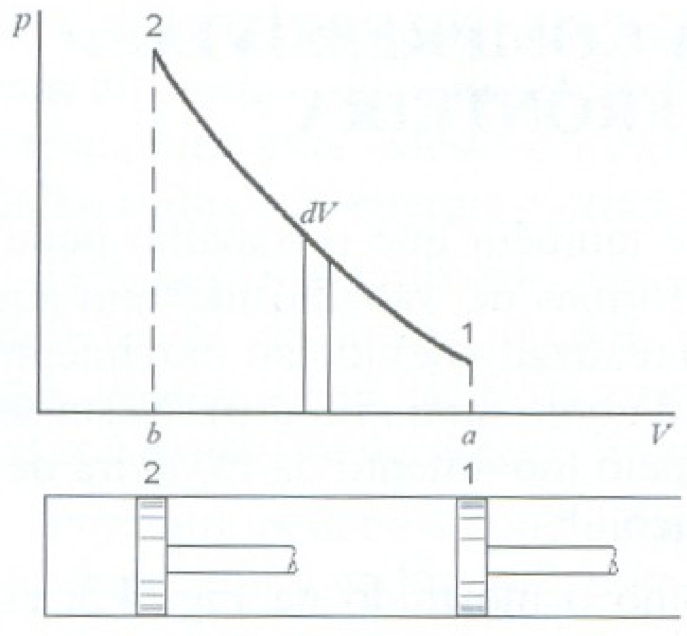
Primeiramente vamos considerar a solução gráfica.

Utilizaremos, como exemplo, o processo de compressão do ar que ocorre num cilindro.

No início do processo, o êmbolo está na posição 1 e a pressão é relativamente baixa.

Esse estado é representado pelo ponto 1 no diagrama pressão-volume (usualmente referido como diagrama *p- V).*

No fim do processo, o êmbolo está na posição 2 e o estado correspondente do gás é representado pelo ponto 2 no diagrama p-V.

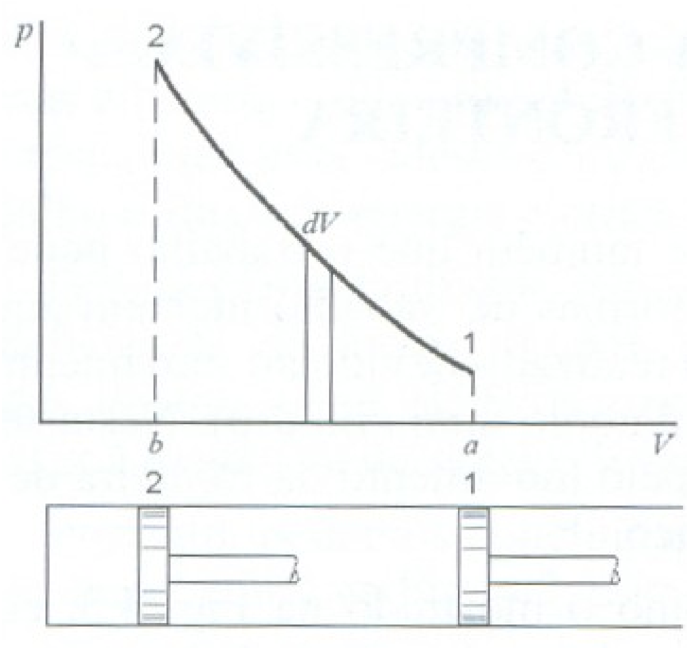


Vamos admitir que essa compressão seja um processo quase-estático e que, durante o processo, o sistema passe através dos estados mostrados pela linha que liga os pontos 1 e 2 do diagrama *p- V.*

A hipótese do processo ser quase-estático é essencial, porque cada ponto da linha 1-2 representa um estado definido e estes estados corresponderão aos estados reais do sistema somente se o desvio do equilíbrio for infinitesimal.

O trabalho realizado sobre o ar durante esse processo de compressão pode ser determinado pela integração de $\delta W = p\, dV$.

$$ {}_1W_2 = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 p\, dV $$



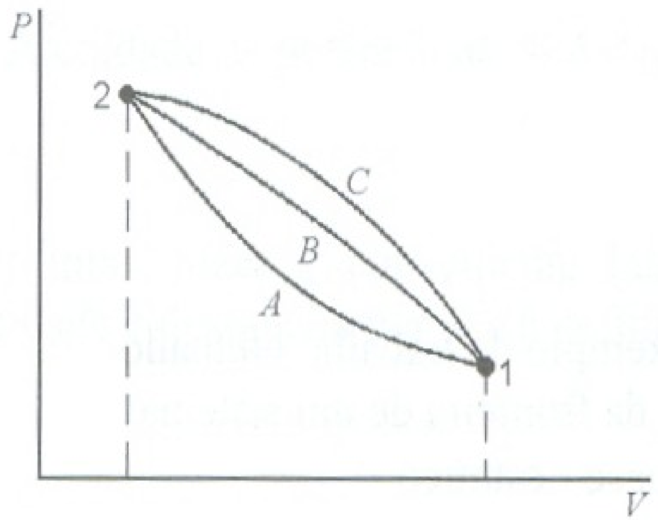
$$ {}_1W_2 = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 p\, dV $$

O símbolo ${}_1W_2$ deve ser interpretado como o trabalho realizado durante o processo (do estado 1 ao estado 2).

Pelo exame do diagrama *p- V,* o trabalho realizado durante esse processo é representado pela área sob a curva 1-2, ou seja, a área *a-1-2-b-a.*

Nesse exemplo, o volume diminuiu, e a área *a-1-2-b-a* representa o trabalho realizado sobre o sistema.

Se o processo tivesse ocorrido do estado 2 ao estado 1, pelo mesmo caminho, a mesma área representaria o trabalho realizado pelo sistema.



$$\int_1^2 dV = V_2 - V_1$$

Uma nova consideração do diagrama *p* - *V* conduz a uma outra conclusão importante.

É possível ir do estado 1 ao estado 2 por caminhos quase-estáticos muito diferentes, tais como A, *B* ou C.

Como a área debaixo de cada curva representa o trabalho para cada processo, o trabalho envolvido em cada caso não é uma função somente dos estados inicial e final do processo, mas também depende do caminho que se percorre ao se ir de um estado a outro.

Por essa razão, o trabalho é chamado de função de linha, ou em linguagem matemática, *δW* é uma diferencial inexata.

Estes conceitos levam a uma breve consideração sobre as funções de ponto e as de linha ou, usando outros termos, sobre as diferenciais exatas e as inexatas.

As propriedades termodinâmicas são funções de ponto - denominação que surge pelo seguinte fato: para um dado ponto de um diagrama, o estado está fixado e, assim, só existe um valor definido para cada propriedade correspondente a este ponto.

As diferenciais de funções de ponto são diferenciais exatas e a integração é simplesmente:

$$\int_1^2 dV = V_2 - V_1$$

Assim, podemos falar de volume no estado 2 e de volume no estado 1, e a variação de volume depende somente dos estados inicial e final.

O trabalho, por outro lado, é uma função de linha, pois, como já foi mostrado, o trabalho realizado num processo quase-estático entre dois estados depende do caminho percorrido.

As diferenciais de funções de linha são diferenciais inexatas. Será usado o símbolo δ para designar as diferenciais inexatas (em contraste a *d* para diferenciais exatas).

Assim, para o trabalho, escrevemos:

$$\int_1^2 \delta W = {}_1W_2$$

Seria mais preciso usar a notação ${}_1W_{2,A}$ para indicar o trabalho realizado durante a mudança do estado 1 ao 2 pelo caminho A.

Entretanto, subentende-se na notação ${}_1W_2$ o processo especificado entre os estados 1 e 2.

Deve-se notar que nunca mencionamos o trabalho do sistema no estado 1 ou no estado 2 e assim nunca escreveremos $W_2 - W_1$.

$$ {}_1W_2 = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 p\,dV $$

Na determinação da integral devemos sempre lembrar que estamos interessados na determinação da área situada sob a curva.

Relativamente a esse aspecto, identificamos duas classes de problemas:

1. A relação entre *P* e *V* é dada em termos de dados experimentais ou em forma gráfica (como, por exemplo, o traço num osciloscópio). Nesse caso, podemos determinar o trabalho por integração gráfica ou numérica.
2. A relação entre *p* e *V* é tal que torna possível o seu ajuste por uma relação analítica. Assim podemos fazer a integração diretamente.

Um exemplo comum desse segundo tipo de relação funcional é o caso de um processo chamado politrópico, no qual

$$ p\,V^n = constante $$

é válido em todo o processo.

O expoente n pode tomar qualquer valor entre $-\infty$ e $+\infty$ e é função do processo em questão.

$p\,V^n = constante$

Nestas condições podemos integrar do seguinte modo:

$$pV^n = constante = p_1V_1^n = p_2V_2^n$$

$$p = \frac{constante}{V^n} = \frac{p_1V_1^n}{V^n} = \frac{p_2V_2^n}{V^n}$$

$$\int_1^2 p\,dV = constante \int_1^2 \frac{dV}{V^n} = constante\left(\frac{V^{-n+1}}{-n+1}\right)\Bigg|_1^2$$

$$= \frac{constante}{1-n}\left(V_2^{1-n} - V_1^{1-n}\right) = \frac{p_2V_2^nV_2^{1-n} - p_1V_1^nV_1^{1-n}}{1-n}$$

$$\int_1^2 p\,dV = \frac{p_2V_2 - p_1V_1}{1-n}$$

Note que o resultado apresentado é válido para qualquer valor do expoente *n,* exceto para *n* = 1.

Para o caso onde *n* = 1, temos

$$pV^n = pV = constante = p_1V_1 = p_1V_2$$

$$\int_1^2 p\,dV = p_1V_1\int_1^2 \frac{dV}{V} = p_1V_1 \ln\frac{V_2}{V_1}$$

MEC 011

MÁQUINAS TÉRMICAS

Observe que não afirma-se que o trabalho é igual as expressões indicadas.

Estas expressões fornecem apenas o valor de uma certa integral, ou seja, um resultado matemático.

Considerar, ou não, que aquela integral corresponda ao trabalho num dado processo, depende do resultado de uma análise termodinâmica do processo.

É importante manter separado o resultado matemático da análise termodinâmica, pois há muitos casos em que o trabalho não é dado por

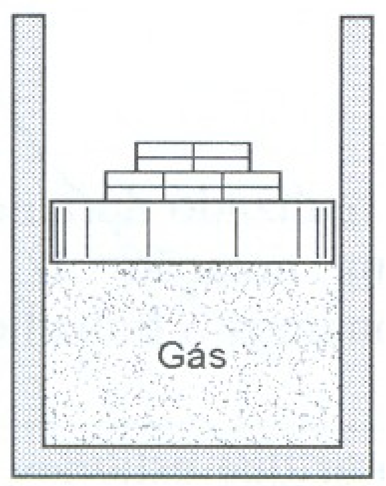
$$ {}_1W_2 = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 p\,dV $$

O processo politrópico apresenta uma relação funcional especial entre p e V durante um processo.

Há muitas outras relações possíveis.

MEC 011

MÁQUINAS TÉRMICAS



Consideremos como sistema o gás contido no conjunto cilindro - êmbolo mostrado na Figura.

Observe que vários pesos pequenos estão colocados sobre o êmbolo.

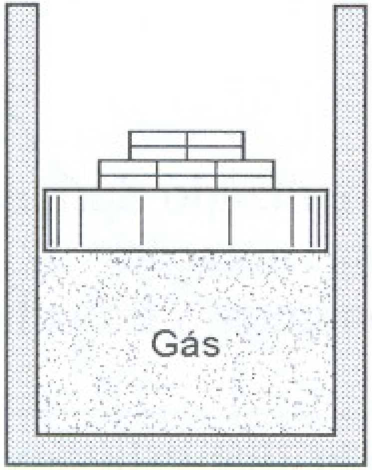
A pressão inicial é de 200 kPa e o volume inicial do gás e de 0,04 m³.

Coloquemos um bico de Bunsen embaixo do cilindro e deixemos que o volume do gás aumente para 0,1 m³, enquanto a pressão permanece constante.

Calcular o trabalho realizado pelo sistema durante esse processo.

$$ {}_1W_2 = \int^2 p\,dV $$

$$ {}_1W_2 = p\int^2 dV = p(V_2 - V_1) = 200\,kPa \bullet (0{,}1 - 0{,}04)\,m^3 = 12{,}0\,kJ $$



Consideremos o mesmo sistema e as mesmas condições iniciais, porém, ao mesmo tempo que o bico de Bunsen está sob o cilindro e o êmbolo se levanta, removamos os pesos deste, de tal maneira que durante o processo a temperatura do gás se mantém constante.

Se admitirmos um comportamento de gás perfeito, então:

pV=mRT ► *pV=constante*

Note que esse processo é politrópico com o expoente *n* = 1.

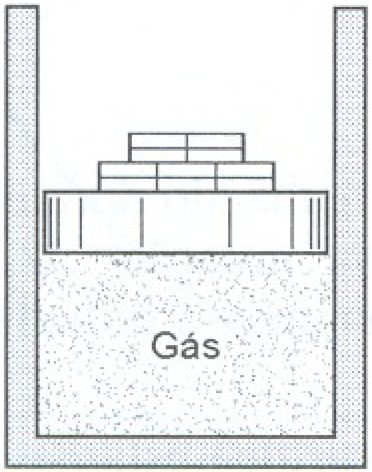
Da nossa análise, concluímos que o trabalho pode ser calculado de:

$$ {}_1W_2 = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 p\, dV $$

$$ {}_1W_2 = \int_1^2 p\, dV = p_1 V_1 \ln\frac{V_2}{V_1} = 200\, kPa \bullet 0{,}04 m^3 \bullet \ln\frac{0{,}10}{0{,}04} = 7{,}33\, kJ $$

MEC 011

MÁQUINAS TÉRMICAS



Consideremos o mesmo sistema porém, durante a transferência de calor, removamos os pesos de tal maneira que a expressão $pV^{1.3}$ = constante descreva a relação entre a pressão e o volume durante o processo.
Novamente, o volume final é 0,1 m³.
Calcular o trabalho.

Esse processo é politrópico, com n = 1,3.
Analisando o processo, concluímos que o trabalho pode ser calculado por:

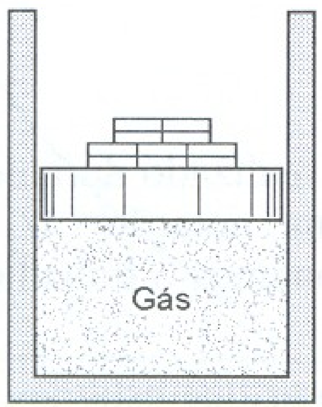
$$ {}_1W_2 = \int_1^2 \delta W = \int_1^2 p\,dV $$

$$ p_2 = p_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^n = 200 \left(\frac{0{,}04}{0{,}10} \right)^{1{,}3} = 60{,}77\,kPa $$

$$ {}_1W_2 = \int_1^2 p\,dV = \frac{p_2V_2 - p_1V_1}{1 - 1{,}3} = \frac{60{,}77 \bullet 0{,}10 - 200 \bullet 0{,}04}{-0{,}3} = 6{,}41\,kJ $$

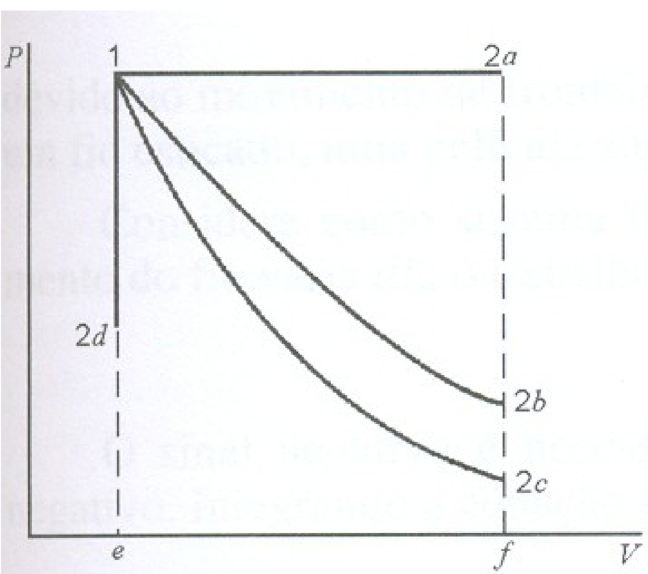
MEC 011

MÁQUINAS TÉRMICAS

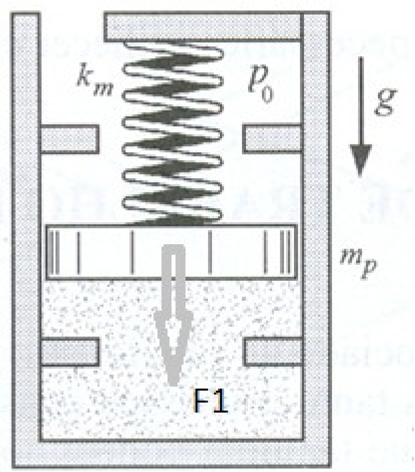


Consideremos o sistema e o estado inicial dados nos três primeiros exemplos, porém mantenhamos o êmbolo preso por meio de um pino, de modo que o volume permaneça constante.
Além disso, façamos com que calor seja transferido do sistema até que a pressão caia a 100 kPa.
Calcular o trabalho.

Como $\delta W = p\, dV$ para um processo quase-estático, o trabalho é nulo porque, neste caso, não há variação de volume.



Os quatro processos do exemplo estão indicados no diagrama *p - V* da Figura.
O processo *1-2a* é um processo a pressão constante e a área *1-2a-f-e-1* representa o trabalho.
Analogamente, a linha 1-2b representa o processo em que *pV* = constante, a linha 1-2c o processo em que $pV^{1,3}$ = constante e a linha *1-2d* representa o processo a volume constante.
Deve-se comparar as áreas sob cada curva com os resultados numéricos obtidos na resolução deste exemplo.



EXEMPLO

Consideremos o conjunto cilindro-pistão mostrado na Figura.

O conjunto contém um gás qualquer, a massa do pistão é m_p, a pressão atmosférica é p_o, a mola é linear (com constante de mola k_m) e uma força F_1 atua sobre o pistão.

O movimento do pistão está restrito pela presença dos esbarros superior e inferior.

Um balanço de forças no pistão, na direção do movimento, fornece:

$$m_p\, a = \sum F_{\uparrow} - \sum F_{\downarrow}$$

Note que a aceleração é nula num processo quase-estático.

Quando o pistão está localizado entre os esbarros, as forças relevantes são:

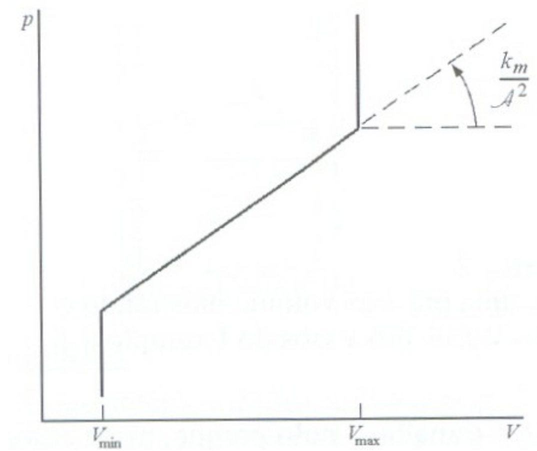
$$\sum F_{\uparrow} = p\,A \qquad \sum F_{\downarrow} = m_p\, g + p_0 A + k_m\left(x - x_0\right) + F_1$$

com x_o sendo a posição do pistão onde a força exercida pela mola é nula.

Observe que x_o é função do modo como é instalada a mola.

Dividindo-se o balanço de forças pela área do pistão, A , obtemos a pressão no gás, ou seja:

$$p = p_0 + \left[m_p\, g + F_1 + k_m\left(x - x_0\right)\right] / A$$



Para facilitar a visualização deste processo num diagrama *p- V,* vamos converter a equação anterior, que é função de *x,* em função de *V.*

Para isto basta dividi-la e multiplica-la pela área do pistão.

Assim

$$p = p_0 + \frac{m_p\, g}{A} + \frac{F_1}{A} + \frac{k_m}{A^2}\left(V - V_0\right) = C_1 + C_2 V$$

Esta relação fornece a pressão como uma função linear do volume.

A inclinação desta reta é $C_2 = k_m/A^2$.

A presença dos esbarros impõe limites máximo e mínimo para o volume do gás e a Figura mostra as possíveis conjuntos de *P* e *V* que podem ser encontrados no processo descrito no exemplo.

Note que este diagrama *P- V* é válido qualquer que seja o gás contido no conjunto cilindro-êmbolo.

O trabalho para um processo quase estático é dado por:

$$\int_1^2 p\, dV = \acute{A}REA\, sob\, a\, curva\, do\, processo = {}_1W_2 = \frac{1}{2}\left(p_1' + p_2'\right)\left(V_2 + V_1\right)$$

com $p_1' = p_1$ e $p_2' = p_2$.

Além disto, as pressões estão sujeitas as restrições: $p_{min} \leq p_1'$ e $p_2' \leq p_{max}$

Estes limites mostram que somente na parte do processo descrito pela linha inclinada, ou seja, quando o pistão se movimenta, ocorre a realização de trabalho.
Para as partes do processo onde a pressão é menor que p_{min} ou a pressão é maior que p_{max} não existe realização de trabalho, pois o pistão está encostado no esbarro inferior ou no superior.
O trabalho máximo ocorre quando a distância percorrida pelo pistão é igual àquela entre os esbarros.

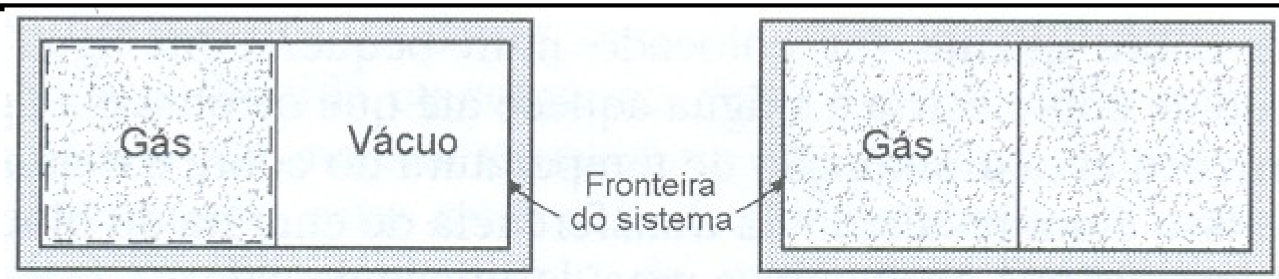
Foi discutido o trabalho associado ao movimento da fronteira de um sistema num processo quase-estático.
Devemos compreender que pode existir trabalho associado ao movimento da fronteira num processo de não-equilíbrio.
Neste caso, a força total exercida sobre o êmbolo pelo gás interno ao cilindro, *pA*, não é igual a força externa, F_{ext}, e o trabalho não é dado por $\delta W = p\,dV$.
O trabalho pode, entretanto, ser determinado em função de F_{ext} ou, dividindo esta força pela área, em função de uma pressão externa equivalente, p_{ext}.
Neste caso, o trabalho associado ao movimento da fronteira é:

$$\delta W = F_{ext} dL = p_{ext} dV$$

é necessário conhecer como a força ou a pressão externa varia durante o processo.

MEC 011

MÁQUINAS TÉRMICAS



A identificação do trabalho é um aspecto importante em muitos problemas termodinâmicos.

Já mencionamos que o trabalho pode ser identificado somente nas fronteiras do sistema.

Por exemplo, considere a situação indicada na Figura.

Observe que um gás está separado do espaço evacuado por uma membrana.

Fazendo com que a membrana se rompa, o gás encherá todo o volume.

Desprezando qualquer trabalho associado com a ruptura da membrana, podemos indagar se há trabalho envolvido no processo.

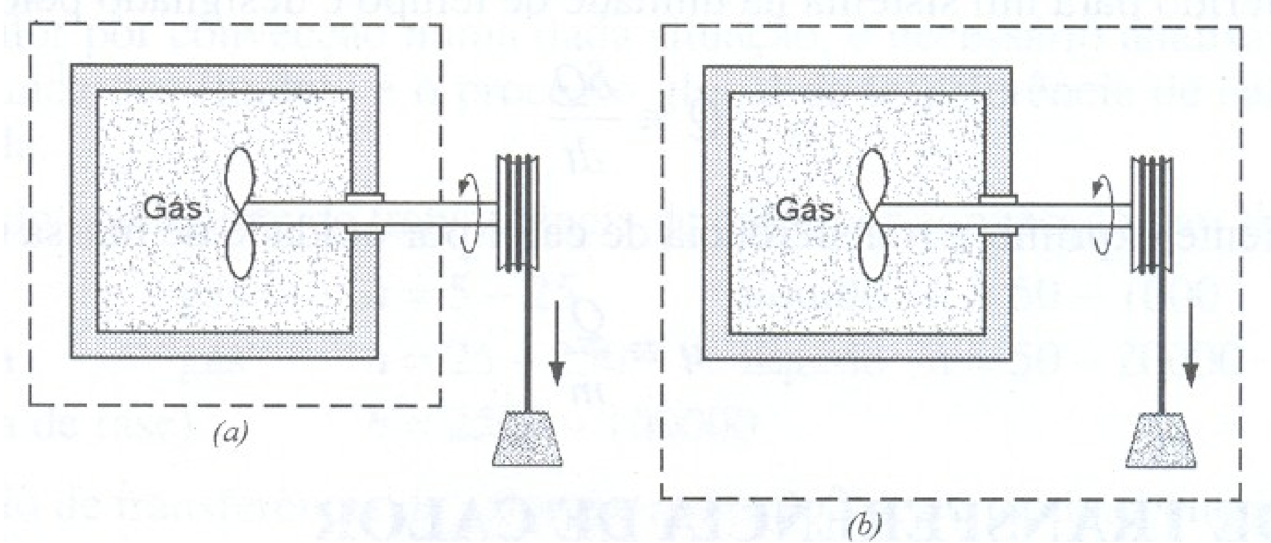
Se tomarmos como sistema o gás e o espaço evacuado, concluímos prontamente que não há trabalho envolvido, pois nenhum trabalho pode ser identificado na fronteira do sistema.

Se tomarmos o gás como sistema, teremos uma variação de volume e poderemos ser induzidos a calcular o trabalho pela integral

$$ {}_1W_2 = \int_1^2 p\, dV $$

Entretanto esse não é um processo quase-estático e, portanto, o trabalho não pode ser calculado com esta relação.

Ao contrário, como não há resistência na fronteira do sistema quando o volume aumenta, concluímos que, para este sistema, não há trabalho envolvido.



Um outro exemplo pode ser citado com a ajuda da Figura.

Em (a), o sistema consiste no recipiente mais o gás.

O trabalho atravessa a fronteira do sistema no ponto onde a fronteira do sistema intercepta o eixo e pode ser associado com as forças de cisalhamento no eixo rotativo.

Em (b), o sistema inclui o eixo e o peso, bem como o gás e o recipiente.

Nesse caso não há trabalho atravessando a fronteira do sistema, quando o peso se move para baixo.

No caso, podemos identificar uma variação de energia potencial dentro do sistema, porém, isto não deve ser confundido com trabalho atravessando a fronteira do sistema.

TRABALHO E CALOR

DEFINIÇÃO DE CALOR

A definição termodinâmica de calor é um tanto diferente da interpretação comum da palavra.
Portanto, é importante compreender claramente a definição de calor, porque ela é aplicável a muitos problemas de termodinâmica.

DEFINIÇÃO DE CALOR

Se um bloco de cobre quente for colocado num béquer com água fria, sabemos, pela experiência, que o bloco de cobre esfria e a água aquece até que o cobre e a água atinjam a mesma temperatura.
O que provoca essa diminuição de temperatura do cobre e o aumento de temperatura da água?
Dizemos que isso é um resultado da transferência de energia do bloco de cobre à água.
É dessa transferência de energia que chegamos a uma definição de calor.

O calor é definido como sendo a forma de transferência de energia através da fronteira de um sistema, numa dada temperatura, a um outro sistema (ou o meio), que apresenta uma temperatura inferior, em virtude da diferença entre as temperaturas dos dois sistemas.

Isto é, o calor é transferido do sistema com temperatura superior ao sistema que apresenta temperatura inferior e a transferência de calor ocorre unicamente devido à diferença entre as temperaturas dos dois sistemas.

Um outro aspecto dessa definição de calor é que um corpo nunca contém calor.

Ou melhor, o calor pode somente ser identificado quando atravessa a fronteira.

Assim, o calor é um fenômeno transitório.

Se considerarmos o bloco quente de cobre como um sistema e a água fria do béquer como um outro sistema, reconhecemos que originalmente nenhum sistema contém calor (eles contém energia).

Quando o bloco de cobre é colocado na água, os dois sistema entram em contato térmico e calor é transferido do cobre à água até que seja estabelecido o equilíbrio de temperatura.

Nesse ponto, já não há mais transferência de calor, pois não há diferença de temperatura.

Nenhum sistema contém calor no fim do processo.

Conclui-se, também, que o calor é identificado na fronteira do sistema, pois o calor é definido como sendo a energia transferida através da fronteira do sistema.

UNIDADES DE CALOR

O calor e o trabalho são formas de transferência de energia para ou de um sistema.

Portanto, as unidades de calor, ou de qualquer forma de energia, são as mesmas das de trabalho.

Assim, no, Sistema Internacional, SI, a unidade de calor (e de qualquer outra forma de energia) é joule.

Considera-se positivo o calor transferido para um sistema e o calor transferido de um sistema é considerado negativo.

Assim, uma transferência de calor positiva representa um aumento de energia no sistema e uma transferência negativa representa uma diminuição de energia no sistema.

O calor é representado pelo símbolo Q.

Os processos que não apresentam transferência de calor (Q = 0) são denominados processos adiabáticos.

Do ponto de vista matemático, o calor (como o trabalho), é uma função de linha e por isto apresenta diferencial inexata.
Isto é, a quantidade de calor transferida para um sistema que sofre uma mudança do estado 1 para o estado 2 depende do caminho que o sistema percorre durante o processo.
Como o calor tem uma diferencial inexata, a diferencial é escrita *δQ.*

Na integração escrevemos: $${}_1Q_2 = \int_1^2 \delta Q$$

Em palavras, ${}_1Q_2$ é o calor transferido durante um dado processo entre o estado 1 e o estado 2.
O calor transferido para um sistema na unidade de tempo é designado por: $$\dot{Q} \equiv \frac{\delta Q}{dt}$$

Também é conveniente exprimir a transferência de calor por unidade de massa do sistema, *q,* por $$q \equiv \frac{Q}{m}$$

MODOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

As moléculas da matéria apresentam energia translacional (cinética), rotacional e vibracional.

A energia pode ser transferida as moléculas vizinhas através de interações (colisões) ou por intercâmbio de moléculas.

As moléculas mais energéticas em média (temperatura mais alta) transferem energia para as moléculas que, em média, são menos energéticas (temperatura mais baixa).

Esta transferência de energia entre moléculas é denominada transferência de calor por condução.

A taxa de transferência de calor por condução é função da diferença de temperatura e também da habilidade da substância realizar a transferência de energia.

Lei de Fourier da condução $\dot{Q} = - k\, A \frac{dT}{dx}$

A taxa de transferência de calor por condução é proporcional a condutibilidade térmica, *k,* a área total, A , e ao gradiente de temperatura.
O sinal negativo indica que o sentido da transferência de calor é da região que apresenta temperatura mais alta para a que apresenta temperatura mais baixa.

Os valores típicos das condutibilidades térmicas dos materiais, em W/mK, são:

sólidos metálicos - da ordem de 100
sólidos não metálicos (como o vidro, o gelo e as rochas) - de 1 a 10
Líquidos - de 0,1 a 10
Gases - de 0,01 a 0,1

A transferência de calor por convecção ocorre quando o meio está escoando.

O movimento da substância como um todo - o escoamento - desloca matéria, que apresenta um certo nível energético, sobre uma superfície que apresenta uma temperatura diferente da do meio que escoa.

A transferência de calor por convecção é influenciada pela natureza do escoamento - a taxa de transferência de calor por convecção depende de como é realizado o contato térmico entre a superfície e o meio que escoa.

Situações onde a transferência de calor por convecção é importante:
- o vento soprando sobre um edifício
- o escoamento de fluidos em trocadores de calor tubulares (tanto o escoamento dentro dos tubos quanto o escoamento sobre os tubos).

O coeficiente de transferência de calor por convecção é correlacionado pela lei do resfriamento de Newton

$$\dot{Q} = h\,A\,\Delta T$$

As propriedades de transferência estão agrupadas no coeficiente de transferência de calor por convecção, *h.*

Este coeficiente é função das propriedades físicas do meio que escoa, do escoamento e da geometria.

Deste modo, para que seja possível avaliar o coeficiente de transferência de calor por convecção numa dada situação, é necessário analisar detalhadamente o escoamento (mecânica dos fluidos) e o processo global de transferência de calor da situação que está sendo analisada.

Os valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção, em W/m^2K, são:

Convecção natural	gás	h =5 – 25	líquido h = 50 – 1000
Convecção forçada	gás	h =25 – 250	líquido h = 50 – 20000
Ebulição (mudança de fase)		h =2500 – 100000	

O último modo de transferência de calor é a radiação.

A energia é transmitida no espaço na forma de ondas eletromagnéticas.

A transferência de calor por radiação pode ocorrer no vácuo mas é necessário um meio material para que ocorra tanto a emissão (geração) quanto a absorção de energia.

A taxa de emissão superficial de energia é escrita como uma fração, emissividade, da taxa de emissão de um corpo negro perfeito, ou seja,

$$\dot{Q} = \varepsilon \, \sigma \, A T_s^4$$

onde *Ts* é a temperatura da superfície e *σ* é a constante de Stefan - Bolztmann. ($\sigma = 5.67\ 10^{-8}\ W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$)

As superfícies não metálicas apresentam emissividades próximas de 0,92 e as superfícies metálicas não polidas apresentam emissividades na faixa delimitada por 0,6 e 0,9.

A radiação térmica não é monocromática e substâncias diferentes emitem e absorvem radiação de modos diferentes.

Um tratamento mais completo dos mecanismos de transferência de calor pode ser encontrado num livro texto sobre transferência de calor.

COMPARAÇÃO ENTRE CALOR E TRABALHO

Há muita semelhança entre calor e trabalho.
Resumindo:

a) O calor e o trabalho são, ambos, fenômenos transitórios. Os sistemas nunca possuem calor ou trabalho, porém qualquer um deles, ou ambos, podem atravessar a fronteira do sistema quando este sofre uma mudança de estado.

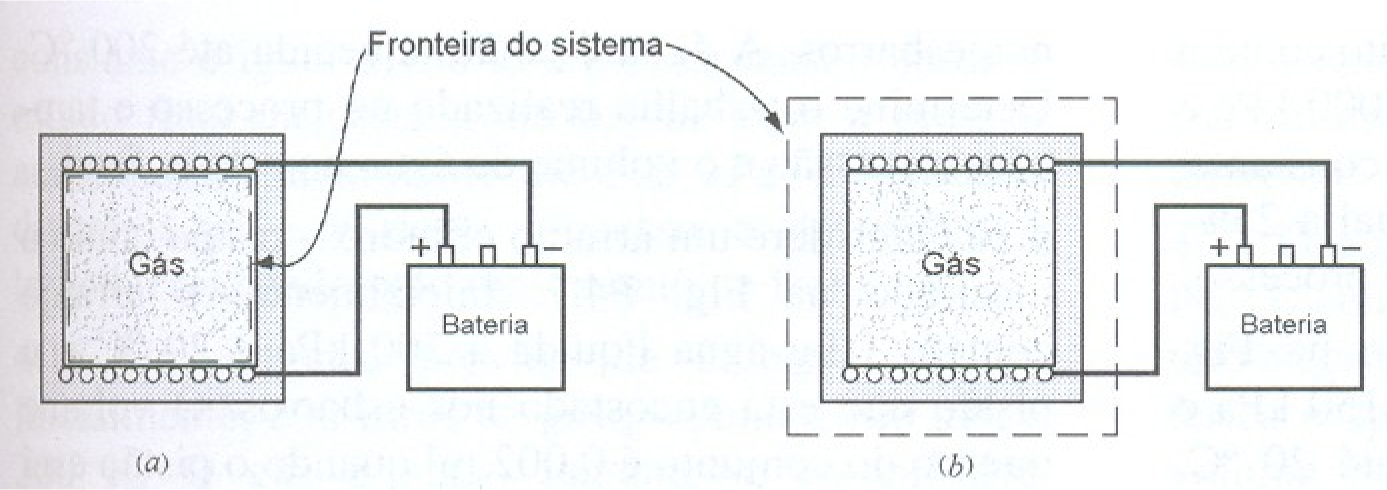
b) Tanto o calor como o trabalho são fenômenos de fronteira. Ambos são observados somente nas fronteiras dos sistemas e representam uma forma de transferência de energia.

c) Tanto o calor como o trabalho são funções de linha e tem diferenciais inexatas.

Deve-se notar que, na nossa convenção de sinais, +Q representa calor transferido ao sistema, e por isto ocorrerá um aumento de energia do sistema, e + *W* representa o trabalho realizado pelo sistema, provocando um decréscimo da energia do sistema.

MEC 011

MÁQUINAS TÉRMICAS



A Figura mostra um gás contido num recipiente rígido.
Observe que espiras de resistências elétricas estão posicionadas em tomo do recipiente.
Quando a corrente elétrica circula através das espiras, a temperatura do gás aumenta.
O que atravessa a fronteira do sistema, calor ou trabalho?
Na Figura (a) consideramos somente o gás como o sistema.
Nesse caso, calor atravessa a fronteira do sistema, porque a temperatura nas paredes é superior a temperatura do gás.
Na Figura (b) o sistema inclui o recipiente e o aquecedor de resistências.
A eletricidade atravessa a fronteira do sistema e, como anteriormente indicado, isto é trabalho.