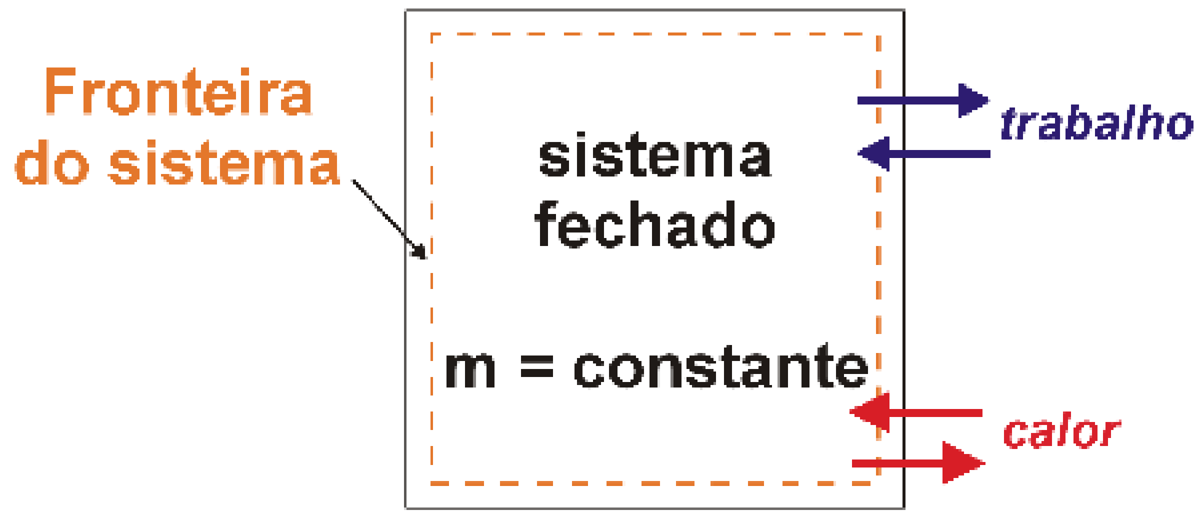
PME 3344

Termodinâmica Aplicada

4) Trabalho e calor

Trabalho e calor

✤ Energia pode atravessar a fronteira de um sistema fechado apenas através de duas formas distintas: *trabalho* ou *calor*. Ambas são interações energéticas entre um sistema e a sua vizinhança.

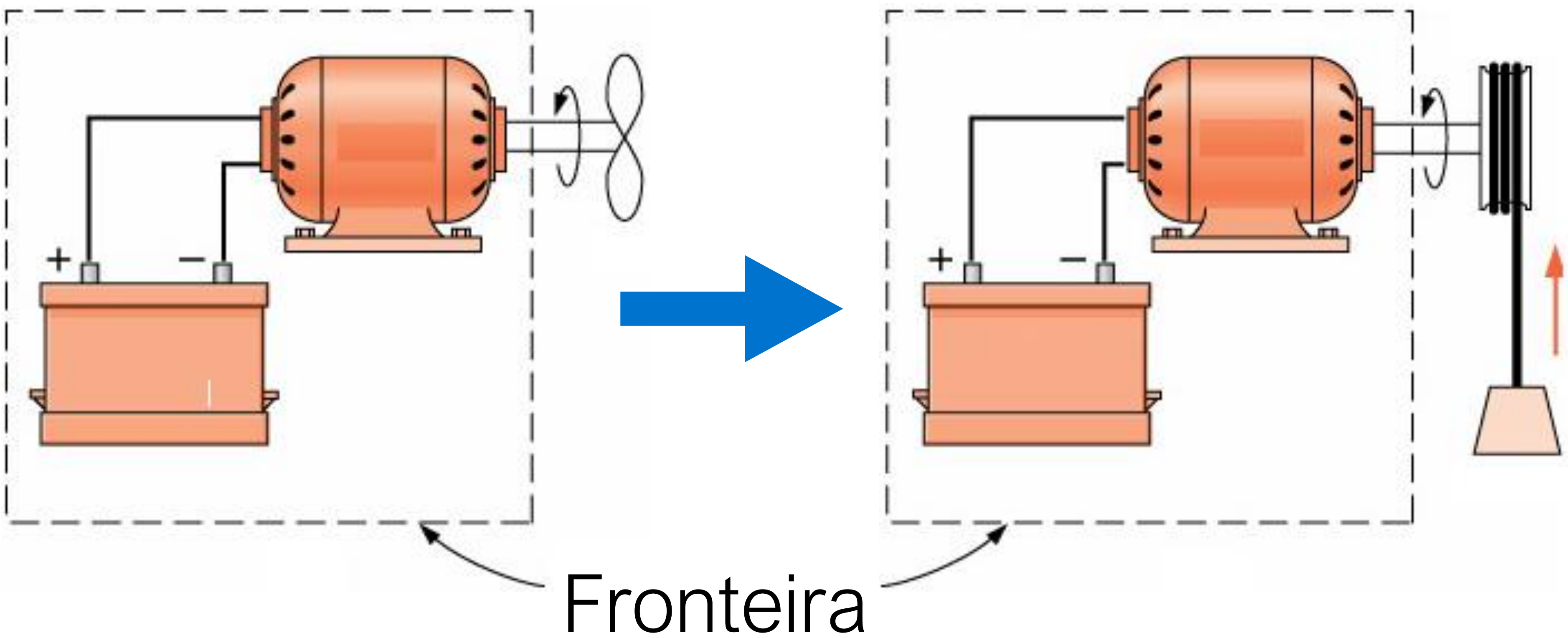


✤ **Calor** – interação energética entre o sistema e a vizinhança provocada por uma diferença de temperatura.

✤ **Trabalho** – interação energética entre o sistema e a vizinhança cujo único efeito sobre a vizinhança é equivalente ao levantamento de um peso.

Interações de trabalho e calor?

Exemplo 1:

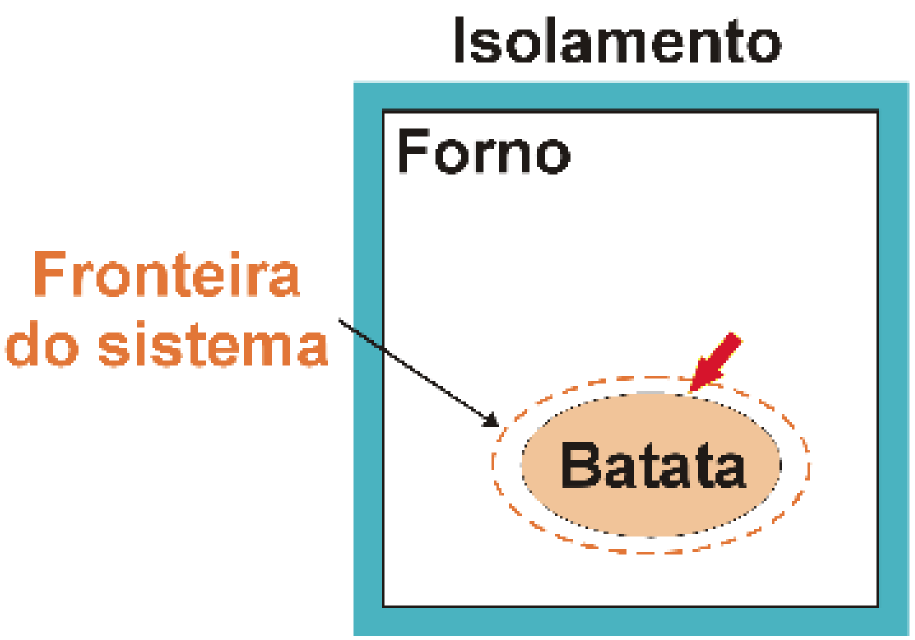


Levantamento de um peso!

Resp. Trabalho.

Interações de trabalho e calor?

Exemplo 2:

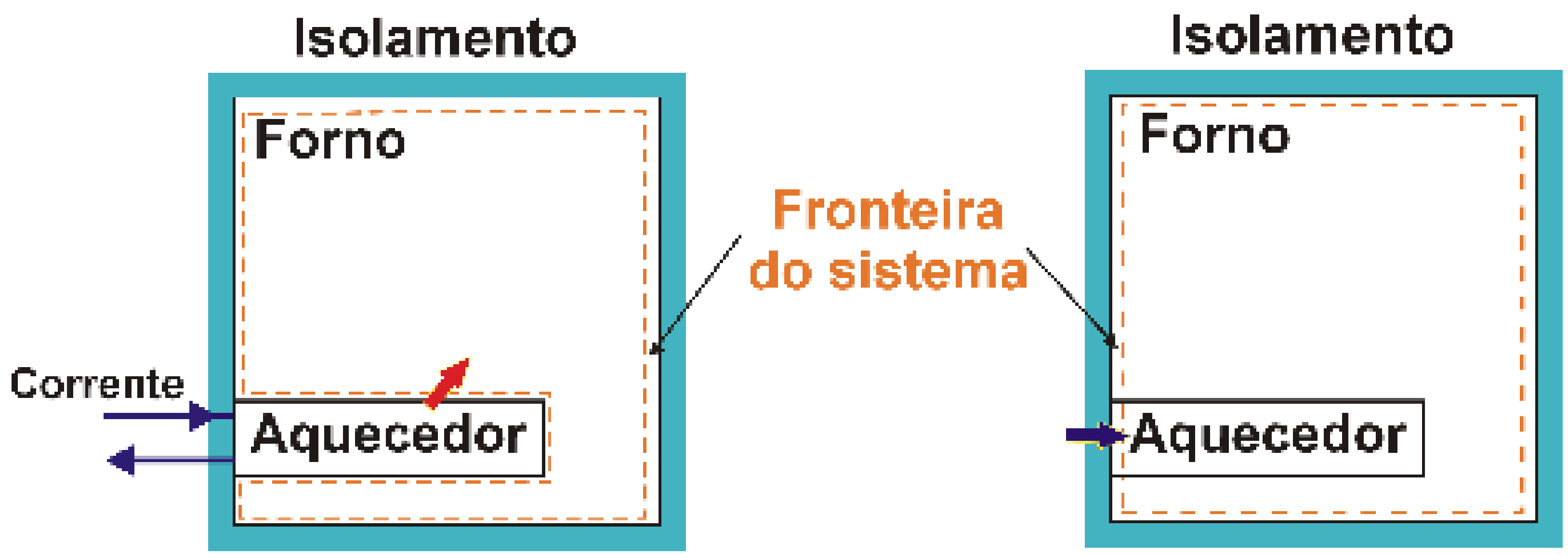


Diferença de temperatura entre os gases, a parede do forno e a batata!

Resp. Calor!

Interações de trabalho e calor?

Exemplo 3 e 4:



Resp. Calor!

Resp. Trabalho!

Trabalho e calor

1. Trabalho e calor são fenômenos de fronteira. Ambos são observados na fronteira do sistema e são responsáveis pela transferência de energia entre o sistema e sua vizinhança;

2. Trabalho e calor são fenômenos transitórios. Os sistemas não possuem trabalho ou calor, isto é, ambos não são propriedades termodinâmicas;

   a. Ambos estão associados a um processo e não a um estado. Portanto não são propriedades termodinâmicas;

   b. Ambos são funções de caminho e não de ponto.

Trabalho e calor

Função de ponto versus Função de caminho

São Paulo

Altitude = 767 m

distância e altura?

- **Altitude é uma função de ponto!**
- **Distância é uma função de caminho!**

Rodovias Anchieta
(74,3km)

Rodovias dos
imigrantes (83km)

Santos

Altitude = 0 m

Definições

Trabalho: W kJ

Calor: Q kJ

Diferenciais de funções de caminho: δW e δQ

Trabalho específico: $w = W/m$ kJ/kg

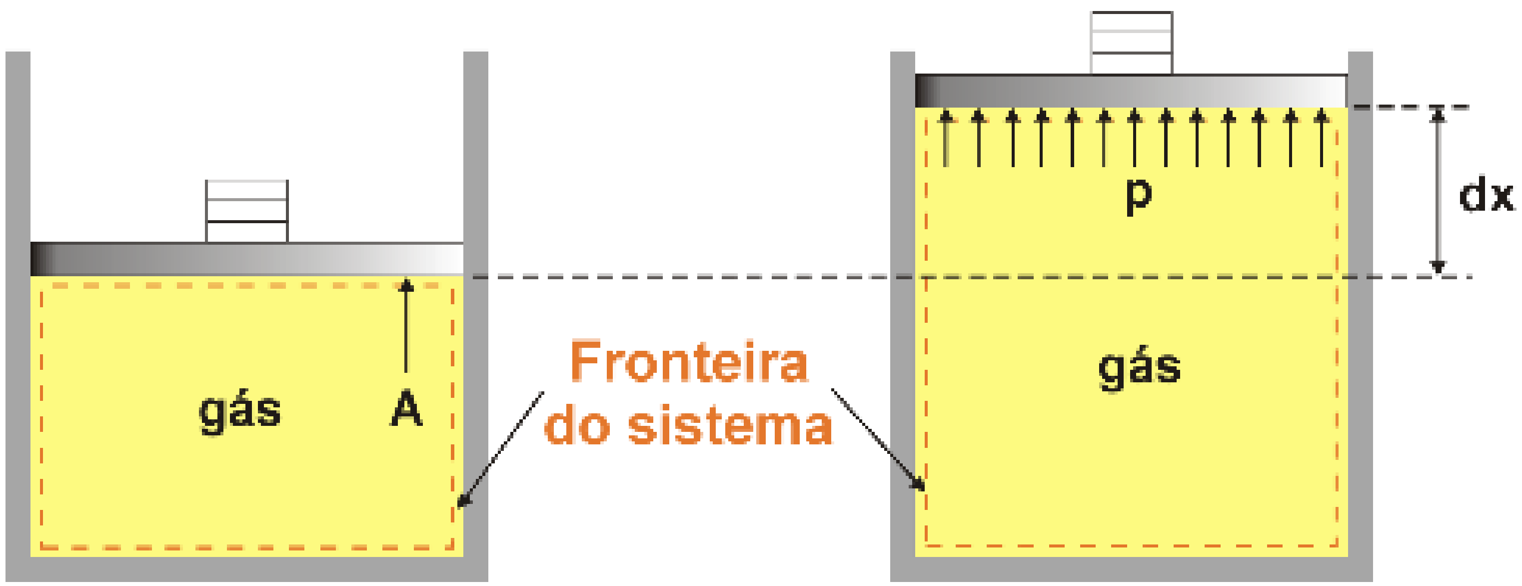
Calor por unidade de massa: $q = Q/m$ kJ/kg

Potência: $\dot{W} = \delta W/dt$ kW

Taxa de transferência de calor: $\dot{Q} = \delta Q/dt$ kW

Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível

Considere a figura:



Em Mecânica:

$$W = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

Assim:

$$\delta W = PAdx \rightarrow \delta W = PdV \rightarrow W = \int_1^2 PdV$$

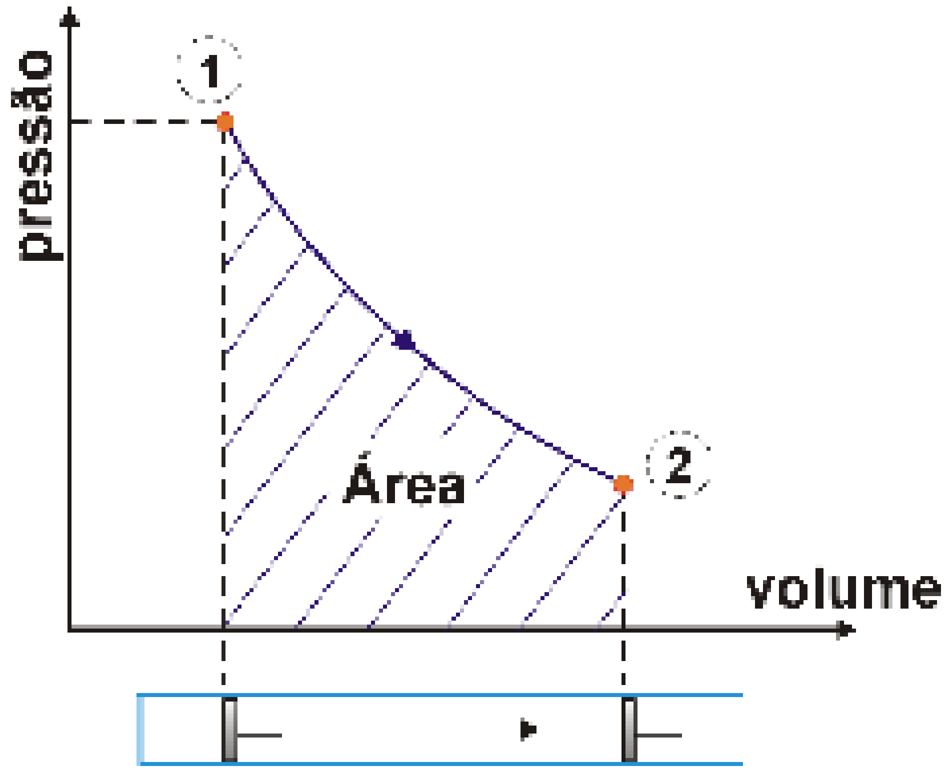
Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível

Deduzimos: $$W = \int_1^2 P dV$$ ***considerando que a pressão na superfície inferior do pistão é uniforme***

Se o processo ocorrer lentamente (processo quase-estático) podemos dizer que um único valor de pressão é representativo do sistema!

Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível

Note, ainda, que em um processo quase-estático, o módulo do trabalho é igual a área sob a curva em um diagrama P (sistema) - v:



Observe, também, que se fossemos de um 1 a 2 por outros caminhos a área sob a curva seria diferente e, consequentemente, o trabalho.

Trabalho realizado na fronteira móvel de um sistema simples compressível

Trabalho pode ser negativo ou positivo. Recorde-se que em Mecânica ele é definido como o produto escalar entre força e deslocamento.

$$W = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{x}$$

★ W > 0 quando força e deslocamento têm o mesmo sentido, trabalho realizado pelo sistema sobre a vizinhança;

★ W < 0 quando força e deslocamento têm sentidos opostos, trabalho realizado sobre o sistema pela vizinhança.

Trabalho de fronteira móvel

Na determinação da integral: $W = \int_1^2 P dV$

Temos duas classes de problemas:

★ Relação P-V obtida experimentalmente ou dada na forma gráfica;

★ Relação P-V tal que possa ser ajustada por uma função analítica.

O processo politrópico é um exemplo do segundo tipo.

Processo politrópico

Obedece a relação: $P.V^n = constante$

com n entre ∞ e -∞

Isto é: $P_1.V_1^n = P_2.V_2^n = ... = constante$

Conhecida a relação entre P e V podemos realizar a integração:

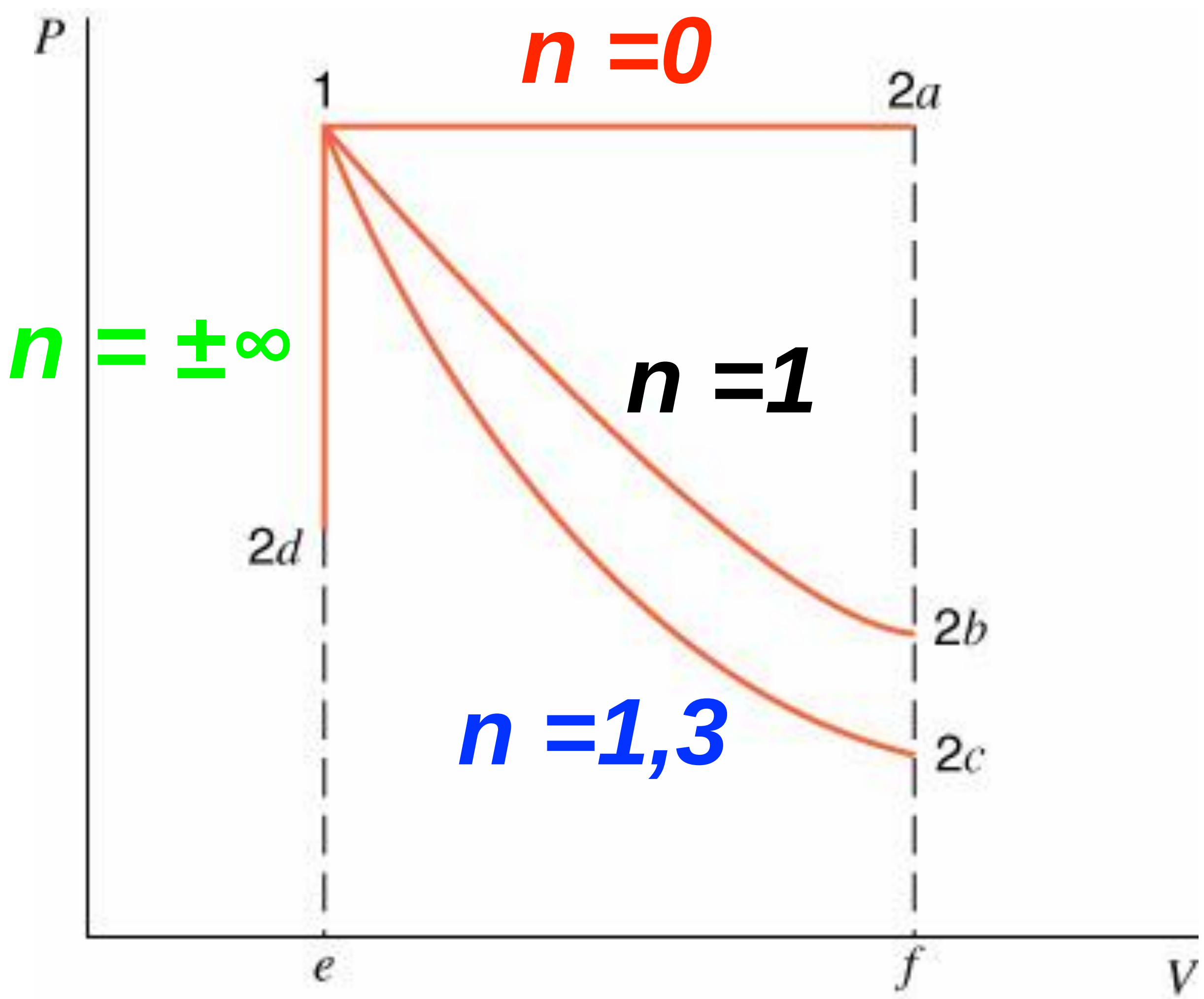
$$\int_1^2 P\,dV = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-n} \qquad n \neq 1$$

ou

$$\int_1^2 P\,dV = P_1V_1 \ln\frac{V_2}{V_1} \qquad n = 1$$

Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Processo politrópico: $P.V^n = constante$



$n = 0$: pressão constante

$n = 1,3$

$n = \pm\infty$: volume constante

$n = 1$: isotérmico
(se válido o modelo de Gás perfeito, $PV = mRT$)

Trabalho e calor

Convenções de sinal

★ $Q > 0$ quando o calor é "transferido" da vizinhança para o sistema;

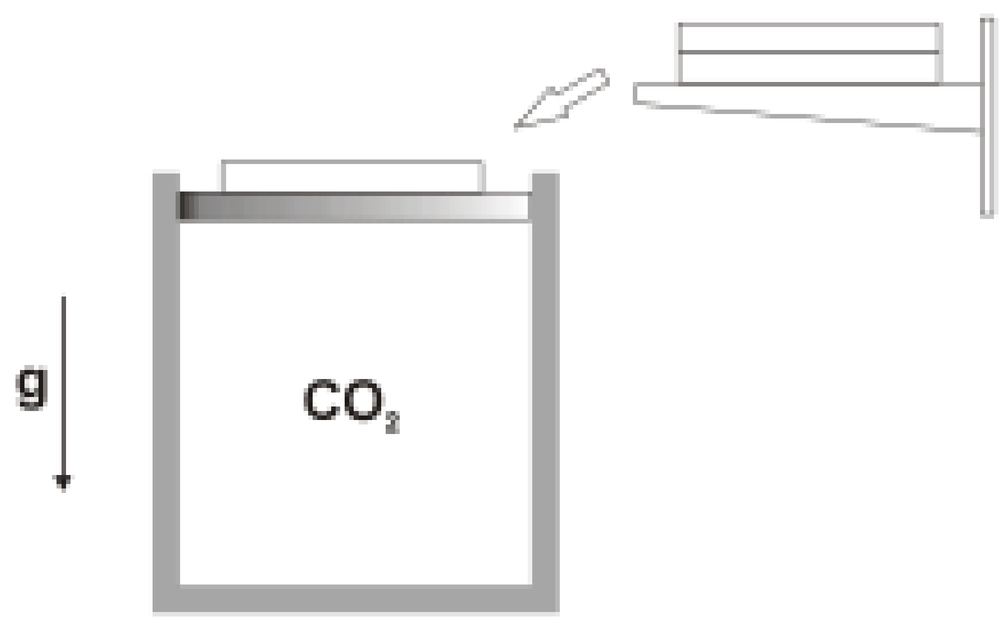
★ $Q < 0$ quando o calor é "transferido" do sistema para a vizinhança;

★ $W > 0$ trabalho realizado pelo sistema sobre a vizinhança;

★ $W < 0$ trabalho realizado sobre o sistema pela vizinhança.

4.51:

O conjunto cilindro-êmbolo contém, inicialmente, 0,2 m^3 de dióxido de carbono a 300 kPa e 100 ºC. Os pesos são então adicionados a uma velocidade tal que o gás é comprimido segundo a relação $p.V^{1,2}$=constante. Admitindo que a temperatura final seja igual a 200 ºC determine o trabalho realizado neste processo.



4.51: Solução

Hipóteses:

1. O sistema é o CO_2 contido no conjunto;
2. O processo de 1 para 2 é de quase-equilíbrio;
3. Os estado 1 e 2 são estados de equilíbrio;
4. O gás se comporta como perfeito nos estados 1 e 2.

4.51: Solução

✦**Trabalho realizado** $W = \int_1^2 PdV$

$$\int_1^2 P\,dV = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{1-n}$$

considerando gás perfeito, $P_2V_2 - P_1V_1 = m.R_{CO2}.(T_2 – T_1)$

Temos as duas temperaturas mas precisamos calcular a massa. Esta pode ser obtida a partir da equação dos gases perfeito e o estado 1.

$m = P_1V_1 / R_{CO2}T_1 = 300.0,2/0,189.373 = 0,851$ kg $\quad$ m = 0,851 kg

4.51: Solução

✦ **Trabalho realizado**

considerando gás perfeito, $W_{1\text{-}2} = mR_{CO2}(T_2\text{-}T_1) / (1\text{-}n)$

$W_{1\text{-}2} = 0{,}851.0{,}189.(200\text{-}100) / (1\text{-}1{,}2)$

$\mathbf{W_{1\text{-}2} = -80{,}4kJ}$

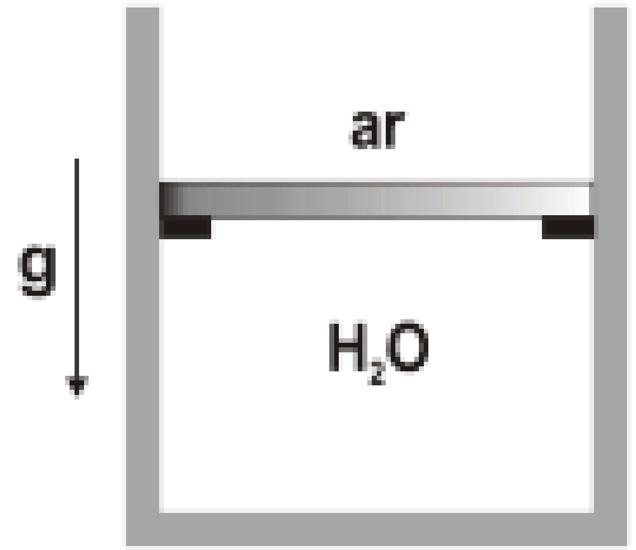
✦ **Comentário**

O sinal negativo indica que a vizinhança realizou trabalho sobre o sistema.

Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo

Extra 1:

Considere o conjunto cilindro-êmbolo mostrado na figura. A massa do êmbolo é de 101 kg e sua área de 0,01 m^2. O conjunto contém 1 kg de água ocupando um volume 0,1m^3. Inicialmente, a temperatura da água é 20 ^{o}C e o pistão repousa sobre os esbarros fixados na parede do cilindro, com sua superfície externa exposta à pressão atmosférica (p_0 = 101325 Pa). A que temperatura a água deve ser aquecida de modo a erguer o êmbolo? Se a água continuar a ser aquecida até o estado de vapor saturado, determine a temperatura final, o volume e o trabalho realizado no processo. Represente o processo em um diagrama p-V.



Extra 1: Solução

Temos dois processos e três estados. O estado 1 é o inicial, o 2 é quando o êmbolo não precisa mais do batente para se manter em repouso e o estado 3 é o final.

Hipóteses:

1. O sistema é a água contida no conjunto;
2. Os processos são de quase-equilíbrio;
3. Os estados 1, 2 e 3 são estados de equilíbrio;
4. Não há atrito entre o pistão e o cilindro.

Extra 1: Solução

✦ **Estado 1**: Definido, pois conhecemos v e T.

$v_1 = 0,1/1 = 0,1\ m^3/kg$

Para identificar o estado 1 devemos consultar a tabela de saturação com $T_1 = 20\ ^oC$ ($P_{sat} = 2,3385$ kPa) e comparar o valor de v_1 com v_l e v_v. Como $v_l < v_1 < v_v$, temos líquido + vapor. Logo $P_1 = P_{sat}$.

O título pode ser prontamente calculado, $x_1=(v_1-v_l)/(v_v-v_l) = 0,00171$

Extra 1: Solução

✦ **Estado 2**: Definido, pois conhecemos v e P.

$v_2 = v_1 = 0{,}1\ m^3/kg$

$P_2 = P_0 + mg/A = 101{,}325 + 10^{-3}.101.9{,}8/0{,}01 = 200\ kPa$

Para identificar o estado 2 devemos consultar a tabela de saturação com P_2 = 200 kPa (T_{sat} = 120,23°C) e comparar o valor de v_2 com v_l=0,001061 e v_v=0,8857 m³/kg. Como $v_l < v_2 < v_v$, temos líquido + vapor. Logo $T_2 = T_{sat}$.

Resp. A água deve ser aquecida até 120,23 °C para que o êmbolo comece a subir.

Extra 1: Solução

✦ **Estado 3**: Definido, pois conhecemos P e x.

$x_3 = 1$ (vapor saturado) e $P_3 = P_2 = 200kPa$

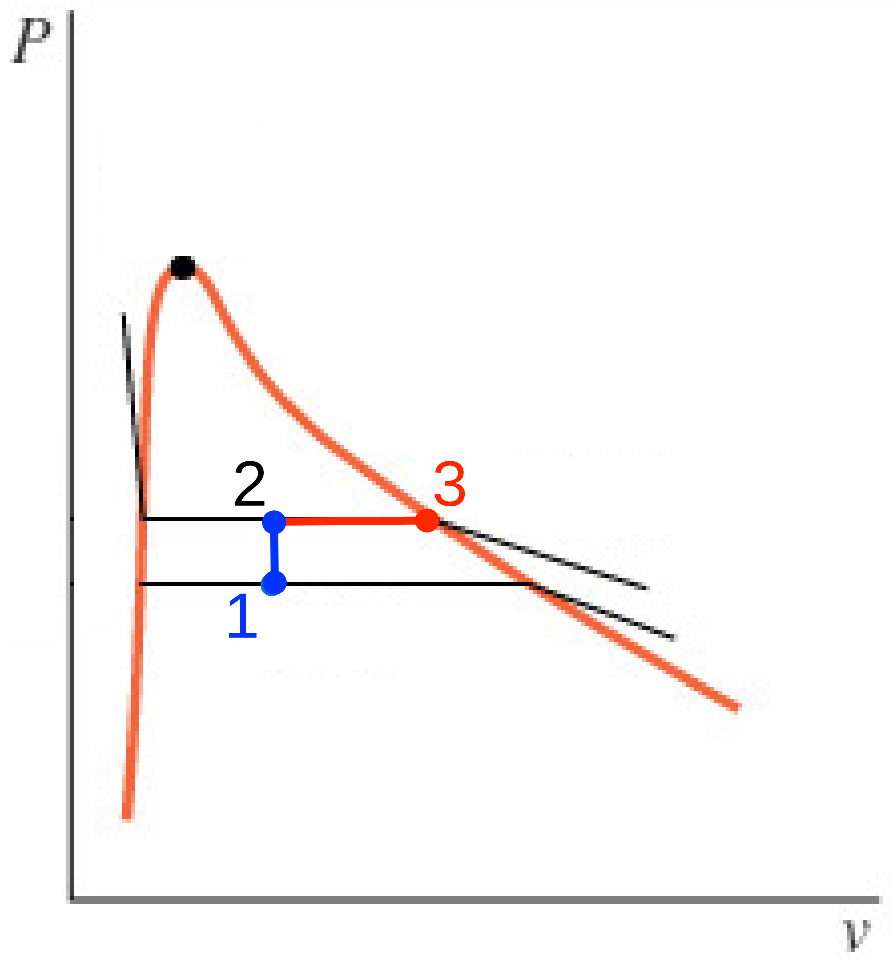
$V_3 = v_3.m = 0,8857.1 = 0,8857\ m^3$

Resp. O volume final é de $0,8857\ m^3$.

Extra 1: Solução

✦**Diagrama P-v**:

Antes de calcular o trabalho é preciso traçar o diagrama P-v:



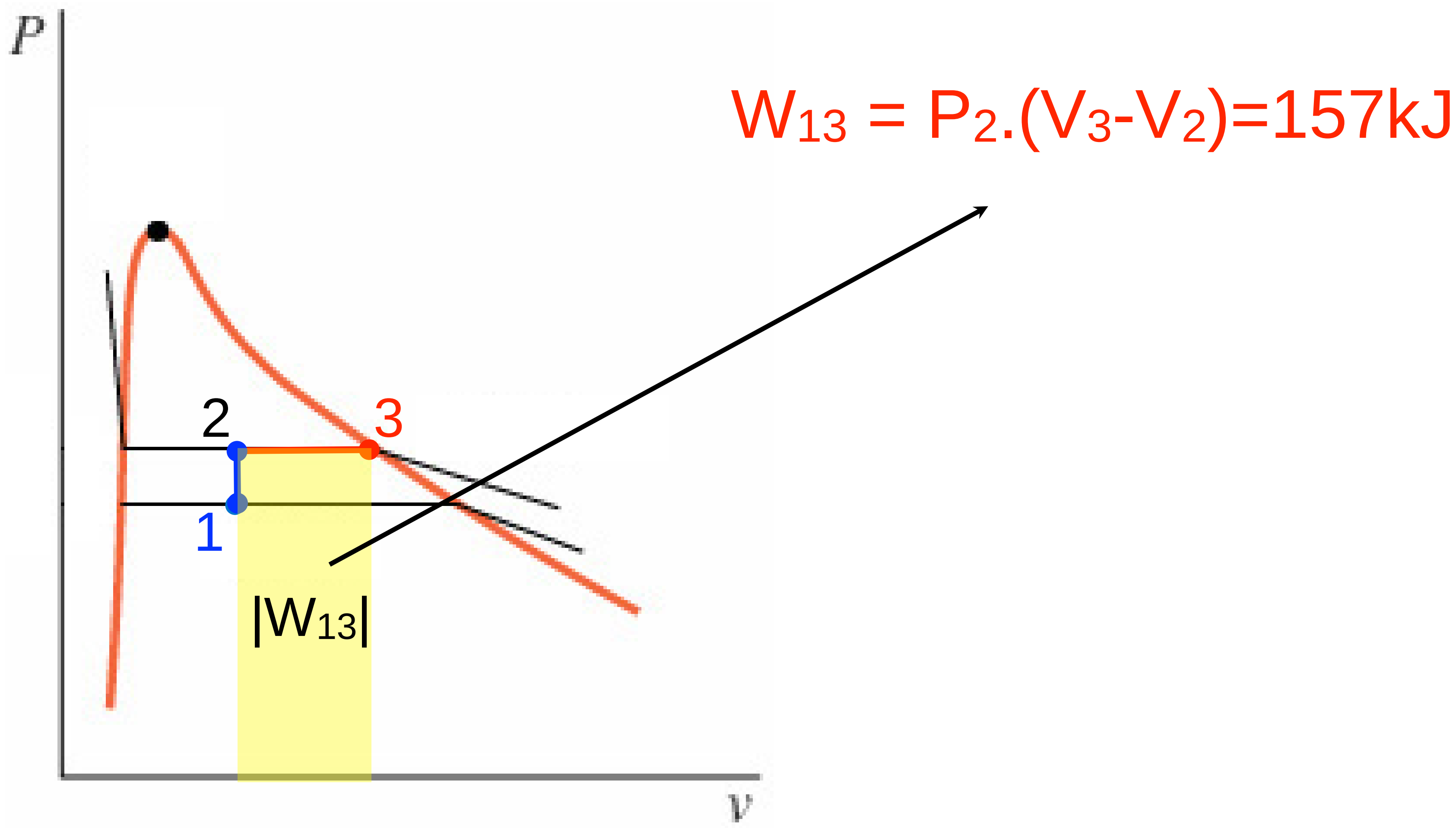
Processo a v constante

Processo a P constante

Extra 1: Solução

✦Trabalho realizado

Pelo diagrama P-v podemos determinar o trabalho já que o processo é quase-estático.



Extra 1: Observações

✦ O sinal é positivo pois temos o sistema realizando trabalho sobre a vizinhança.

✦ O diagrama T-v tem exatamente o mesmo aspecto do P-v. Trace-o você mesmo!