

## A.03.04 – Modelos de Propriedades Energéticas

(Sistemas Fechados)

Prof. C. Naaktgeboren, PhD



<https://github.com/CNThermSci/ApplThermSci>

Compiled on 2020-09-10 19h06m48s UTC



## Modelos de Propriedades Energéticas

Energia Interna e Entalpia

$U$  e  $H$  em Modelos de Substâncias

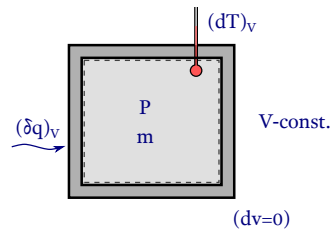
## Tópicos de Leitura



## Energia Interna – Relação com Temperatura

O sistema fechado de massa  $m$ , ilustrado:

- ▶ Recebe uma diferencial de calor a volume constante,  $(\delta q)_v$ ;
- ▶  $m$  e  $V$  constantes implicam em  $v \equiv V/m$  constante, tal que  $(\delta q)_v = (\delta q)_v$ ;
- ▶ A temperatura experimenta uma variação de  $(dT)_v$ .

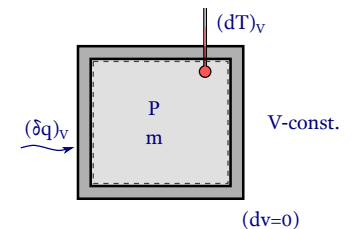


## Energia Interna – Relação com Temperatura (Cont.)

O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:

$$\delta e_{ent} - \delta e_{sai} = de_{sist} \rightarrow (\delta q)_v = du.$$

Assim, o calor transferido a volume constante a um sistema fechado é a variação de sua energia interna!



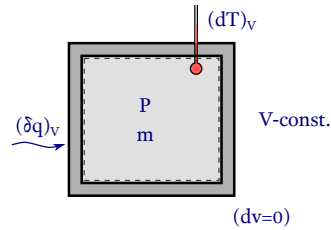
## Energia Interna – Relação com Temperatura (Cont.)

Define-se o **calor específico a volume constante** da substância do sistema,  $c_v$ , como

$$c_v \equiv \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v,$$

uma **propriedade** termodinâmica intensiva.

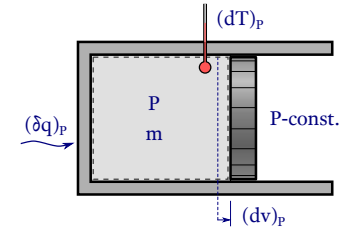
Ainda,  $C_v = (\partial U / \partial T)_v = m c_v$  é a **capacidade térmica a volume constante** do sistema.



## Entalpia – Relação com Temperatura

O sistema fechado de massa  $m$ , ilustrado:

- ▶ Recebe uma diferencial de calor a pressão constante,  $(\delta q)_P$ ;
- ▶ Realiza uma diferencial de trabalho a pressão constante,  $(\delta w)_P = P dv$ ;
- ▶ A temperatura experimenta uma variação de  $(dT)_P$ , possivelmente diferente de  $(dT)_v$ .

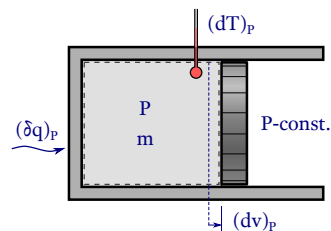


## Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:

$$\begin{aligned} \delta e_{ent} - \delta e_{sai} &= de_{sist} \rightarrow \\ (\delta q)_P - (\delta w)_P &= du \rightarrow \\ (\delta q)_P &= du + P dv = d(u + Pv). \end{aligned}$$

A quantidade  $(u + Pv)$  aparece frequentemente o suficiente para ser definida como uma nova propriedade.

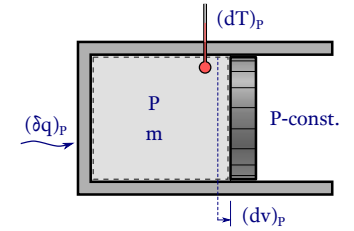


## Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

Assim,

$$\begin{aligned} H &\equiv U + PV & [\text{kJ}], \text{ e} \\ h &\equiv u + Pv & [\text{kJ/kg}], \end{aligned}$$

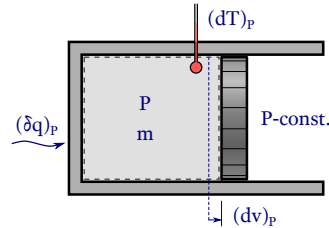
são a **entalpia** e a **entalpia específica**, respectivamente: novas propriedades termodinâmicas.



## Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

O termo origina do verbo grego “ενθάλπω”, que significa: “(eu) aqueço”, conforme a própria ilustração.

Da expressão  $(\delta q)_P = dh$ , tem-se que o calor transferido a pressão constante a um sistema fechado é a variação de sua entalpia!



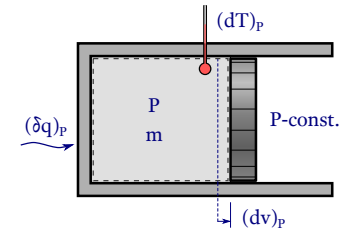
## Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

Define-se o **calor específico a pressão constante** da substância do sistema,  $c_P$ , como

$$c_P \equiv \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_P,$$

uma **propriedade** termodinâmica intensiva.

Ainda,  $C_P = (\partial H / \partial T)_P = m c_P$  é a **capacidade térmica a pressão constante** do sistema.



## Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

Experimentos mostraram que  $u: u(T)$ , assim, Ainda,

$$\begin{aligned} \delta q - \delta w &= du \rightarrow \\ (\delta q)_T - (\delta w)_T &= (du)_T = 0 \rightarrow \\ (\delta q)_T &= (\delta w)_T. \end{aligned}$$

A definição de  $c_v$  simplifica para

$$\begin{aligned} c_v(T) &= \frac{du}{dT} \rightarrow \\ u(T) &= \int c_v(T) dT. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} h &\equiv u + Pv \rightarrow \\ h &= u + RT, \end{aligned}$$

fazendo com que  $h: h(T)$ , e ainda

$$\begin{aligned} c_P(T) &= \frac{dh}{dT} = \frac{du + R dT}{dT} \rightarrow \\ h(T) &= \int c_P(T) dT \text{ and} \\ c_P(T) &= c_v(T) + R. \end{aligned}$$

## Gás Ideal — Calores Específicos

$$c_P(T) = c_v(T) + R \quad (\text{kJ/kg}) \rightarrow$$

$$\bar{c}_P(T) = \bar{c}_v(T) + \bar{R} \quad (\text{kJ/kmol})$$

$$\gamma(T) \equiv \frac{c_P(T)}{c_v(T)} = 1 + \frac{R}{c_v(T)} \quad (-)$$

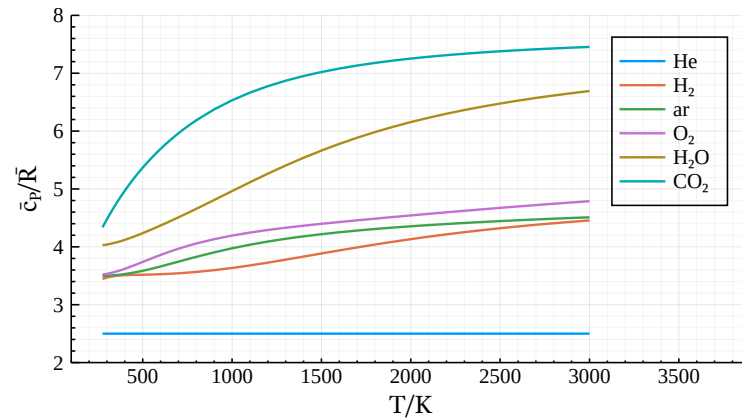
$$\bar{c}_{P, \text{monatom.}} = 5/2 \bar{R}$$

$$\bar{c}_{P, \text{di-atom.}} = 7/2 \bar{R}$$

$$\gamma_{\text{He}} = 5/3 \approx 1,667$$

$$\gamma_{\text{ar}}(300 \text{ K}) \approx 7/5 = 1,4.$$

## Gás Ideal — Comportamento de $\bar{c}_P(T)$

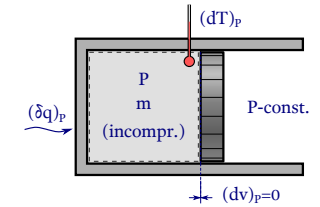


## Substância Incompressível — com $dv = 0$

- ▶ Comportamento *aproximado* por **sólidos e líquidos**;
- ▶ Processos a  **$P$ -const.** idênticos aos a  **$v$ -const.**;
- ▶ Portanto:  $c_P = c_v = c$  o **calor específico de substância incompressível**;
- ▶ Tem-se  $c: c(T)$ ,  $u: u(T)$ , porém  $h: h(T, P)$ .

$$\Delta u = u_2 - u_1 = \int_1^2 c(T) dT,$$

$$\Delta h = \Delta u + v \Delta P.$$



## Tópicos de Leitura I

Çengel, Y. A. e Boles, M. A.  
**Termodinâmica 7ª Edição. Seções 4-3 a 4-5.**  
 AMGH. Porto Alegre. ISBN 978-85-8055-200-3.