A.03.04 – Modelos de Propriedades Energéticas

(Sistemas Fechados)

Prof. C. Naaktgeboren, PhD

https://github.com/CNThermSci/ApplThermSci

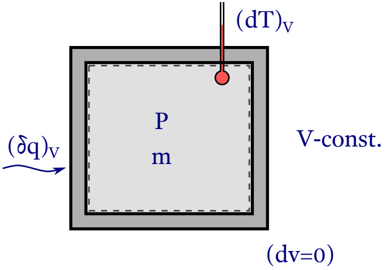
Compiled on 2020-06-04 00h57m05s UTC

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Energia Interna – Relação com Temperatura

O sistema fechado de massa m, ilustrado:

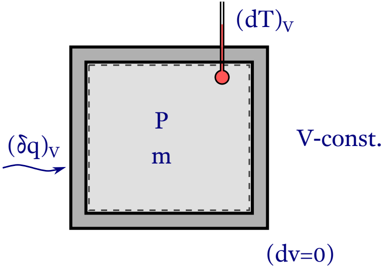
- Recebe uma diferencial de calor a volume constante, $(\delta q)_V$;



Energia Interna – Relação com Temperatura

O sistema fechado de massa m, ilustrado:

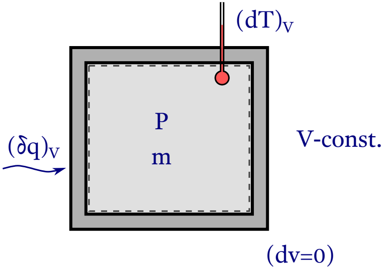
- Recebe uma diferencial de calor a volume constante, $(\delta q)_V$;
- m e V constantes implicam em $v \equiv V/m$ constante, tal que $(\delta q)_V = (\delta q)_v$;



Energia Interna – Relação com Temperatura

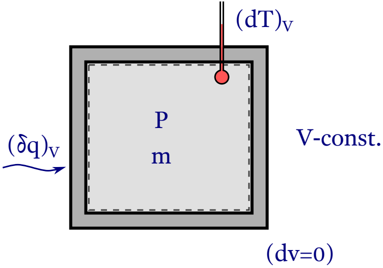
O sistema fechado de massa m, ilustrado:

- 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.)

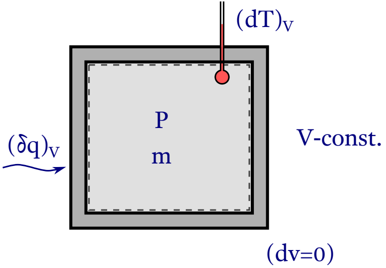
O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:



Energia Interna – Relação com Temperatura (Cont.)

O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:

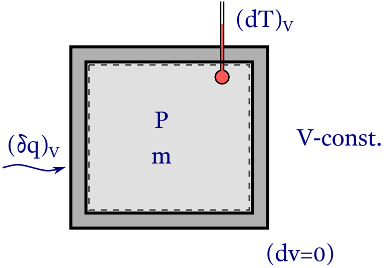
$$\delta e_{ent} - \delta e_{sai} = de_{sist}$$



Energia Interna – Relação com Temperatura (Cont.)

O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:

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

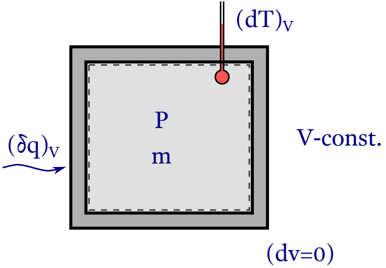


Energia Interna – Relação com Temperatura (Cont.)

O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:

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

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

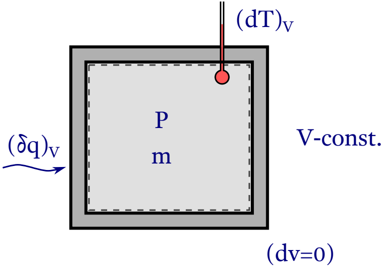


Energia Interna – Relação com Temperatura (Cont.)

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.



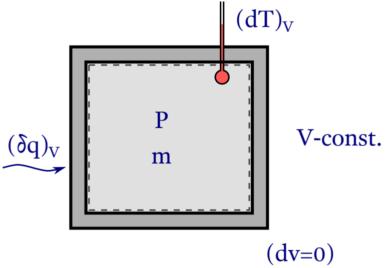
Energia Interna – Relação com Temperatura (Cont.)

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.

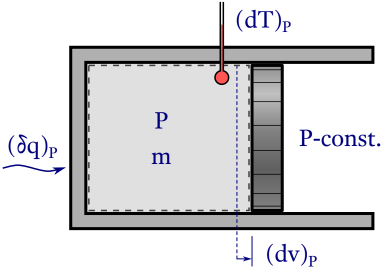
Ainda, $C_v = (\partial U/\partial T)_v = m c_v$ é a capacidade térmical a volume constante do sistema.



Entalpia – Relação com Temperatura

O sistema fechado de massa m, ilustrado:

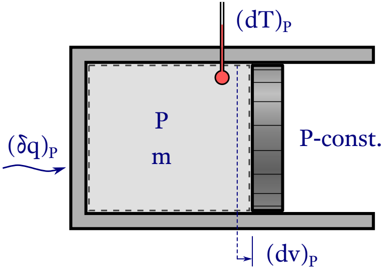
- Recebe uma diferencial de calor a pressão constante, $(\delta q)_P$;



Entalpia – Relação com Temperatura

O sistema fechado de massa m, ilustrado:

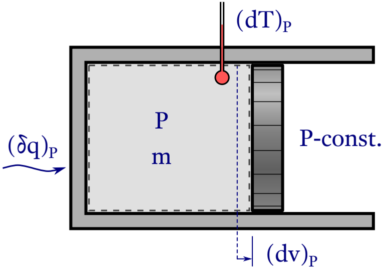
- Recebe uma diferencial de calor a pressão constante, $(\delta q)_P$;
- Realiza uma diferencial de trabalho a pressão constante, $(\delta w)_P = P\,dv$;



Entalpia – Relação com Temperatura

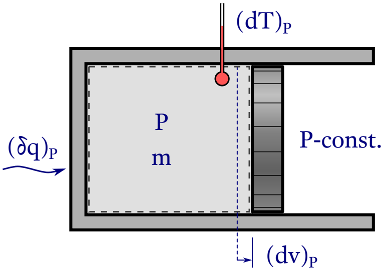
O sistema fechado de massa m, ilustrado:

- 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.)

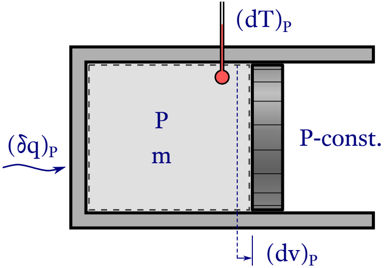
O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:



Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:

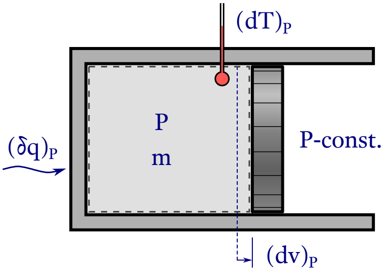
$$\delta e_{ent} - \delta e_{sai} = de_{sist}$$



Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:

$$\delta e_{ent} - \delta e_{sai} = de_{sist} \quad \rightarrow$$
$$(\delta q)_P - (\delta w)_P = du$$



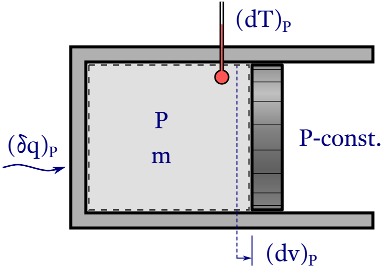
Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:

$$\delta e_{ent} - \delta e_{sai} = de_{sist} \quad \rightharpoondown$$

$$(\delta q)_P - (\delta w)_P = du \quad \rightharpoondown$$

$$(\delta q)_P = du + P\,dv = d(u + Pv).$$

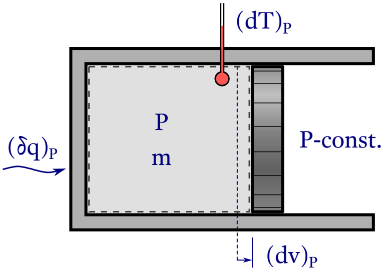


Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

O balanço de energia na forma diferencial do sistema fica:

$$\delta e_{ent} - \delta e_{sai} = de_{sist} \quad \rightharpoondown$$
$$(\delta q)_P - (\delta w)_P = du \quad \rightharpoondown$$
$$(\delta q)_P = du + P\,dv = d(u + Pv).$$

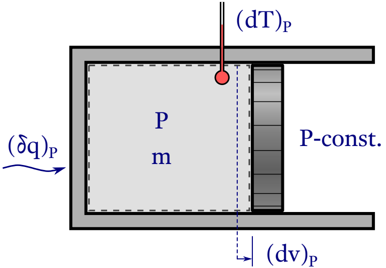
A quantidade $(u + Pv)$ aparece frequentemente o suficiente para ser definida como uma nova propriedade.



Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

Assim,

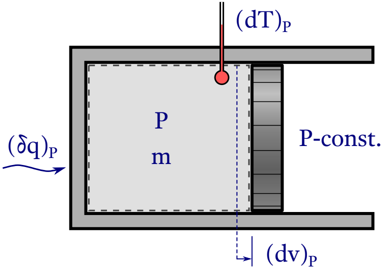
$$H \equiv U + PV \qquad \text{[kJ], e}$$



Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

Assim,

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

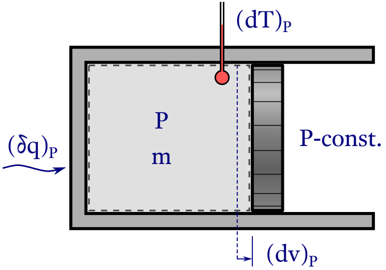


Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

Assim,

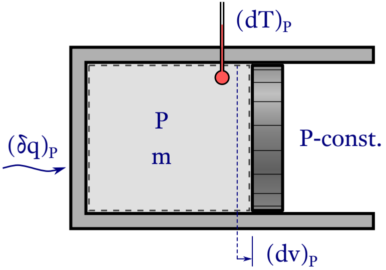
$$H \equiv U + PV \qquad [\text{kJ}], \text{ e}$$
$$h \equiv u + Pv \qquad [\text{kJ/kg}],$$

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



Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

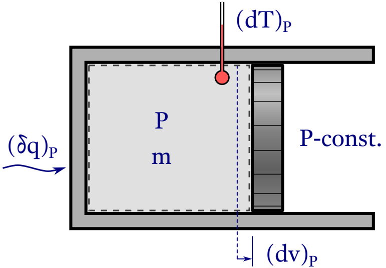
O termo origina do verbo grego "ενθάλπω", que significa: "(eu) aqueço", conforme a própria ilustração.



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!

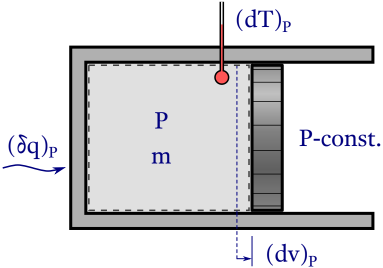


Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

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.



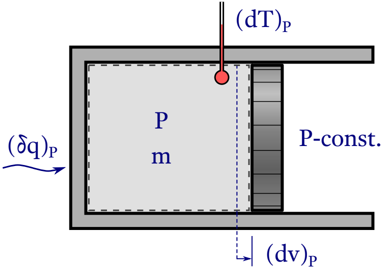
Entalpia – Relação com Temperatura (Cont.)

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 térmical a pressão constante do sistema.



Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

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

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

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

$$\delta q - \delta w = du$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

Experimentos mostraram que $u\!:\!u(T)$, assim,

$$\delta q - \delta w = du \quad \rightarrow$$
$$(\delta q)_T - (\delta w)_T = (du)_T = 0$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

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

$$\delta q - \delta w = du \quad \rightarrow$$
$$(\delta q)_T - (\delta w)_T = (du)_T = 0 \quad \rightarrow$$
$$(\delta q)_T = (\delta w)_T.$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

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

$$\begin{gathered}\delta q - \delta w = du \quad \to \\ (\delta q)_T - (\delta w)_T = (du)_T = 0 \quad \to \\ (\delta q)_T = (\delta w)_T.\end{gathered}$$

A definição de c_v simplifica para

$$c_v(T) = \frac{du}{dT}$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

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

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

A definição de c_v simplifica para

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

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

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

$$\delta q - \delta w = du \quad \to$$
$$(\delta q)_T - (\delta w)_T = (du)_T = 0 \quad \to$$
$$(\delta q)_T = (\delta w)_T.$$

A definição de c_v simplifica para

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \quad \to$$
$$u(T) = \int c_v(T)\, dT.$$

Ainda,

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

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

$$\delta q - \delta w = du \quad \rightharpoonup$$
$$(\delta q)_T - (\delta w)_T = (du)_T = 0 \quad \rightharpoonup$$
$$(\delta q)_T = (\delta w)_T.$$

A definição de c_v simplifica para

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \quad \rightharpoonup$$
$$u(T) = \int c_v(T)\, dT.$$

Ainda,

$$h \equiv u + Pv$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

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

$$\delta q - \delta w = du \quad \rightharpoondown$$
$$(\delta q)_T - (\delta w)_T = (du)_T = 0 \quad \rightharpoondown$$
$$(\delta q)_T = (\delta w)_T.$$

A definição de c_v simplifica para

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \quad \rightharpoondown$$
$$u(T) = \int c_v(T)\, dT.$$

Ainda,

$$h \equiv u + Pv \quad \rightharpoondown$$
$$h = u + RT,$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

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

$$\delta q - \delta w = du \quad \rightharpoondown$$
$$(\delta q)_T - (\delta w)_T = (du)_T = 0 \quad \rightharpoondown$$
$$(\delta q)_T = (\delta w)_T.$$

A definição de c_v simplifica para

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \quad \rightharpoondown$$
$$u(T) = \int c_v(T)\,dT.$$

Ainda,

$$h \equiv u + Pv \quad \rightharpoondown$$
$$h = u + RT,$$

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

$$c_P(T) = \frac{dh}{dT} = \frac{du + R\,dT}{dT}$$

UTFPR UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

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

$$\delta q - \delta w = du \quad \to$$
$$(\delta q)_T - (\delta w)_T = (du)_T = 0 \quad \to$$
$$(\delta q)_T = (\delta w)_T.$$

A definição de c_v simplifica para

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \quad \to$$
$$u(T) = \int c_v(T)\, dT.$$

Ainda,

$$h \equiv u + Pv \quad \to$$
$$h = u + RT,$$

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

$$c_P(T) = \frac{dh}{dT} = \frac{du + R\, dT}{dT} \quad \to$$
$$h(T) = \int c_P(T)\, dT$$

Gás Ideal — Substância com $Pv = RT$

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

$$\delta q - \delta w = du \quad \rightarrow$$
$$(\delta q)_T - (\delta w)_T = (du)_T = 0 \quad \rightarrow$$
$$(\delta q)_T = (\delta w)_T.$$

A definição de c_v simplifica para

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \quad \rightarrow$$
$$u(T) = \int c_v(T)\, dT.$$

Ainda,

$$h \equiv u + Pv \quad \rightarrow$$
$$h = u + RT,$$

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

$$c_P(T) = \frac{dh}{dT} = \frac{du + R\,dT}{dT} \quad \rightarrow$$
$$h(T) = \int c_P(T)\, dT \quad \text{and}$$
$$c_P(T) = c_v(T) + R.$$

Gás Ideal — Calores Específicos

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

Gás Ideal — Calores Específicos

$$c_P(T) = c_v(T) + R \qquad (\mathrm{kJ/kg}) \quad \rightharpoondown$$

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

Gás Ideal — Calores Específicos

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

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

$$\gamma(T) \equiv \frac{c_P(T)}{c_v(T)} = 1 + \frac{R}{c_v(T)} \qquad \text{(—)}$$

Gás Ideal — Calores Específicos

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

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

$$\gamma(T) \equiv \frac{c_P(T)}{c_v(T)} = 1 + \frac{R}{c_v(T)} \qquad (\text{—})$$

$$\bar{c}_{P,monatom.} = {}^5\!/_2 \bar{R}$$

Gás Ideal — Calores Específicos

$$c_P(T) = c_v(T) + R \qquad (\mathrm{kJ/kg}) \quad \rightharpoondown$$

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

$$\gamma(T) \equiv \frac{c_P(T)}{c_v(T)} = 1 + \frac{R}{c_v(T)} \qquad (\text{—})$$

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

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

Gás Ideal — Calores Específicos

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

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

$$\gamma(T) \equiv \frac{c_P(T)}{c_v(T)} = 1 + \frac{R}{c_v(T)} \qquad (\text{—})$$

$$\bar{c}_{P,monatom.} = {}^5\!/_2 \bar{R}$$

$$\bar{c}_{P,di-atom.} = {}^7\!/_2 \bar{R}$$

$$\gamma_{He} = {}^5\!/_3 \approx 1,667$$

Gás Ideal — Calores Específicos

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

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

$$\gamma(T) \equiv \frac{c_P(T)}{c_v(T)} = 1 + \frac{R}{c_v(T)} \qquad (\text{—})$$

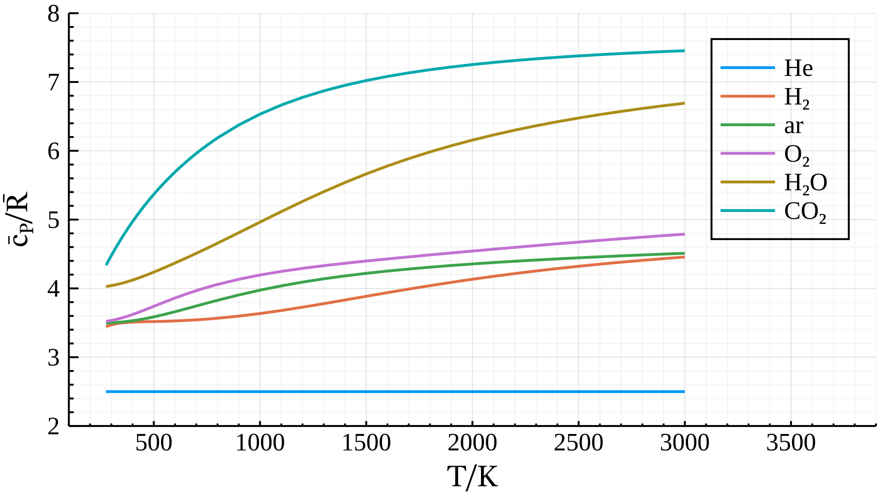
$$\bar{c}_{P,monatom.} = {}^5\!/_2 \bar{R}$$

$$\bar{c}_{P,di-atom.} = {}^7\!/_2 \bar{R}$$

$$\gamma_{He} = {}^5\!/_3 \approx 1,667$$

$$\gamma_{ar}(300\ \text{K}) \approx {}^7\!/_5 = 1,4.$$

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



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.

Image by Free-Photos from pixabay.com