

## A.03.03 – Balanço de Energia (Sistemas Fechados)

Prof. C. Naaktgeboren, PhD



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

Compiled on 2020-04-10 13h42m38s

## 1 Balanço de Energia

- Primeira Lei da Termodinâmica
- Balanço de Energia

## 2 Tópicos de Leitura

# Enunciado

A 1ª lei da Termodinâmica estabelece que:

- Energia é uma quantidade conservada.

# Enunciado

A 1ª lei da Termodinâmica estabelece que:

- Energia é uma quantidade conservada.

Este princípio da conservação da energia:

- É exhaustivamente confirmado em experimentos.

# Algumas Implicações

Logo, no universo observável:

- Não há processos físicos que criem energia,

## Algumas Implicações

Logo, no universo observável:

- Não há processos físicos que criem energia,
- Nem processos físicos que destruam energia.

# Algumas Implicações

Logo, no universo observável:

- Não há processos físicos que criem energia,
- Nem processos físicos que destruam energia.
- Processos físicos podem apenas converter energia de uma forma a outra.

# Algumas Implicações

Logo, no universo observável:

- Não há processos físicos que criem energia,
- Nem processos físicos que destruam energia.
- Processos físicos podem apenas converter energia de uma forma a outra.

A Relatividade Especial de Einstein:

- Unificou as conservações de massa e de energia;



# Algumas Implicações

Logo, no universo observável:

- Não há processos físicos que criem energia,
- Nem processos físicos que destruam energia.
- Processos físicos podem apenas converter energia de uma forma a outra.

A Relatividade Especial de Einstein:

- Unificou as conservações de massa e de energia;
- Através da equivalência massa-energia expressa por  $E_{eq} = c^2m$ .

## Algumas Implicações

Logo, no universo observável:

- Não há processos físicos que criem energia,
- Nem processos físicos que destruam energia.
- Processos físicos podem apenas converter energia de uma forma a outra.

# A Relatividade Especial de Einstein:

- Unificou as conservações de massa e de energia;
- Através da equivalência massa-energia expressa por  $E_{eq} = c^2 m$ .
- Assim, a quantidade  $E_{tot} = c^2 m + E_{outras}$  do universo é conservada.

# Aplicações

A 1ª lei é **central** em Termodinâmica.

Suas aplicações são **vastas** e incluem:

- Princípio em variedade de **deduções**;

# Aplicações

A 1ª lei é **central** em Termodinâmica.

Suas aplicações são **vastas** e incluem:

- Princípio em variedade de **deduções**;
- Instrumental na **definição** de **propriedades**.

# Aplicações

A 1ª lei é **central** em Termodinâmica.

Suas aplicações são **vastas** e incluem:

- Princípio em variedade de **deduções**;
- Instrumental na **definição** de **propriedades**.
- Cálculos de **processos** energéticos.

## Aplicações

A 1ª lei é **central** em Termodinâmica.  
Suas aplicações são **vastas** e incluem:

- Princípio em variedade de **deduções**;
- Instrumental na **definição** de **propriedades**.
- Cálculos de **processos** energéticos.

Exemplo: O que é, afinal, “energia”?

# Aplicações

A 1ª lei é **central** em Termodinâmica.  
Suas aplicações são **vastas** e incluem:

- Princípio em variedade de **deduções**;
- Instrumental na **definição** de **propriedades**.
- Cálculos de **processos** energéticos.

Exemplo: O que é, afinal, “energia”?

— Jack P. Holman (SMU)

# Aplicações

A 1ª lei é **central** em Termodinâmica.  
Suas aplicações são **vastas** e incluem:

- Princípio em variedade de **deduções**;
- Instrumental na **definição** de **propriedades**.
- Cálculos de **processos** energéticos.

Exemplo: O que é, afinal, “energia”?

- “Energia é uma **quantidade** (escalar)

— Jack P. Holman (SMU)



# Aplicações

A 1ª lei é **central** em Termodinâmica.  
Suas aplicações são **vastas** e incluem:

- Princípio em variedade de **deduções**;
- Instrumental na **definição** de **propriedades**.
- Cálculos de **processos** energéticos.

Exemplo: O que é, afinal, “energia”?

- “Energia é uma **quantidade** (escalar)
- que é **conservada** na natureza

— Jack P. Holman (SMU)

# Aplicações

A 1ª lei é **central** em Termodinâmica.  
Suas aplicações são **vastas** e incluem:

- Princípio em variedade de **deduções**;
- Instrumental na **definição** de **propriedades**.
- Cálculos de **processos** energéticos.

Exemplo: O que é, afinal, “energia”?

- “Energia é uma **quantidade** (escalar)
- que é **conservada** na natureza
- e que possui **unidades de  $\text{kg} \cdot \text{m}^2/\text{s}^2$** .”

— Jack P. Holman (SMU)

# Balanço de Energia

A 1ª lei é matematicamente expressa por meio de **balanço de energia**.

# Balanço de Energia

A 1ª lei é matematicamente expressa por meio de **balanço de energia**.

Em um **processo**, o balanço de energia é dado por:

# Balanco de Energia

A 1ª lei é matematicamente expressa por meio de **balanco de energia**.

Em um **processo**, o balanco de energia é dado por:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Total de energia que} \\ \text{entra no sistema} \end{array} \right) -$$

# Balanço de Energia

A 1ª lei é matematicamente expressa por meio de **balanço de energia**.

Em um **processo**, o balanço de energia é dado por:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Total de energia que} \\ \text{entra no sistema} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Total de energia} \\ \text{que sai do sistema} \end{array} \right) =$$

# Balanco de Energia

A 1ª lei é matematicamente expressa por meio de **balanco de energia**.

Em um **processo**, o balanco de energia é dado por:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Total de energia que} \\ \text{entra no sistema} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Total de energia} \\ \text{que sai do sistema} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Variação líquida de} \\ \text{energia no sistema} \end{array} \right),$$

# Balanço de Energia

A 1ª lei é matematicamente expressa por meio de **balanço de energia**.

Em um **processo**, o balanço de energia é dado por:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Total de energia que} \\ \text{entra no sistema} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Total de energia} \\ \text{que sai do sistema} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Variação líquida de} \\ \text{energia no sistema} \end{array} \right),$$

que matematicamente se escreve:

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1, \quad \text{para um processo 1-2.}$$



# Balanco de Energia

A 1ª lei é matematicamente expressa por meio de **balanco de energia**.

Em um **processo**, o balanco de energia é dado por:

$$\left( \begin{array}{c} \text{Total de energia que} \\ \text{entra no sistema} \end{array} \right) - \left( \begin{array}{c} \text{Total de energia} \\ \text{que sai do sistema} \end{array} \right) = \left( \begin{array}{c} \text{Variação líquida de} \\ \text{energia no sistema} \end{array} \right),$$

que matematicamente se escreve:

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1, \quad \text{para um processo 1-2.}$$

Assim, se  $E_1$ ,  $E_{ent}$  e  $E_{sai}$  são conhecidos, então:  $E_2 = E_1 + E_{ent} - E_{sai}$ .

# Balanço de Energia – Formas

Processo

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1$$

# Balanco de Energia – Formas

Processo  $\xrightarrow{d()}$

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1 \quad \xrightarrow{d()}$$

# Balanço de Energia – Formas

Processo  $\xrightarrow{d()}$  Diferencial

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1 \xrightarrow{d()} \delta E_{ent} - \delta E_{sai} = dE_{sist}$$

# Balanço de Energia – Formas

Processo  $\xrightarrow{d()}$  Diferencial  $\xrightarrow{/dt}$

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1 \xrightarrow{d()} \delta E_{ent} - \delta E_{sai} = dE_{sist} \xrightarrow{/dt}$$

# Balanço de Energia – Formas

Processo	$\xrightarrow{d()}$	Diferencial	$\xrightarrow{/dt}$	Taxa
$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1$	$\xrightarrow{d()}$	$\delta E_{ent} - \delta E_{sai} = dE_{sist}$	$\xrightarrow{/dt}$	$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = \left. \frac{dE}{dt} \right _{sist}$

# Balço de Energia – Formas

Processo	$\xrightarrow{d()}$	Diferencial	$\xrightarrow{/dt}$	Taxa
$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1$	$\xrightarrow{d()}$	$\delta E_{ent} - \delta E_{sai} = dE_{sist}$	$\xrightarrow{/dt}$	$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = \left. \frac{dE}{dt} \right _{sist}$
(int.)	$\downarrow \div m$			

# Balço de Energia – Formas

Processo	$\xrightarrow{d()}$	Diferencial	$\xrightarrow{/dt}$	Taxa
$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1$	$\xrightarrow{d()}$	$\delta E_{ent} - \delta E_{sai} = dE_{sist}$	$\xrightarrow{/dt}$	$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = \left. \frac{dE}{dt} \right _{sist}$
(int.)	$\downarrow \div m$			
$e_{ent} - e_{sai} = \Delta e_{sist} = e_2 - e_1$				



# Balço de Energia – Formas

Processo	$\xrightarrow{d()}$	Diferencial	$\xrightarrow{/dt}$	Taxa
$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1$	$\xrightarrow{d()}$	$\delta E_{ent} - \delta E_{sai} = dE_{sist}$	$\xrightarrow{/dt}$	$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = \left. \frac{dE}{dt} \right _{sist}$
(int.)	$\downarrow \div m$	$\downarrow \div m$		
$e_{ent} - e_{sai} = \Delta e_{sist} = e_2 - e_1$	$\xrightarrow{d()}$			

# Balanco de Energia – Formas

Processo	$\xrightarrow{d()}$	Diferencial	$\xrightarrow{/dt}$	Taxa
$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1$	$\xrightarrow{d()}$	$\delta E_{ent} - \delta E_{sai} = dE_{sist}$	$\xrightarrow{/dt}$	$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = \left. \frac{dE}{dt} \right _{sist}$
(int.) $\downarrow \div m$		$\downarrow \div m$		
$e_{ent} - e_{sai} = \Delta e_{sist} = e_2 - e_1$	$\xrightarrow{d()}$	$\delta e_{ent} - \delta e_{sai} = de_{sist}$		

# Balanco de Energia – Formas

Processo	$\xrightarrow{d()}$	Diferencial	$\xrightarrow{/dt}$	Taxa
$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1$	$\xrightarrow{d()}$	$\delta E_{ent} - \delta E_{sai} = dE_{sist}$	$\xrightarrow{/dt}$	$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = \left. \frac{dE}{dt} \right _{sist}$
(int.) $\downarrow \div m$		$\downarrow \div m$		$\downarrow \div m$
$e_{ent} - e_{sai} = \Delta e_{sist} = e_2 - e_1$	$\xrightarrow{d()}$	$\delta e_{ent} - \delta e_{sai} = de_{sist}$	$\xrightarrow{/dt}$	

# Balanco de Energia – Formas

Processo	$\xrightarrow{d()}$	Diferencial	$\xrightarrow{/dt}$	Taxa
$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1$	$\xrightarrow{d()}$	$\delta E_{ent} - \delta E_{sai} = dE_{sist}$	$\xrightarrow{/dt}$	$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = \left. \frac{dE}{dt} \right _{sist}$
(int.) $\downarrow \div m$		$\downarrow \div m$		$\downarrow \div m$
$e_{ent} - e_{sai} = \Delta e_{sist} = e_2 - e_1$	$\xrightarrow{d()}$	$\delta e_{ent} - \delta e_{sai} = de_{sist}$	$\xrightarrow{/dt}$	$\dot{e}_{ent} - \dot{e}_{sai} = \left. \frac{de}{dt} \right _{sist}$

# Balanco de Energia – Formas

Processo	$\xrightarrow{d()}$	Diferencial	$\xrightarrow{/dt}$	Taxa
$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1$	$\xrightarrow{d()}$	$\delta E_{ent} - \delta E_{sai} = dE_{sist}$	$\xrightarrow{/dt}$	$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = \left. \frac{dE}{dt} \right _{sist}$
(int.) $\downarrow \div m$		$\downarrow \div m$		$\downarrow \div m$
$e_{ent} - e_{sai} = \Delta e_{sist} = e_2 - e_1$	$\xrightarrow{d()}$	$\delta e_{ent} - \delta e_{sai} = de_{sist}$	$\xrightarrow{/dt}$	$\dot{e}_{ent} - \dot{e}_{sai} = \left. \frac{de}{dt} \right _{sist}$

# Balanço de Energia – $E_{ent}$ , $E_{sai}$

Em **sistemas compressíveis simples**,  $E_{ent}$  e  $E_{sai}$  podem ser apenas nas formas de:

# Balanço de Energia – $E_{ent}$ , $E_{sai}$

Em **sistemas compressíveis simples**,  $E_{ent}$  e  $E_{sai}$  podem ser apenas nas formas de:

① calor e

# Balço de Energia – $E_{ent}$ , $E_{sai}$

Em **sistemas compressíveis simples**,  $E_{ent}$  e  $E_{sai}$  podem ser apenas nas formas de:

- ① calor e
- ② trabalho.



# Balanco de Energia – $E_{ent}$ , $E_{sai}$

Em **sistemas compressíveis simples**,  $E_{ent}$  e  $E_{sai}$  podem ser apenas nas formas de:

- ① calor e
- ② trabalho.

Assim, no balanço de energia:

# Balanco de Energia – $E_{ent}$ , $E_{sai}$

Em **sistemas compressíveis simples**,  $E_{ent}$  e  $E_{sai}$  podem ser apenas nas formas de:

- ① calor e
- ② trabalho.

Assim, no balanço de energia:

$$E_{ent} = Q_{ent} + W_{ent}, \quad \text{e}$$

# Balanco de Energia – $E_{ent}$ , $E_{sai}$

Em **sistemas compressíveis simples**,  $E_{ent}$  e  $E_{sai}$  podem ser apenas nas formas de:

- ① calor e
- ② trabalho.

Assim, no balanço de energia:

$$E_{ent} = Q_{ent} + W_{ent}, \quad \text{e}$$

$$E_{sai} = Q_{sai} + W_{sai}.$$

# Balanço de Energia – $E_{sist}$

Em **sistemas clássicos** (pré-relativísticos) **não reativos**,  $E_{sist} = E_{micro} + E_{macro}$ :

# Balanco de Energia – $E_{sist}$

Em **sistemas clássicos** (pré-relativísticos) **não reativos**,  $E_{sist} = E_{micro} + E_{macro}$ :

①  $E_{micro} \equiv U_{sist}$ , a **energia interna**, em kJ;

# Balanco de Energia – $E_{sist}$

Em **sistemas clássicos** (pré-relativísticos) **não reativos**,  $E_{sist} = E_{micro} + E_{macro}$ :

- ①  $E_{micro} \equiv U_{sist}$ , a **energia interna**, em kJ;
- ②  $E_{macro} = E_c + E_p$ , a soma das energias **cinética**, e **potencial**, em kJ, onde:

# Balanco de Energia – $E_{sist}$

Em **sistemas clássicos** (pré-relativísticos) **não reativos**,  $E_{sist} = E_{micro} + E_{macro}$ :

- ①  $E_{micro} \equiv U_{sist}$ , a **energia interna**, em kJ;
- ②  $E_{macro} = E_c + E_p$ , a soma das energias **cinética**, e **potencial**, em kJ, onde:
- ③  $E_c = mV^2/2$ , com  $[[V]] = \sqrt{\text{kJ/kg}} = \sqrt{1000} \text{ m/s} \approx 31.62 \text{ m/s}$ , ou

# Balanco de Energia – $E_{sist}$

Em **sistemas clássicos** (pré-relativísticos) **não reativos**,  $E_{sist} = E_{micro} + E_{macro}$ :

- ①  $E_{micro} \equiv U_{sist}$ , a **energia interna**, em kJ;
- ②  $E_{macro} = E_c + E_p$ , a soma das energias **cinética**, e **potencial**, em kJ, onde:
- ③  $E_c = mV^2/2$ , com  $[[V]] = \sqrt{\text{kJ/kg}} = \sqrt{1000} \text{ m/s} \approx 31.62 \text{ m/s}$ , ou
- ④  $E_c = mv^2/2000$ , com  $[[v]] = \text{m/s} = \sqrt{\text{J/kg}}$ ;



# Balanco de Energia – $E_{sist}$

Em **sistemas clássicos** (pré-relativísticos) **não reativos**,  $E_{sist} = E_{micro} + E_{macro}$ :

- ①  $E_{micro} \equiv U_{sist}$ , a **energia interna**, em kJ;
- ②  $E_{macro} = E_c + E_p$ , a soma das energias **cinética**, e **potencial**, em kJ, onde:
- ③  $E_c = mV^2/2$ , com  $\llbracket V \rrbracket = \sqrt{\text{kJ/kg}} = \sqrt{1000} \text{ m/s} \approx 31.62 \text{ m/s}$ , ou
- ④  $E_c = mv^2/2000$ , com  $\llbracket v \rrbracket = \text{m/s} = \sqrt{\text{J/kg}}$ ;
- ⑤  $E_p = mgZ$ , com  $\llbracket g \rrbracket = \text{m/s}^2$  e  $\llbracket Z \rrbracket = \text{km}$ , tal que  $\llbracket gZ \rrbracket = \text{k(m/s)}^2 = \text{k(J/kg)}$ , ou

# Balanco de Energia – $E_{sist}$

Em **sistemas clássicos** (pré-relativísticos) **não reativos**,  $E_{sist} = E_{micro} + E_{macro}$ :

- ①  $E_{micro} \equiv U_{sist}$ , a **energia interna**, em kJ;
- ②  $E_{macro} = E_c + E_p$ , a soma das energias **cinética**, e **potencial**, em kJ, onde:
- ③  $E_c = mV^2/2$ , com  $[[V]] = \sqrt{\text{kJ/kg}} = \sqrt{1000} \text{ m/s} \approx 31.62 \text{ m/s}$ , ou
- ④  $E_c = mV^2/2000$ , com  $[[v]] = \text{m/s} = \sqrt{\text{J/kg}}$ ;
- ⑤  $E_p = mgZ$ , com  $[[g]] = \text{m/s}^2$  e  $[[Z]] = \text{km}$ , tal que  $[[gZ]] = \text{k(m/s)}^2 = \text{k(J/kg)}$ , ou
- ⑥  $E_p = mgZ/1000$ , com  $[[g]] = \text{m/s}^2$  e  $[[z]] = \text{m}$ .

# Balanço de Energia – Em Processo

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1 \rightarrow$$

# Balanco de Energia – Em Processo

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1 \rightarrow$$

$$(Q_{ent} + W_{ent}) - (Q_{sai} + W_{sai}) = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1 \rightarrow$$

# Balanco de Energia – Em Processo

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1 \rightarrow$$

$$(Q_{ent} + W_{ent}) - (Q_{sai} + W_{sai}) = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1 \rightarrow$$

$$(Q_{ent} + W_{ent}) - (Q_{sai} + W_{sai}) = \Delta E_{sist} = (U_2 + E_{c,2} + E_{p,2}) - (U_1 + E_{c,1} + E_{p,1}) \rightarrow$$

# Balanco de Energia – Em Processo

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1 \rightarrow$$

$$(Q_{ent} + W_{ent}) - (Q_{sai} + W_{sai}) = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1 \rightarrow$$

$$(Q_{ent} + W_{ent}) - (Q_{sai} + W_{sai}) = \Delta E_{sist} = (U_2 + E_{c,2} + E_{p,2}) - (U_1 + E_{c,1} + E_{p,1}) \rightarrow$$

$$(Q_{ent} - Q_{sai}) + (W_{ent} - W_{sai}) = \Delta E_{sist} = (U_2 - U_1) + (E_{c,2} - E_{c,1}) + (E_{p,2} - E_{p,1}) \rightarrow$$

# Balanco de Energia – Em Processo

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1 \rightarrow$$

$$(Q_{ent} + W_{ent}) - (Q_{sai} + W_{sai}) = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1 \rightarrow$$

$$(Q_{ent} + W_{ent}) - (Q_{sai} + W_{sai}) = \Delta E_{sist} = (U_2 + E_{c,2} + E_{p,2}) - (U_1 + E_{c,1} + E_{p,1}) \rightarrow$$

$$(Q_{ent} - Q_{sai}) + (W_{ent} - W_{sai}) = \Delta E_{sist} = (U_2 - U_1) + (E_{c,2} - E_{c,1}) + (E_{p,2} - E_{p,1}) \rightarrow$$

$$Q_{liq,ent} - W_{liq,sai} = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p. \quad (\text{conv. explícita})$$

# Balanco de Energia – Em Processo

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1 \rightarrow$$

$$(Q_{ent} + W_{ent}) - (Q_{sai} + W_{sai}) = \Delta E_{sist} = E_2 - E_1 \rightarrow$$

$$(Q_{ent} + W_{ent}) - (Q_{sai} + W_{sai}) = \Delta E_{sist} = (U_2 + E_{c,2} + E_{p,2}) - (U_1 + E_{c,1} + E_{p,1}) \rightarrow$$

$$(Q_{ent} - Q_{sai}) + (W_{ent} - W_{sai}) = \Delta E_{sist} = (U_2 - U_1) + (E_{c,2} - E_{c,1}) + (E_{p,2} - E_{p,1}) \rightarrow$$

$$Q_{liq,ent} - W_{liq,sai} = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p. \quad (\text{conv. explícita})$$

$$Q - W = \Delta U + \Delta E_c + \Delta E_p. \quad (\text{conv. implícita})$$



# Tópicos de Leitura I



Çengel, Y. A. e Boles, M. A.

*Termodinâmica 7ª Edição.* Seções 2-6 e 4-2.

AMGH. Porto Alegre. ISBN 978-85-8055-200-3.



Image by David Mark from pixabay.com

