

# PME 5228 – Fundamentos de Combustão

Prof. Dr. Guenther C. Krieger Filho  
Laboratory of Environmental and Thermal  
Engineering - LETE

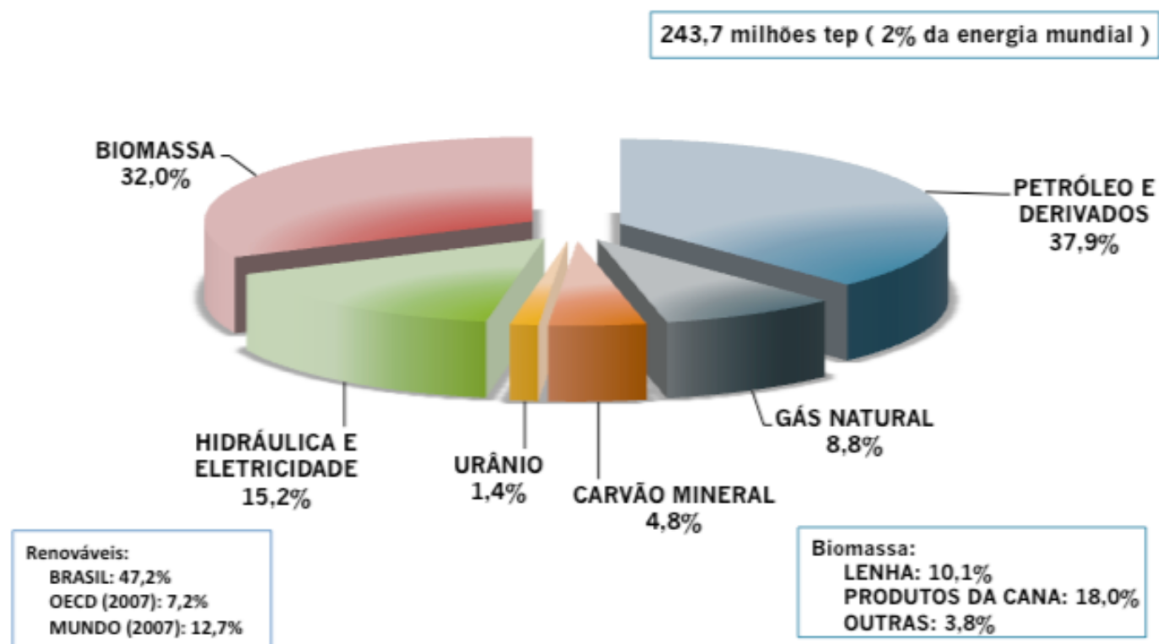
# 1.0 Introdução e Motivação

**Combustão:** Rápida oxidação gerando CALOR e LUZ; também oxidação lenta acompanhada de relativamente baixa liberação de calor e nenhuma luz (Webster's Dictionary)

→ Transforma a ENERGIA contida nas ligações químicas em energia interna

# 1.0 Introdução e Motivação

- Matriz Energética Brasileira



Fonte: Ministério das Minas e Energia (2009).

# 1.0 Introdução e Motivação

## Fases dos combustíveis e aplicações

- Sólidos
- Líquidos
- Gasosos
  - Pré-misturada
  - Não pré-misturada

Ex: Carvão, MCI, c/carburação /coletor admissão, queimadores, a óleo, gás, motor diesel.

## 2 COMBUSTÃO E TERMODINÂMICA

### 2.1 Revisão de Relações de Propriedades

- Propriedades Extensivas x Intensivas

$$V = vm \quad \text{ou} \quad \bar{v}N \quad (1)$$

- Equação de Estado

- Relação entre  $P$ ,  $T$  e  $v$
- Gás Ideal  $\longrightarrow$  Forças intermoleculares negligenciadas

$$PV = \begin{array}{c} NR_u T \\ \downarrow \\ \text{Const. Univ. dos Gases} \\ R_u = 8315 \text{ J}/[\text{Kmol} \cdot \text{K}] \end{array} \quad (2)$$

$$PV = \begin{array}{c} mRT \\ \downarrow \\ \text{Const. do Gas } R = R_u/W \\ W \rightarrow \text{peso molecular } [\text{Kg}/\text{Kmol}] \end{array} \quad (3)$$

$$Pv = RT \quad \text{ou} \quad P = \rho RT \quad (4)$$

$\longrightarrow$  Em processos de combustão a hipótese de gás ideal é válida devido às altas temperaturas  $\Leftrightarrow$  baixa densidade.

- Equação Calorífica de Estado

$$u = u(T, P) \quad (5)$$

$$h = h(T, p) \quad (6)$$

$$du = \underbrace{\left(\frac{\partial u}{\partial T}\right)_v}_{\equiv c_v} dT + \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T dv \quad (7)$$

$$dh = \underbrace{\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p}_{\equiv c_p} dT + \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T dp \quad (8)$$

para gás ideal  $u = u(T) \Rightarrow \left(\frac{\partial u}{\partial v}\right)_T = 0$

e

$$h \equiv u + pv = \underbrace{u + RT}_{h=h(T)} \quad \text{e} \quad \left(\frac{\partial h}{\partial p}\right)_T = 0$$

então:

$$u(T) - u_{ref} = \int_{T_{ref}}^T c_v dT \quad (9)$$

$$h(T) - h_{ref} = \int_{T_{ref}}^T c_p dT \quad (10)$$

- $C_p$  depende da temperatura
- Energia interna e entalpia sensíveis – não está computada a mudança de espécies química

## 2.2 Misturas de Gases Ideais

$N_1$  moles da espécie 1  
 $N_2$  moles da espécie 2, etc.

- Fração molar da espécie "i"

$$X_i \equiv \frac{N_i}{N_1 + N_2 + \dots + N_i + \dots + N_n} = \frac{N_i}{N_{tot}} \quad (11)$$

Analogamente,

- Fração mássica da espécie "i"

$$Y_i \equiv \frac{m_i}{m_1 + m_2 + \dots + m_i + \dots + m_n} = \frac{m_i}{m_{tot}} \quad (12)$$

Ainda:

$$\sum_i X_i = \frac{\sum_i N_i}{N_{tot}} = \frac{N_{tot}}{N_{tot}} = 1 \quad (13)$$

$$\sum_i Y_i = \frac{\sum_i m_i}{m_{tot}} = \frac{m_{tot}}{m_{tot}} = 1 \quad (14)$$

e mais

$$Y_i = \frac{m_i}{m_{tot}} = \frac{N_i MW_i}{N_{tot} MW_{mist}} = x_i \frac{MW_i}{MW_{mist}} \quad (15)$$

$$X_i = \frac{N_i}{N_{tot}} = \frac{\overbrace{m_i / MW_i}^{Kmol_i}}{\underbrace{m_{tot} / MW_{mist}}_{Kmol_{mist}}} = y_i \frac{MW_{mist}}{MW_i} \quad (16)$$

# Massa Molecular da Mistura

$$\begin{aligned}
 MW_{mist} &= \frac{N_1}{N_{tot}} MW_1 + \frac{N_2}{N_{tot}} MW_2 + \dots \frac{N_i}{N_{tot}} MW_i + \dots = \sum_i x_i MW_i \\
 \downarrow & \qquad \qquad \downarrow \\
 \left[ \frac{Kg_{mist}}{Kmol_{mist}} \right] & \qquad \text{Ponderação de cada} \\
 & \qquad \text{peso molecular com fração} \\
 & \qquad \text{molecular correspondente}
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

ou

$$MW_{mist} = \left( \underbrace{\frac{m_1}{m_{tot}} \cdot \frac{1}{MW_1}}_{\frac{Kg_i}{Kg} \cdot \frac{Kmol_i}{Kg_i}} + \frac{m_2}{m_{tot}} \cdot \frac{1}{MW_2} + \dots \right)^{-1} = \frac{1}{\sum_i \frac{y_i}{MW_i}}
 \tag{18}$$

- Pressão parcial da espécie "i"

→ é como se a espécie "i" estivesse sozinha à mesma T e mesmo V. Para gases ideais (não interagem) a pressão total (moléculas chocam-se com paredes):

$$P = \sum_i P_i \quad (19)$$

ainda:

$$P = NR_u T$$

$$\frac{P}{P_i} = \frac{NR_u T}{N_i R_u T} = \frac{N}{N_i} \longrightarrow P_i = P x_i \quad (20)$$

# Entalpia de misturas de gases ideais

- Entalpia:

$$h_{mist} = \sum_i y_i h_i \quad (21)$$

$$\bar{h}_{mist} = \sum_i x_i \bar{h}_i \quad (22)$$

lembre-se:

$$h_i = h_i(T) \Rightarrow (\text{gases ideais})$$

e portanto

$$h_{mist} = h_{mist}(T)$$

# Entropia de misturas de gases ideais

$$s_{mist}(T, P) = \sum_i y_i s_i(T, P_i) \quad (23)$$

$$\bar{s}_{mist}(T, P) = \sum_i x_i \bar{s}_i(T, P_i) \quad (24)$$

Da 2ª eq's TDS aplicada a gás ideal:

$$s_i(T, P_i) = s_i(T, P_{ref}) - R \ln \frac{P_i}{P_{ref}} \quad (25)$$

$$\bar{s}_i(T, P_i) = \bar{s}_i(T, P_{ref}) - R_n \ln \frac{P_i}{P_{ref}} \quad (26)$$

## 2.3 Calor latente de vaporização ou entalpia de vaporização

$$h_{fg}(T, P) = h_{vapor}(T, P) - h_{liq}(T, P) \quad (27)$$

- Equação de Clausius-Clapeyron (Van Wylen)

$$\frac{dP_{sat}}{P_{sat}} = \frac{h_{fg}}{R} \frac{dT_{sat}}{T_{sat}^2} \quad (28)$$

assume-se:

$$v_{liq} \ll v_{vapor}$$

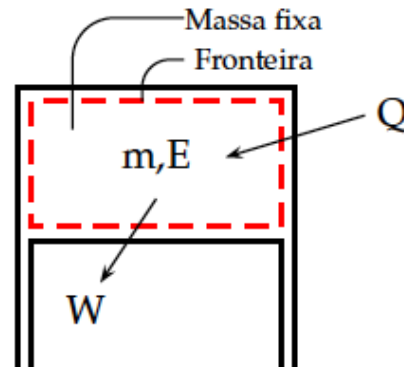
vapor  $\Rightarrow$  gás ideal

$$h_{fg} = cte$$

Determina-se  $P_{sat}$  dado  $T_{sat1}$ ,  $T_{sat2}$ ,  $P_{sat1}$ .

## 2.4 1a Lei da Termodinâmica

- Sistema Fechado (massa Fixa)



## 2.4 1a Lei da Termodinâmica

$$\begin{array}{ccccc}
 {}_1Q_2 & - & {}_1W_2 & = & \Delta E_{1-2} \\
 \downarrow & & \downarrow & & \downarrow \\
 \text{Calor líquido trocado} & & \text{Trabalho líquido} & & \text{Variação da energia do sistema} \\
 \text{entre os estados 1 e 2} & & \text{entre os estados 1 e 2} & & \text{entre os estados 1 e 2}
 \end{array} \quad (29)$$

$$E = m \left[ \underbrace{u}_{\text{interna}} + \frac{1}{2} \underbrace{v^2}_{\text{cinética}} + \underbrace{gz}_{\text{potencial}} \right] \quad (30)$$

uma forma específica

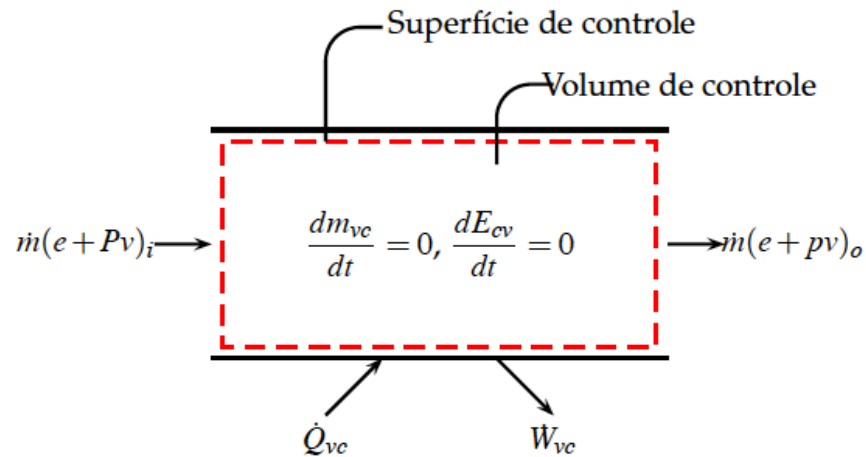
$${}_1q_2 - {}_1w_2 = \Delta e_{1-2}$$

na forma da taxa: ( $\div \Delta t$ )

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt} \quad (31)$$

## 2.4 1a Lei da Termodinâmica

- Sistema aberto ou volume de controle



## 2.4 1a Lei da Termodinâmica

para regime permanente ( $\frac{\partial()}{\partial t} = 0$ )

$$\dot{Q}_{vc} - \underbrace{\dot{W}_{vc}}_{\substack{\text{Qualquer trabalho que} \\ \text{não o de bombeamento}}} = \underbrace{\dot{m}e_0 - \dot{m}e_i}_{\text{Fluxo mássico}} + \underbrace{\dot{m}}_{\downarrow} x \underbrace{(P_0 v_0 - P_i v_i)}_{\substack{\text{Trabalho líquido} \\ \text{associado à forças de pressão} \\ \text{onde o fluido cruza as fronteiras,} \\ \text{trabalho de "bombeamento"}}$$

(32)

ainda na forma:

$$\dot{Q}_{vc} - \dot{W}_{vc} = \dot{m} \left[ (h_0 - h_i) + \frac{1}{2}(v_0^2 - v_i^2) + g(z_0 - z_i) \right] \quad (33)$$