



---

# MOTORES TÉRMICOS

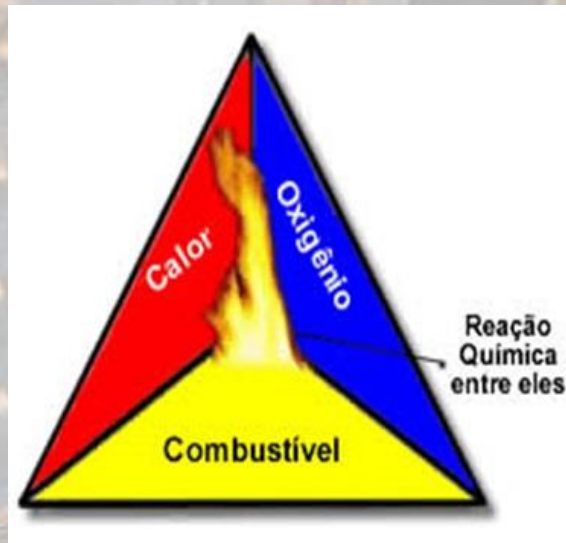
AULA 13-17 – MISTURAS REAGENTES E COMBUSTÃO

---

PROF.: KAIO DUTRA

# Fundamentos da Combustão

- Nas reações de combustão, a rápida oxidação dos elementos combustíveis do combustível resulta em uma liberação de energia à medida que os produtos de combustão são formados.





# Fundamentos da Combustão

- Uma combustão é dita completa quando todo o carbono presente no combustível se queima formando água, todo o enxofre se queima formando dióxido de enxofre e todos os outros elementos combustíveis forem totalmente oxidados.



# Fundamentos da Combustão Combustíveis

- Um combustível é simplesmente uma substância comburente. Os combustíveis hidrocarbonados líquidos são comumente derivados de petróleo cru através de processos de destilação.
- Como exemplos têm-se a gasolina, o óleo diesel, o querosene e outros tipos de óleo combustíveis.





# Fundamentos da Combustão Combustíveis

- De modo a simplificar os cálculos em combustão, a gasolina pode ser modelada como uma octana,  $C_8H_{18}$ , e o óleo diesel como uma dodecana,  $C_{12}H_{26}$ . O gás natural consiste em uma série de diferentes hidrocarbonetos sendo o metano,  $CH_4$ , o principal.



# Fundamentos da Combustão

## Modelando o Ar de Combustível

- Necessita-se de oxigênio para cada reação de combustão. Oxigênio puro é somente utilizado em aplicações especiais. Na maioria das aplicações em combustão, o ar fornece o oxigênio necessário.

**TABLE 12.1** Approximate Composition of Dry Air

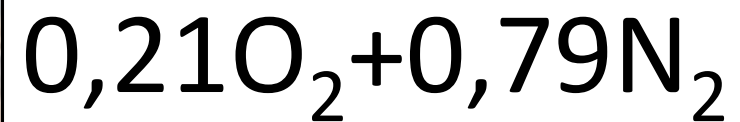
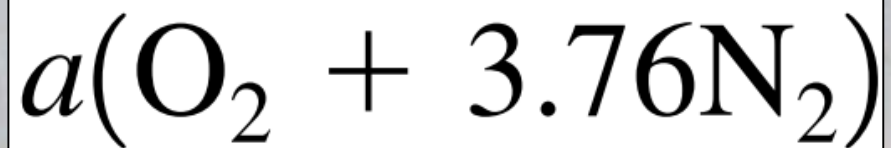
Component	Mole Fraction (%)
Nitrogen	78.08
Oxygen	20.95
Argon	0.93
Carbon dioxide	0.03
Neon, helium, methane, and others	0.01



# Fundamentos da Combustão

## Modelando o Ar de Combustível

- Como simplificação todos os componentes do ar, exceto o oxigênio, são agrupados juntamente com o nitrogênio. Consequentemente, em uma base molar o ar é considerado como 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio. Assim, quando o ar fornecer o oxigênio em uma reação de combustão cada mol de oxigênio é acompanhado por 3,76 (0,79/0,21) moles de nitrogênio.



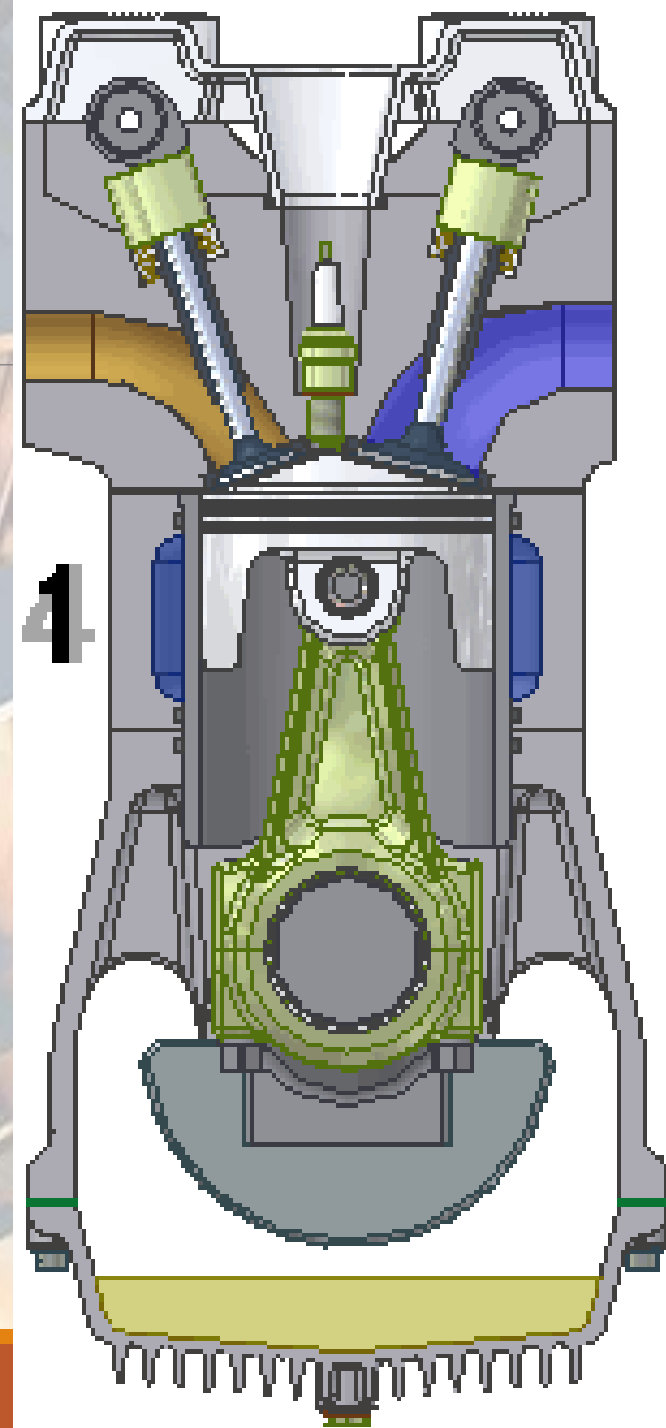
# Fundamentos da Combustão

## Razão Ar-Combustível

- A razão ar-combustível é simplesmente a razão entre a quantidade de ar em uma reação pela quantidade de combustível.
- Esta razão pode ser escrita em base molar ou em uma base mássica.

$$AF = \overline{AF} \left( \frac{M_{\text{air}}}{M_{\text{fuel}}} \right)$$

$$\begin{aligned} \frac{\text{mass of air}}{\text{mass of fuel}} &= \frac{\text{moles of air} \times M_{\text{air}}}{\text{moles of fuel} \times M_{\text{fuel}}} \\ &= \frac{\text{moles of air}}{\text{moles of fuel}} \left( \frac{M_{\text{air}}}{M_{\text{fuel}}} \right) \end{aligned}$$

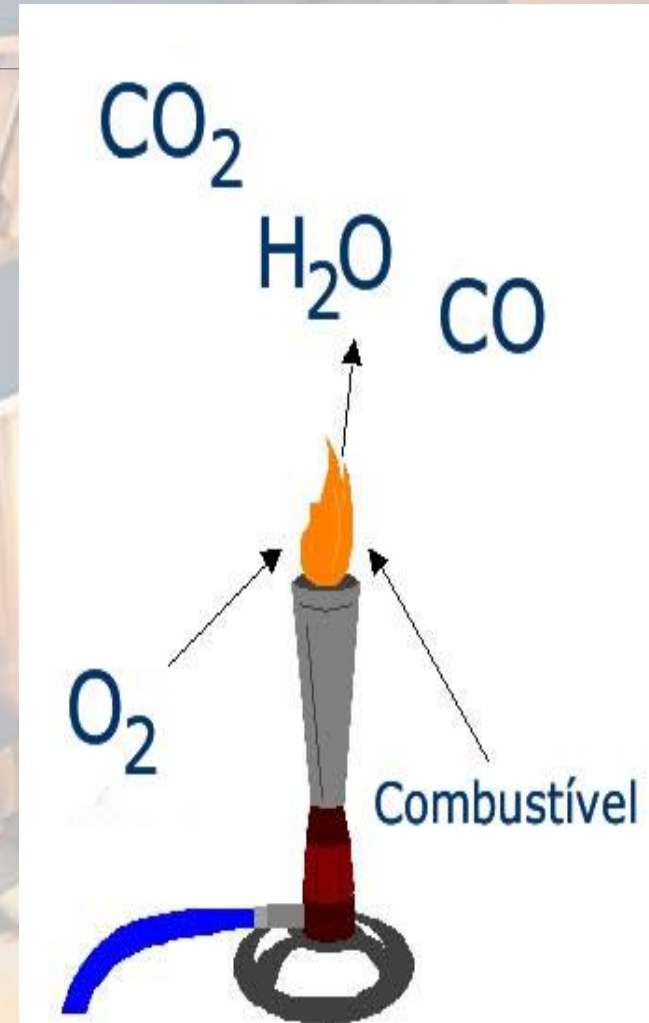




# Fundamentos da Combustão

## Ar Teórico

- A quantidade mínima de ar que fornece oxigênio suficiente para a combustão completa de todo o carbono, o hidrogênio e o enxofre presente no combustível é denominada quantidade teórica de ar.
- Para a combustão completa com a quantidade teórica de ar, os produtos consistiram em dióxido de carbono, água, dióxido de enxofre, o nitrogênio que acompanha o oxigênio no ar e qualquer nitrogênio contido no combustível.



# Fundamentos da Combustão

## Ar Teórico



$$\text{C:} \quad b = 1$$

$$\text{H:} \quad 2c = 4$$

$$\text{O:} \quad 2b + c = 2a$$

$$\text{N:} \quad d = 3.76a$$



$$AF = \overline{AF} \left( \frac{M_{\text{air}}}{M_{\text{fuel}}} \right) = 9.52 \left( \frac{28.97}{16.04} \right) = 17.19$$



# Fundamentos da Combustão

## Ar Teórico

---

- Normalmente, a quantidade de ar fornecida é maior ou menor que a quantidade teórica. A quantidade de ar que é de fato fornecida é comumente expressa em termos da **percentagem de ar teórico**.
- De outra forma, a quantidade de ar fornecida pode ser expressa como uma **percentagem de excesso** ou uma percentagem de deficiência de ar.
- Assim, 150% de ar teórico é equivalente a 50% de excesso de ar, e 80% de ar teórico é o mesmo que 20% de deficiência de ar.

# Fundamentos da Combustão

## Ar Teórico

---

- Considere a combustão completa do metano com 150% de ar teórico (50% de excesso de ar).





# Fundamentos da Combustão

## Razão de Equivalência

- A razão de equivalência é a razão entre a verdadeira razão ar-combustível e a razão ar-combustível para a combustão completa com a quantidade teórica de ar.
- Diz-se que os reagentes formam uma **mistura pobre** quando a razão de equivalência é maior do que a unidade.
- Quando esta razão for menor do que a unidade, diz-se que os reagentes formam uma **mistura rica**.

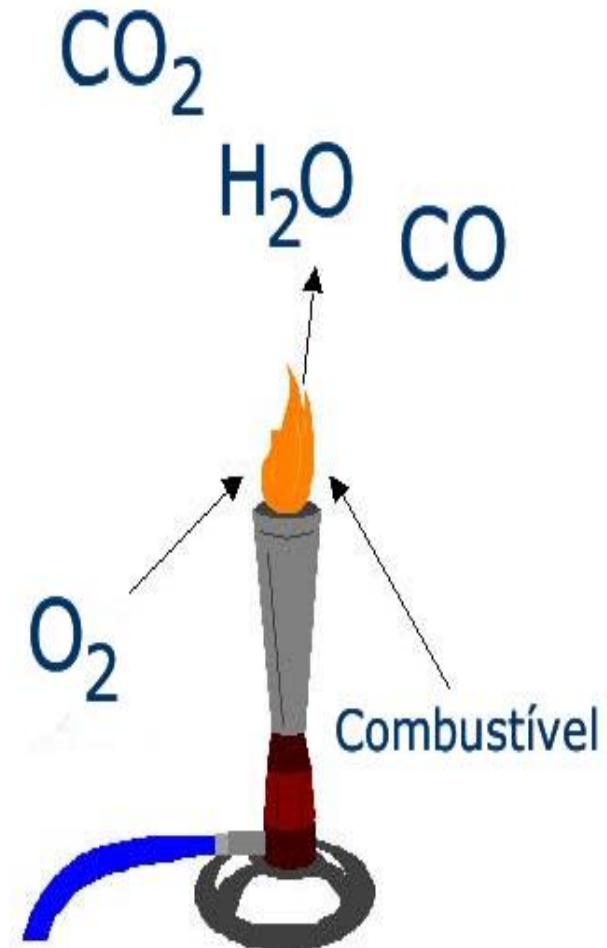
$$\Phi = \frac{(A/F)_{est}}{(A/F)}$$

$$\Phi = \frac{(F/A)}{(F/A)_{est}}$$

# Fundamentos da Combustão

## Determinando os Produtos de Combustão

- Em uma combustão completa. Para um combustível hidrocarbonado, os únicos produtos possíveis são  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$  e  $\text{N}_2$  e também  $\text{O}_2$ , caso seja fornecido um excesso de ar.
- Quando se queima combustível no cilindro de um motor de combustão interna, os produtos da reação variam com a temperatura e com a pressão no cilindro.

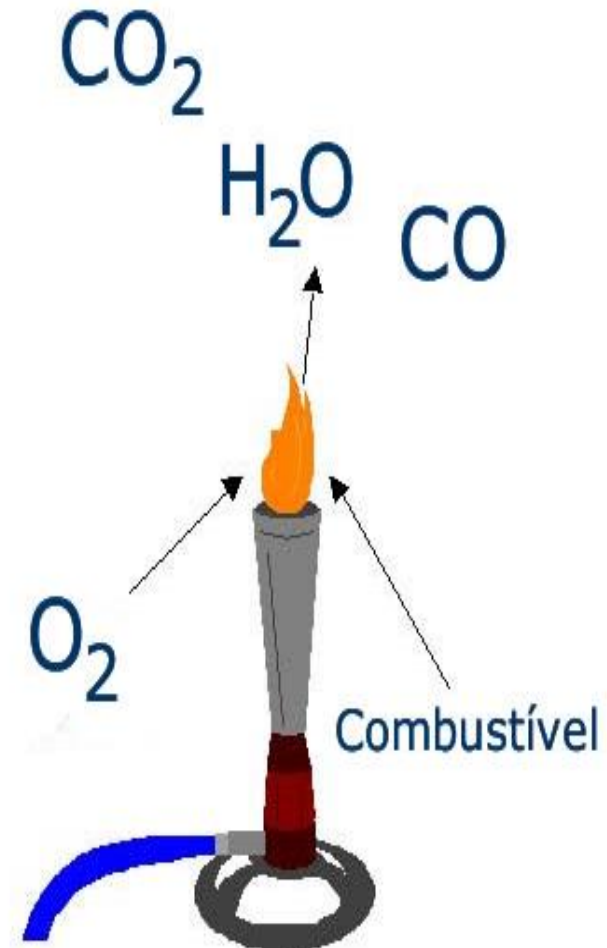




# Fundamentos da Combustão

## Determinando os Produtos de Combustão

- Muito embora a quantidade de ar suprida em um processo de combustão real possa exceder a quantidade teórica, não é raro que algum monóxido de carbono e oxigênio não-queimado apareçam nos produtos. Isso pode acontecer devido a uma mistura incompleta, a um tempo insuficiente para a combustão completa e a outros fatores.



# Fundamentos da Combustão

## Exemplo 13.1

---

- Determine a razão ar-combustível em base molar e em base mássica para a combustão completa da octana,  $C_8H_{18}$ , com (a) a quantidade teórica de ar, (b) 150% de ar teórico (50% de excesso de ar).



# Fundamentos da Combustão

## Exemplo 13.2

---

- Queima-se metano,  $\text{CH}_4$ , com ar seco. A análise molar dos produtos em base seca é  $\text{CO}_2$ , 9,7%;  $\text{CO}$ , 0,5%;  $\text{O}_2$ , 2,95% e  $\text{N}_2$ , 86,85%. Determine (a) a razão ar-combustível em uma base molar e em uma base mássica, (b) a percentagem de ar teórico, (c) a temperatura de ponto de orvalho dos produtos, em  $^\circ\text{F}$ , se a pressão for 1 atm.

# Conservação de Energia

## Entalpia Para Sistemas Reagentes

- Quando existe uma reação química, reagentes desaparecem e produtos são formados.
- Um valor de entalpia para o estudo de sistemas reagentes pode ser estabelecido atribuindo-se um valor arbitrário nulo para a entalpia dos elementos estáveis em um estado denominado estado de referência padrão e definido por  $T_{\text{ref}}=298,15\text{K}$  ( $25^{\circ}\text{C}$ ) e  $p_{\text{ref}}=1\text{atm}$ .
- No estado padrão as formas estáveis do hidrogênio, do oxigênio e do nitrogênio são  $\text{H}_2$ ,  $\text{O}_2$  e  $\text{N}_2$  e não  $\text{H}$ ,  $\text{O}$  e  $\text{N}$  monoatômicos.

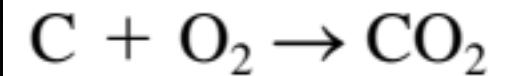
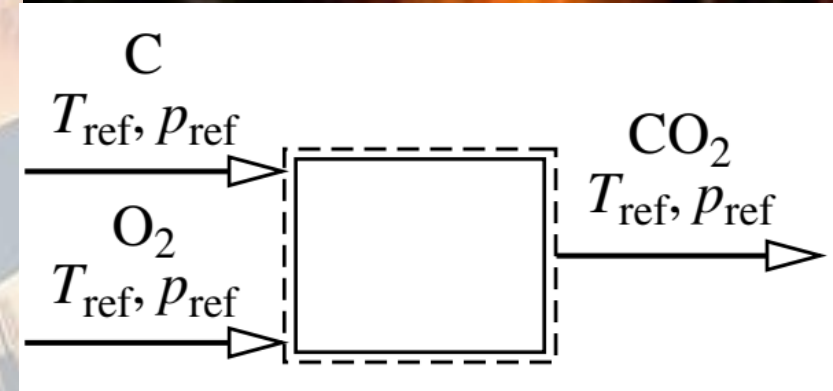




# Conservação de Energia

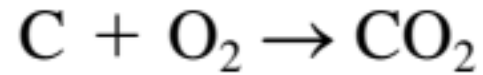
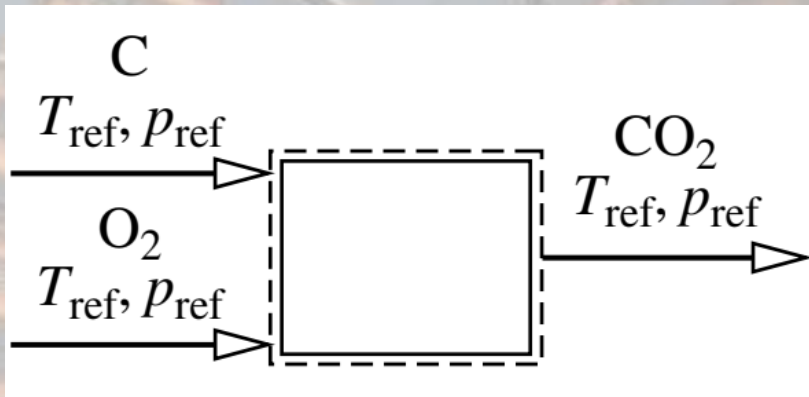
## Entalpia de Formação

- A entalpia de formação é a entalpia liberada ou absorvida quando o composto é formado pelos seus elementos, estando ambos a  $T_{ref}$  e  $p_{ref}$ .
- O dióxido de carbono é formado por carbono e oxigênio de acordo com:
- Esta reação é exotérmica, a taxa de transferência de calor e as entalpias das correntes de entrada e de saída encontra-se relacionadas pelo balanço de energia.



# Conservação de Energia

## Entalpia de Formação



$$0 = \dot{Q}_{cv} + \dot{m}_C h_C + \dot{m}_{\text{O}_2} h_{\text{O}_2} - \dot{m}_{\text{CO}_2} h_{\text{CO}_2}$$

$$0 = \dot{Q}_{cv} + \dot{n}_C \bar{h}_C + \dot{n}_{\text{O}_2} \bar{h}_{\text{O}_2} - \dot{n}_{\text{CO}_2} \bar{h}_{\text{CO}_2}$$

$$\bar{h}_{\text{CO}_2} = \frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{n}_{\text{CO}_2}} + \frac{\dot{n}_C}{\dot{n}_{\text{CO}_2}} \bar{h}_C + \frac{\dot{n}_{\text{O}_2}}{\dot{n}_{\text{CO}_2}} \bar{h}_{\text{O}_2} = \frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{n}_{\text{CO}_2}} + \bar{h}_C + \bar{h}_{\text{O}_2}$$

$$\bar{h}_C = \bar{h}_{\text{O}_2} = 0$$

$$\bar{h}_{\text{CO}_2} = \frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{n}_{\text{CO}_2}}$$

- Consequentemente, o valor atribuído à entalpia específica do dióxido de carbono no estado padrão é igual à transferência de calor por mol  $\text{CO}_2$ .



# Conservação de Energia

## Avaliando Entalpia

- A entalpia específica de um composto em um estado que não o estado padrão é determinado pela adição da variação de entalpia específica entre o estado padrão e o estado de interesse à entalpia de formação.

$$\bar{h}(T, p) = \bar{h}_f^\circ + [\bar{h}(T, p) - \bar{h}(T_{\text{ref}}, p_{\text{ref}})] = \bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h}$$

# Conservação de Energia

## Balço de Energia

- Ao se fazer balanços de energia que envolvem combustão, várias considerações entram em cena.
- O estado dos produtos e dos reagentes de combustão devem ser estimados. É importante conhecer se os produtos de combustão são misturas gasosas ou se uma parte da água formada na combustão se condensou.



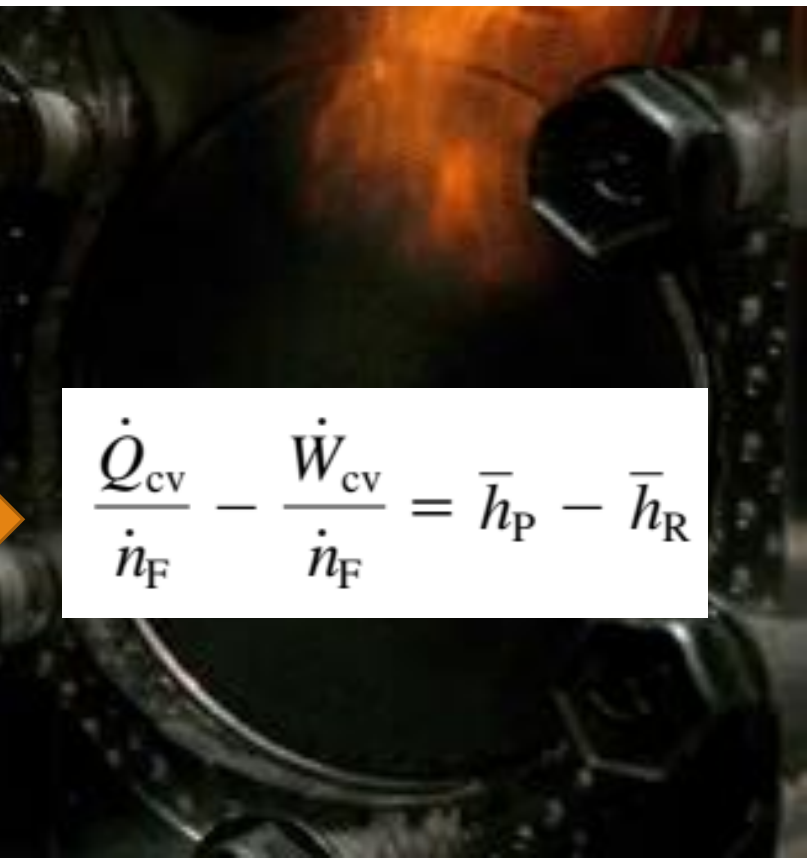
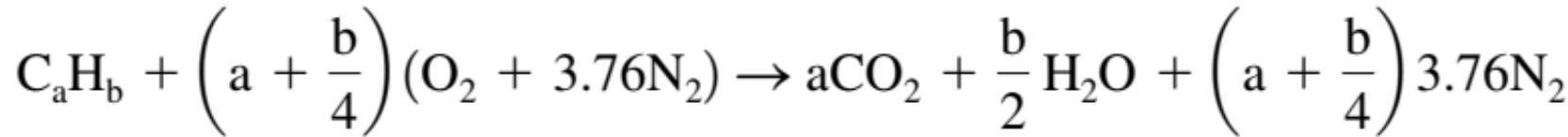
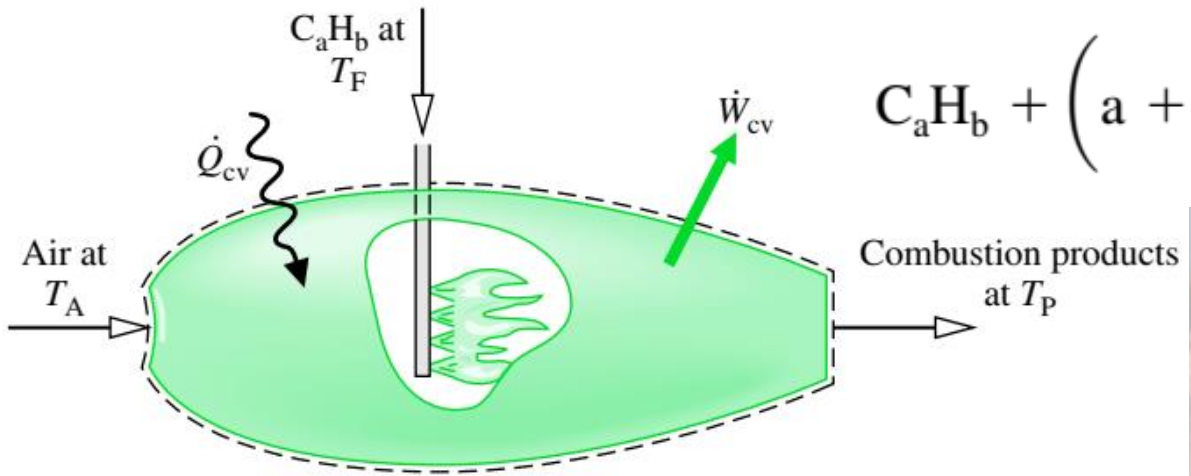


# Conservação de Energia

## Balço de Energia



MakeAGIF.com



$$\frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{n}_F} - \frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{n}_F} = \frac{\left[ a \bar{h}_{CO_2} + \frac{b}{2} \bar{h}_{H_2O} + \left(a + \frac{b}{4}\right) 3.76 \bar{h}_{N_2} \right]}{\left[ \left(a + \frac{b}{4}\right) \bar{h}_{O_2} + \left(a + \frac{b}{4}\right) 3.76 \bar{h}_{N_2} \right]} - \bar{h}_F$$



$$\frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{n}_F} - \frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{n}_F} = \bar{h}_P - \bar{h}_R$$

# Conservação de Energia

## Balço de Energia

$$\frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{n}_F} - \frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{n}_F} = \frac{[a\bar{h}_{CO_2} + \frac{b}{2}\bar{h}_{H_2O} + (a + \frac{b}{4})3.76\bar{h}_{N_2}]}{1} - \bar{h}_F - \frac{[(a + \frac{b}{4})\bar{h}_{O_2} + (a + \frac{b}{4})3.76\bar{h}_{N_2}]}{1}$$

$$\bar{h} = \bar{h}_f^\circ + [\bar{h}(T_P) - \bar{h}(T_{ref})]$$

$$\frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{n}_F} - \frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{n}_F} = a(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_{CO_2} + \frac{b}{2}(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_{H_2O} + (a + \frac{b}{4})3.76(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_{N_2} - (\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_F - (a + \frac{b}{4})(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_{O_2} - (a + \frac{b}{4})3.76(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_{N_2}$$

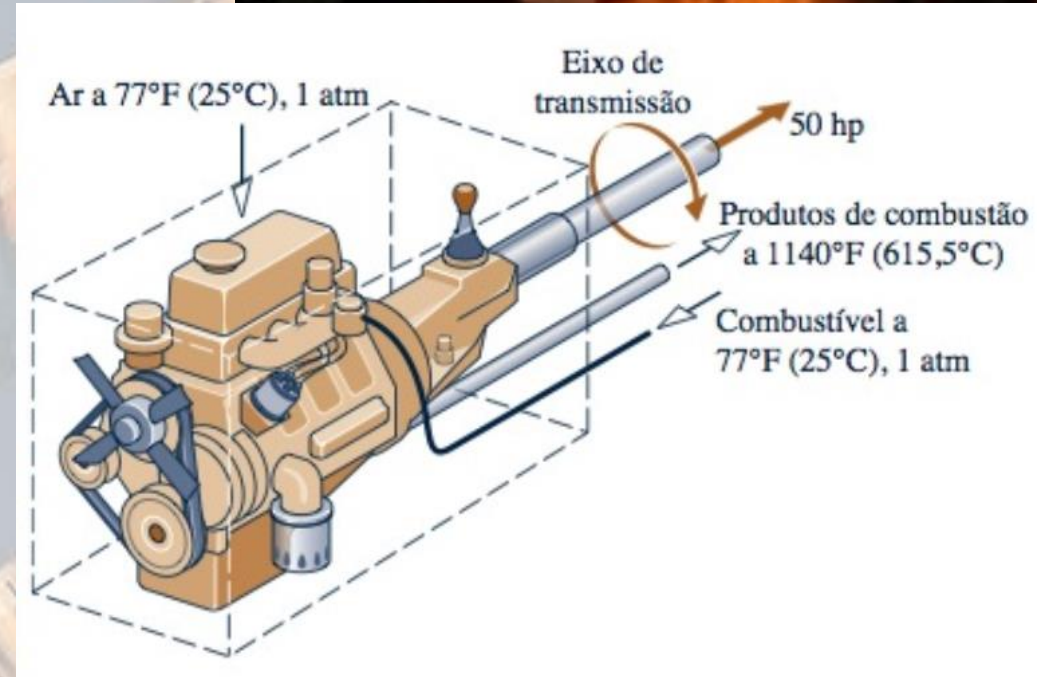
$$\frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{n}_F} - \frac{\dot{W}_{cv}}{\dot{n}_F} = \sum_P n_e(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_e - \sum_R n_i(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h})_i$$



# Conservação de Energia

## Exemplo 13.4

- Octano líquido entra em um motor de combustão interna operando em regime permanente com uma vazão mássica de  $0,004 \text{ lbm/s}$  ( $0,0018 \text{ Kg/s}$ ) e é misturado com a quantidade de ar teórico. O combustível e o ar entram no motor a  $77^\circ\text{F}$  ( $25^\circ\text{C}$ ) e  $1 \text{ atm}$ . A mistura queima completamente e os produtos de combustão deixam o motor a  $1140^\circ\text{F}$  ( $615,5^\circ\text{C}$ ). O motor desenvolve uma potência de saída de  $50 \text{ hp}$  ( $36,8 \text{ KW}$ ). Determine a taxa de transferência de calor do motor, em  $\text{Btus/s}$ , desprezando os efeitos de energia cinética e potencial.



# Conservação de Energia

## Sistemas Fechados

- Consideremos um sistema fechado no qual se desenvolve um processo de combustão.

$$U_P - U_R = Q - W \quad \sum_P n\bar{u} - \sum_R n\bar{u} = Q - W \quad \bar{u} = \bar{h} - \bar{R}T$$

$$\begin{aligned} Q - W &= \sum_P n(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h} - \bar{R}T_P) - \sum_R n(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h} - \bar{R}T_R) \\ &= \sum_P n(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h}) - \sum_R n(\bar{h}_f^\circ + \Delta\bar{h}) - \bar{R}T_P \sum_P n + \bar{R}T_R \sum_R n \end{aligned}$$



# Entalpia de Combustão

- Muito embora o conceito de entalpia de formação permeie as formulações dos balanços de energia para os sistemas reativos, a entalpia de formação do combustível nem sempre é conhecida.
- Por exemplo, óleo combustível e carvão são normalmente compostos de uma série de substâncias químicas cujas quantidades relativas podem variar consideravelmente dependendo da fonte.



# Entalpia de Combustão

- A entalpia de combustão é definida como a diferença entre a entalpia dos produtos e a entrada dos reagentes quando ocorre uma combustão completa em uma certa temperatura e pressão.

$$\bar{h}_{\text{RP}} = \sum_{\text{P}} n_e \bar{h}_e - \sum_{\text{R}} n_i \bar{h}_i$$

- No entanto, em muitos casos de interesse prático a entalpia de combustão pode ser determinada experimentalmente.





# Entalpia de Combustão

◦ Por meio de um balanço de energia, obtêm-se:

$$\frac{\dot{Q}_{cv}}{\dot{n}_F} = \sum_P n_e \bar{h}_e - \sum_R n_i \bar{h}_i$$

$$\bar{h}_{RP} = \sum_P n_e \bar{h}_e - \sum_R n_i \bar{h}_i$$

$$\bar{h}_{RP} = \dot{Q}_{cv} / \dot{n}_F$$



# Poder Calorífico

- O poder calorífico de um combustível é um número positivo e igual ao módulo da entalpia de combustão.
- Dois poderes caloríficos são reconhecidos por este nome:
  - O Poder Calorífico Superior (PCS): é obtido quando toda a água formada na combustão é um líquido.
  - O poder Calorífico Inferior (PCI): é obtido quando toda a água formada na combustão é vapor.
- A diferença entre o poder calorífico superior e o poder calorífico inferior equivale à energia de vaporização da água.





# Temperatura Adiabática de Chama

- A temperatura que seria atingida pelos produtos em um limite de operação adiabática do reator é denominada temperatura adiabática de chama.

$$\sum_P n_e \bar{h}_e = \sum_R n_i \bar{h}_i \quad \sum_P n_e (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h})_e = \sum_R n_i (\bar{h}_f^\circ + \Delta \bar{h})_i$$

- Para um certo combustível e uma certa temperatura e pressão de reagentes, a temperatura adiabática de chama máxima está associada à combustão completa com a quantidade teórica de ar.

