Modelagem de motores de ignição por faísca

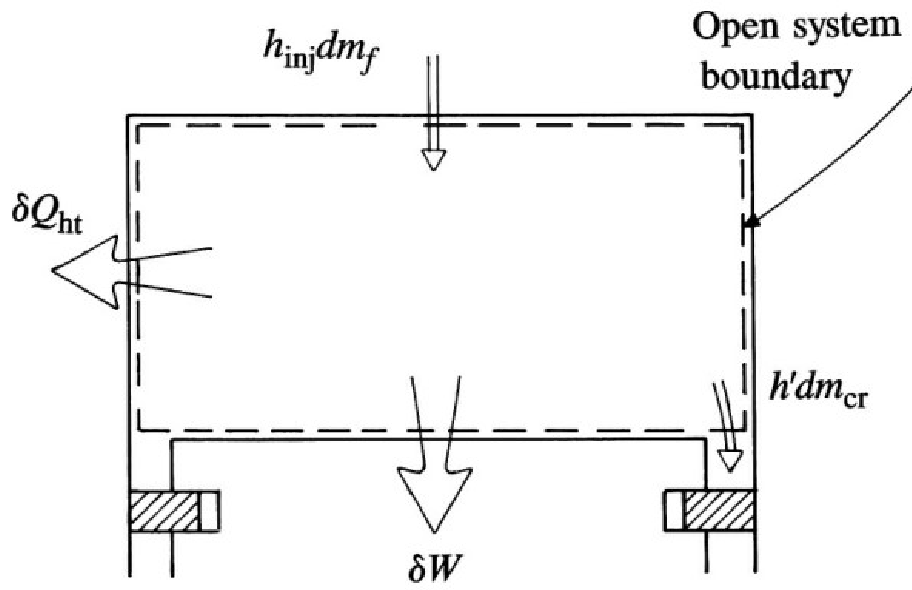
Objetivos

• Modelar um ciclo de um MIF com as seguintes características:

1. Mistura de gases ideais em função da razão de equivalência e fração de gas residual
2. Modelo de Intake e Exhaust – quase estático
3. Função de Wiebe para a taxa de liberação de calor (ou queima do combustível)

Analise de pressão e combustão – GÁS PERFEITO

Combustão



$$\delta Q_{ch} = \left(\frac{c_v}{R}\right)Vdp + \left(\frac{c_v}{R}\right)pdV + (h' - u + c_v T)dm_{cr} + \delta Q_{ht}$$

$$\frac{dQ_{ch}}{d\theta} = \frac{\gamma}{\gamma - 1}p\frac{dV}{d\theta} + \frac{1}{\gamma - 1}V\frac{dp}{d\theta} + V_{cr}\left[\frac{T'}{T_w} + \frac{T}{T_w(\gamma - 1)} + \frac{1}{bT_w}\ln\left(\frac{\gamma - 1}{\gamma' - 1}\right)\right]\frac{dp}{d\theta} + \frac{dQ_{ht}}{d\theta}$$

Equações para cálculo da mistura – EES

- $n_b = n_{CO} + n_{H_2} + n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{O_2} + n_{N_2}$
- $n_u \rightarrow total\ number\ of\ moles\ of\ unburned\ mixture$
- $n_u = (1 - x_b)\left[\frac{1}{\frac{\left(x+\frac{y}{4}\right)}{\phi}} + (1 + 3.773)\right] + x_b n_b$

Equações para cálculo da mistura – EES

- $\varepsilon\phi C + 2(1-\varepsilon)\phi H_2 + O_2 + \psi N_2 \rightarrow n_{CO}CO + n_{H_2}H_2 + n_{CO_2}CO_2 + n_{H_2O}H_2O + n_{O_2}O_2 + n_{N_2}N_2$

- $\psi = {}^{N}/_{O} = 3.773$

- $\varepsilon = \frac{4}{4+y}$

- $n_i \rightarrow moles\ of\ "i"\ per\ mol\ of\ O_2\ as\ reactant$

- $x_b = \frac{moles\ of\ burned\ gas}{moles\ of\ fresh\ mixture}$

Equações para cálculo da mistura – EES

- **EES:** $AtoF = \frac{\left(x+\frac{y}{4}\right)}{\phi}$
- **EES**
- $\rightarrow aCO_2 + bH_2O + cCO + dH_2 + eN_2 + fO_2$
- $n\_CO_2 = {}^{a}/_{AtoF} \rightarrow number\ of\ moles\ of\ CO_2\ per\ mol\ of\ O_2$
- $x\_b\_CO_2 = \frac{n\_CO_2}{n\_b} \rightarrow mole\ fraction\ of\ specie\ "i"\ per\ mol\ of\ O_2\ as\ reactant$

$$u = u(T, \emptyset)$$

$$m\frac{\partial u}{\partial T}\frac{dT}{dt} + m\frac{\partial u}{\partial \emptyset}\frac{d\emptyset}{dt} = -\frac{mRT}{V}\frac{dV}{dt} + Q^{\cdot} + \sum_j \dot{m}_j h_j$$

$$m\,(x_b cv_b + (1 - x_b)cv_u)\frac{dT}{dt} + m\frac{\partial u}{\partial \emptyset}\frac{d\emptyset}{dt} = -\frac{m(x_b R_b + (1-x_b)R_u)T}{V}\frac{dV}{dt} + Q^{\cdot} + \sum_j \dot{m}_j (x_b cp_b + (1 - x_b)cp_u)T_j$$

- Para sistema onde não haja variação da razão de equivalência:

$$m\,(x_b cv_b + (1 - x_b) cv_u)\frac{dT}{dt} = -\frac{m(x_b R_b + (1 - x_b) R_u)T}{V} + \dot{Q} + \sum_j \dot{m}_j (x_b cp_b + (1 - x_b) cp_u) T_j$$

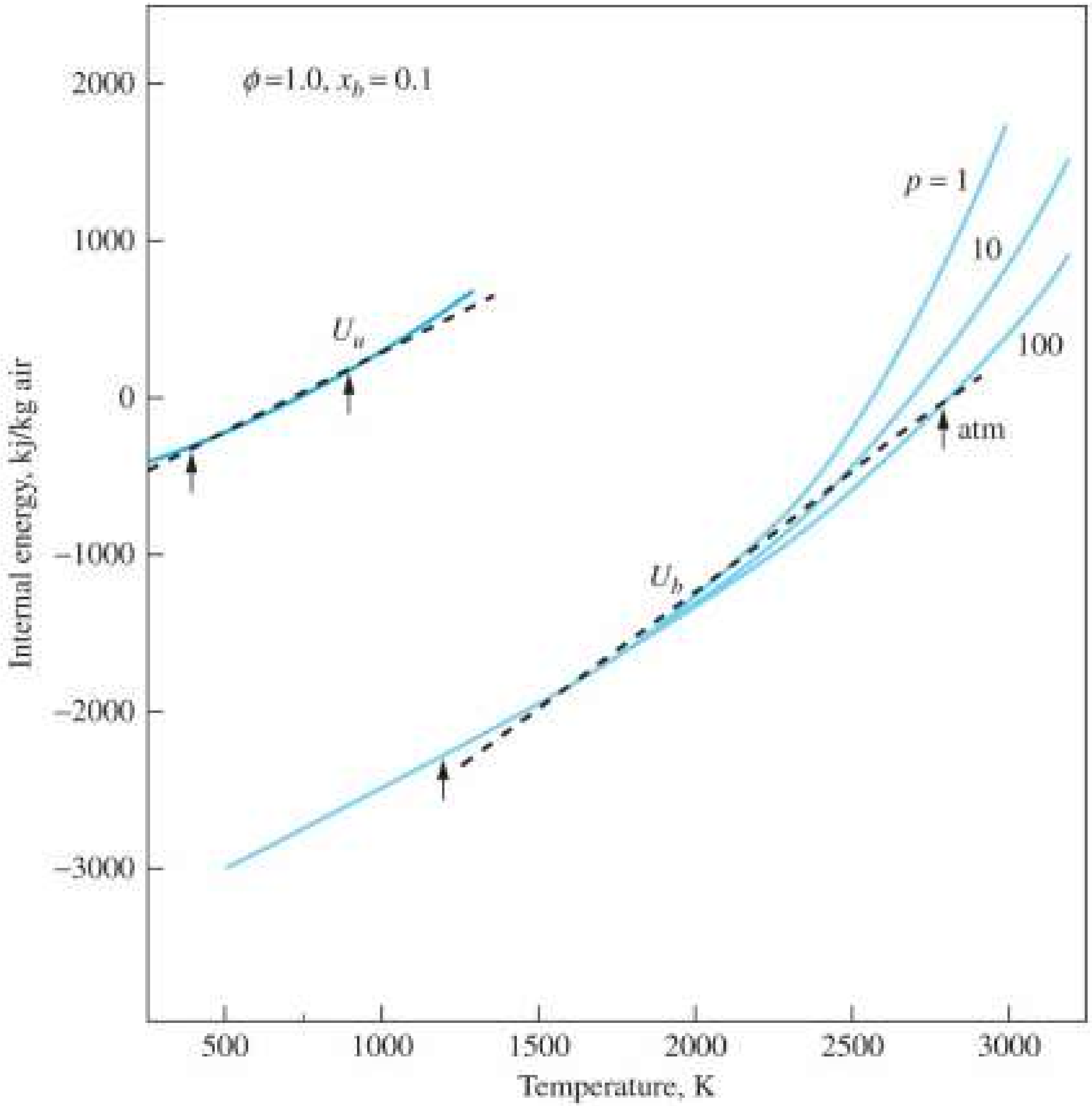


Figure 4.2 Internal energy versus temperature plot for stoichiometric unburned and burned gas mixtures: isooctane fuel; unburned residual fraction 0.1.

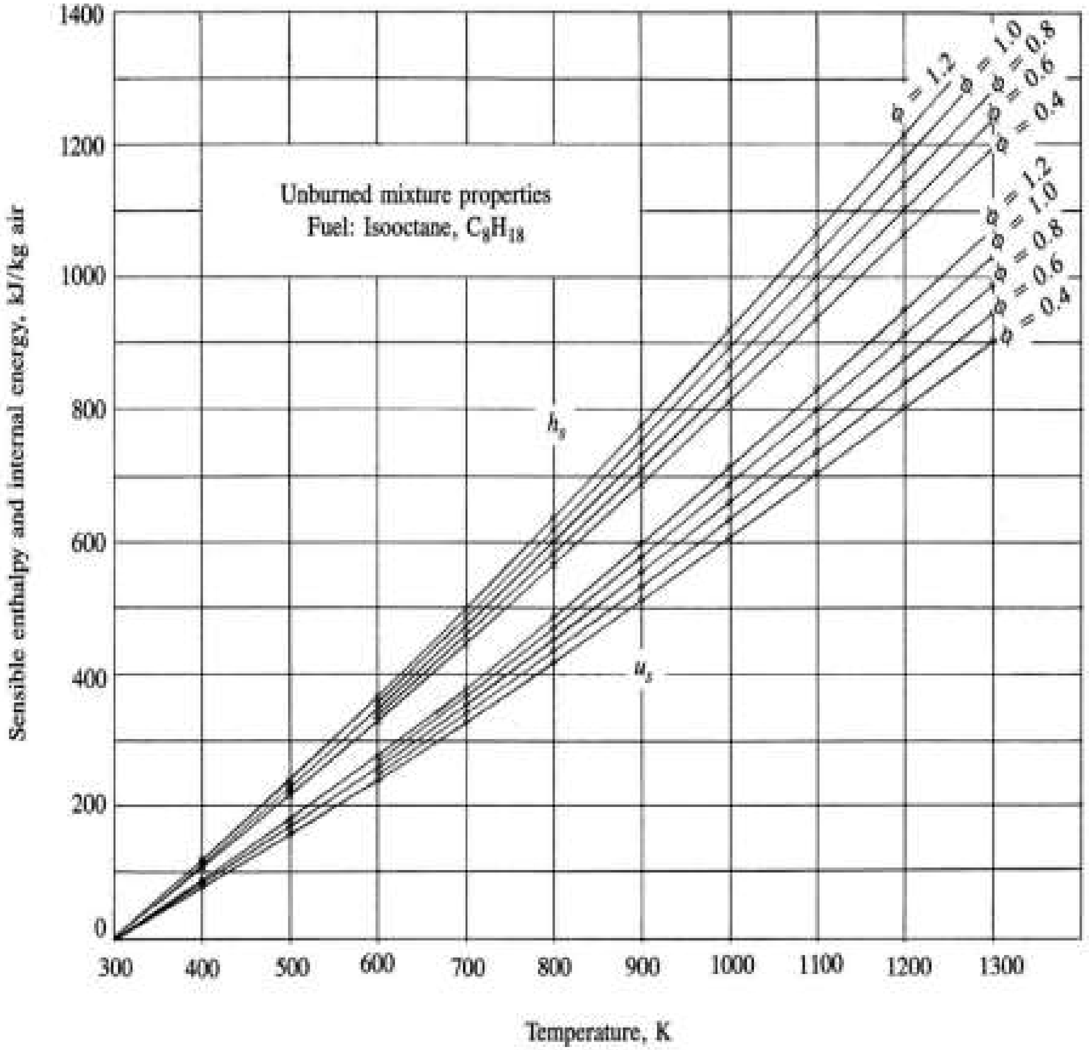


Figure 4.3 Sensible enthalpy and internal energy of unburned isooctane-air mixtures as function of temperature. Units: kJ/kg air in mixture.

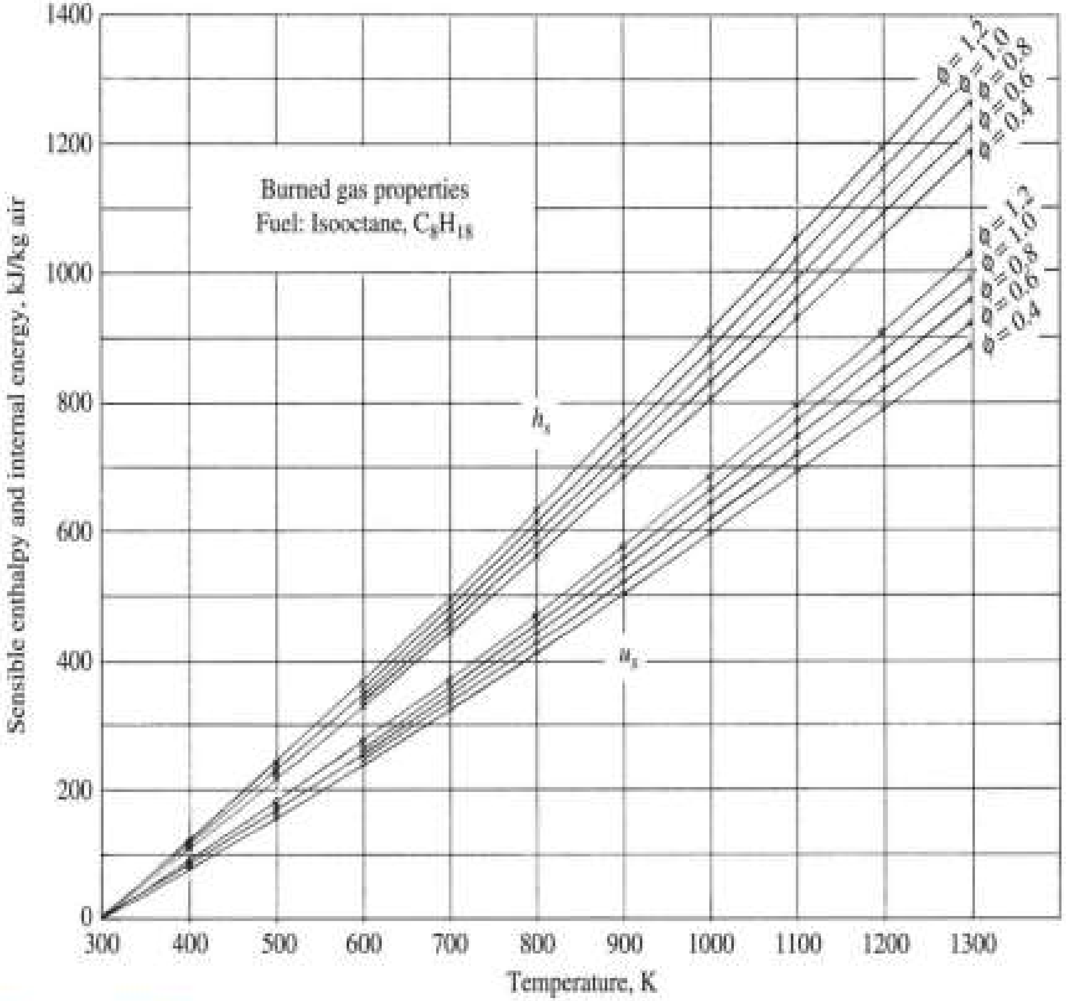


Figure 4.10 Sensible enthalpy and internal energy of low-temperature burned gases as function of temperature, isooctane fuel. Units: kJ/kg air in original mixture.

Propriedades da mistura

$$\phi = \frac{(F/A)}{(F/A)_{ST}}$$

$$\lambda = \frac{(A/F)}{(A/F)_{ST}} \rightarrow \lambda^{-1} = \frac{(A/F)_{ST}}{(A/F)} \times \frac{F_{ST}}{F_{ST}} = \frac{A_{ST}}{A/F} \times \frac{1}{F_{ST}}$$

$$\lambda^{-1} = \frac{(A_{ST}/A_{ST})}{\frac{A}{F} \times \frac{F_{ST}}{A_{ST}}} = \frac{1}{\frac{A}{F} \times \left(\frac{F}{A}\right)_{ST}} = \frac{(F/A)}{(F/A)_{ST}} \equiv \phi \rightarrow \phi = \lambda^{-1}$$

$$\lambda = \phi^{-1} = \frac{n_{air}M_{air}/n_f M_f}{(n_{air}M_{air}/n_f M_f)_{ST}} = \frac{n_{air}/n_f}{(n_{air}/n_f)_{ST}}$$

p/ $n_f = 1\, mol \rightarrow \lambda = \phi^{-1} = \frac{n_{air}}{(n_{air})_{ST}}$

Fração mássica residual

(do último ciclo)

$$x_r \equiv \frac{m_r}{m_c}$$

Aprisionada no cilindro

$$x_r = \frac{m_c - m_i}{m_c} = 1 - m_i/m_c$$

$m_i \rightarrow$ massa induzida (admitida) no cilindro por ciclo

Fração mássica queimada (x_b):

- Se só admite a mistura de ar fresco/ fuel → $x_b = x_r$
- Se há *Exhaust Gas Recirculation* – Nox diminui

$$EGR(\%) = \frac{m_{EGR}}{m_i} \times 100$$

x_b na mistura fresca

$$x_b = \frac{m_{EGR}+m_r}{m_c} = \frac{\frac{EGR}{100}\times m_i+m_r}{m_c} = \frac{EGR}{100}\left(\frac{m_i}{m_c}\right) + x_r = \frac{EGR}{100}(1 - x_r) + x_r$$

Reagentes:

$$C_aH_b + \left(a + \frac{b}{4}\right)(O_2 + \psi N_2)$$

$$\psi = 3{,}772\ (molar\ ratio)$$

$$C_aH_b + \left(\frac{4a + b}{4}\right)(O_2 + \psi N_2)$$

$$y = \frac{b}{a}\ para\ normalizar\ o$$

$$C_aH_b\ para\ 1\ mol\ de\ C\ no\ fuel$$

$$CH_y + \frac{a}{a}\left(\frac{4 + {}^{b}/_{a}}{4}\right)(O_2 + \psi N_2)$$

$$CH_y + \frac{a}{a}\left(\frac{4 + y}{4}\right)(O_2 + \psi N_2)$$

$$\varepsilon = \frac{4}{4 + y}$$

Reagentes:

$$CH_y + \frac{1}{\varepsilon}(O_2 + \psi N_2)$$

$n_{air/st}$ *para* 1 *mol de fuel* CH_y

$$n_{air/st} = n_{air}\phi$$

$$n_{air} = \frac{n_{air/st}}{\phi} = \frac{1}{\varepsilon} * \frac{1}{\phi}$$

mas para $n_f = 1$ *mol*,

$$\lambda = \phi^{-1} = \frac{n_{air}}{n_{air/st}}$$

então

$$\frac{1}{\varepsilon}(O_2 + \psi N_2)$$

Para qualquer ψ:

$$\frac{1}{\varepsilon\phi}(O_2 + \psi N_2)$$

$$CH_y + \frac{1}{\varepsilon\phi}(O_2 + \phi N_2)$$

$$\varepsilon\phi CH_y \rightarrow \varepsilon\phi C + \phi\varepsilon H_y$$

Em elementos de C e H

$$\varepsilon\phi CH_y = \varepsilon\phi C + \frac{4}{4+y}\phi y H$$

$$\varepsilon\phi CH_y = \varepsilon\phi C + \frac{2y}{4+y}\phi H_2$$

$$\varepsilon\phi CH_y = \varepsilon\phi C + 2\left(\frac{4+y-4}{4+y}\right)\phi H_2$$

$$\varepsilon\phi CH_y = \varepsilon\phi C + 2\left(1 - \frac{4}{4+y}\right)\phi H_2$$

$$\varepsilon\phi CH_y = \varepsilon\phi C + 2(1-\varepsilon)\phi H_2$$

$$mas\ CH_y + \frac{1}{\varepsilon\phi}(O_2 + \psi N_2) \rightarrow E\phi CH_y + (O_2 + \psi N_2)$$

Então os reagentes:

$$\varepsilon\phi C + 2(1-\varepsilon)\phi H_2 + O_2 + \psi N_2$$

Para a equação de combustão geral:

$$\varepsilon\phi C + 2(1-\varepsilon)\phi H_2 + O_2 + \psi N_2$$
$$\rightarrow n_{CO_2}CO_2 + n_{H_2O}H_2O + n_{CO}CO + n_{H_2}H_2 + n_{O_2}O_2$$
$$+ n_{N_2}N_2$$

$n_i \rightarrow \textit{número de mols da espécie}$ i por mols de O_2 *como reagente*

$$n_b = \sum n_i$$

Generalizando para um combustível de formula molecular "media" $\left(CH_y\right)_\alpha$, tem-se para 11 a 4 mol de C:

$$M_f = \alpha\frac{(12a+b)}{a} = \alpha(12+y)$$

Então a Eq. de combustão pode ser escrita como:

$$\left(CH_y\right)_\alpha + \frac{\alpha}{\phi\varepsilon}(O_2+\psi N_2)$$

E por mol de O_2:

$$\frac{\phi\varepsilon}{\alpha}\left(CH_y\right)_\alpha + \ (O_2+\psi N_2)$$

Mas observe que:

$$\frac{\varepsilon}{\alpha} = \frac{4}{\alpha(4+y)} = \frac{4}{\alpha(12+y)} \times \frac{(12+y)}{(4+y)} = \frac{4}{\alpha(12+y)}\left(\frac{4+y+2\times 4}{4+y}\right)$$

$$\frac{\varepsilon}{\alpha} = \frac{4}{\alpha(12+y)}\left(1+2\left(\frac{4}{4+y}\right)\right) = \frac{4}{\alpha(12+y)}(1+2\varepsilon)$$

Então:

$$\frac{4}{\alpha(12+y)}(1+2\varepsilon)\,\phi\left(CH_y\right)_{\alpha} + \left(O_2+\psi N_2\right)$$

Ou ainda:

$$\frac{4}{M_f}(1+2\varepsilon)\,\phi\left(CH_y\right)_{\alpha} + \left(O_2+\psi N_2\right)$$

Número de moles da mistura **não queimada** (n_u):

$$n_u = (1 - x_b)\left[\frac{4(1+2\varepsilon)\phi}{M_f} + 1 + \psi\right] + x_b n_b$$

Número de moles da mistura **queimada** (n_b):

$$n_b = n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{CO} + n_{H_2} + n_{O_2} + n_{N_2}$$

Vai depender de mistura pobre ou rica

Mistura pobre $(\boldsymbol{\phi} \leq \mathbf{1})$:

$$n_{CO_2} = \varepsilon\phi$$

$$n_{H_2O} = 2(1-\varepsilon)\phi$$

$$n_{CO} = 0$$

$$n_{H_2} = 0$$

$$n_{O_2} = 1-\phi$$

$$n_{N_2} = \psi$$

$$n_b = (1-\varepsilon)\phi + 1 + \psi$$

Mistura rica $(\boldsymbol{\phi} \geq \mathbf{1})$:

$$n_{O_2} = 0$$

$$n_{N_2} = \psi$$

*Os outros components dependem da hipótese para a mistura, como EQUILÍBRIO QUÍMICO

Massa da mistura (queimada ou não queimada), (m_{RP}), por mol de O_2 :

$$m_{RP} = 32 + \frac{4(1+2\varepsilon)}{M_f} \times M_f + 28{,}16\psi$$

$$m_{RP} = 32 + 4(1+2\varepsilon) + 28{,}16\psi$$

Massa molecular da mistura **queimada** (M_b):

$$M_b = \frac{m_{RP}}{n_b}$$

Massa molecular da mistura **não queimada** (M_u):

$$M_u = \frac{m_{RP}}{n_u}$$

Propriedades da mistura

Para mistura nao queimada, T1=500K e T2=1000K

cv_u=((uu2-uu1)/(T2-T1)/M_air)

cp_u=((hu2-hu1)/(T2-T1)/M_air)

gama_u=cp_u/cv_u

Para mistura queimada, T1=1200K e T2=2700K

cv_b=((ub2-ub1)/(T2-T1)/M_air)

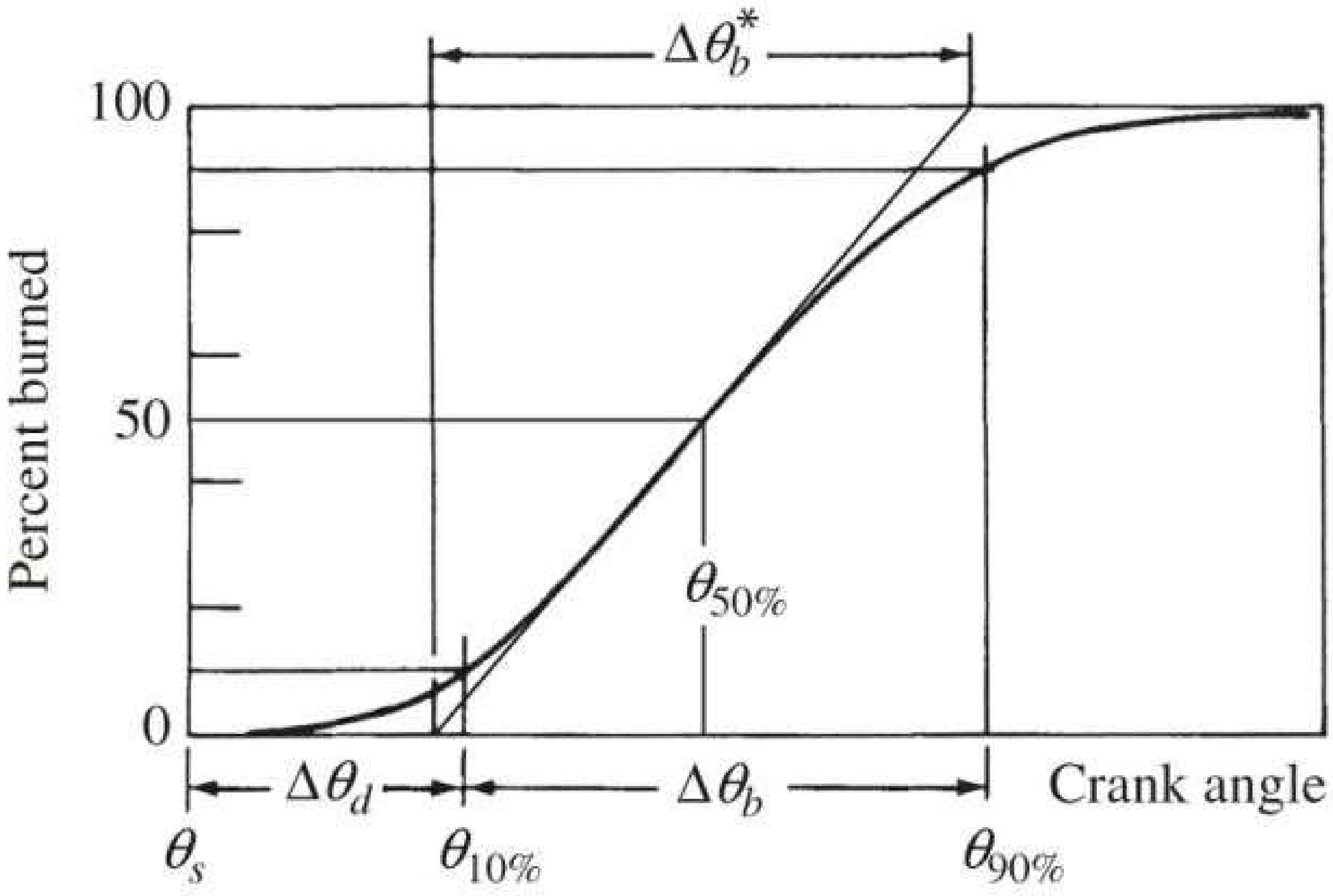
cp_b=((hb2-hb1)/ (T2-T1) /M_air)

gama_b=cp_b/cv_b

- Modelo Quase-estático de enchimento e esvaziamento do cilindro. Fluxo mássico (kg/s) pela abertura "j":

$$\dot{m}_j = C_D A_2 \left[\frac{2\rho(P_1 - P_2)}{(1 - (A_2/A_1)^2)} \right]^{1/2}$$

Analise de pressão e combustão



$$\frac{\Delta\theta_d}{\Delta\theta_{d,\mathrm{ref}}} = \left(\frac{N}{N_{\mathrm{ref}}}\right)^{1/3} \left(\frac{S_{L,\mathrm{ref}}}{S_L}\right)^{2/3}$$

Função de Wiebe

$$x_b = 1 - \exp\left[-a\left(\frac{\theta - \theta_0}{\Delta\theta}\right)^{m+1}\right]$$

- Modificar para a entrega do projeto:

1) Incluir área de abertura em função do CAD
2) Incluir Função de Wiebe completa
3) Incluir taxa de transferência de calor por convecção em cada *stroke*