PME 5411 - Fundamentos de Escoamentos Turbulentos Reativos

Aula 1 - Introdução à Combustão Turbulenta

Prof. Dr. Guenther Carlos Krieger Filho

22 de setembro de 2022

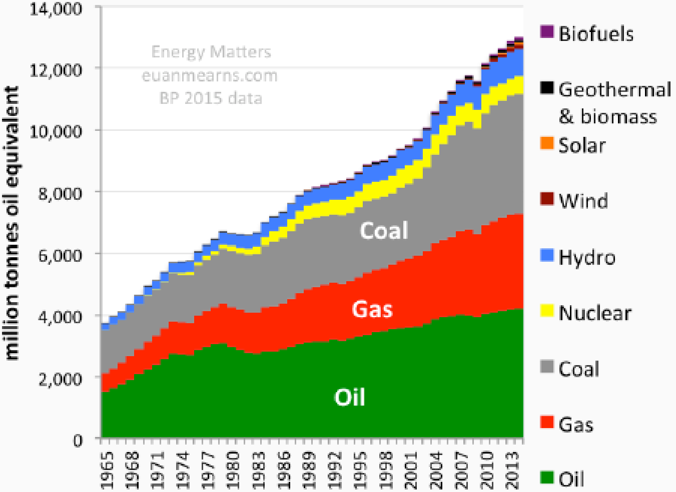
Escola Politécnica da USP - LETE/CRC - Combustion Research Centre

Introdução à Combustão Turbulenta

Por que estudar combustão turbulenta?

- É a mais velha "tecnologia" da humanidade;
- 90% do suprimento de energia mundial ainda é combustão;
- Ocorre em combustíveis fósseis, renováveis ou sintéticos;
- **Problema: Aquecimento Global e Emissões;**
- Novas tecnologias: *oxyfuel*, *flameless*, combustão catalítica e em meios porosos ampliarão o campo de aplicação.

Consumo mundial de energia:



Introdução à Combustão Turbulenta

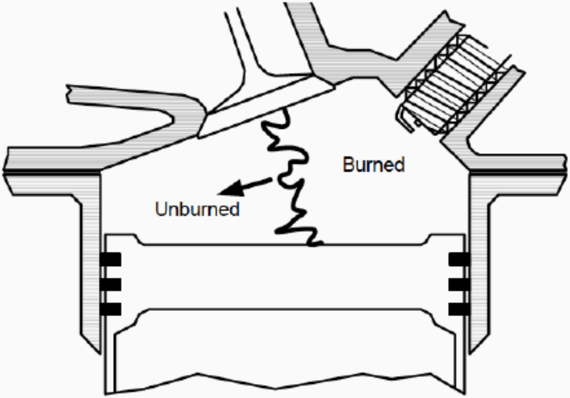
Chamas básicas:

- Pré-misturada - laminar/turbulenta;
- Não pré-misturada (difusão) - laminar/turbulenta;
- Parcialmente pré-misturada - laminar/turbulenta.

Chamas pré-misturadas - laminares/turbulentas:

- Combustível já na forma gasosa e completamente misturado ao oxidante antes do início do processo de combustão;
- Escoamento Laminar ou Turbulento;
- Exemplos: Motores com *Port Fuel Injection* e Turbinas a gás com queimadores "*Lean-Premixed*".

Motor de combustão interna - gasolina



Equação da reação global de combustão:

$$\text{combustível} + \text{oxidante} \rightarrow \text{produtos} \tag{1}$$

Para a combustão completa de um hidrocarboneto com ar:

$$\mathrm{C_xH_y} + \mathrm{a}\left(\mathrm{O_2} + 3,76\ \mathrm{N_2}\right) \rightarrow \mathrm{x\ CO_2} + \left(\mathrm{y}/2\right)\mathrm{H_2O} + 3,76\mathrm{a}\ \mathrm{N_2} \tag{2}$$

Para mistura estequiométrica deve-se colocar $\mathrm{a} = \mathrm{x} + \mathrm{y}/4$ moles de ar.
Razão ar/combustível na base másica:

$$\mathrm{AF} = \frac{\mathrm{m_{ar}}}{\mathrm{m_F}} \tag{3}$$

Na estequiometria:

$$(\mathrm{AF})_{\mathrm{st}} = \left(\frac{\mathrm{m_{ar}}}{\mathrm{m_F}}\right)_{\mathrm{st}} = \frac{4,76\mathrm{a}}{1}\frac{\mathrm{M_{ar}}}{\mathrm{M_F}} \tag{4}$$

A razão de equivalência (Φ):

$$\Phi = \frac{(\mathrm{AF})_{\mathrm{st}}}{(\mathrm{AF})_{\mathrm{real}}} \tag{5}$$

$$\begin{cases} \Phi < 1 \rightarrow \text{mistura pobre (mais ar)} \\ \Phi = 1 \rightarrow \text{mistura estequiométrica} \\ \Phi > 1 \rightarrow \text{mistura rica (menos ar)} \end{cases}$$

$$\lambda = \frac{1}{\Phi} \tag{6}$$

ar estequiométrico:

$$(\%)\,\text{ar estequiométrico} = \frac{100\%}{\Phi} \tag{7}$$

Excesso de ar:

$$(\%)\,\text{excesso de ar} = \frac{1-\Phi}{\Phi}100\% \tag{8}$$

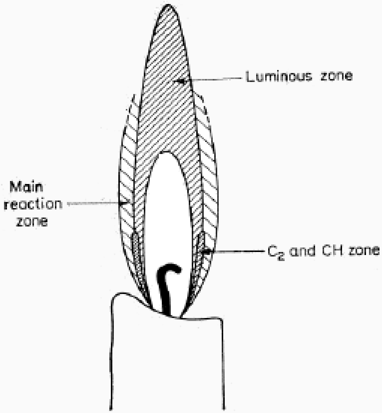
Combustão Turbulenta - Chamas Não Pré-misturadas

Chamas não pré-misturadas (difusão): combustível gasoso e ar são misturados/entram em contato durante o processo de combustão.

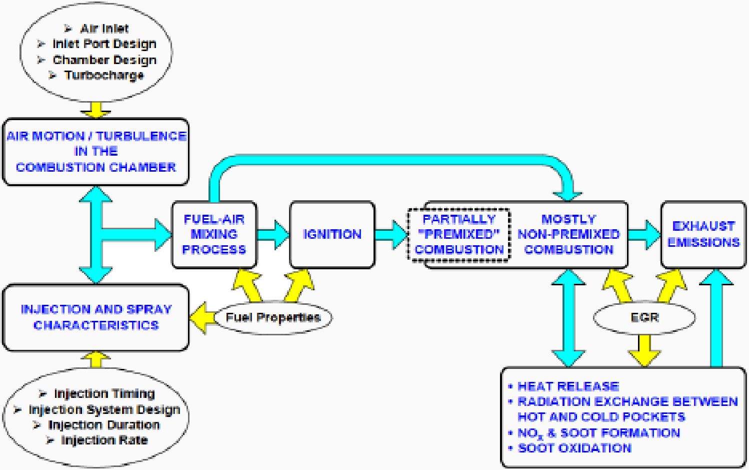
Exemplos:

- Uma vela;
- Motores a diesel;
- Turbinas aeronáuticas convencionais a gás;
- Motores de foguete bipropelente líquido;
- Fornos de cimento;
- Flares em refinarias, queimadores de óleo;
- Incêndios;
- Câmaras de carvão e biomassa.

Chama de vela:

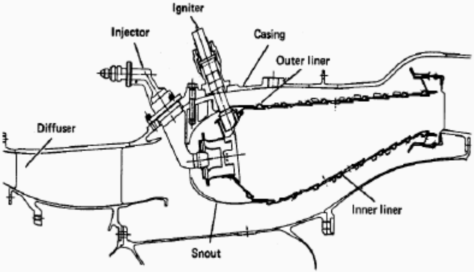


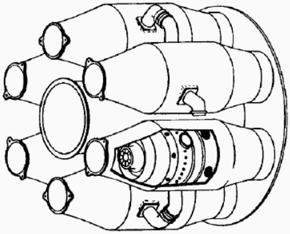
Motor diesel:



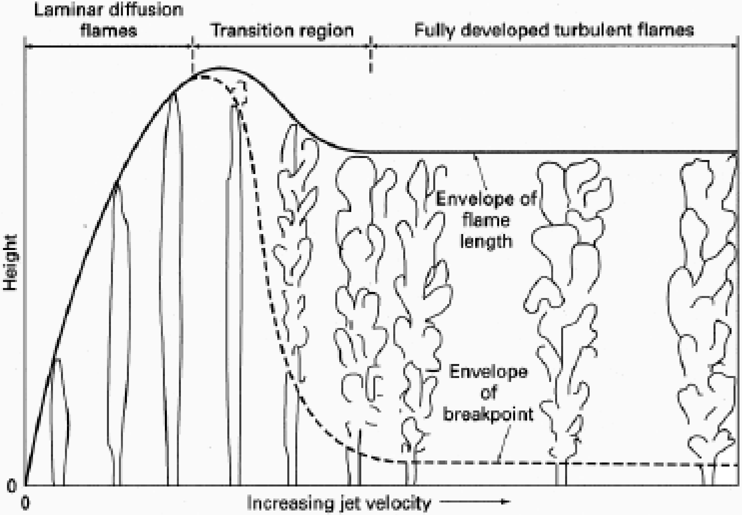
Combustão Turbulenta - Chamas Não Pré-misturadas

Turbina a gás:





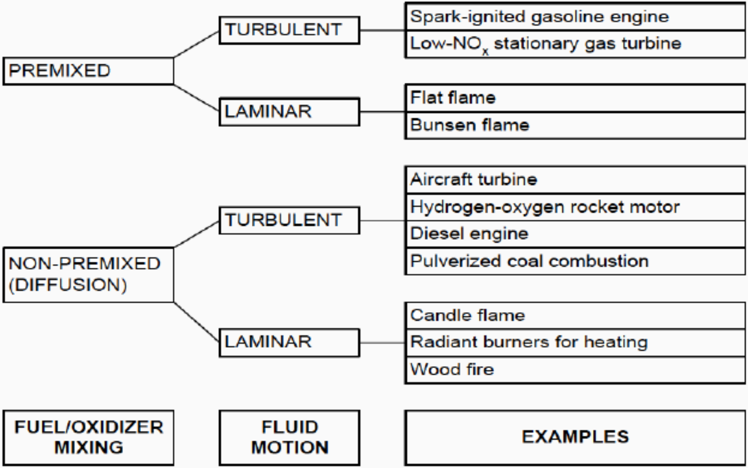
Regimes de chamas de difusão:



Chamas de difusão de C_2H_4:

Combustão Turbulenta - Chamas Não Pré-misturadas

Exemplos de sistemas de combustão:



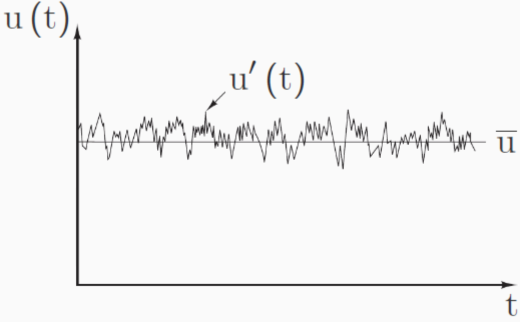
Combustão Turbulenta

Algumas das questões que o projetista de combustão tem que lidar são:

- Intensidade e eficiência da combustão;
- Estabilidade da chama;
- Tamanho e forma da chama;
- Transferência de calor;
- Formação de poluentes.

Escoamento Turbulento

Os escoamentos turbulentos são caracterizados por serem irregulares, aleatórios e caóticos. O campo de velocidades e todas as outras propriedades do escoamento variam de forma **aleatória** e **caótica**.

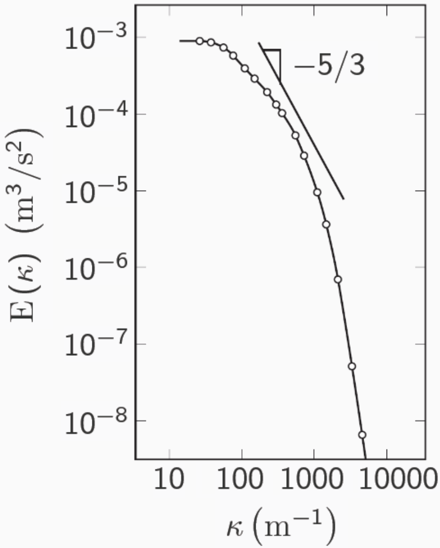


A velocidade pode ser dividida em média e flutuação como:

$$u(t) = \overline{u} + u'(t) \tag{9}$$

Descrições Elementares de Turbulência

- Visualizações de escoamentos turbulentos revelam **estruturas turbulentas**, os chamados *eddies*, com uma ampla gama de escalas de comprimento;
- A energia cinética é transferida de grandes *eddies* para *eddies* cada vez menores no que é chamado de **cascata de energia**;
- A energia espectral $\mathrm{E}(\kappa)$ é mostrada em função do número de onda $\kappa = 2\pi/\lambda$, onde λ é o comprimento de onda dos *eddies*.



Número de *Reynolds* turbulento:

$$\mathrm{Re}_{\Lambda} = \frac{\mathrm{u}'\Lambda}{\nu} \tag{10}$$

onde Λ é uma escala de comprimento de turbulência.

Descritores de turbulência: escalas de comprimento e tempo:

- Escala de comprimento integral - relacionada ao tamanho característico do escoamento ($\mathrm{l_t}$);
- Escala de comprimento de *Kolmogorov* - a menor escala (η).

O número de *Reynolds* é construído para cada escala de comprimento:

$$\mathrm{Re_t} = \frac{\mathrm{u}'\mathrm{l_t}}{\nu} \text{ (100 a 2000 em dispositivos de combustão)} \tag{11}$$

$$\mathrm{Re}_{\eta} = \frac{\mathrm{u}'\eta}{\nu} \approx 1 \tag{12}$$

Para turbulência isotrópica homogênea, a energia das grandes escalas flui para as escalas menores através da cascata de *Kolmogorov*. O fluxo de energia de uma escala para outra é constante e dado pela taxa de dissipação como:

$$\varepsilon = \frac{\mathrm{u'}^2(\mathrm{r})}{\mathrm{r}/\mathrm{u'}(\mathrm{r})} = \frac{\mathrm{u'}^3(\mathrm{r})}{\mathrm{r}} \tag{13}$$

Na escala de *Kolmogorov* $(\mathrm{r} = \eta)$ tem-se:

$$\mathrm{Re}_\eta = \frac{\mathrm{u'}(\mathrm{r} = \eta)\,\eta}{\nu} = 1 \longrightarrow$$

$$[\varepsilon\ \eta]^{1/3}\,\frac{\eta}{\nu} = 1 \longrightarrow$$

$$\frac{\varepsilon^{1/3}\ \eta^{4/3}}{\nu} = 1$$

Então, a escala de *Kolmogorov* fica:

$$\eta = \left(\frac{\nu^3}{\varepsilon}\right)^{1/4} \tag{14}$$

A razão entre as escalas de comprimento integral e de *Kolmogorov* fica:

$$\frac{\mathrm{l_t}}{\eta} = \frac{\mathrm{u'}^3\left(\mathrm{r}=\mathrm{l_t}\right)/\varepsilon}{\left(\nu^3/\varepsilon\right)^{1/4}} \longrightarrow$$

$$\frac{\mathrm{l_t}}{\eta} = \frac{\mathrm{u'}^3\left(\mathrm{r}=\mathrm{l_t}\right)}{\varepsilon}\frac{\varepsilon^{1/4}}{\nu^{3/4}} \longrightarrow$$

$$\frac{\mathrm{l_t}}{\eta} = \frac{\mathrm{u'}^3\left(\mathrm{r}=\mathrm{l_t}\right)}{\varepsilon^{3/4}\nu^{3/4}}$$

Como, $\varepsilon = \dfrac{\mathrm{u'}^3\left(\mathrm{r}=\mathrm{l_t}\right)}{\mathrm{l_t}}$

$$\frac{\mathrm{l_t}}{\eta} = \frac{\mathrm{u'}^3\left(\mathrm{r}=\mathrm{l_t}\right)}{\left[\mathrm{u'}^3\left(\mathrm{r}=\mathrm{l_t}\right)/\mathrm{l_t}\right]^{3/4}\nu^{3/4}} \longrightarrow$$

$$\frac{\mathrm{l_t}}{\eta} = \frac{\mathrm{u'}^{3/4}\left(\mathrm{r}=\mathrm{l_t}\right)\mathrm{l_t}^{3/4}}{\nu^{3/4}} \longrightarrow$$

$$\frac{\mathrm{l_t}}{\eta} = \mathrm{Re_t}^{3/4} \tag{15}$$

As escalas de comprimento integral podem ser avaliadas a partir do coeficiente de correlação de tal forma que

$$\mathrm{R_x}(\mathrm{r}) = \frac{\overline{\mathrm{u'_x}(0)\ \mathrm{u'_x}(\mathrm{r})}}{\mathrm{u'_{x,rms}}(0)\ \mathrm{u'_{x,rms}}(\mathrm{r})} \tag{16}$$

Integrado a uma distância entre dois pontos

$$\mathrm{l_t} = \int_0^{\infty} \mathrm{R_x}(\mathrm{r})\ \mathrm{dr} \tag{17}$$

Para processo estatisticamente estacionário (o que isso significa?), as escalas de tempo integral podem ser avaliadas a partir da autocorrelação dada por:

$$\mathrm{R_x}(\tau) = \overline{\mathrm{u'_x}(0)\ \mathrm{u'_x}(\tau)} \tag{18}$$

O coeficiente de autocorrelação normalizado é dado por:

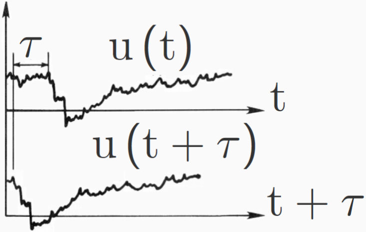
$$\rho(\tau) = \frac{\mathrm{R_x}(\tau)}{\overline{\mathrm{u}'^{\,2}_{\mathrm{x}}}} \tag{19}$$

A escala de tempo integral pode ser avaliada a partir da integração ao longo do intervalo de tempo

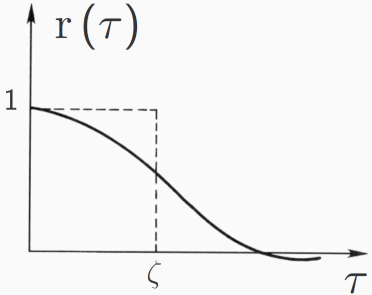
$$\tau_{\mathrm{t}} = \int_0^{\infty} \rho(\tau)\ \mathrm{d}\tau \tag{20}$$

A escala de tempo integral dá a medida aproximada do intervalo ao longo do qual $\mathrm{u}(\mathrm{t})$ está correlacionado consigo mesma.

Método de cálculo da autocorrelação $\mathrm{R}(\tau) = \langle \mathrm{u}(\mathrm{t})\, \mathrm{u}(\mathrm{t}+\tau) \rangle$



Função de autocorrelação $\mathrm{r}(\tau)$ e a escala de tempo integral τ.



Número de *Damköhler* (Da): razão entre a escala de tempo integral da fluidodinâmica (τ_{t}) e a escala de tempo química (τ_{c}). Interação entre escalas de tempo química e do escoamento nas grandes escalas.

$$\mathrm{Da} = \frac{\tau_{\mathrm{t}}}{\tau_{\mathrm{c}}} \tag{21}$$

Escala de tempo fluidodinâmica: $\tau_{\mathrm{t}} = \dfrac{\mathrm{l_t}}{\mathrm{u'}\left(\mathrm{l_t}\right)}$

Escala de tempo química: $\tau_{\mathrm{c}} = \dfrac{\delta_{\mathrm{L}}}{\mathrm{S_L}}$

Interação química-turbulência

Número de Karlovitz (Ka): a razão da escala de tempo química (τ_c) e a escala de tempo de *Kolmogorov* (τ_η). Interação entre escala de tempo química e a que corresponde aos menores *eddies* (*Kolmogorov*).

$$\mathrm{Ka} = \frac{\tau_\mathrm{c}}{\tau_\eta} \tag{22}$$

Escala de tempo de *Kolmogorov*: $\tau_\eta = \dfrac{\eta}{\mathrm{u}'(\eta)}$

Escala de tempo química: $\tau_\mathrm{c} = \dfrac{\delta_\mathrm{L}}{\mathrm{S_L}}$

Lista de exercícios 1

Próxima aula: Introdução ao RANS

Leituras recomendadas:

Básica: capítulo 11 Turns;

Complementar: capítulo 1 Poinsot; capítulos 1 e 2 Pope.

Referências Bibliográficas

- Turns, Stephen R. **An introduction to combustion: concepts and applications.** 3rd ed. New York: McGraw-Hill, 2012.
- Poinsot, T.; Veynante, D. **Theoretical and Numerical Combustion.** 2nd ed. Philadelphia: Edwards, 2005.
- Pope, Stephen B. **Turbulent flows.** 10th ed. New York: Cambridge University Press, 2013.
- Versteeg, H. K. and Malalasekera, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics.** 2nd ed. Edinburgh: Pearson Education Limited, 2007.