

# C.02.01 – Ciclo Otto Ar-Combustível de Tempo Finito de Combustão

FTAF – Finite Time Air-Fuel Otto Engine Model

Prof. C. Naaktgeboren, PhD



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

Compiled on 2020-09-14 23h34m05s UTC

# Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modelo do livro-texto (tópicos de leitura) adiciona **combustão** ao **Ciclo Otto ideal**;

## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modelo do livro-texto (tópicos de leitura) adiciona **combustão** ao **Ciclo Otto ideal**;
  - Permite variação de **combustíveis**;

## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modelo do livro-texto (tópicos de leitura) adiciona **combustão** ao **Ciclo Otto ideal**;
  - Permite variação de **combustíveis**;
  - Porém, desde que sejam **carbonados**: norm. em C; **excluindo**  $\text{H}_2$  e  $\text{H}_4\text{N}_2$  puros, p. ex.;
  - Ênfase nas **propriedades**  $\bar{c}_{p,v}(T)$ ,  $k(T)$ ,  $\bar{u}(T)$ , etc. das misturas;

## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modelo do livro-texto (tópicos de leitura) adiciona **combustão** ao **Ciclo Otto ideal**;
  - Permite variação de **combustíveis**;
  - Porém, desde que sejam **carbonados**: norm. em  $C$ ; **excluindo**  $H_2$  e  $H_4N_2$  puros, p. ex.;
  - Ênfase nas **propriedades**  $\bar{c}_{p,v}(T)$ ,  $k(T)$ ,  $\bar{u}(T)$ , etc. das misturas;
  - Incorpora **combustão** e **equilíbrio químico**;

## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modelo do livro-texto (tópicos de leitura) adiciona **combustão** ao **Ciclo Otto ideal**;
  - Permite variação de **combustíveis**;
  - Porém, desde que sejam **carbonados**: norm. em  $C$ ; **excluindo**  $H_2$  e  $H_4N_2$  puros, p. ex.;
  - Ênfase nas **propriedades**  $\bar{c}_{p,v}(T)$ ,  $k(T)$ ,  $\bar{u}(T)$ , etc. das misturas;
  - Incorpora **combustão** e **equilíbrio químico**;
  - **Não emprega** o calor liberado na **combustão**!







## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modelo do livro-texto (tópicos de leitura) adiciona **combustão** ao **Ciclo Otto ideal**;
  - Permite variação de **combustíveis**;
  - Porém, desde que sejam **carbonados**: norm. em  $C$ ; **excluindo**  $H_2$  e  $H_4N_2$  puros, p. ex.;
  - Ênfase nas **propriedades**  $\bar{c}_{p,v}(T)$ ,  $k(T)$ ,  $\bar{u}(T)$ , etc. das misturas;
  - Incorpora **combustão** e **equilíbrio químico**;
  - **Não emprega** o calor liberado na **combustão**!
- Modelo **ar-combustível de tempo finito, FTAF**:
  - Adiciona **combustão**, mantendo as demais características do **FTHA**;
  - Obtém tanto as **propriedades** quanto o **calor liberado** pelas **reações**!

# Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modelo do livro-texto (tópicos de leitura) adiciona **combustão** ao **Ciclo Otto ideal**;
  - Permite variação de **combustíveis**;
  - Porém, desde que sejam **carbonados**: norm. em  $C$ ; **excluindo**  $H_2$  e  $H_4N_2$  puros, p. ex.;
  - Ênfase nas **propriedades**  $\bar{c}_{p,v}(T)$ ,  $k(T)$ ,  $\bar{u}(T)$ , etc. das misturas;
  - Incorpora **combustão** e **equilíbrio químico**;
  - **Não emprega** o calor liberado na **combustão**!
- Modelo **ar-combustível de tempo finito, FTAF**:
  - Adiciona **combustão**, mantendo as demais características do **FTHA**;
  - Obtém tanto as **propriedades** quanto o **calor liberado** pelas **reações**!
  - **Permite** modelar combustão de **HC's**,  $H_2$  e  $H_4N_2$ ; tanto **puros** quanto suas **misturas**!

## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modelo do livro-texto (tópicos de leitura) adiciona **combustão** ao **Ciclo Otto ideal**;
  - Permite variação de **combustíveis**;
  - Porém, desde que sejam **carbonados**: norm. em  $C$ ; **excluindo**  $H_2$  e  $H_4N_2$  puros, p. ex.;
  - Ênfase nas **propriedades**  $\bar{c}_{p,v}(T)$ ,  $k(T)$ ,  $\bar{u}(T)$ , etc. das misturas;
  - Incorpora **combustão** e **equilíbrio químico**;
  - **Não emprega** o calor liberado na **combustão**!
- Modelo **ar-combustível de tempo finito, FTAF**:
  - Adiciona **combustão**, mantendo as demais características do **FTHA**;
  - Obtém tanto as **propriedades** quanto o **calor liberado** pelas **reações**!
  - **Permite** modelar combustão de **HC's**,  $H_2$  e  $H_4N_2$ ; tanto **puros** quanto suas **misturas**!
  - Desenvolvido em um **TCC** defendido em **2018** (citação nos tópicos de leitura);



## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modela combustão de forma **não instantânea**:

- Modela combustão de forma não instantânea:
  - Interações simultâneas de liberação de energia interna e trabalho;

# Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modela combustão de forma **não instantânea**:
  - Interações **simultâneas** de **liberação de energia interna** e **trabalho**;
  - Tempos de motor **discretizados** em sub-processos;

## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modela combustão de forma **não instantânea**:
  - Interações **simultâneas** de **liberação de energia interna** e **trabalho**;
  - Tempos de motor **discretizados** em **sub-processos**;
  - Elemento computacional: sub-processo **localmente politrópico** em base **extensiva**;



## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modela combustão de forma **não instantânea**:
  - Interações **simultâneas** de **liberação de energia interna** e **trabalho**;
  - Tempos de motor **discretizados** em **sub-processos**;
  - Elemento computacional: sub-processo **localmente politrópico** em base **extensiva**;
  - **Remoção** de calor permanece **isocórica** (instantânea);

# Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modela combustão de forma **não instantânea**:
  - Interações **simultâneas** de **liberação de energia interna** e **trabalho**;
  - Tempos de motor **discretizados** em sub-processos;
  - Elemento computacional: sub-processo **localmente politrópico** em base **extensiva**;
  - **Remoção** de calor permanece **isocórica** (instantânea);
  - Requer modelos de mistura e reações **não instantâneos**!

## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modela combustão de forma **não instantânea**:
  - Interações **simultâneas** de **liberação de energia interna** e **trabalho**;
  - Tempos de motor **discretizados** em **sub-processos**;
  - Elemento computacional: sub-processo **localmente politrópico** em base **extensiva**;
  - **Remoção** de calor permanece **isocórica** (instantânea);
  - Requer modelos de mistura e reações **não instantâneos**!
- Não mais um modelo **padrão a ar**:

## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modela combustão de forma **não instantânea**:
  - Interações **simultâneas** de liberação de energia interna e trabalho;
  - Tempos de motor **discretizados** em sub-processos;
  - Elemento computacional: sub-processo **localmente politrópico** em base **extensiva**;
  - **Remoção** de calor permanece **isocórica** (instantânea);
  - Requer modelos de mistura e reações **não instantâneos**!
- Não mais um modelo **padrão a ar**:
- Não mais um modelo de **substância pura**:

## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modela combustão de forma **não instantânea**:
  - Interações **simultâneas** de liberação de energia interna e trabalho;
  - Tempos de motor **discretizados** em sub-processos;
  - Elemento computacional: sub-processo **localmente politrópico** em base **extensiva**;
  - **Remoção** de calor permanece **isocórica** (instantânea);
  - Requer modelos de mistura e reações **não instantâneos**!
- Não mais um modelo **padrão a ar**:
- Não mais um modelo de **substância pura**:
  - Inclui **combustão e equilíbrio químico**;

# Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Modela combustão de forma **não instantânea**:
  - Interações **simultâneas** de **liberação de energia interna** e **trabalho**;
  - Tempos de motor **discretizados** em sub-processos;
  - Elemento computacional: sub-processo **localmente politrópico** em base **extensiva**;
  - **Remoção** de calor permanece **isocórica** (instantânea);
  - Requer modelos de mistura e reações **não instantâneos**!
- Não mais um modelo **padrão a ar**:
- Não mais um modelo de **substância pura**:
  - Inclui **combustão e equilíbrio químico**;
  - Requer modelagem termodinâmica de **misturas reativas**.

## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Inclui todos os parâmetros do **FTHA**:

## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Inclui todos os parâmetros do **FTHA**:
  - Todos os do **ciclo Otto ideal**, mais



## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Inclui todos os parâmetros do **FTHA**:
  - Todos os do **ciclo Otto ideal**, mais
  - Todos os parâmetros **construtivos** do **motor**, mais

- Inclui todos os parâmetros do **FTHA**:
  - Todos os do **ciclo Otto ideal**, mais
  - Todos os parâmetros **construtivos** do **motor**, mais
  - Todos os parâmetros **operacionais** do **motor**;

## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Inclui todos os parâmetros do **FTHA**:
  - Todos os do **ciclo Otto ideal**, mais
  - Todos os parâmetros **construtivos** do **motor**, mais
  - Todos os parâmetros **operacionais** do **motor**;
- Inclui parâmetros da **mistura ar-combustível**:

## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Inclui todos os parâmetros do **FTHA**:
  - Todos os do **ciclo Otto ideal**, mais
  - Todos os parâmetros **construtivos** do **motor**, mais
  - Todos os parâmetros **operacionais** do **motor**;
- Inclui parâmetros da **mistura ar-combustível**:
  - **Proporções** dos gases do ar;



## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Inclui todos os parâmetros do **FTHA**:
  - Todos os do **ciclo Otto ideal**, mais
  - Todos os parâmetros **construtivos** do **motor**, mais
  - Todos os parâmetros **operacionais** do **motor**;
- Inclui parâmetros da **mistura ar-combustível**:
  - **Proporções** dos gases do ar;
  - **Composições e proporções** do combustíveis;



## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Inclui todos os parâmetros do **FTHA**:
  - Todos os do **ciclo Otto ideal**, mais
  - Todos os parâmetros **construtivos** do **motor**, mais
  - Todos os parâmetros **operacionais** do **motor**;
- Inclui parâmetros da **mistura ar-combustível**:
  - **Proporções** dos gases do ar;
  - **Composições e proporções** do **combustíveis**;
  - **Proporções** da **mistura ar-combustível** em relação à **estequiometria**.
- **Balanco de Energia** melhorado:

## Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Inclui todos os parâmetros do **FTHA**:
  - Todos os do **ciclo Otto ideal**, mais
  - Todos os parâmetros **construtivos** do **motor**, mais
  - Todos os parâmetros **operacionais** do **motor**;
- Inclui parâmetros da **mistura ar-combustível**:
  - **Proporções** dos gases do ar;
  - **Composições e proporções** do combustíveis;
  - **Proporções** da mistura **ar-combustível** em relação à estequiometria.
- **Balanco de Energia** melhorado:
  - **Liberação de energia interna** pelas reações **explícita**;



# Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- Inclui todos os parâmetros do **FTHA**:
  - Todos os do **ciclo Otto ideal**, mais
  - Todos os parâmetros **construtivos** do **motor**, mais
  - Todos os parâmetros **operacionais** do **motor**;
- Inclui parâmetros da **mistura ar-combustível**:
  - **Proporções** dos gases do ar;
  - **Composições e proporções** do combustíveis;
  - **Proporções** da mistura **ar-combustível** em relação à estequiometria.
- **Balanco de Energia** melhorado:
  - **Liberação de energia interna** pelas reações **explícita**;
  - Com separação conceitual das **transferências de calor**.

## Modelo de Evolução de Reação:

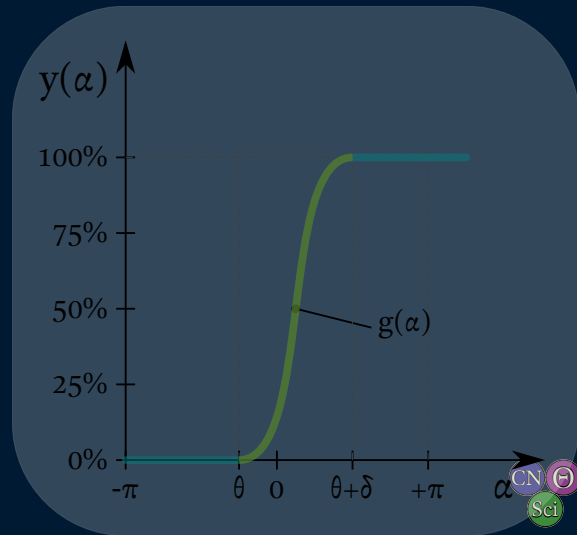
- Reações evoluem com  $y(\alpha)$ :



## Modelo de Evolução de Reação:

- Reações evoluem com  $y(\alpha)$ :

$$y(\alpha) = \begin{cases} 0 & \text{para } \alpha < \theta, \\ g(\alpha) & \text{para } \theta \leq \alpha \leq \theta + \delta, \\ 1 & \text{para } \alpha > \theta + \delta. \end{cases}$$

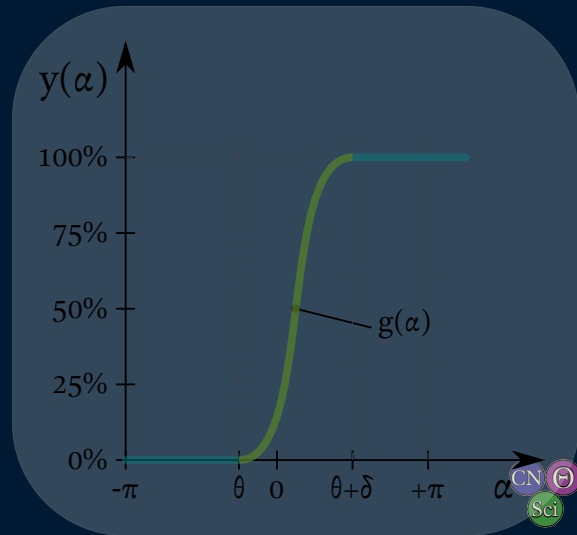


## Modelo de Evolução de Reação:

- Reações evoluem com  $y(\alpha)$ :

$$y(\alpha) = \begin{cases} 0 & \text{para } \alpha < \theta, \\ g(\alpha) & \text{para } \theta \leq \alpha \leq \theta + \delta, \\ 1 & \text{para } \alpha > \theta + \delta. \end{cases}$$

- $g(\alpha)$  modela o histórico da reação química:

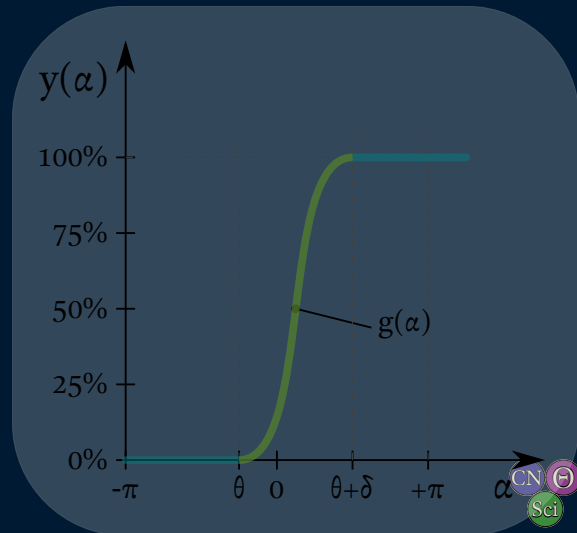


## Modelo de Evolução de Reação:

- Reações evoluem com  $y(\alpha)$ :

$$y(\alpha) = \begin{cases} 0 & \text{para } \alpha < \theta, \\ g(\alpha) & \text{para } \theta \leq \alpha \leq \theta + \delta, \\ 1 & \text{para } \alpha > \theta + \delta. \end{cases}$$

- $g(\alpha)$  modela o **histórico** da reação química:
  - $g(\theta) = 0$  e  $g(\theta + \delta) = 1$ ;

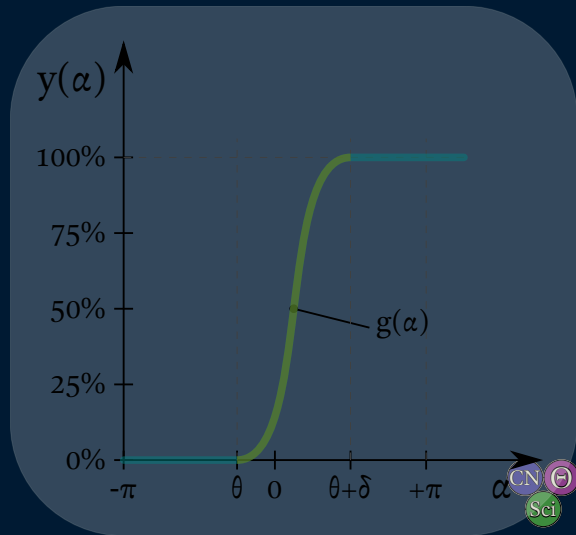


## Modelo de Evolução de Reação:

- Reações evoluem com  $y(\alpha)$ :

$$y(\alpha) = \begin{cases} 0 & \text{para } \alpha < \theta, \\ g(\alpha) & \text{para } \theta \leq \alpha \leq \theta + \delta, \\ 1 & \text{para } \alpha > \theta + \delta. \end{cases}$$

- $g(\alpha)$  modela o **histórico** da reação química:
  - $g(\theta) = 0$  e  $g(\theta + \delta) = 1$ ;
  - Função  $g(\alpha)$  deve ser **monotônica**;

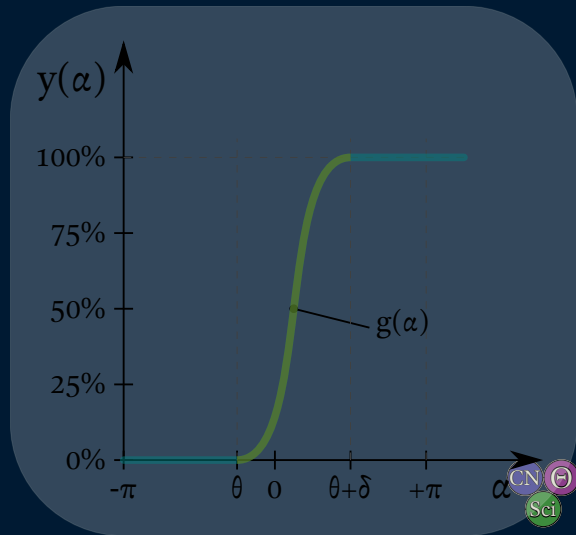


## Modelo de Evolução de Reação:

- Reações evoluem com  $y(\alpha)$ :

$$y(\alpha) = \begin{cases} 0 & \text{para } \alpha < \theta, \\ g(\alpha) & \text{para } \theta \leq \alpha \leq \theta + \delta, \\ 1 & \text{para } \alpha > \theta + \delta. \end{cases}$$

- $g(\alpha)$  modela o **histórico** da reação química:
  - $g(\theta) = 0$  e  $g(\theta + \delta) = 1$ ;
  - Função  $g(\alpha)$  deve ser **monotônica**;
  - $g(\alpha)$  pode basear-se em **experimentos**;

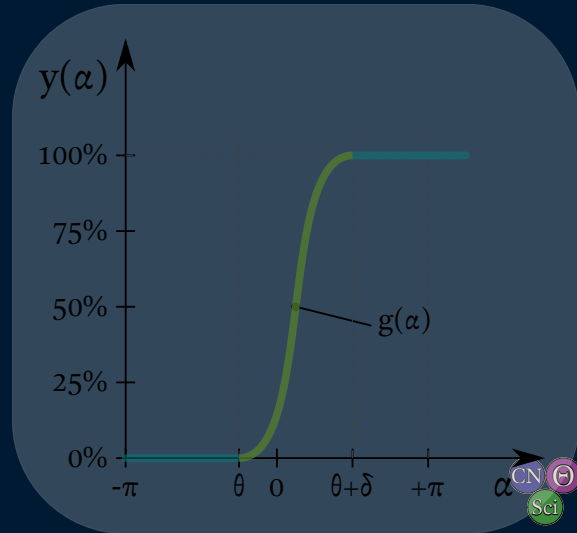


## Modelo de Evolução de Reação:

- Reações evoluem com  $y(\alpha)$ :

$$y(\alpha) = \begin{cases} 0 & \text{para } \alpha < \theta, \\ g(\alpha) & \text{para } \theta \leq \alpha \leq \theta + \delta, \\ 1 & \text{para } \alpha > \theta + \delta. \end{cases}$$

- $g(\alpha)$  modela o **histórico** da reação química:
  - $g(\theta) = 0$  e  $g(\theta + \delta) = 1$ ;
  - Função  $g(\alpha)$  deve ser **monotônica**;
  - $g(\alpha)$  pode basear-se em **experimentos**;
  - Lit.:  $g(\alpha) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2} \cos\left(\frac{\pi}{\delta}(\alpha - \theta)\right)$ .





# Equações Termodinâmicas

Balanço de energia do  $i$ -ésimo (sub-)processo politrópico  $P_i V_i^{n_i} = P_{i+1} V_{i+1}^{n_i}$ :





## Equações Termodinâmicas

Balanço de energia do  $i$ -ésimo (sub-)processo politrópico  $P_i V_i^{n_i} = P_{i+1} V_{i+1}^{n_i}$ :

$$Q_i - W_i = U_{m,i+1} - U_{m,i}, \quad \rightarrow$$

$$Q_i + (U_{f,m,i}^0 - U_{f,m,i+1}^0) - W_i = U_{m,i+1}^0 - U_{m,i}^0,$$

## Equações Termodinâmicas

Balanço de energia do  $i$ -ésimo (sub-)processo politrópico  $P_i V_i^{n_i} = P_{i+1} V_{i+1}^{n_i}$ :

$$Q_i - W_i = U_{m,i+1} - U_{m,i}, \quad \rightarrow$$

$$Q_i + (U_{f,m,i}^0 - U_{f,m,i+1}^0) - W_i = U_{m,i+1}^0 - U_{m,i}^0, \quad \rightarrow$$

$$U_{m,i+1}^0 = U_{m,i}^0 + Q_i + \Delta U_{\text{reac},i} - W_i, \quad \text{com}$$

# Equações Termodinâmicas

Balanço de energia do  $i$ -ésimo (sub-)processo politrópico  $P_i V_i^{n_i} = P_{i+1} V_{i+1}^{n_i}$ :

$$Q_i - W_i = U_{m,i+1} - U_{m,i}, \quad \rightarrow$$

$$Q_i + (U_{f,m,i}^0 - U_{f,m,i+1}^0) - W_i = U_{m,i+1}^0 - U_{m,i}^0, \quad \rightarrow$$

$$U_{m,i+1}^0 = U_{m,i}^0 + Q_i + \Delta U_{\text{reac},i} - W_i, \quad \text{com}$$

$$\Delta U_{\text{reac},i} \equiv U_{f,m,i}^0 - U_{f,m,i+1}^0 \quad \rightarrow$$

$$= H_{f,m,i}^0 - n_{m,i} \bar{R} T_0 - H_{f,m,i+1}^0 + n_{m,i+1} \bar{R} T_0.$$

# Equações Termodinâmicas

$Q_i = 0 \text{ kJ}$ , ignorando transferência de calor com cabeçote, bloco...

# Equações Termodinâmicas

$Q_i = 0 \text{ kJ}$ , ignorando transferência de calor com cabeço, bloco...

$$W_i = \begin{cases} \frac{P_i V_i}{1 - n_i} \left[ 1 - \left( \frac{V_i}{V_{i+1}} \right)^{n_i - 1} \right], & \text{para } n_i \neq 1, \\ P_i V_i \ln \frac{V_i}{V_{i+1}}, & \text{para } n_i = 1, \\ 0 \text{ kJ}, & \text{para } V_i \approx V_{i+1} \rightarrow |V_i - V_{i+1}| \leq \epsilon_V. \end{cases}$$

## Mistura Ativa: Composição Instantânea

A composição **instantânea** do sistema, que contém o **fluido ativo**, é:





# Mistura Ativa: Composição Instantânea

A composição **instantânea** do sistema, que contém o **fluido ativo**, é:

$$M_{sys,i} = (1 - y_i) M_{re} + y_i M_{pr}, \quad \rightarrow$$

# Mistura Ativa: Composição Instantânea

A composição **instantânea** do sistema, que contém o **fluido ativo**, é:

$$\mathbb{M}_{\text{sys},i} = (1 - y_i) \mathbb{M}_{\text{re}} + y_i \mathbb{M}_{\text{pr}}, \quad \rightarrow$$

$$\mathbb{M}_{\text{sys},i} = (1 - y_i)(1 - \zeta) \mathbb{M}_{\text{af}} + [(1 - y_i)\zeta + y_i] \mathbb{M}_{\text{pr}},$$

# Mistura Ativa: Composição Instantânea

A composição **instantânea** do sistema, que contém o **fluido ativo**, é:

$$\mathbb{M}_{\text{sys},i} = (1 - y_i) \mathbb{M}_{\text{re}} + y_i \mathbb{M}_{\text{pr}}, \quad \rightarrow$$

$$\mathbb{M}_{\text{sys},i} = (1 - y_i)(1 - \zeta) \mathbb{M}_{\text{af}} + [(1 - y_i)\zeta + y_i] \mathbb{M}_{\text{pr}},$$

com:

## Mistura Ativa: Composição Instantânea

A composição **instantânea** do sistema, que contém o **fluido ativo**, é:

$$\mathbb{M}_{\text{sys},i} = (1 - y_i) \mathbb{M}_{\text{re}} + y_i \mathbb{M}_{\text{pr}}, \quad \rightarrow$$

$$\mathbb{M}_{\text{sys},i} = (1 - y_i)(1 - \zeta) \mathbb{M}_{\text{af}} + [(1 - y_i)\zeta + y_i] \mathbb{M}_{\text{pr}},$$

com:

$$\mathbb{M}_{\text{af}} = n_{\text{f}} C n_{\text{C}} H n_{\text{H}} O n_{\text{O}} N n_{\text{N}} + n_{\text{air}} \left( \frac{1}{1 + \psi} \text{O}_2 + \frac{\psi}{1 + \psi} \text{N}_2 \right) \quad \text{e}$$

# Mistura Ativa: Composição Instantânea

A composição **instantânea** do sistema, que contém o **fluido ativo**, é:

$$\mathbb{M}_{\text{sys},i} = (1 - y_i) \mathbb{M}_{\text{re}} + y_i \mathbb{M}_{\text{pr}}, \quad \rightarrow$$

$$\mathbb{M}_{\text{sys},i} = (1 - y_i)(1 - \zeta) \mathbb{M}_{\text{af}} + [(1 - y_i)\zeta + y_i] \mathbb{M}_{\text{pr}},$$

com:

$$\mathbb{M}_{\text{af}} = n_{\text{f}} C n_{\text{C}} H n_{\text{H}} O n_{\text{O}} N n_{\text{N}} + n_{\text{air}} \left( \frac{1}{1 + \psi} \text{O}_2 + \frac{\psi}{1 + \psi} \text{N}_2 \right) \quad \text{e}$$

$$\mathbb{M}_{\text{pr}} = n_{\text{CO}_2} \text{CO}_2 + n_{\text{H}_2\text{O}} \text{H}_2\text{O} + n_{\text{CO}} \text{CO} + n_{\text{H}_2} \text{H}_2 + n_{\text{O}_2} \text{O}_2 + n_{\text{N}_2} \text{N}_2.$$

# Tópicos de Leitura I



Brunetti, F.

*Motores de combustão interna.* Capítulos 1 e 2.

Blücher. São Paulo. ISBN 978-85-2120-708-5.



Silva, R. K. de O.

*Modelo ar-combustível de tempo finito de adição de calor de motores Otto.*

Repositório Roca UTFPR.

[repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8786](http://repositorio.roca.utfpr.edu.br/jspui/handle/1/8786).



Photo by Kaboompics.com from Pexels