

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 23h12m24s 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** 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;

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:

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**;

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

- 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);
 - **Não** modela a cinética química: tempos de combustão permanecem dados de **entrada**.

Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

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

Ciclo Otto ar-combustível de tempo finito—FTAF

- 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**:

- 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

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**;

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**.

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:

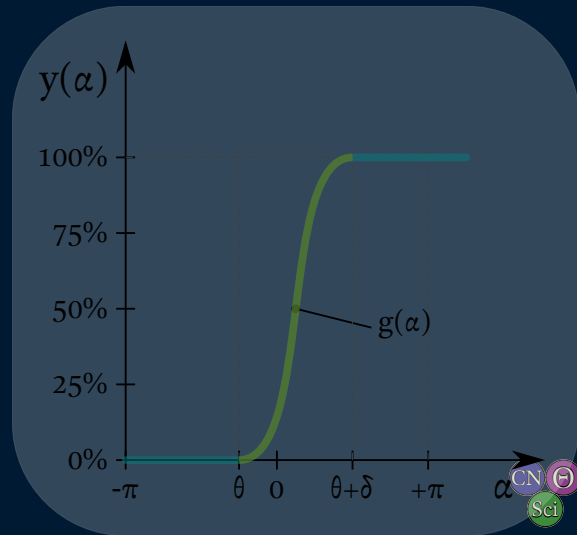
- Reações evoluem com $y(\alpha)$:



Modelo de Evolução de Reação:

- Reações evoluem com $y(\alpha)$:

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

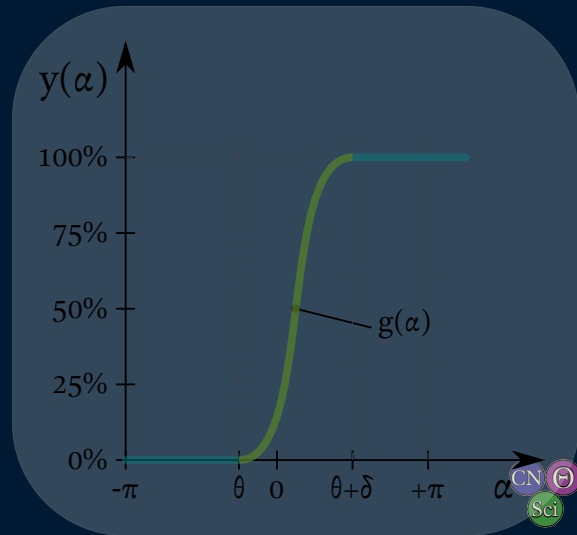


Modelo de Evolução de Reação:

- 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:

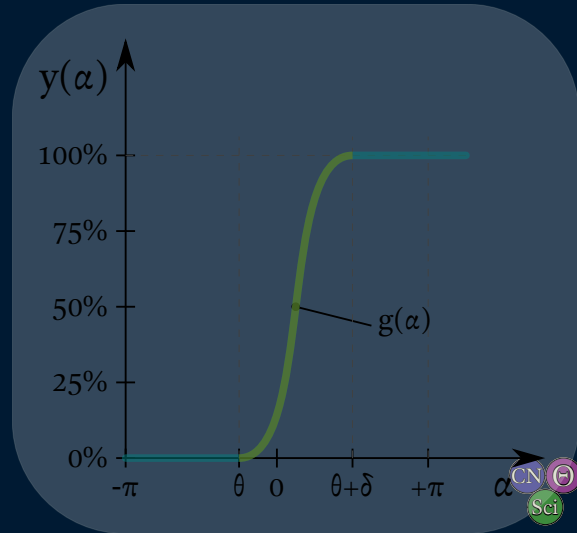


Modelo de Evolução de Reação:

- 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 $g(\theta + \delta) = 1$;

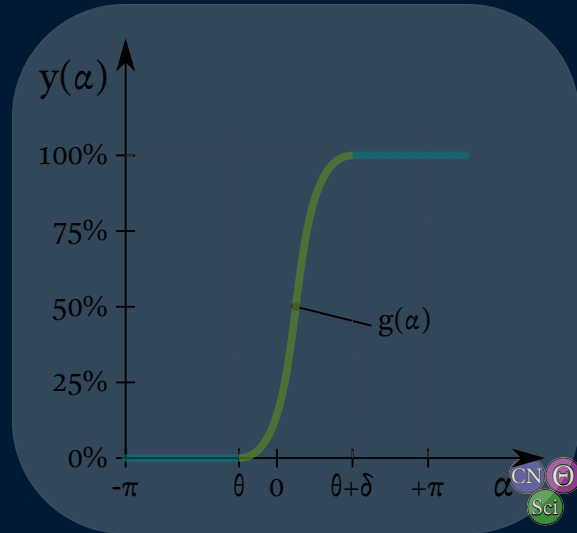


Modelo de Evolução de Reação:

- 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**;

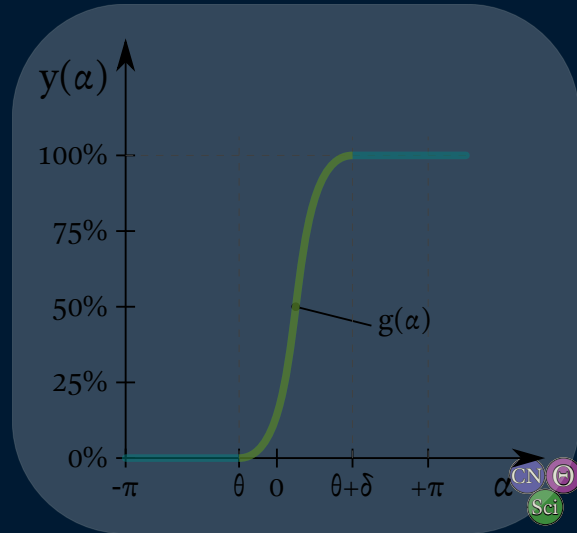


Modelo de Evolução de Reação:

- 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**;

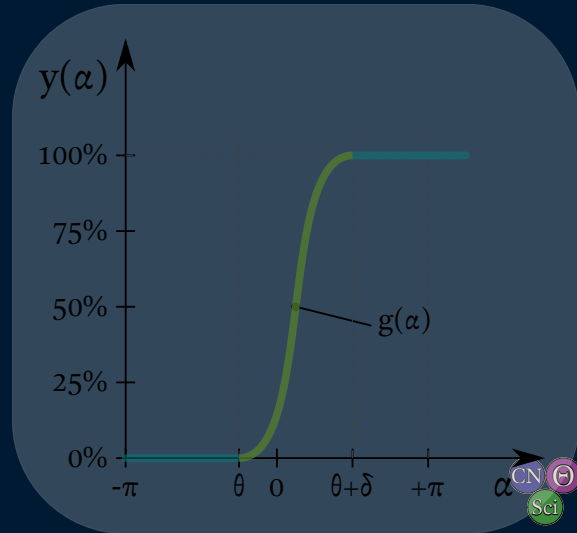


Modelo de Evolução de Reação:

- 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 $P_i V_i^{n_i} = P_{i+1} V_{i+1}^{n_i}$:

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

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

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

Equações Termodinâmicas

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

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

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

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

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

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

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.



Photo by Kaboompics.com from Pexels