

# C.01.01 – Ciclo Otto de Tempo Finito de Adição de Calor

## FTHA – Finite-Time Heat Addition Otto Engine Model

Prof. C. Naaktgeboren, PhD



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

Compiled on 2020-08-13 17h25m05s UTC

## 1 Introdução

- Limitações do Ciclo Otto Ideal
- Proposta do Ciclo Otto FTHA

## 2 Modelagem FTHA

- Modelagem do Motor
- Modelagem do Ciclo
- Procedimento de Solução

### 3 Tópicos de Leitura

# Melhorando o Ciclo Otto Ideal

O ciclo Otto **ideal**, da termodinâmica aplicada:

# Melhorando o Ciclo Otto Ideal

O ciclo Otto **ideal**, da termodinâmica aplicada:

- Assume todas as **hipóteses padrão a ar**;

# Melhorando o Ciclo Otto Ideal

O ciclo Otto **ideal**, da termodinâmica aplicada:

- Assume todas as **hipóteses padrão a ar**;
- Gás **ideal**;

O ciclo Otto **ideal**, da termodinâmica aplicada:

- Assume todas as hipóteses padrão a ar;
- Gás ideal;
- Processos internamente reversíveis;

## Melhorando o Ciclo Otto Ideal

O ciclo Otto **ideal**, da termodinâmica aplicada:

- Assume todas as hipóteses padrão a ar;
- Gás ideal;
- Processos internamente reversíveis;
- Entrada de calor modela a combustão;

# Melhorando o Ciclo Otto Ideal

O ciclo Otto **ideal**, da termodinâmica aplicada:

- Assume todas as **hipóteses padrão a ar**;
- Gás **ideal**;
- Processos **internamente reversíveis**;
- Entrada de **calor** modela a combustão;
- Saída de **calor** modela a exaustão;





O ciclo Otto **ideal**, da termodinâmica aplicada:

- Assume todas as hipóteses padrão a ar;
- Assume entrada de calor isocórica;
- Gás ideal;
- Processos internamente reversíveis;
- Entrada de calor modela a combustão;
- Saída de calor modela a exaustão;
- Modelo em ciclo fechado;





# Melhorando o Ciclo Otto Ideal

O ciclo Otto **ideal**, da termodinâmica aplicada:

- Assume todas as **hipóteses padrão a ar**;
- Assume entrada de calor **isocórica**;
- Possui parâmetros  $r$  e  $k$ , e
- Solução analítica, **hip. padrão a ar frio**:
- Gás **ideal**;
- Processos **internamente reversíveis**;
- Entrada de **calor** modela a combustão;
- Saída de **calor** modela a exaustão;
- Modelo em **ciclo fechado**;
- Calores específicos **constantes**.

# Melhorando o Ciclo Otto Ideal

O ciclo Otto **ideal**, da termodinâmica aplicada:

- Assume todas as **hipóteses padrão a ar**;
- Assume entrada de calor **isocórica**;
- Possui parâmetros  $r$  e  $k$ , e
- Solução analítica, **hip. padrão a ar frio**:

$$\eta_t = 1 - r^{1-k} \rightarrow$$

- Gás **ideal**;
- Processos **internamente reversíveis**;
- Entrada de **calor** modela a combustão;
- Saída de **calor** modela a exaustão;
- Modelo em **ciclo fechado**;
- Calores específicos **constantes**.

# Melhorando o Ciclo Otto Ideal

O ciclo Otto **ideal**, da termodinâmica aplicada:

- Assume todas as **hipóteses padrão a ar**;
- Assume entrada de calor **isocórica**;
- Possui parâmetros  $r$  e  $k$ , e
- Solução analítica, **hip. padrão a ar frio**:

$$\eta_t = 1 - r^{1-k} \rightarrow$$

- $\eta_t : \eta_t(r, k)$  **apenas!**

- Gás **ideal**;
- Processos **internamente reversíveis**;
- Entrada de **calor** modela a combustão;
- Saída de **calor** modela a exaustão;
- Modelo em **ciclo fechado**;
- Calores específicos **constantes**.

## Desvios do ciclo Otto ideal—incluem, mas não limitados a:



Diagrama  $P - V$  ilustrativo de perdas por (i) combustão não instantânea—verde, (ii) transferência de calor—vermelho—e de (iii) bombeamento—azul. Fonte: adaptado de Wikimedia Commons.

[https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6c/P-V\\_diagram\\_deviations\\_to\\_Otto\\_cycle.svg](https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/6c/P-V_diagram_deviations_to_Otto_cycle.svg).



# Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Modela combustão (adição de calor) de forma **não instantânea**:

## Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Modela combustão (adição de calor) de forma **não instantânea**:
  - Interações **simultâneas** de **calor** e **trabalho**;

# Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Modela combustão (adição de calor) de forma **não instantânea**:
  - Interações **simultâneas** de **calor** e **trabalho**;
  - Tempos de motor **discretizados** em **sub-processos**;

## Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Modela combustão (adição de calor) de forma **não instantânea**:
  - Interações **simultâneas** de **calor** e **trabalho**;
  - Tempos de motor **discretizados** em **sub-processos**;
  - Elemento computacional: sub-processo **localmente politrópico**.

## Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Modela combustão (adição de calor) de forma não instantânea:
  - Interações simultâneas de calor e trabalho;
  - Tempos de motor discretizados em sub-processos;
  - Elemento computacional: sub-processo localmente politrópico.
- Mantém-se como modelo padrão a ar:

## Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Modela combustão (adição de calor) de forma **não instantânea**:
  - Interações **simultâneas** de **calor** e **trabalho**;
  - Tempos de motor **discretizados** em **sub-processos**;
  - Elemento computacional: sub-processo **localmente politrópico**.
- Mantém-se como modelo **padrão a ar**:
  - Transferência de calor para bloco inclui **irreversibilidades**;

## Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Modela combustão (adição de calor) de forma **não instantânea**:
  - Interações **simultâneas** de **calor** e **trabalho**;
  - Tempos de motor **discretizados** em **sub-processos**;
  - Elemento computacional: sub-processo **localmente politrópico**.
- Mantém-se como modelo **padrão a ar**:
  - Transferência de calor para bloco inclui **irreversibilidades**;
  - Perdas de bombeamento envolvem **sistema e ciclo abertos**.

# Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Modela combustão (adição de calor) de forma **não instantânea**:
  - Interações **simultâneas** de **calor** e **trabalho**;
  - Tempos de motor **discretizados** em **sub-processos**;
  - Elemento computacional: sub-processo **localmente politrópico**.
- Mantém-se como modelo **padrão a ar**:
  - Transferência de calor para bloco inclui **irreversibilidades**;
  - Perdas de bombeamento envolvem **sistema e ciclo abertos**.
- Mantém-se como modelo de **substância pura**:



## Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Modela combustão (adição de calor) de forma **não instantânea**:
  - Interações **simultâneas** de **calor** e **trabalho**;
  - Tempos de motor **discretizados** em **sub-processos**;
  - Elemento computacional: sub-processo **localmente politrópico**.
- Mantém-se como modelo **padrão a ar**:
  - Transferência de calor para bloco inclui **irreversibilidades**;
  - Perdas de bombeamento envolvem **sistema e ciclo abertos**.
- Mantém-se como modelo de **substância pura**:
  - Evita **combustão e equilíbrio químico**;

## Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Modela combustão (adição de calor) de forma **não instantânea**:
  - Interações **simultâneas** de **calor** e **trabalho**;
  - Tempos de motor **discretizados** em **sub-processos**;
  - Elemento computacional: sub-processo **localmente politrópico**.
- Mantém-se como modelo **padrão a ar**:
  - Transferência de calor para bloco inclui **irreversibilidades**;
  - Perdas de bombeamento envolvem **sistema e ciclo abertos**.
- Mantém-se como modelo de **substância pura**:
  - Evita **combustão e equilíbrio químico**;
  - Evita modelagem termodinâmica de **misturas reativas**.

# Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Inclui todos os parâmetros do **ciclo Otto ideal**:

# Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Inclui todos os parâmetros do **ciclo Otto ideal**:
  - **Razão de compressão** do motor;

## Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Inclui todos os parâmetros do **ciclo Otto ideal**:
  - Razão de compressão do motor;
  - Calores específicos do fluido de trabalho.

## Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Inclui todos os parâmetros do **ciclo Otto ideal**:
  - **Razão de compressão** do motor;
  - **Calores específicos** do fluido de trabalho.
- Inclui parâmetros **construtivos** do **motor**:

# Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Inclui todos os parâmetros do **ciclo Otto ideal**:
  - **Razão de compressão** do motor;
  - **Calores específicos** do fluido de trabalho.
- Inclui parâmetros **construtivos** do **motor**:
  - Conjunto **pistão-cilindro**;

# Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Inclui todos os parâmetros do **ciclo Otto ideal**:
  - **Razão de compressão** do motor;
  - **Calores específicos** do fluido de trabalho.
- Inclui parâmetros **construtivos** do **motor**:
  - Conjunto **pistão-cilindro**;
  - Mecanismo **biela-manivela**.





# Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Inclui todos os parâmetros do **ciclo Otto ideal**:
  - Razão de compressão do motor;
  - Calores específicos do fluido de trabalho.
- Inclui parâmetros **construtivos** do **motor**:
  - Conjunto **pistão-cilindro**;
  - Mecanismo **biela-manivela**.
- Inclui parâmetros **operacionais** do **motor**:
  - Velocidade angular (rotação);

# Ciclo Otto padrão a ar de tempo finito de adição de calor—FTHA

- Inclui todos os parâmetros do **ciclo Otto ideal**:
  - **Razão de compressão** do motor;
  - **Calores específicos** do fluido de trabalho.
- Inclui parâmetros **construtivos** do **motor**:
  - Conjunto **pistão-cilindro**;
  - Mecanismo **biela-manivela**.
- Inclui parâmetros **operacionais** do **motor**:
  - **Velocidade angular** (rotação);
  - Ângulo de **ignição** e

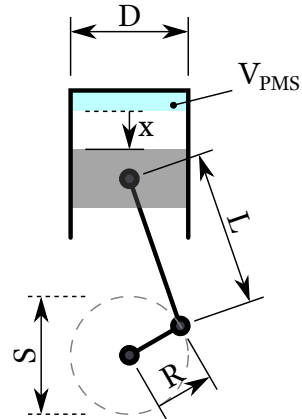


- **Diâmetro** do pistão/cilindro,  $D$ ;

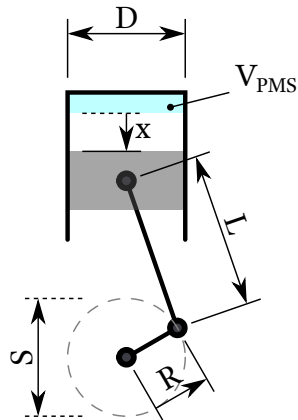


## Parâmetros do mecanismo

- **Diâmetro** do pistão/cilindro,  $D$ ;
- **Raio** da manivela,  $R$ ;

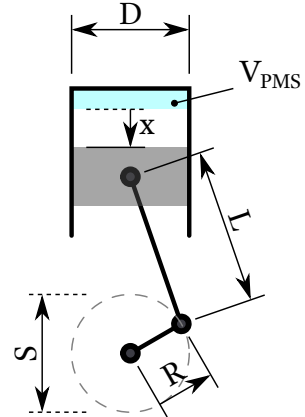


- **Diâmetro** do pistão/cilindro,  $D$ ;
- **Raio** da manivela,  $R$ ;
- **Curso** do pistão,  $S = 2R$ ;



## Parâmetros do mecanismo

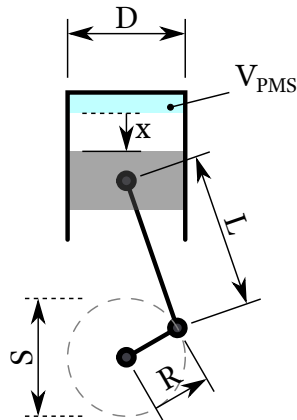
- **Diâmetro** do pistão/cilindro,  $D$ ;
- **Raio** da manivela,  $R$ ;
- **Curso** do pistão,  $S = 2R$ ;
- **Comprimento** da biela,  $L$ ;





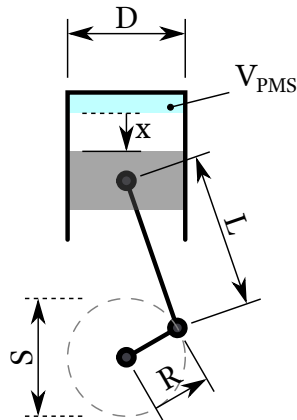
## Parâmetros do mecanismo

- Diâmetro do pistão/cilindro,  $D$ ;
- Raio da manivela,  $R$ ;
- Curso do pistão,  $S = 2R$ ;
- Comprimento da biela,  $L$ ;
- Volume morto (do PMS),  $V_{\text{PMS}}$ ;



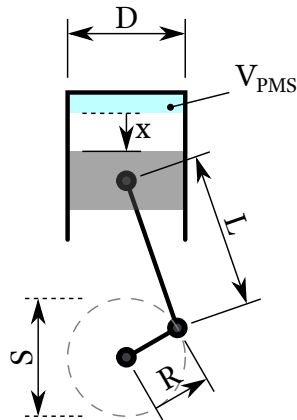
## Parâmetros do mecanismo

- **Diâmetro** do pistão/cilindro,  $D$ ;
- **Raio** da manivela,  $R$ ;
- **Curso** do pistão,  $S = 2R$ ;
- **Comprimento** da biela,  $L$ ;
- **Volume** morto (do PMS),  $V_{PMS}$ ;
- **Volume** máximo (do PMI),  $V_{PMI}$ ;



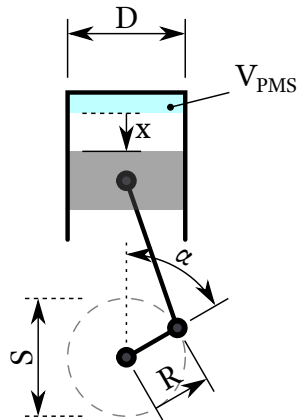
## Parâmetros do mecanismo

- **Diâmetro** do pistão/cilindro,  $D$ ;
- **Raio** da manivela,  $R$ ;
- **Curso** do pistão,  $S = 2R$ ;
- **Comprimento** da biela,  $L$ ;
- **Volume** morto (do PMS),  $V_{PMS}$ ;
- **Volume** máximo (do PMI),  $V_{PMI}$ ;
- **Razão de compressão**,  $r = \frac{V_{PMS}}{V_{PMI}}$ .



## Parâmetros do mecanismo

- Posição do pistão (rel. PMS),  $x$ ;



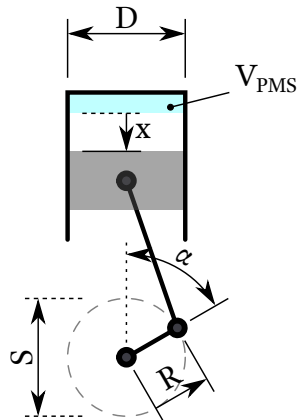
## Parâmetros do mecanismo

- Posição do pistão (rel. PMS),  $x$ ;
- Ângulo do virabrequim (rel. PMS),  $\alpha$ ;



## Parâmetros do mecanismo

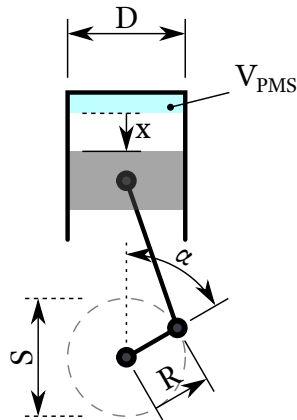
- **Posição** do pistão (rel. PMS),  $x$ ;
- **Ângulo** do virabrequim (rel. PMS),  $\alpha$ ;
- **Volume** instantâneo,  $V$ ;



## Parâmetros do mecanismo

- **Posição** do pistão (rel. PMS),  $x$ ;
- **Ângulo** do virabrequim (rel. PMS),  $\alpha$ ;
- **Volume** instantâneo,  $V$ ;

$$x(\alpha) = L \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{R^2}{L^2} \sin^2 \alpha} \right) + R(1 - \cos \alpha)$$

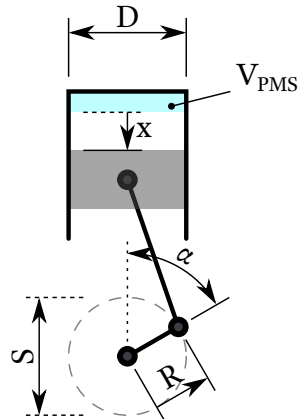


## Parâmetros do mecanismo

- **Posição** do pistão (rel. PMS),  $x$ ;
- **Ângulo** do virabrequim (rel. PMS),  $\alpha$ ;
- **Volume** instantâneo,  $V$ ;

$$x(\alpha) = L \left( 1 - \sqrt{1 - \frac{R^2}{L^2} \sin^2 \alpha} \right) + R(1 - \cos \alpha)$$

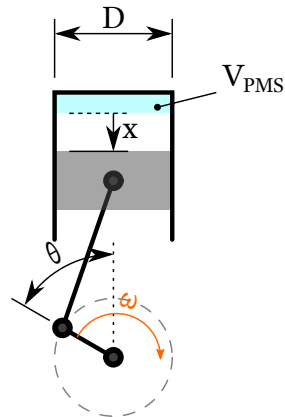
$$V(\alpha) = \frac{\pi x(\alpha)}{4} D^2 + V_{\text{PMS}} \quad \rightarrow \quad v(\alpha) = \frac{V(\alpha)}{m_0}$$





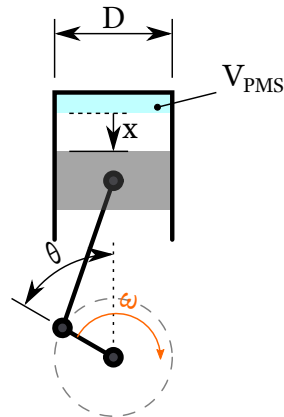
## Parâmetros de tempo do motor

- Ângulo de ignição (rel. PMS),  $\theta$ ;



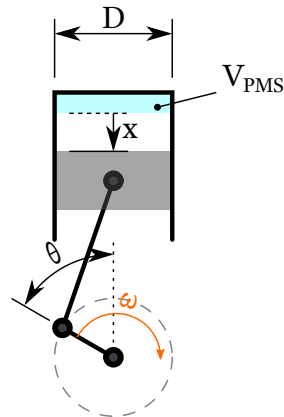
## Parâmetros de tempo do motor

- Ângulo de ignição (rel. PMS),  $\theta$ ;
- Duração da combustão,  $\Delta t_c$ ;



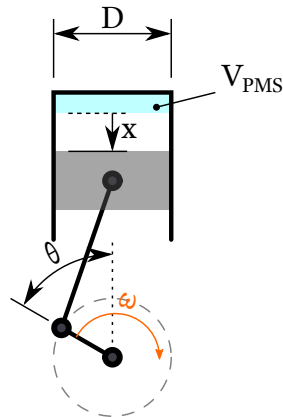
## Parâmetros de tempo do motor

- Ângulo de ignição (rel. PMS),  $\theta$ ;
- Duração da combustão,  $\Delta t_c$ ;
- Velocidade angular,  $\omega \equiv \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi N/60$ ;



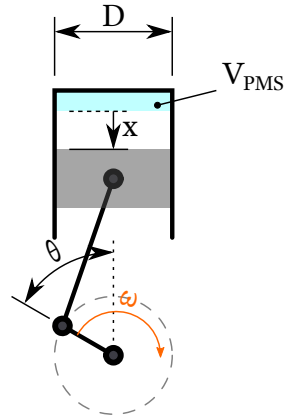
## Parâmetros de tempo do motor

- Ângulo de ignição (rel. PMS),  $\theta$ ;
- Duração da combustão,  $\Delta t_c$ ;
- Velocidade angular,  $\omega \equiv \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi N/60$ ;
- “Duração angular” da combustão,  $\delta = \omega \Delta t_c$ ;



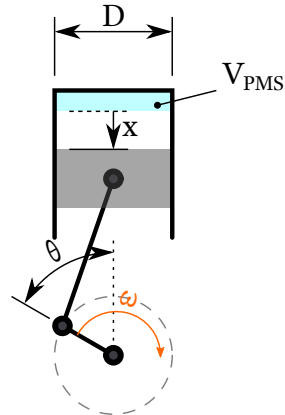
## Parâmetros de tempo do motor

- Ângulo de ignição (rel. PMS),  $\theta$ ;
- Duração da combustão,  $\Delta t_c$ ;
- Velocidade angular,  $\omega \equiv \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi N/60$ ;
- “Duração angular” da combustão,  $\delta = \omega \Delta t_c$ ;
- Casos de  $\omega$  constante—discretização em  $\alpha$ :
  - Intervalo de simulação:  $-\pi \leq \alpha \leq +3\pi$ ;



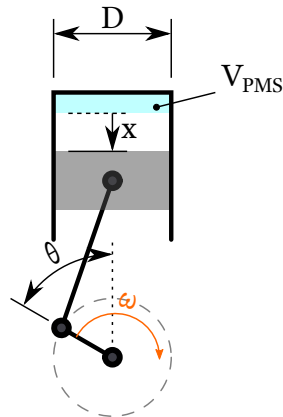
## Parâmetros de tempo do motor

- Ângulo de ignição (rel. PMS),  $\theta$ ;
- Duração da combustão,  $\Delta t_c$ ;
- Velocidade angular,  $\omega \equiv \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi N/60$ ;
- “Duração angular” da combustão,  $\delta = \omega \Delta t_c$ ;
- Casos de  $\omega$  constante—discretização em  $\alpha$ :
  - Intervalo de simulação:  $-\pi \leq \alpha \leq +3\pi$ ;
  - Intervalo de adição de calor:  $\theta \leq \alpha \leq \theta + \delta$ .



## Parâmetros de tempo do motor

- Ângulo de ignição (rel. PMS),  $\theta$ ;
- Duração da combustão,  $\Delta t_c$ ;
- Velocidade angular,  $\omega \equiv \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi N/60$ ;
- “Duração angular” da combustão,  $\delta = \omega \Delta t_c$ ;
- Casos de  $\omega$  constante—discretização em  $\alpha$ :
  - Intervalo de simulação:  $-\pi \leq \alpha \leq +3\pi$ ;
  - Intervalo de adição de calor:  $\theta \leq \alpha \leq \theta + \delta$ .
- Casos de  $\omega$  variável—discretização em  $t$ .



## Modelo de Adição de Calor, $q(\alpha)$

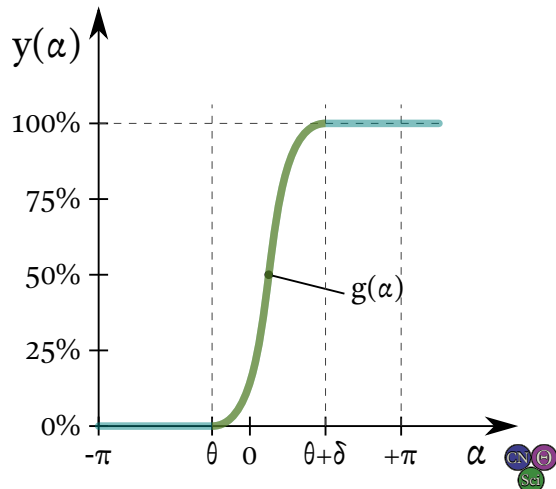
$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$



## Modelo de Adição de Calor, $q(\alpha)$

$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$

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

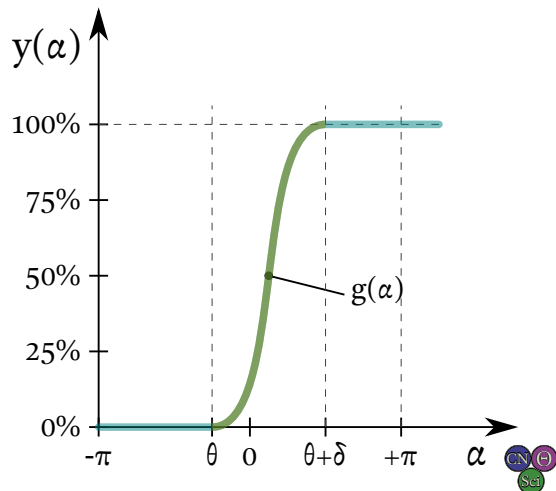


## Modelo de Adição de Calor, $q(\alpha)$

$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$

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

- $g(\alpha)$  modela o **histórico** da ad. de calor:

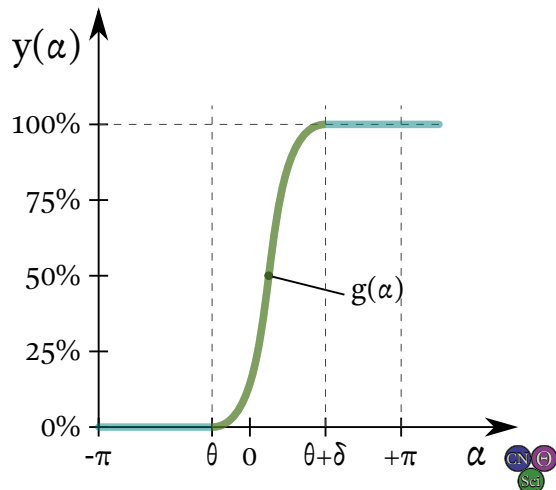


## Modelo de Adição de Calor, $q(\alpha)$

$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$

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

- $g(\alpha)$  modela o **histórico** da ad. de calor:
  - $g(\theta) = 0$  e  $g(\theta + \delta) = 1$ ;

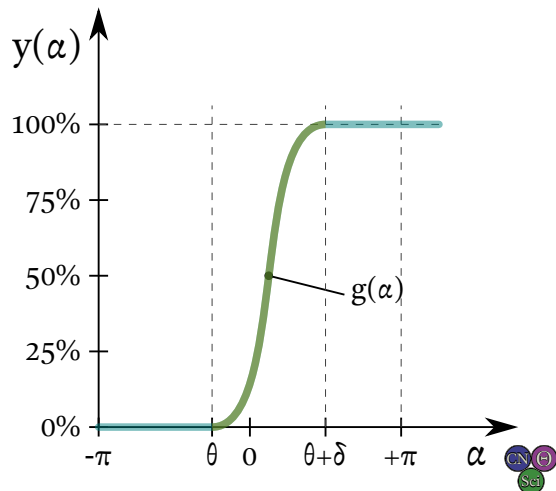


## Modelo de Adição de Calor, $q(\alpha)$

$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$

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

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

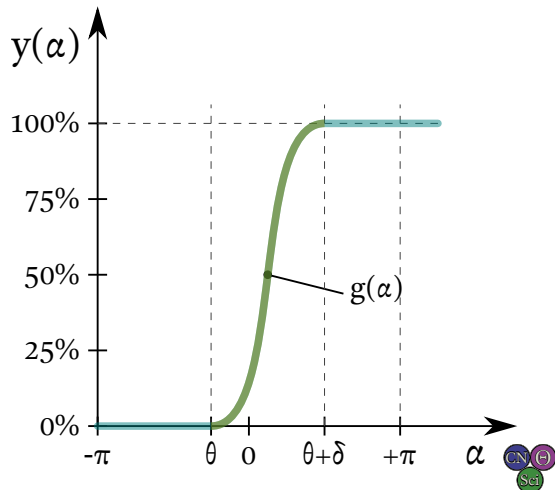


## Modelo de Adição de Calor, $q(\alpha)$

$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$

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

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

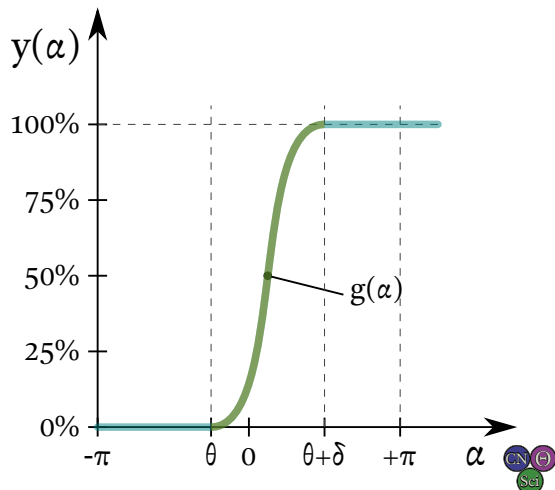


## Modelo de Adição de Calor, $q(\alpha)$

$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$

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

- $g(\alpha)$  modela o **histórico** da ad. de calor:
  - $g(\theta) = 0$  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

(Sub-)Processo politrópico  $i|i \in \mathbb{Z}$ :











# Equações Termodinâmicas

(Sub-)Processo politrópico  $i|i \in \mathbb{Z}$ :

- Sistema evolui do **estado- $i$**  para o **estado- $(i+1)$** .
- **Estados** com **propriedades**  $P_i, T_i, v_i, u_i$ , etc.
- **Interações** do **processo** são  $q_i$  e  $w_i$ .

Balanco de energia de processo:

$$q_i + w_i = \Delta u_i = u_{i+1} - u_i$$

# Equações Termodinâmicas

(Sub-)Processo politrópico  $i|i \in \mathbb{Z}$ :

- Sistema evolui do **estado- $i$**  para o **estado- $(i+1)$** .
- **Estados** com **propriedades**  $P_i, T_i, v_i, u_i$ , etc.
- **Interações** do **processo** são  $q_i$  e  $w_i$ .

Balanço de energia de processo:

$$q_i + w_i = \Delta u_i = u_{i+1} - u_i \quad \rightarrow$$



# Equações Termodinâmicas

$$q_i = q_{ent} \cdot (y_{i+1} - y_i)$$

# Equações Termodinâmicas

$$q_i = q_{ent} \cdot (y_{i+1} - y_i) \quad \rightarrow$$



# Equações Termodinâmicas

$$q_i = q_{ent} \cdot (y_{i+1} - y_i) \quad \rightarrow$$

$$q_i = q_{ent} \cdot [y(\alpha_{i+1}) - y(\alpha_i)], \quad e$$



# Equações Termodinâmicas

$$q_i = q_{ent} \cdot (y_{i+1} - y_i) \quad \rightarrow$$

$$q_i = q_{ent} \cdot [y(\alpha_{i+1}) - y(\alpha_i)], \quad e$$

$$w_i = \int_{v_i}^{v_{i+1}} (P_i v_i^{n_i}) v^{-n_i} dv, \quad \rightarrow$$

# Equações Termodinâmicas

$$q_i = q_{ent} \cdot (y_{i+1} - y_i) \quad \rightarrow$$

$$q_i = q_{ent} \cdot [y(\alpha_{i+1}) - y(\alpha_i)], \quad e$$

$$w_i = \int_{v_i}^{v_{i+1}} (P_i v_i^{n_i}) v^{-n_i} dv, \quad \rightarrow$$

$$w_i = \begin{cases} \frac{P_i}{1-n_i} \left( v_i - \frac{v_i^{n_i}}{v_{i+1}^{n_i-1}} \right), & \text{para } n_i \neq 1, \\ P_i v_i \ln \frac{v_i}{v_{i+1}}, & \text{para } n_i = 1. \end{cases}$$

# Título

Um **template** de slide.

# Título

Um **template** de slide.

# Tópicos de Leitura I



Çengel, Y. A. e Boles, M. A.

*Termodinâmica 7ª Edição. Seções 9–3 a 9–5.*

AMGH. Porto Alegre. ISBN 978-85-8055-200-3.



Naaktgeboren, C.

*An air-standard finite-time heat addition Otto engine model.*

*Int. J. Mech. Eng. Educ.* 45 (2), 2017.

DOI 10.1177/0306419016689447.



Image by Free-Photos from pixabay.com