

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 17h00m35s 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;
- 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
- 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**;

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.

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

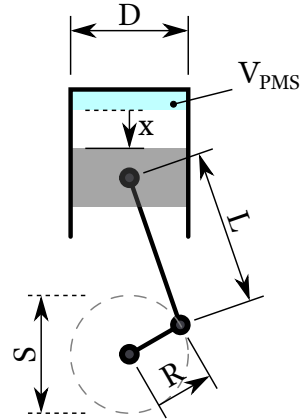
- Inclui todos os parâmetros do **ciclo Otto ideal**:
 - Razão de compressão do motor;
 - Calores específicos do fluido de trabalho.
- Inclui parâmetros **construtivos** do **motor**:
 - Conjunto **pistão-cilindro**;
 - Mecanismo **biela-manivela**.
- Inclui parâmetros **operacionais** do **motor**: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

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

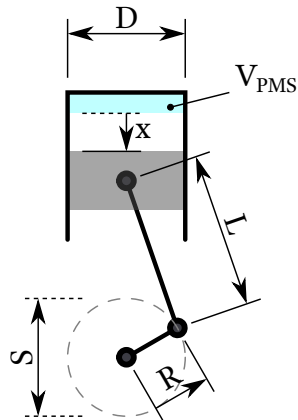


Parâmetros do mecanismo

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

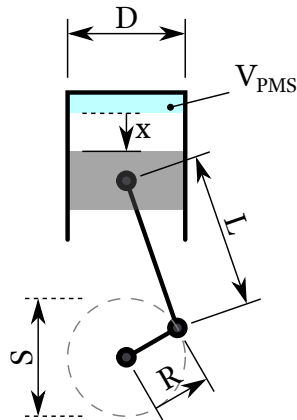


- Diâmetro do pistão/cilindro, D ;
- Raio da manivela, R ;
- Curso do pistão, $S = 2R$;
- Comprimento da biela, L ;



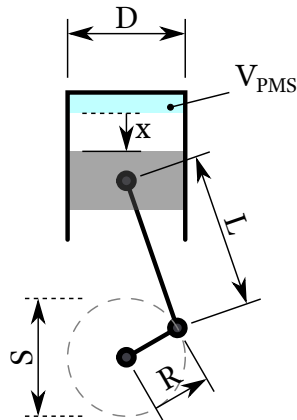
Parâmetros do mecanismo

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



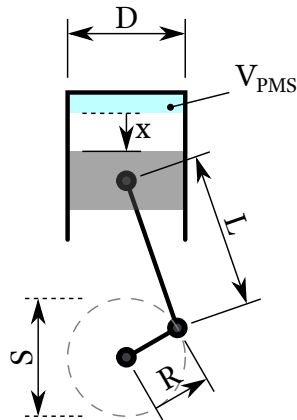
Parâmetros do mecanismo

- **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} ;



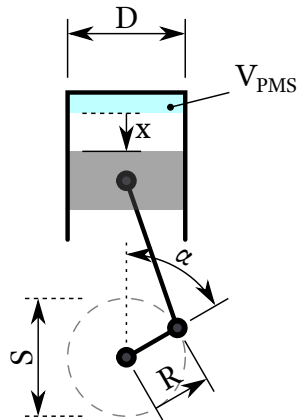
Parâmetros do mecanismo

- **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 ;



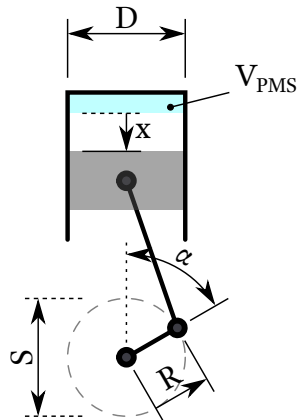
Parâmetros do mecanismo

- Posição do pistão (rel. PMS), x ;
- Ângulo do virabrequim (rel. PMS), α ;



Parâmetros do mecanismo

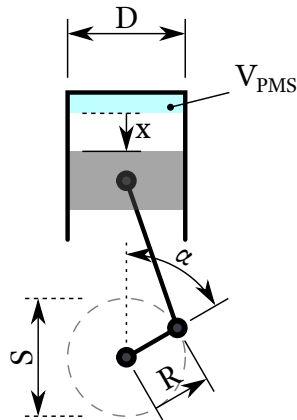
- **Posição** do pistão (rel. PMS), x ;
- **Ângulo** do virabrequim (rel. PMS), α ;
- **Volume** instantâneo, V ;



Parâmetros do mecanismo

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

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

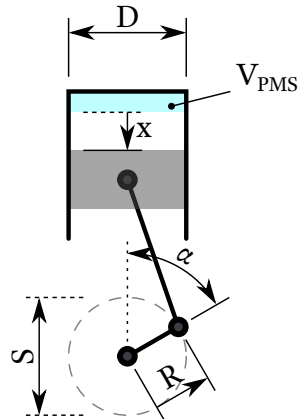


Parâmetros do mecanismo

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

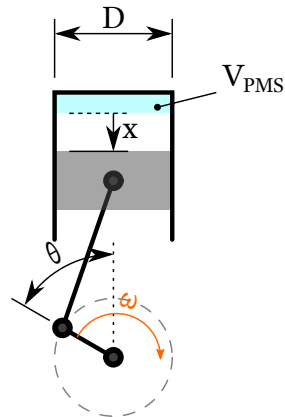
$$x(\alpha) = L \left(1 - \sqrt{1 - \frac{R^2}{L^2} \sin^2 \alpha} \right) + R(1 - \cos \alpha)$$

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



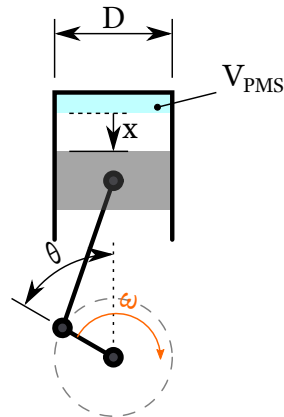
Parâmetros de tempo do motor

- Ângulo de ignição (rel. PMS), θ ;



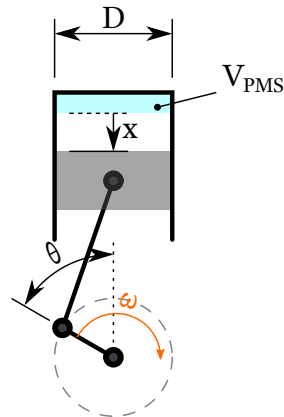
Parâmetros de tempo do motor

- Ângulo de ignição (rel. PMS), θ ;
- Duração da combustão, Δt_c ;



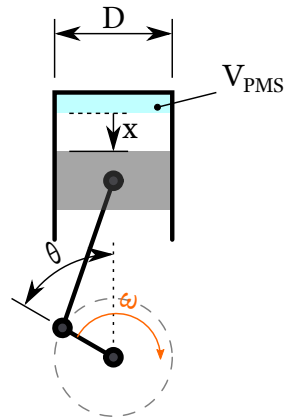
Parâmetros de tempo do motor

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



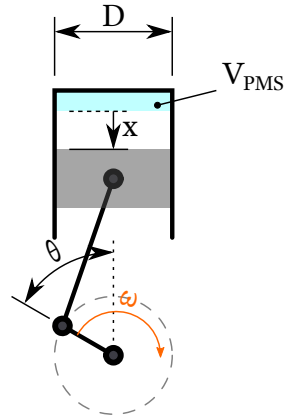
Parâmetros de tempo do motor

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



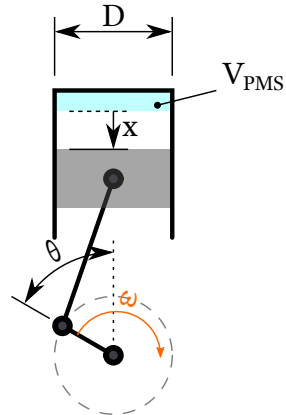
Parâmetros de tempo do motor

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



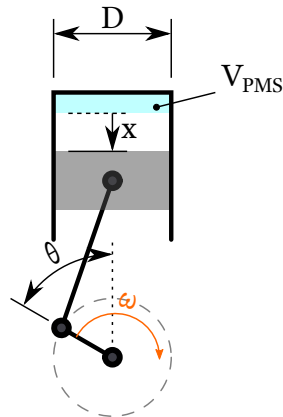
Parâmetros de tempo do motor

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



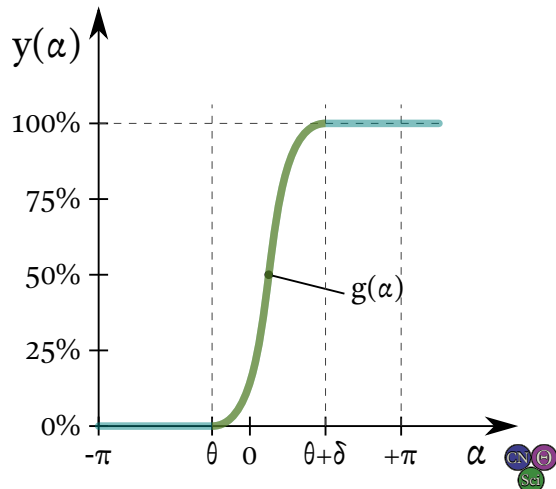
Modelo de Adição de Calor, $q(\alpha)$

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

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

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

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

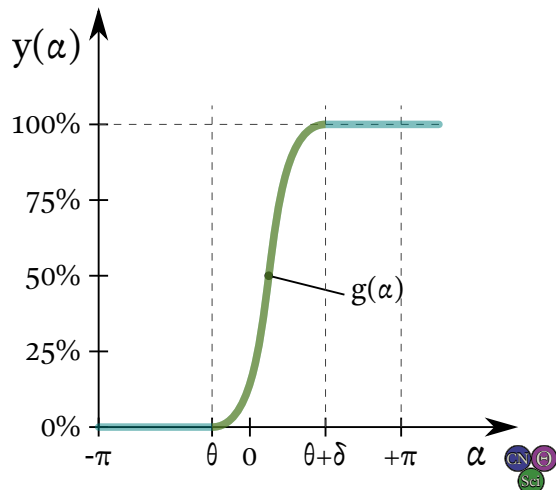


Modelo de Adição de Calor, $q(\alpha)$

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

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

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

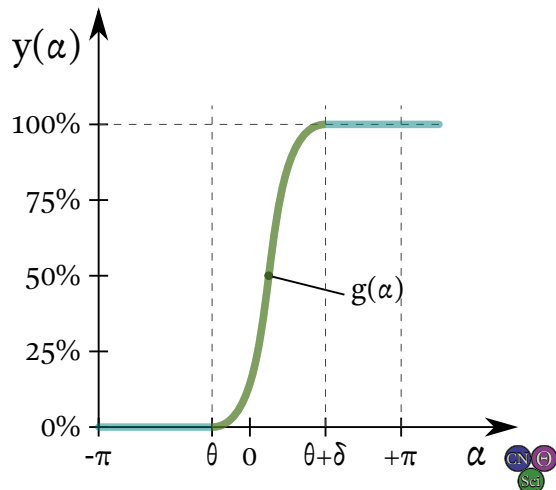


Modelo de Adição de Calor, $q(\alpha)$

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

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

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

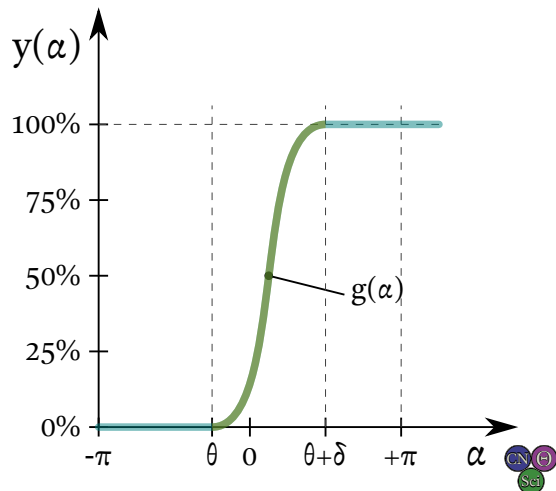


Modelo de Adição de Calor, $q(\alpha)$

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

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

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

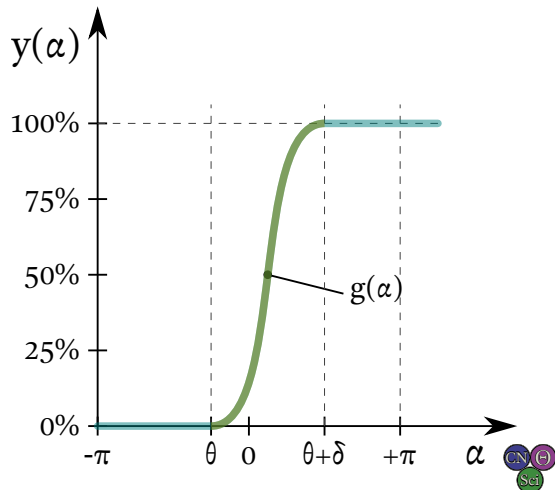


Modelo de Adição de Calor, $q(\alpha)$

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

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

- $g(\alpha)$ 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**;

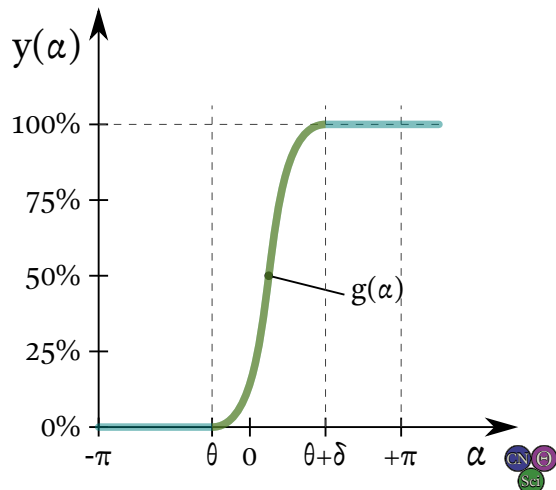


Modelo de Adição de Calor, $q(\alpha)$

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

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

- $g(\alpha)$ 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 .

Balanço 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

(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:

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

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