## 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 14h53m31s UTC





- Modelagem do Motor
  - Mecanismo Biela-Manivela
  - Tempos (*Timings*) do Motor
- 2 Modelagem do Ciclo
  - Modelo de Substância
  - Procedimento de Solução
- 3 Tópicos de Leitura







O ciclo Otto ideal, da termodinâmica aplicada:





40 + 40 + 43 + 43 +

O ciclo Otto ideal, da termodinâmica aplicada:





O ciclo Otto ideal, da termodinâmica aplicada:

• Assume todas as hipóteses padrão a ar;

Gás ideal;





O ciclo Otto ideal, da termodinâmica aplicada:

- Gás ideal;
- Processos internamente reversíveis;







O ciclo Otto ideal, da termodinâmica aplicada:

- Gás ideal;
- Processos internamente reversíveis;
- Entrada de calor modela a combustão;







O ciclo Otto ideal, da termodinâmica aplicada:

- Gás ideal;
- Processos internamente reversíveis;
- Entrada de calor modela a combustão;
- Saída de calor modela a exaustão;







O ciclo Otto ideal, da termodinâmica aplicada:

- Gás ideal;
- Processos internamente reversíveis;
- Entrada de calor modela a combustão;
- Saída de calor modela a exaustão;
- Modelo em ciclo fechado;







- 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;







- 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;







- 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;







- 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.







- 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:

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

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





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:

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

•  $\eta_t:\eta_t(r,k)$  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.





40 ) 40 ) 43 ) 43 )

#### 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.





• Modela combustão (adição de calor) de forma não instantânea:





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







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







- 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.







- 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:







- 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;







- 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.





- 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:







- 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;





- 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.





• Inclui todos os parâmetros do ciclo Otto ideal:





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







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







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







- 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;







- 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 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:







- 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);





- 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







- 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
  - Duração da combustão.







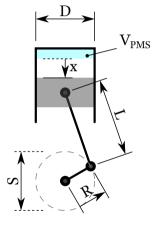
• Diâmetro do pistão/cilindro, D;







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

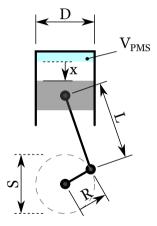








- Diâmetro do pistão/cilindro, D;
- Raio da manivela, R;
- Curso do pistão, S = 2R;

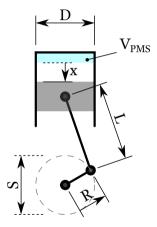








- Diâmetro do pistão/cilindro, D;
- Raio da manivela, R;
- Curso do pistão, S = 2R;
- Comprimento da biela, *L*;

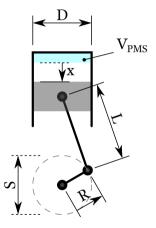








- Diâmetro do pistão/cilindro, D;
- Raio da manivela, R;
- Curso do pistão, S = 2R;
- Comprimento da biela, *L*;
- Volume morto (do PMS), V<sub>PMS</sub>;

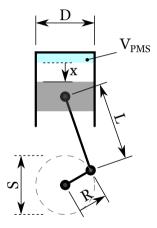








- Diâmetro do pistão/cilindro, D;
- Raio da manivela, R;
- Curso do pistão, S = 2R;
- Comprimento da biela, *L*;
- Volume morto (do PMS), V<sub>PMS</sub>;
- Volume máximo (do PMI), V<sub>PMI</sub>;

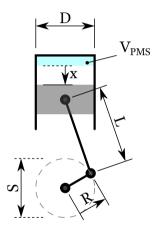








- Diâmetro do pistão/cilindro, D;
- Raio da manivela, *R*;
- Curso do pistão, S = 2R;
- Comprimento da biela, *L*;
- Volume morto (do PMS), V<sub>PMS</sub>;
- Volume máximo (do PMI), V<sub>PMI</sub>;
- Razão de compressão,  $r = \frac{V_{\rm PMS}}{V_{\rm PMI}}$ .

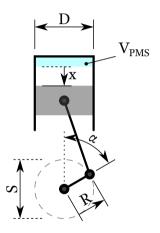








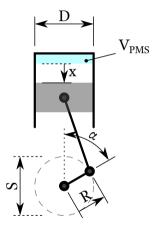
• Posição do pistão (rel. PMS), x;







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

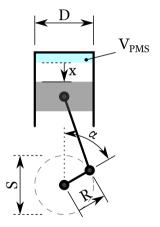








- Posição do pistão (rel. PMS), x;
- Ângulo do virabrequim (rel. PMS), α;
- Volume instantâneo, *V*;



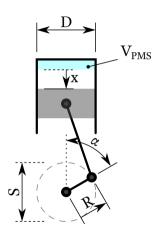






- Posição do pistão (rel. PMS), x;
- Ângulo do virabrequim (rel. PMS), α;
- Volume instantâneo, V;

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





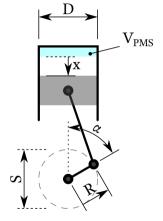




- Posição do pistão (rel. PMS), x;
- Ângulo do virabrequim (rel. PMS), α;
- Volume instantâneo, *V*;

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

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

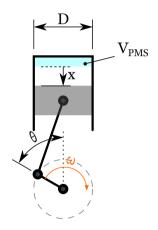








• Ângulo de ignição (rel. PMS), θ;

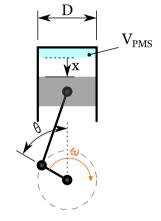








- Ângulo de ignição (rel. PMS),  $\theta$ ;
- Duração da combustão,  $\Delta t_c$ ;

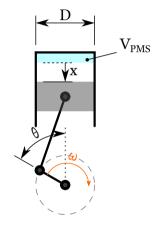








- Ângulo de ignição (rel. PMS),  $\theta$ ;
- Duração da combustão,  $\Delta t_c$ ;
- Velocidade angular,  $\omega \equiv \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi N/60$ ;

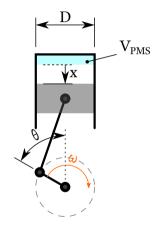








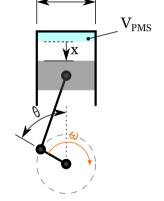
- Ângulo de ignição (rel. PMS),  $\theta$ ;
- Duração da combustão,  $\Delta t_c$ ;
- Velocidade angular,  $\omega \equiv \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi N/60$ ;
- "Duração angular" da combustão,  $\delta = \omega \Delta t_c$ ;







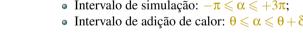
- Ângulo de ignição (rel. PMS),  $\theta$ ;
- Duração da combustão,  $\Delta t_c$ ;
- Velocidade angular,  $\omega \equiv \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi N/60$ ;
- "Duração angular" da combustão,  $\delta = \omega \Delta t_c$ ;
- Casos de ω constante—discretização em α:
  - Intervalo de simulação:  $-\pi \le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

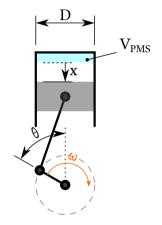






- Ângulo de ignição (rel. PMS), θ;
- Duração da combustão,  $\Delta t_c$ ;
- Velocidade angular,  $\omega \equiv \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi N/60$ ;
- "Duração angular" da combustão,  $\delta = \omega \Delta t_c$ ;
- Casos de ω constante—discretização em α:
  - Intervalo de simulação:  $-\pi \le \alpha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



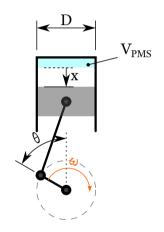






- Ângulo de ignição (rel. PMS),  $\theta$ ;
- Duração da combustão,  $\Delta t_c$ ;
- Velocidade angular,  $\omega \equiv \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi N/60$ ;
- "Duração angular" da combustão,  $\delta = \omega \Delta t_c$ ;
- Casos de ω constante—discretização em α:
  - Intervalo de simulação:  $-\pi \le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





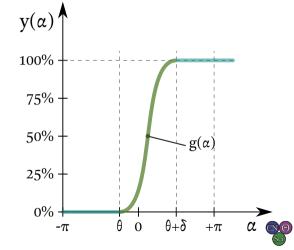


$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha)$$
, com





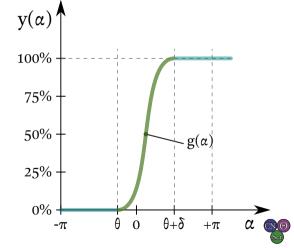
$$q(lpha) = q_{ent} \cdot y(lpha), \quad ext{com}$$
  $y(lpha) = egin{cases} 0 & ext{para } lpha < heta, \ g(lpha) & ext{para } lpha \leqslant lpha \leqslant heta + \delta, \ 1 & ext{para } lpha > heta + \delta. \end{cases}$ 





$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$
 
$$y(\alpha) = \begin{cases} 0 & \text{para } \alpha < \theta, \\ g(\alpha) & \text{para } \theta \leqslant \alpha \leqslant \theta + \delta, \\ 1 & \text{para } \alpha > \theta + \delta. \end{cases}$$

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



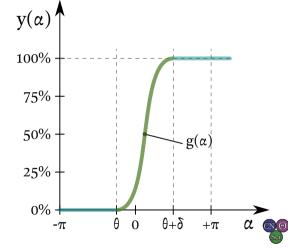




$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$
 
$$y(\alpha) = \begin{cases} 0 & \text{para } \alpha < \theta, \\ g(\alpha) & \text{para } \theta \leqslant \alpha \leqslant \theta + \delta, \\ 1 & \text{para } \alpha > \theta + \delta. \end{cases}$$

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

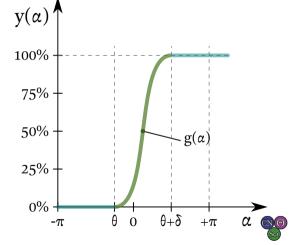
• 
$$g(\theta) = 0$$
 e  $g(\theta + \delta) = 1$ ;





$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$
 
$$y(\alpha) = \begin{cases} 0 & \text{para } \alpha < \theta, \\ g(\alpha) & \text{para } \theta \leqslant \alpha \leqslant \theta + \delta, \\ 1 & \text{para } \alpha > \theta + \delta. \end{cases}$$

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

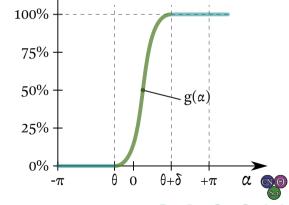




 $y(\alpha)$ 

$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$
 
$$y(\alpha) = \begin{cases} 0 & \text{para } \alpha < \theta, \\ g(\alpha) & \text{para } \theta \leqslant \alpha \leqslant \theta + \delta, \\ 1 & \text{para } \alpha > \theta + \delta. \end{cases}$$

- $g(\alpha)$  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;



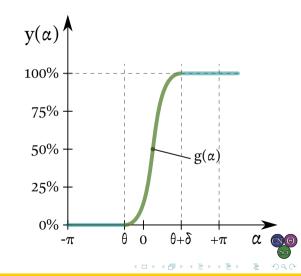


$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$
 
$$y(\alpha) = \begin{cases} 0 & \text{para } \alpha < \theta, \\ g(\alpha) & \text{para } \theta \leqslant \alpha \leqslant \theta + \delta, \\ 1 & \text{para } \alpha > \theta + \delta. \end{cases}$$

- $g(\alpha)$  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.: 
$$g(\alpha) = \frac{1}{2} - \frac{1}{2}\cos(\frac{\pi}{\delta}(\alpha - \theta))$$
.





A abordagem de solução do ciclo será numérica:





40 + 40 + 43 + 43 +

A abordagem de solução do ciclo será numérica:

Métodos numéricos empregam formas de discretização.





A abordagem de solução do ciclo será numérica:

- Métodos numéricos empregam formas de discretização.
- Discretização consiste em subdividir em finitas partes.







A abordagem de solução do ciclo será numérica:

- Métodos numéricos empregam formas de discretização.
- Discretização consiste em subdividir em finitas partes.
- O problema contínuo é transformado em um discreto.







A abordagem de solução do ciclo será numérica:

- Métodos numéricos empregam formas de discretização.
- Discretização consiste em subdividir em finitas partes.
- O problema contínuo é transformado em um discreto.
- Portanto sua solução será também discreta.







A abordagem de solução do ciclo será numérica:

- Métodos numéricos empregam formas de discretização.
- Discretização consiste em subdividir em finitas partes.
- O problema contínuo é transformado em um discreto.
- Portanto sua solução será também discreta.

Divisão em subprocessos i, com  $i \in \mathbb{Z}$ , durante o qual:







A abordagem de solução do ciclo será numérica:

- Métodos numéricos empregam formas de discretização.
- Discretização consiste em subdividir em finitas partes.
- O problema contínuo é transformado em um discreto.
- Portanto sua solução será também discreta.

Divisão em subprocessos i, com  $i \in \mathbb{Z}$ , durante o qual:

• O sistema evolve do estado-i para o estado-(i+1); e







A abordagem de solução do ciclo será numérica:

- Métodos numéricos empregam formas de discretização.
- Discretização consiste em subdividir em finitas partes.
- O problema contínuo é transformado em um discreto.
- Portanto sua solução será também discreta.

Divisão em subprocessos i, com  $i \in \mathbb{Z}$ , durante o qual:

- O sistema evolve do estado-i para o estado-(i+1); e
- As interações de calor e trabalho são  $q_i$  e  $w_i$ .







### **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.





