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 14h25m11s 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:

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





• 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.







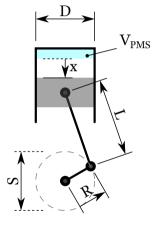
• Diâmetro do pistão/cilindro, D;







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

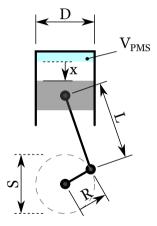








- Diâmetro do pistão/cilindro, D;
- Raio da manivela, R;
- Curso do pistão, S = 2R;

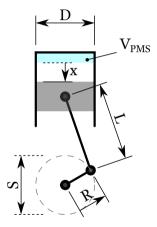








- Diâmetro do pistão/cilindro, D;
- Raio da manivela, R;
- Curso do pistão, S = 2R;
- Comprimento da biela, *L*;

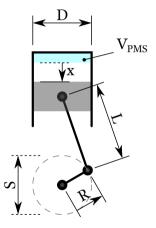








- Diâmetro do pistão/cilindro, D;
- Raio da manivela, R;
- Curso do pistão, S = 2R;
- Comprimento da biela, *L*;
- Volume morto (do PMS), V_{PMS};

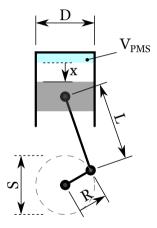








- Diâmetro do pistão/cilindro, D;
- Raio da manivela, R;
- Curso do pistão, S = 2R;
- Comprimento da biela, *L*;
- Volume morto (do PMS), V_{PMS};
- Volume máximo (do PMI), V_{PMI};

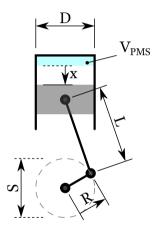








- Diâmetro do pistão/cilindro, D;
- Raio da manivela, *R*;
- Curso do pistão, S = 2R;
- Comprimento da biela, *L*;
- Volume morto (do PMS), V_{PMS};
- Volume máximo (do PMI), V_{PMI};
- Razão de compressão, $r = \frac{V_{\rm PMS}}{V_{\rm PMI}}$.

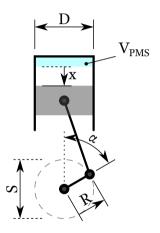








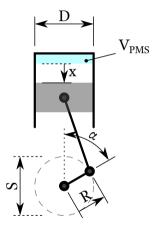
• Posição do pistão (rel. PMS), x;







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

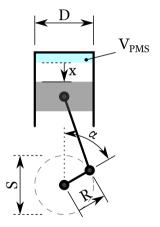








- Posição do pistão (rel. PMS), x;
- Ângulo do virabrequim (rel. PMS), α;
- Volume instantâneo, *V*;



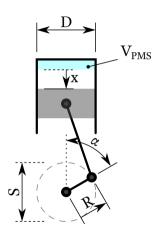






- Posição do pistão (rel. PMS), x;
- Ângulo do virabrequim (rel. PMS), α;
- Volume instantâneo, V;

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





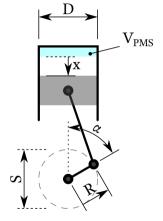




- Posição do pistão (rel. PMS), x;
- Ângulo do virabrequim (rel. PMS), α;
- Volume instantâneo, *V*;

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

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

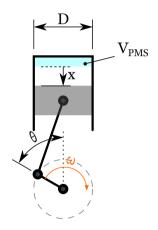








• Ângulo de ignição (rel. PMS), θ;

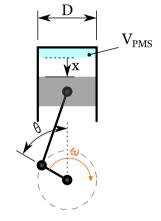








- Ângulo de ignição (rel. PMS), θ ;
- Duração da combustão, Δt_c ;

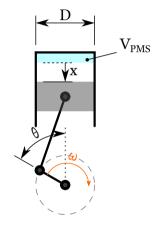








- Ângulo de ignição (rel. PMS), θ ;
- Duração da combustão, Δt_c ;
- Velocidade angular, $\omega \equiv \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi N/60$;

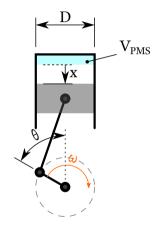








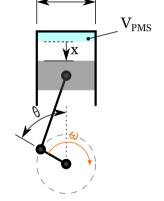
- Ângulo de ignição (rel. PMS), θ ;
- Duração da combustão, Δt_c ;
- Velocidade angular, $\omega \equiv \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi N/60$;
- "Duração angular" da combustão, $\delta = \omega \Delta t_c$;







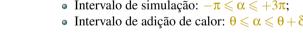
- Ângulo de ignição (rel. PMS), θ ;
- Duração da combustão, Δt_c ;
- Velocidade angular, $\omega \equiv \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi N/60$;
- "Duração angular" da combustão, $\delta = \omega \Delta t_c$;
- Casos de ω constante—discretização em α:
 - Intervalo de simulação: $-\pi \le \alpha \le +3\pi$;

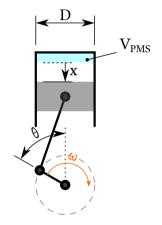






- Ângulo de ignição (rel. PMS), θ;
- Duração da combustão, Δt_c ;
- Velocidade angular, $\omega \equiv \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi N/60$;
- "Duração angular" da combustão, $\delta = \omega \Delta t_c$;
- Casos de ω constante—discretização em α:
 - Intervalo de simulação: $-\pi \le \alpha \le +3\pi$;
 -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



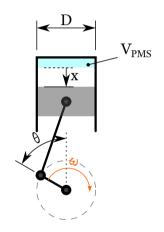






- Ângulo de ignição (rel. PMS), θ ;
- Duração da combustão, Δt_c ;
- Velocidade angular, $\omega \equiv \frac{d\alpha}{dt} = 2\pi N/60$;
- "Duração angular" da combustão, $\delta = \omega \Delta t_c$;
- Casos de ω constante—discretização em α:
 - Intervalo de simulação: $-\pi \le \alpha \le +3\pi$;
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







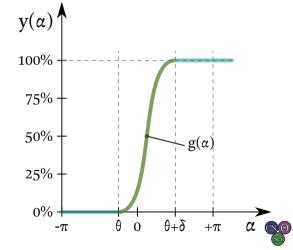
$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha)$$
, com





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

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

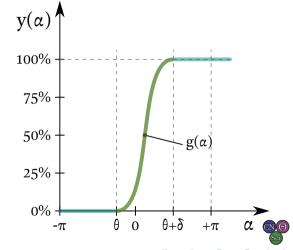




$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$

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

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



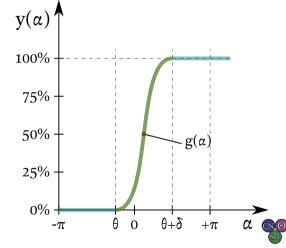


$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$

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

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

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

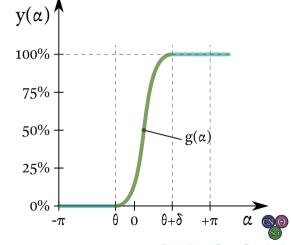




$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$

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

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



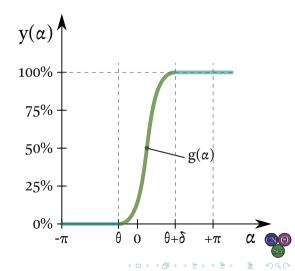


$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$

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

- $g(\alpha)$ 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;





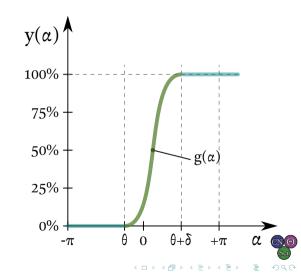
$$q(\alpha) = q_{ent} \cdot y(\alpha), \quad \text{com}$$

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

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





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.





