

2 Motor de Combustão Interna

2.1. Considerações Gerais

Segundo Costa (2002), O motor é a fonte de energia do automóvel. Converte a energia calorífica produzida pela combustão da gasolina em energia mecânica, capaz de imprimir movimento nas rodas. O carburante, normalmente constituído por uma mistura de gasolina e ar (a mistura gasosa), é queimado no interior dos cilindros do motor.

Temos agora alguns conceitos gerais sobre motores de combustão interna tais como:

Meirelles (2007) define os motores de combustão interna como máquinas térmicas alternativas, destinadas ao suprimento de energia mecânica ou força motriz de acionamento.

Videira (1997) define o motor de combustão Interna como um aparelho capaz de transformar diretamente energia térmica em energia mecânica..

Segundo Ladeira (2005) e Videira (1997), nos motores de combustão interna, a transformação de energia calorífica resultante da queima ou da explosão de uma mistura de ar - combustível é feita no interior de um dos órgãos da maquina, a câmara de explosão. Os motores de combustão interna são baseados no princípio de que os gases se expandem quando aquecidos. Controlando-se essa expansão dos gases, pode-se obter pressão, a qual será utilizada para movimentar algum órgão da maquina, tendo-se assim a transformação da energia calorífica do combustível em energia mecânica no órgão motor da maquina.

Estes motores podem trabalhar com combustíveis líquidos voláteis (óleos pesados, diesel, querosene, gasolina, álcool, benzol, etc.), ou com gases (butano, propano, metano, etc.).

Os de combustão interna são usados numa quantidade imensa de serviço. Assim, os motores a gasolina têm como característica principal baixo peso pôr

potência, a capacidade de fornecer acelerações rápidas e trabalhar com altas velocidades. Os motores a diesel são usados na propulsão de navios, locomotivas, tratores, grandes caminhões, automóveis, ônibus, lanchas e outros tipos de embarcações; enfim na propulsão de veículos pesados.

Os motores de combustão interna podem ser classificados como de ignição por centelha ou ignição por compressão. O motor por compressão é comumente chamado de motor diesel. O nome deriva do engenheiro francês Rudolf Diesel, que desenvolveu o primeiro motor no período de 1893 a 1898. O motor é composto de um mecanismo capaz de transformar os movimentos alternativos dos pistões em movimento rotativo da árvore de manivela, que transmite energia mecânica aos equipamentos acionados, como por exemplo, um gerador de corrente alternada (Meirelles, 2007).

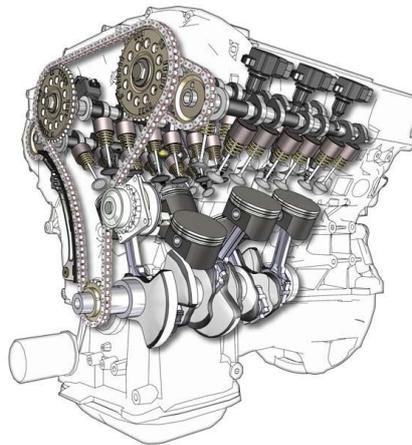


Figura 1. O Motor.

Fonte: Unijui (2005).

No diagrama de blocos de entradas e saídas, teríamos como entrada: o ar e combustível e o aporte de sistemas auxiliares precisados para o funcionamento como são os sistemas de lubrificação, refrigeração e energia elétrica; é no interior do motor, sistema de distribuição, mecanismos pistão –biela – manivela e como produto de saída final nós teríamos a energia mecânica utilizável, ainda teríamos como resíduos ou produtos da ineficiência os gases da combustão e calor cedido ao meio (Moreno, 2005).

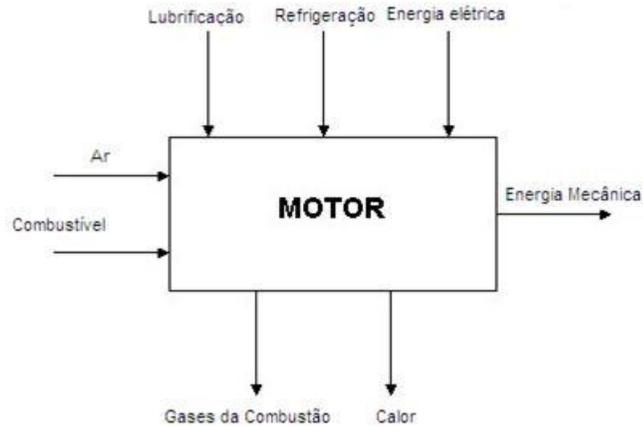


Figura 2. Diagrama de blocos de Entrada e Saída do motor.

Fonte: Moreno A. (2005).

Os motores de combustão podem ser classificados como de:

- **COMBUSTÃO EXTERNA:** no qual o fluido de trabalho está completamente separado da mistura ar/combustível, sendo o calor dos produtos da combustão transferido através das paredes de um reservatório ou caldeira.
- **COMBUSTÃO INTERNA,** no qual o fluido de trabalho consiste nos produtos da combustão da mistura de ar/combustível.

O esquema abaixo mostra a classificação dos motores de combustão interna, levando em conta:

- Pela Ignição de combustível por faísca (SI) e ignição por compressão (CI).
- Pelo ciclo operacional (dois tempos e quatro tempos).
- Pela relação entre oxigênio e combustível na ignição (ignição pobre e ignição rica).
- Pelo tipo de combustível (gás natural, álcool, óleo combustível, gasolina, óleo diesel, e dual combustível).
- Pelo método de adição de combustível (carburação ou injeção de combustível).
- Pela pressão de alimentação da mistura (naturalmente turbinado ou aspirado).

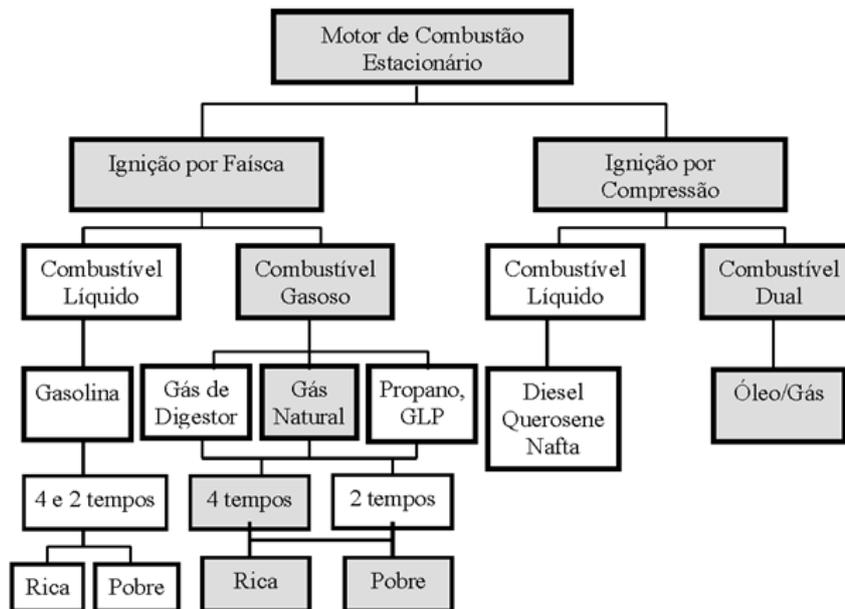


Figura 3. Classificação geral dos motores de combustão estacionários.

Fonte: Gonçalves (2006).

2.1.1.

Classificação dos Motores de Combustão Interna (MCI)

Segundo Ladeira (2005), os MCI podem ser classificados em:

a) Quanto à propriedade do gás na admissão:

- Ar (Diesel)
- Mistura ar-combustível (Otto)

b) Quanto à ignição

- Por centelha (ICE) [*spark ignition (SI)*]
- Por compressão (ICO) [*compression ignition (CI)*]

c) Quanto ao movimento do pistão

- Alternativo (Otto, Diesel).
- Rotativo (Wankel, Quasiturbine).

d) Quanto ao ciclo de trabalho

- 2 tempos
- 4 tempos.

e) Quanto ao número de cilindros

- Monocilíndricos.
- Policilíndricos.

f) Quanto à disposição dos cilindros

- Em linha à opostos (boxer).
- Em V à em estrela (radial).

g) Quanto à utilização

- **ESTACIONÁRIOS** - Destinados ao acionamento de máquinas estacionárias, tais como Geradores, máquinas de solda, bombas ou outras máquinas que operam em rotação constante;
- **INDUSTRIAIS** - Destinados ao acionamento de máquinas de construção civil, tais como: tratores, carregadeiras, guindastes, compressores de ar, máquinas de mineração, veículos de operação fora-de-estrada, acionamento de sistemas hidrostáticos e outras aplicações onde se exijam características especiais específicas do acionador;
- **VEICULARES** - Destinados ao acionamento de veículos de transporte em geral, tais como caminhões e ônibus;
- **MARÍTIMOS** - Destinados à propulsão de barcos e máquinas de uso naval. Conforme o tipo de serviço e o regime de trabalho da embarcação existem uma vasta gama de modelos com características apropriadas, conforme o uso. (Laser, trabalho comercial leve, pesado, médiocontínuo e contínuo).

2.2.**Princípio de Funcionamento**

Os motores do ciclo diesel são aqueles que aspiram ar, que após ser comprimido no interior dos cilindros, recebe o combustível sob pressão superior àquela em que o ar se encontra.

A combustão ocorre por auto-ignição quando o combustível entra em contato com o ar aquecido pela elevada pressão.

O combustível que é injetado ao final da compressão do ar é o óleo diesel, porém o motor pode rodar com outros combustíveis, inclusive o óleo vegetal *in natura* (Meirelles, 2007).

Em linhas gerais, o motor diesel funciona de maneira semelhante ao motor de explosão. No primeiro tempo o ar é aspirado, passando pela válvula de aspiração que está aberta entrando no cilindro. No segundo tempo, tendo fechado a válvula de aspiração, o ar, comprimido dentro do cilindro até a uma pressão de cerca de 500 psi, atinge temperatura da ordem de 649° C. Próximo do PMS é injetado óleo combustível no cilindro. Este óleo, misturando-se com o ar altamente aquecido entram em ignição e a expansão dos gases resultantes força o êmbolo a realizar o terceiro tempo do ciclo, a expansão. Pouco antes de o êmbolo atingir o PMI, a válvula de descarga abre e os gases começam a ser descarregados do interior do cilindro. Antes de o êmbolo atingir o PMS, a válvula de aspiração abre e o ar que entra no cilindro faz aquilo que em linguagem técnica se chama lavagem do cilindro, expulsando quase a totalidade dos gases de descarga que ainda permaneciam no interior do motor. Ao atingir o PMS e fechando-se a válvula de descarga, inicia-se nova aspiração e, portanto, novo ciclo. O motor que trabalha da maneira acima é de quatro tempos. Há motores que trabalham a dois tempos.

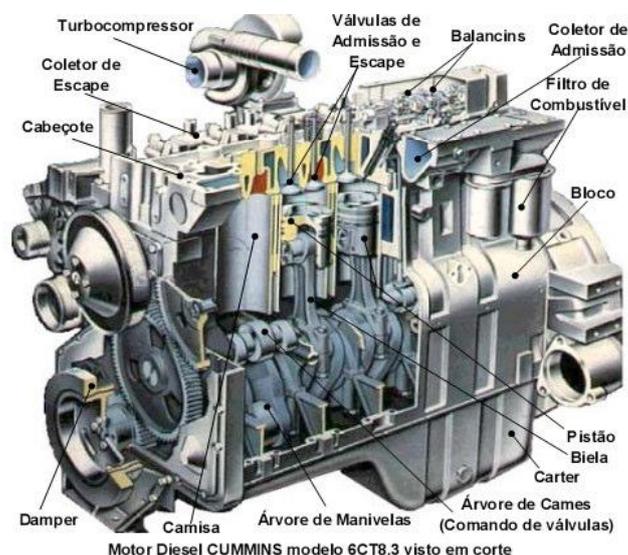


Figura 4. Motor de Combustão Interna.

Fonte: Meirelles (2007).

2.3.

Parâmetros do motor

- *Ponto Morto Superior* – Posição extrema do pistão na parte superior do cilindro. Caracteriza o mínimo volume do cilindro.

- *Ponto Morto Inferior* – Posição extrema do pistão na parte inferior do cilindro. Caracteriza o máximo volume do cilindro.
- *Curso do Êmbolo* – É a distância percorrida entre o ponto morto superior e o ponto morto inferior.
- *Tempo Motor* - É o deslocamento do êmbolo do Ponto Morto Superior ao Ponto Morto Inferior decorrente da combustão e expansão dos gases na combustão.
- *Volume de admissão* – É o volume compreendido entre o ponto motor superior e o ponto morto inferior.

$$\text{Volume de admissão} = \frac{\pi \cdot \text{diâmetro do cilindro}^2 \cdot \text{curso de pistão}}{\text{número de cilindros}}$$

- *Volume da Câmara de Combustão* – É o volume ocupado pela mistura combustível/ar quando o pistão encontra-se no Ponto Morto Superior.
- *Taxa de Compressão* – É a relação volumétrica no cilindro antes e depois da compressão.

$$\text{Taxa de compressão} = \frac{\text{Volume de admissão} + \text{Volume de câmara de combustão}}{\text{Volume da câmara de combustão}}$$

2.4.

Motor de quatro Tempos

O ciclo de trabalho de um motor de quatro tempos compreende duas voltas na árvore da manivela ou quatro cursos completos do êmbolo. Os cursos são: admissão, compressão, expansão e exaustão.

- 1) **Admissão:** Começa quando o êmbolo se encontra no ponto morto superior (PMS). Abre-se a válvula de admissão e o êmbolo baixa, permitindo a entrada de ar devido à sucção que o êmbolo provoca; quando o êmbolo chega ao ponto morto inferior (PMI), fecha-se a válvula de admissão. A árvore de manivelas girou meia volta.
- 2) **Compressão:** O êmbolo sobe até o ponto morto superior (PMS), enquanto as válvulas estão fechadas, comprimindo o ar na câmara de compressão. Pouco antes de o pistão completar o curso, ocorre a auto-ignição com a entrada do diesel. A árvore de manivelas completou uma volta.

- 3) **Expansão:** Com a auto-ignição, os gases começam a se expandir, produzindo uma alta pressão que atua sobre a cabeça do êmbolo, obrigando-o a baixar do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI). A árvore de manivelas girou uma volta e meia.
- 4) **Exaustão:** O êmbolo sobe do ponto morto inferior (PMI) e abre-se a válvula de escapamento, que permite a saída dos gases para o exterior, que são expulsos pelo êmbolo. Ao chegar o êmbolo no ponto morto superior (PMS), fecha-se a válvula de escapamento. A árvore de manivelas girou então duas voltas, completando um ciclo de trabalho.

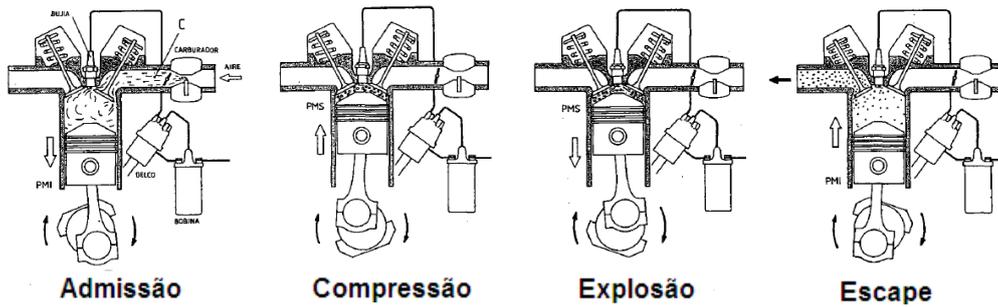


Figura 5. Esquema do funcionamento de um motor de quatro tempos do ciclo Otto.

Fonte: De Castro (1987).

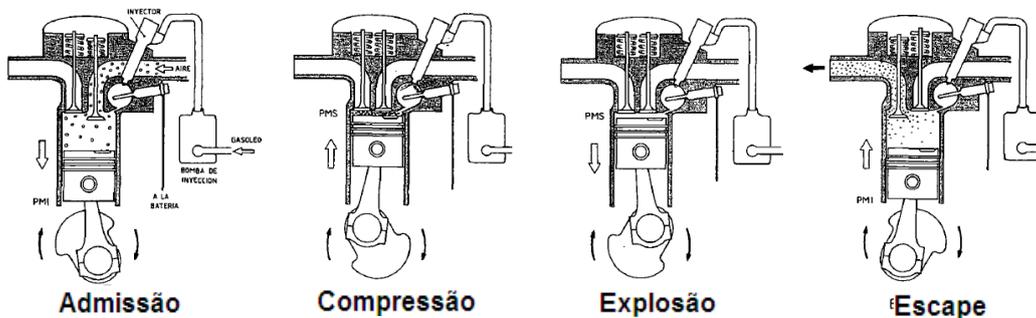


Figura 6. Funcionamento de um motor de quatro tempos do ciclo Diesel.

Fonte: De Castro (1987).

2.5. Ciclo teórico ideal de um motor Diesel

Segundo Meirelles (2007), em um motor diesel, o ar é comprimido com uma razão de compressão típica entre 15 e 20. Esta compressão eleva a temperatura do combustível para a sua temperatura de ignição. A ignição é dada com a injeção do combustível na câmara de combustão ao final da compressão do ar. O Ciclo padrão ar ideal é modelado com a admissão do ar seguido da compressão adiabática reversível, seguida do processo de fornecimento de calor a pressão constante. Em seguida ocorre uma expansão adiabática reversível e, por fim, uma retirada de calor isovolumétrica. Depois da retirada de calor, o processo é reiniciado.

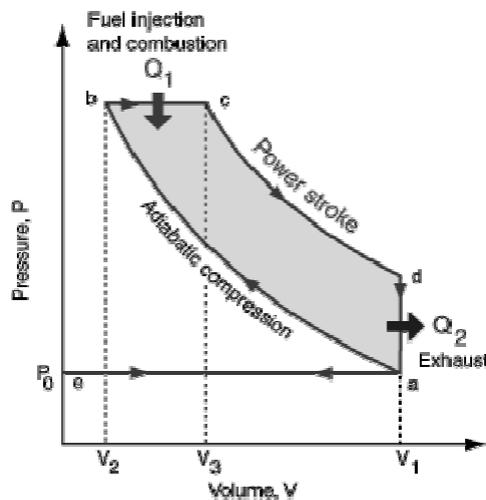


Figura 7. Ciclo teórico de motor diesel.

Fonte: Meirelles (2007).

Como a compressão e expansão teóricas do motor são adiabáticas, a eficiência pode ser calculada a pressão e volumes constantes. Com isso a eficiência é dada pelos calores na combustão e exaustão do motor de acordo com a equação.

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \quad (1)$$

Onde:

η = Eficiência Térmica.

Q_1 = Calor de combustão.

Q_2 = Calor de exaustão.

2.5.1. Ciclo Diesel real e teórico

Na tabela 1 é apresentada as diferenças entre o ciclo Diesel teórico e o real, referentes a perdas de calor, combustão e funcionamento das válvulas.

Tabela 1. Diferencia entre o Ciclo Diesel Real e Teórico.

	TEÓRICO	REAL
Perdas de Calor	Nulas	Apreciáveis
Combustão	Pressão Constante	Pressão varia durante o processo.
Tempo de abertura da válvula de escapamento.	A extração de calor se leva a cabo instantaneamente coincidindo com a posição do pistão no P.M.I.	A válvula de escapamento deve abrir-se antecipadamente para dar tempo a uma parte dos gases queimados, escapar antes de chegar ao P.M.I.

Fonte: Moreno A, et al (2005).

2.6. Motores de Ciclo Diesel, análise Termodinâmico

No ciclo padrão Diesel o calor é fornecido a pressão constante. Os motores que operam segundo estas características são denominados motores do ciclo Diesel ou motores de ignição por compressão WYLEN, et al (2003).

Um ciclo hipotético para o motor Diesel pode ser representado pelos diagramas p-v e T-s, ilustrados nas figuras 8a e 8b. LADEIRA C., M. et al (2005); WYLEN, et al (2003).

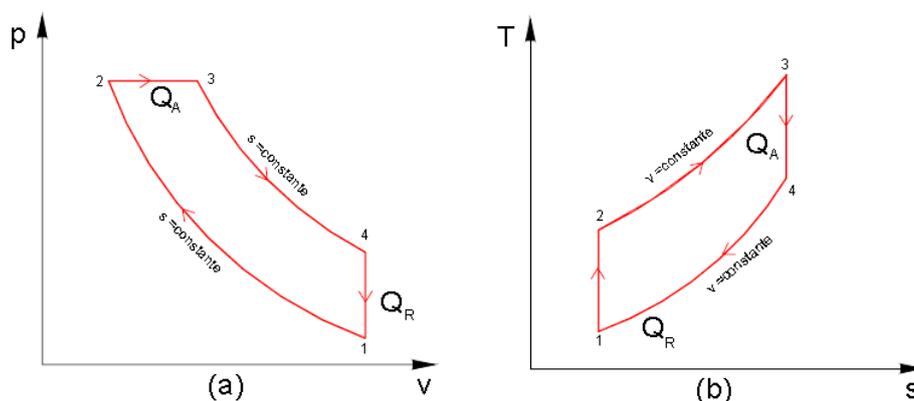


Figura 8. Ciclo padrão Ar – Diesel.

Fonte: Ladeira (2005).

- $1 \rightarrow 2$ – *Compressão Isentrópica*: compressão de volume $v_{1 \rightarrow 2}$ para v_2 . A pressão sobe de p_1 para p_2 consumindo um trabalho $w_{1 \rightarrow 2}$ sem que haja rejeição e calor. A temperatura sobe de T_1 para T_2 . No motor real corresponde à compressão do ar admitido. A Temperatura T_2 deve ser superior à de auto-ignição do diesel.
- $2 \rightarrow 3$ – *Adição do calor isobárica*: ocorre na pressão $p_{2 \rightarrow 3}$. Há uma expansão de v_2 para v_3 em conjunto com o fornecimento de calor Q_A que deve ser suficiente para manter a pressão constante. A temperatura sobe de T_2 para T_3 . Corresponde ao período de injeção de diesel e subsequente ignição e combustão da mistura ar-combustível.
- $3 \rightarrow 4$ – *Expansão Isentrópica*: expansão de v_3 a v_4 . Há uma queda de pressão de p_3 para p_4 e de temperatura de T_3 para T_4 . É realizado um trabalho $w_{3 \rightarrow 4}$ sem que haja fornecimento de calor. Corresponde à expansão dos gases de combustão.
- $4 \rightarrow 1$ – *Rejeição de calor Isocórica*: ocorre no volume $v_{1 \rightarrow 4}$. A pressão cai de p_4 para p_1 e a temperatura de T_4 para T_1 . Um calor Q_R é rejeitado. Corresponde aos processos de descarga dos gases de combustão e admissão da mistura fresca.

O rendimento térmico teórico para o motor de ciclo Diesel pode ser determinado por:

$$\eta_{Diesel} = \frac{Q_A - Q_R}{Q_A} = \frac{m \times C_v \times T_4 - T_1}{m \times C_p \times T_3 - T_2} \quad (2)$$

Re-arrumando, temos:

$$\eta_{Diesel} = 1 - \frac{1}{k \times r^{k-1}} \left(\frac{g^k - 1}{g - 1} \right) \quad (3)$$

Onde:

η_{Diesel} é o rendimento térmico teórico do motor Diesel.

k é a relação entre os calores específicos C_p/C_v

r é a taxa de compressão v_1/v_2

g é a taxa de expansão a pressão constante v_3/v_2

2.7. Motores de Ciclo Diesel–Gás Natural, análise Termodinâmico

A diferença fundamental entre o motor por compressão tradicional e o operando no modo diesel–gás está na quantidade de óleo diesel injetado. No motor operando da forma tradicional toda liberação de energia provém unicamente da combustão do óleo injetado no cilindro. Já no motor diesel–gás, grande parte da energia de combustão provém da queima do gás. Apenas uma pequena injeção de diesel se faz necessária para a ignição da mistura ar–gás natural (Wylen, 2003; Ladeira, 2005).

No motor operando no modo bicomcombustível (diesel–gás natural) um jato piloto de diesel inicia a combustão de uma mistura ar–gás natural previamente comprimida e aquecida. O processo inicialmente se comporta como no motor de ignição por compressão, com fornecimento de calor a pressão constante. Após o início da combustão da mistura o processo segue como no motor de ignição por centelha, com fornecimento de calor a volume constante.

Como o volume de diesel injetado é muito pequeno, em relação ao volume total da mistura ar–gás admitido, o motor se comporta essencialmente como no ciclo Otto. Uma análise do ciclo termodinâmico teórico para um motor dual permite estabelecer as tendências do seu comportamento.

Um ciclo hipotético para o motor Diesel pode ser representado pelos diagramas p-v e T-s, ilustrados nas figuras 9a e 9b. Com transformações parciais ocorrendo na seguinte ordem.

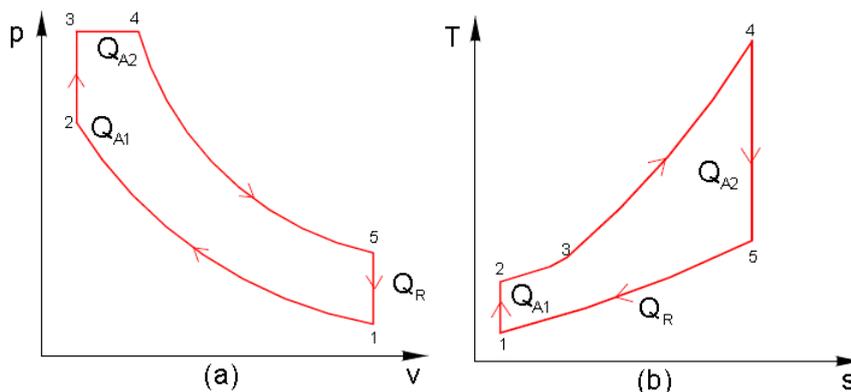


Figura 9. Ciclo padrão ar Dual Diesel–Gás Natural.

Fonte: Ladeira (2005).

- 1 → 2 – *Compressão Isentrópica*: compressão de volume $v_{1 \rightarrow 5}$ para v_2 . A pressão sobe de p_1 para p_2 , consumindo um trabalho $w_{1 \rightarrow 2}$ sem que haja rejeição e calor. A temperatura sobe de T_1 para T_2 . No motor real

corresponde à compressão da mistura ar-gás, até uma temperatura superior à de auto-ignição do diesel.

- $2 \rightarrow 3$ – *Adição de calor Isocórica*: ocorre no volume $v_{2 \rightarrow 3}$. A pressão sobe de p_2 para p_3 e a temperatura de T_2 para T_3 . É fornecido calor Q_{A1} . Corresponde ao período de injeção de diesel e subsequente ignição e combustão da mistura ar – gás natural – diesel.
- $3 \rightarrow 4$ – *Adição de calor Isobárica*: ocorre na pressão $p_{3 \rightarrow 4}$. Há uma expansão de v_3 para v_4 em conjunto com o fornecimento de calor Q_{A2} , que deve ser suficiente para manter a pressão constante. A temperatura sobe de T_3 para T_4 . Neste ponto todo o diesel do jato piloto já foi consumido e o processo segue como no motor de ignição por centelha, com a combustão da mistura ar-gás.
- $4 \rightarrow 5$ – *Expansão Isentrópica*: expansão de $v_{4 \rightarrow 3}$ a v_5 . Há uma queda de pressão de p_4 para p_5 e de temperatura de T_4 para T_5 . É realizando um trabalho $w_{4 \rightarrow 5}$ sem que haja fornecimento de calor. Corresponde à expansão dos gases de combustão.
- $5 \rightarrow 1$ – *Rejeição de calor Isocórica*: ocorre no volume $v_{1 \rightarrow 5}$. A pressão cai de p_5 para p_1 e a temperatura de T_5 para T_1 . Um calor Q_R é rejeitado. Corresponde aos processos de descarga dos gases de combustão e admissão da mistura fresca.

O rendimento térmico teórico para o motor dual pode ser determinado por:

$$\eta_{Dual} = \frac{Q_{A1} + Q_{A2} - Q_R}{Q_{A1} + Q_{A2}} = 1 - \frac{m \times C_v \times T_5 - T_1}{m \times C_p \times T_3 - T_2 + m \times C_v \times T_4 - T_3} \quad (4)$$

Re-arrumando as temperaturas e realizando as transformações, temos:

$$\eta_{Dual} = 1 - \frac{\frac{T_4}{T_3} \times \left(\frac{T_3}{T_2}\right)^k - 1}{\frac{T_2}{T_1} \times \left[k \left(\frac{T_3}{T_2}\right) - 1 + \frac{T_3}{T_2} \times \left(\frac{T_4}{T_3} - 1\right) \right]} \quad (5)$$

Como, $\frac{T_2}{T_1} = r^{k-1}$ e $\frac{T_3}{T_2} = \frac{v_3}{v_2} = \mathcal{G}$, definindo $\frac{T_4}{T_3} = \frac{p_4}{pT_3} = \xi$

Temos:

$$\eta_{Dual} = 1 - \left(\frac{1}{r^{k-1}} \right) \times \left(\frac{\xi \times \mathcal{G}^k - 1}{k \times \mathcal{G} - 1 + \mathcal{G} \times \xi - 1} \right) \quad (6)$$

Onde:

η_{Dual} é o rendimento térmico teórico do motor Dual.

k é a relação entre os calores específicos C_p/C_v

r é a taxa de compressão v_1/v_2

\mathcal{G} é a taxa de expansão a pressão constante v_3/v_2

ξ é o aumento da pressão a volume constante p_4/p_3

Analisando a figura podemos observar que quanto menor for à injeção do jato piloto de diesel, no tocante a massa e tempo de injeção, mais o ciclo com diesel-gás, se aproxima do ciclo Otto. O trecho 3 → 4 dos diagramas T-s e p-v, tende a diminuir com a redução do jato piloto. Verificamos que, com o estreitamento do trecho 2 → 3 o valor de \mathcal{G} (taxa de expansão a volume constante) tende a se aproximar da unidade, levando a expressão do rendimento térmico obtida na equação (11) a se aproximar da equação obtida no ciclo Otto.

Apesar de sabido que vários fatores influenciam no rendimento térmico, podemos realizar uma breve comparação entre os ciclos apresentados. Para tal é necessário fixar a base de análise. Por exemplo:

- Para mesma razão de compressão e admissão de calor, tem-se:

$$\eta_{Otto} > \eta_{Dual} > \eta_{Diesel}$$

- Para mesma pressão máxima e admissão de calor, tem-se:

$$\eta_{Diesel} > \eta_{Dual} > \eta_{Oto}$$

- Para mesma pressão máxima e trabalho máximo fornecido, tem-se:

$$\eta_{Diesel} > \eta_{Dual} > \eta_{Oto}$$

- Para mesma pressão máxima e temperatura máxima, tem-se:

$$\eta_{Diesel} > \eta_{Dual} > \eta_{Oto}$$