

**UNIVERSIDADE DO SAGRADO CORAÇÃO**

**VINÍCIUS BOMPEAN BARBOSA**

**CICLOS TERMODINÂMICOS EM MOTORES DE  
COMBUSTÃO INTERNA**

BAURU  
2014

**VINÍCIUS BOMPEAN BARBOSA**

**CICLOS TERMODINÂMICOS EM MOTORES DE  
COMBUSTÃO INTERNA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas da Universidade do Sagrado Coração, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, sob orientação do Prof. Dr. Herbert Duchatsch Johansen.

BAURU  
2014

Barbosa, Vinícius Bompean.

B238c

Ciclos termodinâmicos em motores de combustão interna  
/ Vinícius Bompean Barbosa. -- 2014.

50f. : il.

Orientador: Prof. Dr. Herbert Duchatsch Johansen.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em  
Engenharia Química) – Universidade do Sagrado Coração –  
Bauru – SP.

1. Ciclo termodinâmico. 2. Combustão interna. 3. Ciclo de  
Otto. 4. Ciclo de Diesel. 5. Ciclo de Brayton. I. Johansen,  
Herbert Duchatsch. II. Título.

**VINÍCIUS BOMPEAN BARBOSA**

**CICLOS TERMODINÂMICOS EM MOTORES DE COMBUSTÃO  
INTERNA**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Centro de Ciências Exatas e Sociais Aplicadas da Universidade do Sagrado Coração, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Química, sob orientação do Prof. Dr. Herbert Duchatsch Johansen.

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Herbert Duchatsch Johansen  
Universidade do Sagrado Coração

---

Profa. Dra. Beatriz Antoniassi Tavares  
Universidade do Sagrado Coração

---

Prof. Me. Alexander da Silva Maranhão  
Universidade do Sagrado Coração

Bauru, 15 de dezembro de 2014.

Aos meus pais, que sempre me apoiaram, acreditaram em mim e me incentivam a lutar pelos meus sonhos.

Ao meu amor, Marina Sugiura, por todo carinho a mim dedicado, por sempre estar ao meu lado me proporcionando felicidade.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao meu orientador, Prof. Dr. Herbert Duchatsch Johansen, pelo empenho dedicado ao meu trabalho, pelo auxílio prestado e pela oportunidade.

À Profa. Dra. Beatriz Antoniassi Tavares e ao Prof. Me. Dorival Roberto Rodrigues, que sempre me ajudaram ao longo da minha vida acadêmica sempre me agregando conhecimento.

Aos meus amigos do curso de Engenharia Química, os quais nesses anos todos tornaram o curso em algo totalmente prazeroso e empolgante.

À Universidade do Sagrado Coração, que oportunizaram a janela que hoje vislumbro, um horizonte superior, eivado pela acendrada confiança no mérito e ética aqui presentes.

À todos aqueles que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação.

Ao meu amor, Marina Sugiura, que me ajudou muito a manter a concentração, o foco, a calma e equilíbrio por todo momento aqui dedicado, incentivando a me esforçar para sempre dar o meu melhor.

“A imaginação é mais importante que a ciência, porque a ciência é limitada, ao passo que a imaginação abrange o mundo inteiro.”

Albert Einstein

## RESUMO

Os ciclos termodinâmicos em motores de combustão interna estão presentes no cotidiano, pois são mecanismos que geram força e trabalho em motores de qualquer veículo, seja ele uma moto, carro, caminhão ou até mesmo um avião. Existem dois tipos de motores de combustão, o de combustão externa e o de combustão interna. Neste trabalho serão discutidos apenas os motores de combustão interna e alguns de seus ciclos termodinâmicos, tais como, o ciclo de Otto, ciclo de Diesel, ciclo de Brayton e o ciclo de Carnot. Uma breve introdução aos fundamentos termodinâmicos é essencial para o entendimento deste assunto. O rendimento do trabalho de um motor de combustão interna é sempre maior que o rendimento dos motores de combustão externa, sendo assim, torna-o muito mais útil, robusto e aplicado aos veículos de transporte. Esses tipos de motores sofrem bastante influência dos combustíveis, pois cada um apresenta rendimento e desempenho para o motor desejado, sendo fundamental a escolha certa para cada tipo de motor.

**Palavras-chave:** Ciclo termodinâmico. Combustão interna. Ciclo de Otto. Ciclo de Diesel. Ciclo de Brayton. Ciclo de Carnot. Termodinâmica.

## ABSTRACT

The thermodynamic cycles in internal combustion engines are presents nowadays, because its mechanism of operation generates power and work in any vehicle like a motorcycle, car, truck or even an aeroplane. There are two types of combustion engines, it may be by external combustion one or the internal combustion one. In this work will be developed only for internal combustion engines, and some of their thermodynamic cycles, such as, Otto cycle, Diesel cycle, Brayton cycle and Carnot cycle. The efficiency of the work of an internal combustion engine is greater than the external combustion, therefore, makes it more useful in transport. A brief introduction to the thermodynamic fundamentals is essential to understanding this theme. These type of engines have some fuel influence, because each one presents an efficiency and performance to the desired engine, fundamental for the right choice for each engine's type.

**Keywords:** Thermodynamic cycle. Internal combustion. Otto cycle. Diesel cycle. Brayton cycle. Carnot cycle. Thermodynamics.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Vizinhança e sistema. ....	16
Figura 2 – Sistemas aberto, fechado e isolado. ....	17
Figura 3 – Nomenclaturas dentro de um motor. ....	22
Figura 4 – Ciclo Otto, Admissão (pressão isobárica). ....	23
Figura 5 – Ciclo Otto, Compressão (pressão adiabática). ....	24
Figura 6 – Ciclo Otto, Expansão (pressão adiabática). ....	25
Figura 7 – Ciclo Otto, Escape (pressão isobárica). ....	26
Figura 8 – Diagramas p-v e T-S do ciclo de Otto de ar padrão. ....	26
Figura 9 – Ciclo Diesel, Admissão (pressão isobárica). ....	30
Figura 10 – Ciclo Diesel, Compressão (pressão adiabática). ....	31
Figura 11 – Ciclo Diesel, Expansão (pressão adiabática). ....	32
Figura 12 – Ciclo Diesel, Escape (pressão isobárica). ....	33
Figura 13 – Diagramas p-v e T-S do ciclo de Diesel de ar padrão. ....	33
Figura 14 – Ciclo de Brayton, turbina a gás. ....	35
Figura 15 – Ciclo de Brayton de ar padrão com turbina a gás. ....	36
Figura 16 – Ciclo ideal para um motor de turbina a gás. Ciclo de Brayton. ....	36
Figura 17 – Ciclo de Carnot de motor a vapor. ....	39
Figura 18 – Comparativo dos ciclos termodinâmicos de motores de combustão interna. ....	41

## LISTA DE SÍMBOLOS

ANP	Agência Nacional do Petróleo
PMS	Ponto morto superior
PMI	Ponto morto inferior
C	Carbono
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Etileno (eteno)
C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	Etanol
C <sub>12</sub> H <sub>26</sub>	Dodecano (óleo diesel leve)
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	Etileno
CO	Monóxido de carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono
CH <sub>4</sub>	Metano
H <sub>2</sub>	Hidrogênio
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de hidrogênio
H <sub>x</sub> C <sub>y</sub>	Hidrocarbonetos
NO <sub>x</sub>	Óxido de Nitrogênio
SO <sub>x</sub>	Óxido de Enxofre
SO <sub>2</sub>	Dióxido e enxofre
SO <sub>3</sub>	Trióxido de enxofre (ou óxido sulfúrico)
O <sub>2</sub>	Oxigênio
N <sub>2</sub>	Nitrogênio
H <sub>2</sub> O	Água
atm	Pressão atmosférica
<i>C<sub>p</sub></i>	Capacidade calorífica à pressão constante
<i>C<sub>v</sub></i>	Capacidade calorífica à volume constante
GLP	Gás Liquefeito de Petróleo
GNV	Gás Natural Veicular
<i>H</i>	Entalpia
$\Delta H$	Varição de entalpia ou calor latente de transição de fase
<i>k</i>	Representação genérica de qualquer propriedade termodinâmica exceto P e T
Kg	Kilograma
<i>ln</i>	Logaritmo natural

$m$	Massa
$m^3$	Metro cubico
$mg$	Miligrama
$\eta$	Eficiência térmica
$P$	Pressão
$Q$	Calor
$Q_f$	Calor de um reservatório frio
$Q_q$	Calor de um reservatório quente
$r$	Razão de compressão
$S$	Entropia
$\Delta S$	Variação de entropia
$T$	Temperatura
$T_f$	Temperatura de um reservatório frio
$T_q$	Temperatura de um reservatório quente
$U$	Energia interna
$V$	Volume
$V_r$	Razão entre o volume máximo e o volume mínimo verificados durante o ciclo do interior do cilindro
$W$	Trabalho

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	13
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	14
2.1	GERAL .....	14
2.2	ESPECÍFICOS .....	14
<b>3</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	15
3.1	TERMODINÂMICA .....	15
3.1.1	PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA .....	15
3.1.2	SEGUNDA LEI DA TERMODINÂMICA .....	18
3.2	EFICIÊNCIA TÉRMICA .....	19
3.3	MÁQUINAS TÉRMICAS .....	19
<b>4</b>	<b>DESENVOLVIMENTO</b> .....	21
4.1	MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA .....	21
4.2	CICLOS TERMODINÂMICOS .....	21
4.2.1	CICLO DE OTTO .....	22
4.2.2	CICLO DE DIESEL .....	29
4.2.3	CICLO BRAYTON .....	35
4.2.4	CICLO DE CARNOT .....	38
4.3	COMPARATIVO DOS CICLOS TERMODINÂMICOS DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA .....	40
4.4	INFLUÊNCIA DOS COMBUSTÍVEIS .....	41
4.4.1	GASOLINA .....	42
4.4.2	ETANOL .....	43
4.4.3	DIESEL .....	44
4.4.4	GÁS NATURAL VEICULAR (GNV) .....	45
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b> .....	47
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	49

## **PREFÁCIO**

Este trabalho baseia-se em pesquisas que comparam os principais tipos de ciclos termodinâmicos de motores de combustão interna, mostrando as funcionalidades de cada caso.

Os motores estão presentes na vida de todos, em diversos aspectos, desde os primórdios até os dias atuais. Sua participação é forte tanto na vida cotidiana com os automóveis, os ônibus, os caminhões, assim como no âmbito industrial e até mesmo na aviação. Em todos os âmbitos são utilizados os mesmos princípios de operação de motores de combustão interna, de 150 anos atrás. Esta versatilidade, de ser capaz de aplicar este tipo de motor nas mais diferentes áreas e para as mais diferentes finalidades, enfatiza a importância dos motores para a humanidade. A leitura deste presente Trabalho de Conclusão de Curso permite um maior entendimento dos conceitos tradicionais, básicos e ao mesmo tempo usuais, especificamente dos motores de combustão interna.

É de extrema importância abordar conceitos teóricos (formalismo) sobre os principais assuntos que fazem parte do processo, pois além de auxiliar no entendimento do leitor, enriquece o trabalho, dando um suporte conceitual de autores consagrados.

## 1 INTRODUÇÃO

Segundo Taylor (1988), existem dois tipos de motores de combustão, o de combustão externa e o de combustão interna: a combustão externa é resultado da transferência de calor através das paredes de um reservatório ou caldeira, porém de maneira a permitir que o fluido de trabalho esteja completamente separado da mistura combustível-ar. Já na combustão interna, este fluido é diretamente o produto da reação de combustão da mistura combustível-ar.

Neste presente trabalho será abordado somente os ciclos dos motores de combustão interna, que por sua vez, é o tipo de motor mais usado atualmente nos veículos terrestres, marítimos e aéreos.

Para maior entendimento do leitor, será explicado os princípios essenciais da termodinâmica para compreensão dos motores de combustão interna, a fim de fazer uma comparação entre eles ao final do trabalho.

O trabalho está subdividido em Revisão Bibliográfica, a qual trata dos princípios fundamentais da Termodinâmica, explicando o que é Termodinâmica, importância da Primeira e Segunda Leis da Termodinâmica, descreve também a Eficiência Térmica e sobre Máquinas Térmicas. Na sequência, em Desenvolvimento, adentra, especificamente, no funcionamento dos motores, explicado pelo tópico Motor de Combustão Interna, e seus ciclos em Ciclos Termodinâmicos que estão divididos em sub-tópicos: Ciclo de Otto, Ciclo de Diesel, Ciclo Brayton e Ciclo de Carnot. Por fim, são apresentadas as Influências dos combustíveis diretamente envolvidos neste estudo, seguido pelas Considerações Finais e Referências, nas quais o presente estudo está fundamentado.

## 2 OBJETIVOS

Este trabalho de conclusão de curso tem os seguintes objetivos:

### 2.1 GERAL

- Abordar o funcionamento dos ciclos termodinâmicos dos motores de combustão interna, bem como compará-los.

### 2.2 ESPECÍFICOS

- a) explicar o funcionamento básico de um motor;
- b) explicar o funcionamento do ciclo de cada tipo de motor de combustão interna, tais como: ciclo de Otto, ciclo de Diesel, ciclo Brayton;
- c) comparar os tipos de motores abordados neste trabalho;
- d) apresentar a influência dos combustíveis na geração de potência em motores de combustão interna.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

É de extrema importância abordar conceitos teóricos básicos sobre os principais assuntos que fazem parte do processo de combustão interna, auxiliando o entendimento do leitor.

#### 3.1 TERMODINÂMICA

Sabe-se a relevância da Termodinâmica, pois ela está presente em quase todos os sistemas que é utilizado no dia a dia de cada um. Segundo Moran et al. (2005) a palavra termodinâmica possui a sua origem grega, *termo* (calor) e *dinâmica* (força) e seus estudos tiveram início desde os primórdios do século XIX, considerando a capacidade de corpos quentes produzirem trabalho (uma forma organizada de energia).

É necessário compreender sobre as Leis da Termodinâmica para se ter um entendimento mais completo sobre o assunto. De acordo com Smith, Van Ness e Abbott (2007), a termodinâmica resume-se em transformações de energias, e que tais Leis descrevem os limites que podem ser observados em decorrência destas transformações.

##### 3.1.1 Primeira Lei da Termodinâmica

Koretsky (2007) explica que a Primeira Lei da Termodinâmica é a mudança de uma forma de energia para outra, pela expressão, "*a quantidade total de energia interna (U) no universo é constante*". Através da dedução matemática, Equação 1:

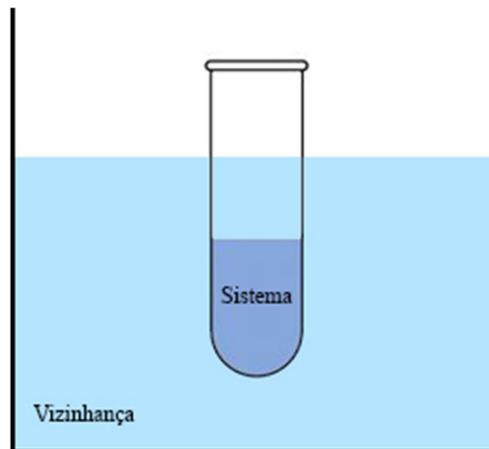
$$\Delta U_{universo} = 0 \quad (1)$$

Entretanto, o autor afirma que não é conveniente usar o universo inteiro sempre que for calcular, por isso divide-se este universo por regiões, chamadas de sistemas, e os arredores como vizinhança (Equação 2).

$$\Delta U(\text{energia do sistema}) + \Delta U(\text{energia da vizinhança}) = 0 \quad (2)$$

De acordo com Atkins (2001), o sistema pode ser entendido como parte do universo interessado e a vizinhança como onde são feitas as observações (Figura 1).

Figura 1 – Vizinhança e sistema.



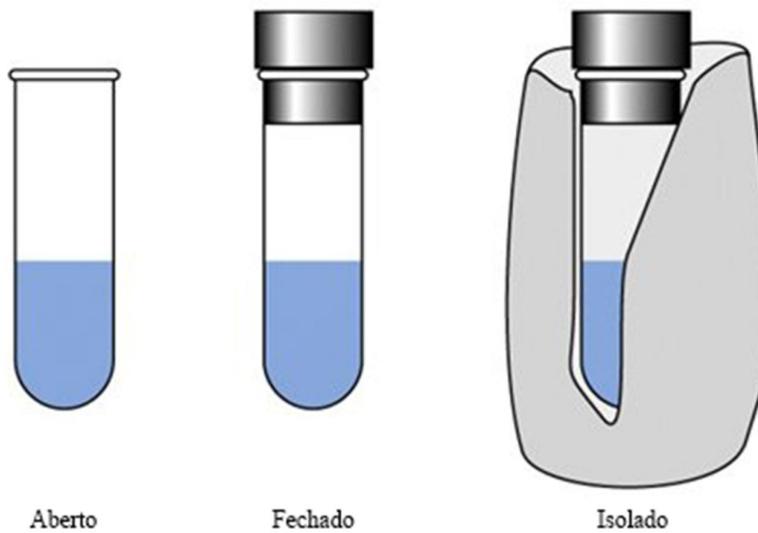
Fonte: Aparicio (2009).

Nota: Adaptado pelo autor.

A vizinhança pode ser imaginada como um imenso banho de água que permanece a temperatura constante independente da energia que flui para dentro ou para fora dela, concluindo-se assim, que independente do sistema sofrer uma expansão, a vizinhança manterá o mesmo volume.

Ainda segundo Atkins (2001), é preciso distinguir três tipos de sistema. O sistema aberto pode trocar energia e massa com as vizinhanças. Já o sistema fechado pode trocar energia, mas não a massa. Finalmente o sistema isolado não pode trocar nem massa e nem energia com a sua vizinhança, ou seja, é impermeável. Como exemplo, o autor cita que o sistema aberto é como um frasco sem tampa, ou seja, algumas substâncias podem ser inseridas em seu sistema. Pode ser comparado também à uma célula biológica, pois os nutrientes e os resíduos podem passar pelas paredes da célula. No caso do sistema fechado, é como um frasco tampado, pois há troca de energia pelas paredes por serem capazes de conduzirem calor através delas. O sistema isolado por ser imaginado como um frasco tampado e isolado térmica, mecânica e eletricamente da vizinhança (Figura 2).

Figura 2 – Sistemas aberto, fechado e isolado.



Fonte: Aparicio (2009).  
Nota: Adaptado pelo autor.

Segundo Smith, Van Ness e Abbott (2007) e Perry e Chilton (1980), a troca de energia de um sistema fechado para a vizinhança são realizadas com calor e trabalho com sinais opostos em relação à energia do sistema. Desta forma pode-se resumir a Equação 2 pelas Equações 3 e conseqüentemente Equação 4:

$$\Delta U(\text{energia da vizinhança}) = -Q - W \quad (3)$$

Logo,

$$\Delta U(\text{energia do sistema}) = Q + W \quad (4)$$

Esta é a equação da Primeira Lei da Termodinâmica, que resume-se na aplicação do princípio de conservação da energia aos sistemas que podem trocar energia com a vizinhança por calor ( $Q$ ) e por trabalho ( $W$ ).

Quando  $W < 0$ , o sistema se expande e perde energia para a vizinhança.

Já quando  $W > 0$ , o sistema se contrai e recebe energia da vizinhança.

Enquanto  $Q > 0$ , quando a energia passa da vizinhança para o sistema.

Contudo  $Q < 0$ , quando a energia passa do sistema para a vizinhança.

Atkins (2001) explica que o trabalho é a transferência de energia (organizada) que pode gerar um movimento contra a força oposta a esse movimento. O calor, por

sua vez, é a transferência de energia (desorganizada) devido a uma diferença de temperatura entre as vizinhanças e o sistema. Quando nas paredes de um sistema não passa calor, este processo é chamado de adiabático ( $Q = 0$ ). Já o contrário, quando há transferência de calor, conhecemos como diatérmicos ( $Q \neq 0$ ).

### 3.1.2 Segunda Lei da Termodinâmica

Na obra de Smith, Van Ness e Abbott (2007), é introduzida a Segunda Lei da Termodinâmica como a relação entre as diferenças de duas formas de energia, o calor e o trabalho. Essas duas energias são incluídas como termos aditivos em balanço de energia, sendo que uma unidade de calor é equivalente à mesma unidade de trabalho. Porém, na prática isso não acontece, havendo uma diferença de qualidade entre o calor e o trabalho, que será demonstrada a seguir.

Todo trabalho pode ser facilmente convertido em outros tipos e formas de energia. Por exemplo, pela elevação de um peso (energia potencial), pela aceleração de uma massa (energia cinética), pela operação de um gerador (energia elétrica), entre outros. Esses tipos de processos podem até alcançar aproximadamente uma eficiência de conversão de 100%, quando é eliminado o atrito presente (deixando de dissipar calor), explica Smith, Van Ness e Abbott (2007). Ainda os mesmos autores citam que mesmo com os esforços para realizar um processo com conversão contínua de calor (sem dissipação) em trabalho falham, quaisquer que sejam os melhoramentos, suas eficiências de conversão não ultrapassam 40%.

Obert (1971) completa que não importa o quão perfeita ou caprichosa seja a construção de uma máquina, será impossível converter completamente todo o calor em trabalho. Segundo Planck (1903 apud OBERT, 1971, p. 67, grifo do autor), um dos diversos enunciados da Segunda Lei da Termodinâmica diz: "*É impossível construir um motor que trabalhe num ciclo completo e não produza outro efeito do que elevar um peso e resfriar um reservatório térmico*". Em outras palavras significa que, por mais que a máquina seja eficiente, sempre haverá uma perda de calor significativa no processo.

Smith, Van Ness e Abbott (2007) explicam que a Segunda Lei da Termodinâmica não proíbe que seja produzido trabalho a partir de calor, no entanto estabelece que existe um limite na quantidade de calor que pode ser convertida em

trabalho neste processo. Existem exceções, em alguns casos específicos, naqueles casos em que não se trata da conversão direta de calor em trabalho, como é o caso da geração de energia em usinas hidroelétricas e eólicas, onde a conversão parcial de trabalho é suficiente para produção de energia.

Para quantificar a Segunda Lei da Termodinâmica, é preciso prever uma propriedade termodinâmica conhecida como entropia ( $S$ ). Segundo Koretsky (2007), assim como energia interna, a entropia é uma função de estado que permite quantificar uma lei da natureza.

### 3.2 EFICIÊNCIA TÉRMICA

Em Obert (1971), é possível compreender que a eficiência térmica ( $\eta$ ) de um ciclo está relacionada com a rejeição de calor, e o trabalho realizado é sempre menor que o calor fornecido. A definição da eficiência térmica é a fração do calor fornecido a um ciclo termodinâmico convertido em trabalho expressa pela Equação 5, o qual  $W$  é trabalho realizado e  $Q$  é o calor rejeitado.

$$\eta = \sum \frac{W}{Q_a} \quad (5)$$

Os motores de combustão interna têm a energia química dos combustíveis como fonte de energia, e dá para avaliar sua eficiência como mostra a Equação 6.

$$\eta = \frac{\text{trabalho produzido}}{\text{valor calorífico do combustível}} \quad (6)$$

### 3.3 MÁQUINAS TÉRMICAS

Máquinas térmicas produzem trabalho a partir do calor de um processo cíclico, explica Smith, Van Ness e Abbott (2007), e a Segunda Lei da Termodinâmica é baseada numa visão macroscópica das propriedades do comportamento das moléculas produzidas a partir dessas máquinas térmicas. O autor ainda ressalta que os processos da absorção de calor pelo sistema em elevadas temperaturas e a

rejeição de calor para a vizinhança em baixas temperaturas, são fundamentais para produção de trabalho, e estes processos estão necessariamente em todos os ciclos de máquinas térmicas. Nessa operação, o calor  $|Q_q|$  é absorvido de um reservatório quente pelo fluido de trabalho de uma máquina térmica, que produz uma quantidade de trabalho  $|W|$ , joga fora o calor  $|Q_f|$  para um reservatório frio, e volta ao seu estado inicial. Com isso, a Primeira Lei da Termodinâmica se resume a Equação 7:

$$|W| = |Q_q| - |Q_f| \quad (7)$$

Substituindo com a Equação 6, a eficiência térmica da máquina fica como (Equação 8):

$$\eta = \frac{|W|}{|Q_q|} = \frac{|Q_q| - |Q_f|}{|Q_q|} = 1 - \frac{|Q_f|}{|Q_q|} \quad (8)$$

Smith, Van Ness e Abbott (2007) dizem que para  $\eta$  ser unitária, com eficiência térmica de 100%,  $|Q_f|$  tem que ser igual a zero. Atualmente, ainda não foi possível construir uma máquina térmica que se aproxime desse resultado, pois o calor sempre é descartado para o reservatório frio. A eficiência térmica de uma máquina térmica depende do nível de reversibilidade de suas operações. Foi então idealizado por um engenheiro francês, Nicolas Leonard Sadi Carnot, uma máquina ideal para que seja possível a reversibilidade, o qual será tratado mais para frente no item 4.2.4, especificamente, o Ciclo de Carnot.

## 4 DESENVOLVIMENTO

A seguir serão apresentados os funcionamentos dos ciclos termodinâmicos em motores de combustão interna.

### 4.1 MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA

Obert (1971), em sua literatura introduz que os motores de combustão interna começaram a ser utilizados no século XVIII, substituindo as máquinas à vapor e de combustão externa. Desde então sua utilidade veio se expandindo. O progresso do mundo trouxe este tipo de motor para indústrias automobilísticas, marítimas, aeronáuticas, e outros tipos de indústria em geral.

Nas máquinas de combustão externa os produtos de sua combustão (mistura ar-combustível) transmitem calor a um outro fluido que por sua vez produz o trabalho. Já nas máquinas de combustão interna, os produtos de sua combustão são os mesmos que produzem o trabalho. O motor com combustão interna tem um rendimento do trabalho maior que o motor de combustão externa, e conseqüentemente por ocorrer tudo nele, torna-o a mais leve máquina motriz, segundo Obert (1971), justificando sua enorme utilização nos diversos tipos de transporte.

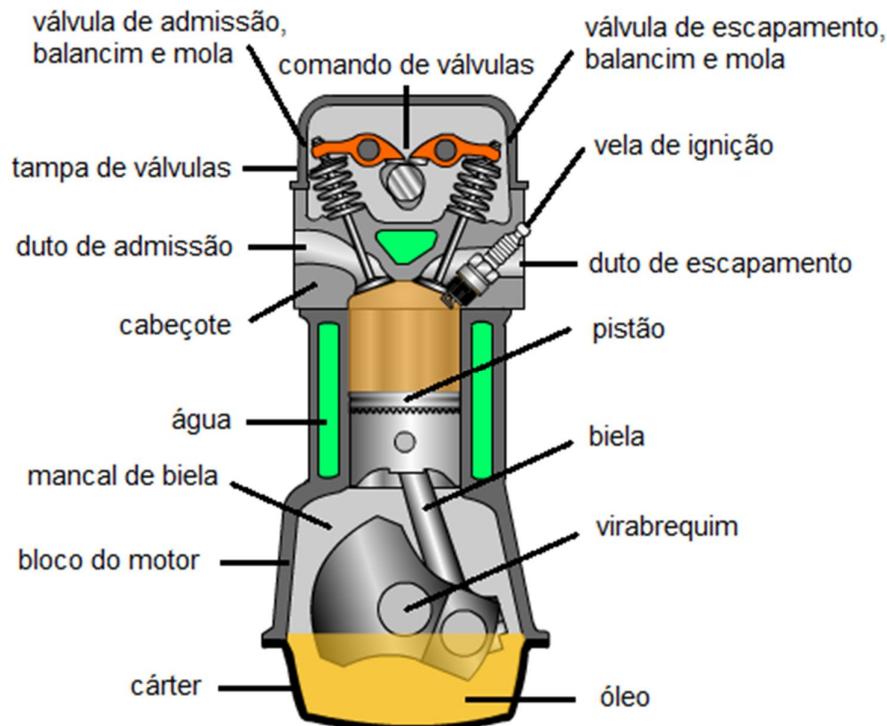
### 4.2 CICLOS TERMODINÂMICOS

Um ciclo termodinâmico ocorre quando o fluido que executa o trabalho sofre uma série de processos e que este fluido é retornado em seu estado inicial. Em outras palavras, a variação dessas grandezas termodinâmicas de seu sistema sejam nulas. A Primeira Lei da Termodinâmica é um fator marcante nos ciclos termodinâmicos, o qual diz que a soma de calor e trabalho recebidos pelo sistema, deve ser igual à soma de calor e trabalho realizados pelo sistema, de acordo com Obert (1971).

### 4.2.1 Ciclo de Otto

Primeiramente devem ser apresentados os nomes das principais peças presentes dentro do cilindro de um motor de 4 tempos (Figura 3).

Figura 3 – Nomenclaturas dentro de um motor.



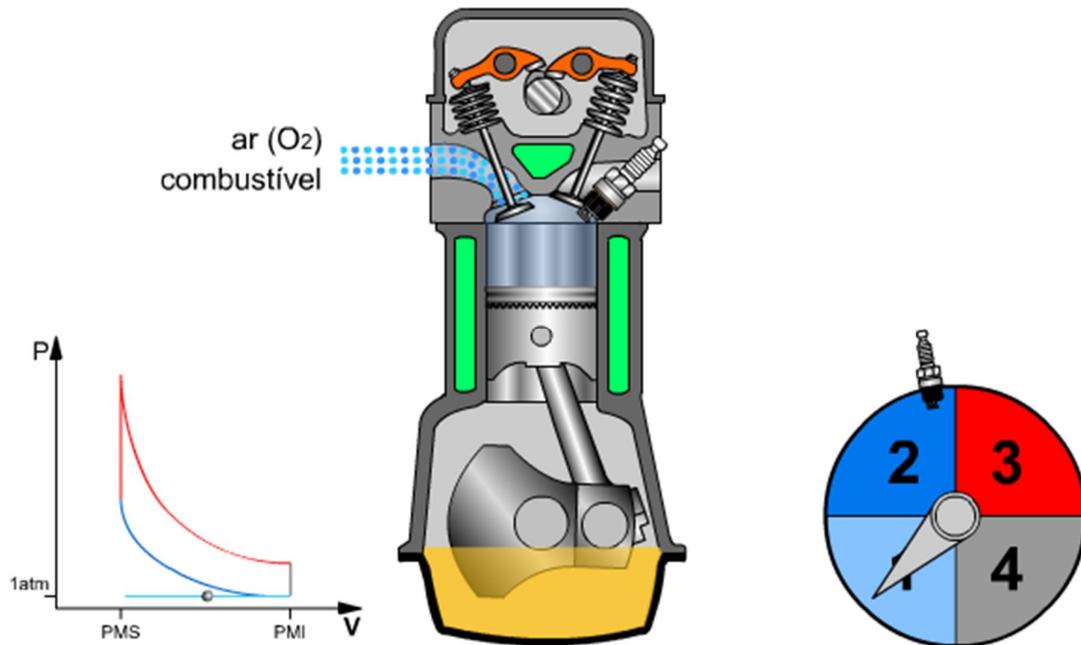
Fonte: Stefanelli ([2012?]).  
Nota: Adaptado pelo autor.

Moran et al. (2005), Smith, Van Ness e Abbott (2007), Obert (1971) e Stefanelli (2014), explicam o funcionamento separadamente dos diversos sistemas de um motor de combustão interna com ignição à centelha do Ciclo de Otto. Um diagrama ao lado esquerdo de cada figura informa o gráfico de Pressão x Volume aproximados da curva do Ciclo de Otto teórico de quatro tempos como demonstrado na Figura 4.

No primeiro tempo, com o pistão (êmbolo) no ponto morto superior, o comando de válvulas abre a válvula de admissão, e a inércia do virabrequim (eixo de manivelas) movimenta a biela que move o pistão para baixo, ao caminho do ponto morto inferior. Esse movimento reduz a pressão interna do cilindro e o vácuo é

criado, aspirando a mistura ar-combustível sem quase alterar sua pressão, ficando próxima à pressão atmosférica (Figura 4).

Figura 4 – Ciclo Otto, Admissão (pressão isobárica).

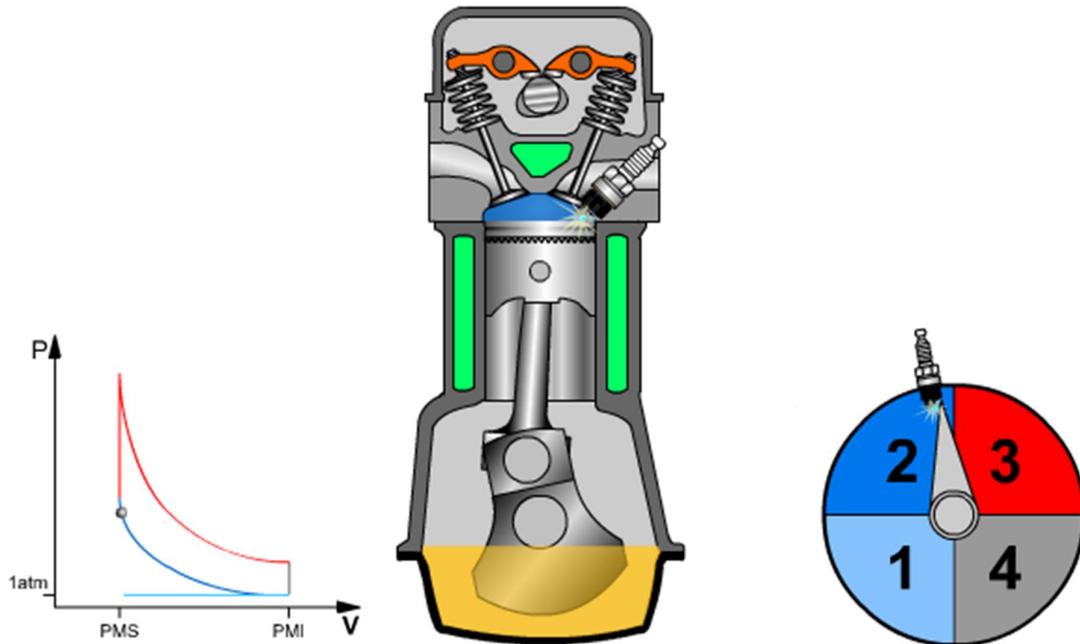


Fonte: Stefanelli ([2012?]).  
Nota: Adaptado pelo autor.

Já no segundo tempo (Figura 5), com as válvulas de admissão fechada, o virabrequim continua girando e empurra o pistão para cima, ponto morto superior, comprimindo assim a mistura ar-combustível na câmara interna de combustão, sem haver troca de energia térmica com o meio. Antes mesmo do pistão atingir o ponto morto superior, é acionada uma fagulha pela ignição, e a mesma se inflama com a mistura ar-combustível. A pressão interna aumenta aproximadamente conforme equação geral dos gases, Equação 9.

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2} \quad (9)$$

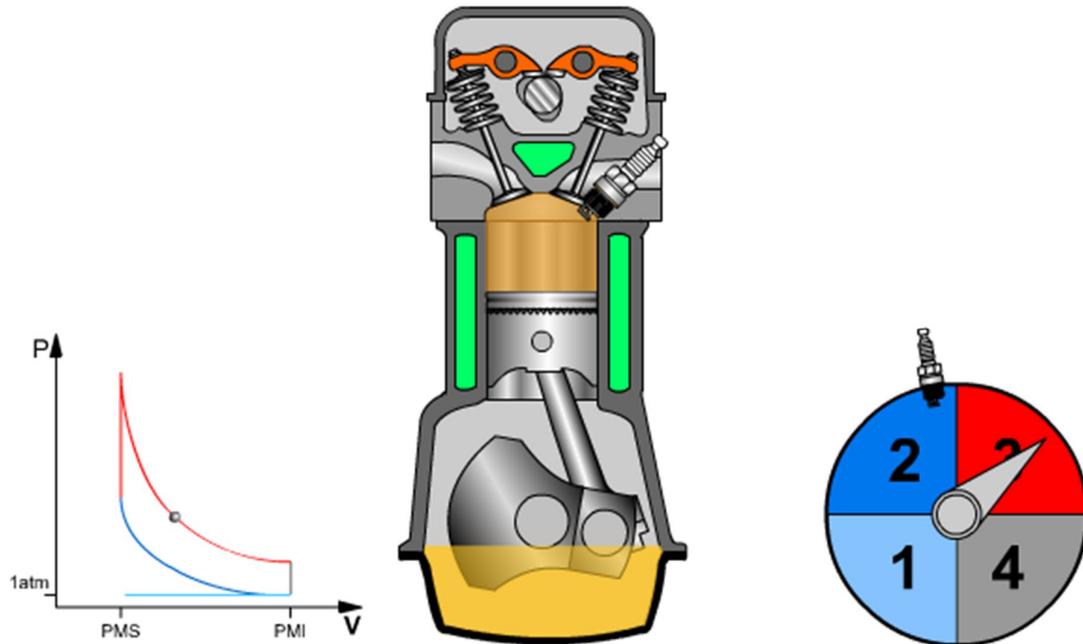
Figura 5 – Ciclo Otto, Compressão (pressão adiabática).



Fonte: Stefanelli ([2012?]).  
Nota: Adaptado pelo autor.

No terceiro tempo, a rápida e intensa combustão é gerada pela fagulha e libera uma explosão, que aumenta instantaneamente a pressão e a temperatura interna da câmara de combustão. Essa explosão movimenta o pistão para o ponto morto inferior rapidamente forçando um giro do virabrequim, que por sua vez gera potência num único tempo do ciclo (Figura 6).

Figura 6 – Ciclo Otto, Expansão (pressão adiabática).

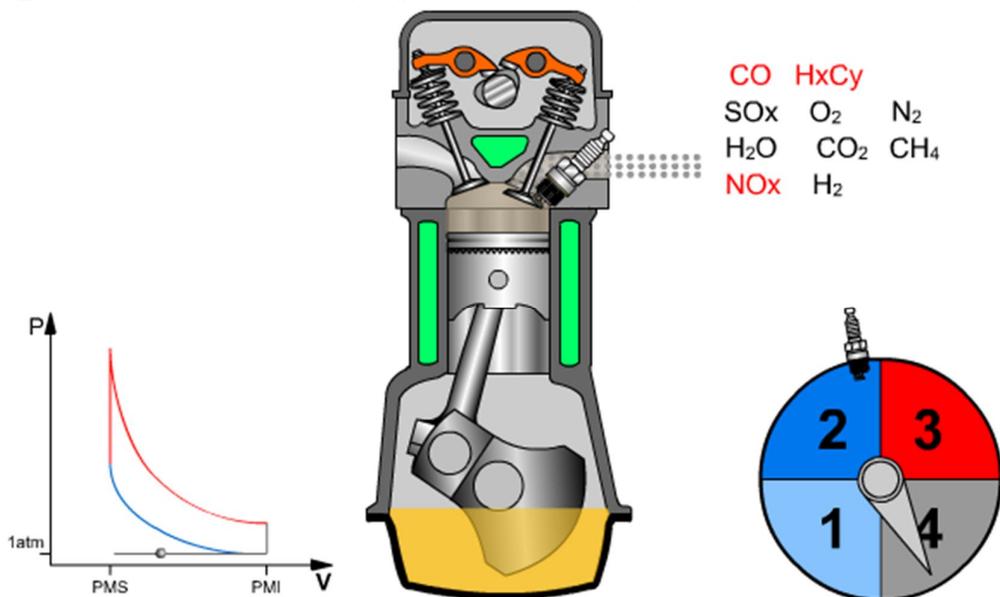


Fonte: Stefanelli ([2012?]).  
Nota: Adaptado pelo autor.

Em seu último tempo do ciclo, o pistão está no ponto morto inferior, e a válvula de escape abre. O pistão é movimentado pela inércia do virabrequim para cima, retomando seu caminho ao ponto morto superior, expulsando todos os gases gerados pela queima da combustão do cilindro. Sua pressão interna cai para próximo da pressão atmosférica. Próximo ao ponto morto superior a válvula de admissão começa a se abrir, a diferença de temperatura e densidade entre os gases da admissão e do escape, e a inércia dos gases, levam o resquício dos gases ( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{SO}_x$ , entre outros) queimados para o duto de escapamento e a válvula de escape se fecha, se preparando para o reinício do ciclo de quatro tempos. (Figura 7).

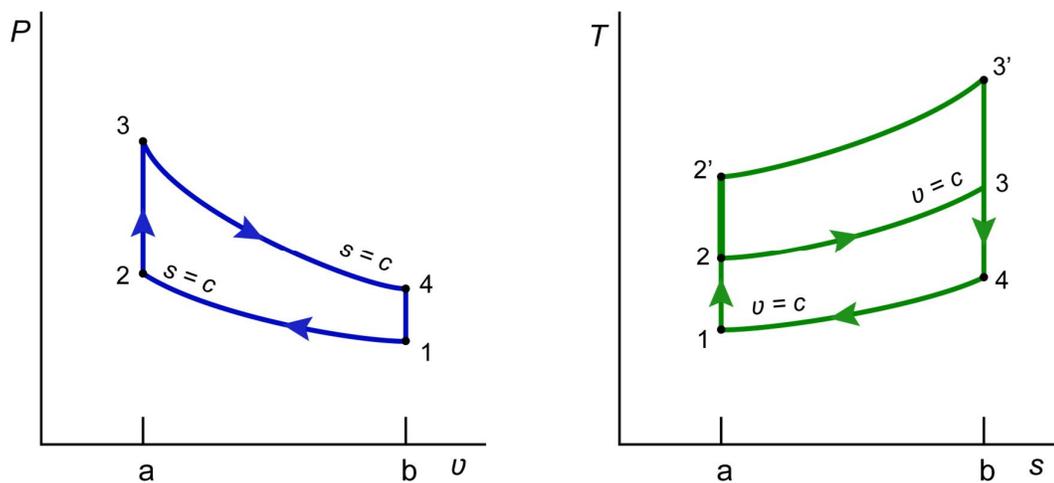
Moran et al. (2005) em seus estudos diz que o Ciclo de Otto consiste em dois processos onde há trabalho, sem haver transferência de calor, os processos 1-2 e 3-4. Existem também neste ciclo outros dois processos, nos quais existe transferência de calor, contudo sem haver trabalho, que são os processos 2-3 e 4-1 (Figura 8). Essas transferências de energias são obtidas pela simplificação do balanço de energia para sistemas fechados, ignorando-se as variações de energia cinética e potencial (Equação 10).

Figura 7 – Ciclo Otto, Escape (pressão isobárica).



Fonte: Stefanelli ([2012?]).  
Nota: Adaptado pelo autor.

Figura 8 – Diagramas p-v e T-S do ciclo de Otto de ar padrão.



Fonte: Moran et al. (2005, p. 218).  
Nota: Adaptado pelo autor.

$$\frac{W_{12}}{m} = u_2 - u_1, \quad \frac{W_{34}}{m} = u_3 - u_4$$

$$\frac{Q_{23}}{m} = u_3 - u_2, \quad \frac{Q_{41}}{m} = u_4 - u_1$$

(10)

Na Equação 10, considera-se todo trabalho e transferências de calor como grandezas positivas. Com isso concluímos que o termo  $\frac{W_{12}}{m}$  (referente ao trabalho do processo 1-2) é um número positivo, representando trabalho de entrada durante a compressão e  $\frac{Q_{41}}{m}$  (referente ao calor do processo 4-1) é um número que representa o calor rejeitado no escape. Assim, o trabalho líquido do ciclo de Otto é representado pela Equação 11:

$$\frac{W_{ciclo}}{m} = \frac{W_{34}}{m} - \frac{W_{12}}{m} = (u_3 - u_4) - (u_2 - u_1) \quad (11)$$

O trabalho líquido pode ser calculado como calor líquido adicionado. Reorganizando, pode-se colocar sob a mesma forma da expressão anterior para trabalho líquido (Equação 12).

$$\frac{W_{ciclo}}{m} = \frac{Q_{23}}{m} - \frac{Q_{41}}{m} = (u_3 - u_2) - (u_4 - u_1) \quad (12)$$

Como a eficiência térmica ( $\eta$ ) é dada pela razão entre o trabalho líquido do ciclo e o calor adicionado (Equação 13).

$$\eta = \frac{(u_3 - u_2) - (u_4 - u_1)}{u_3 - u_2} = 1 - \frac{u_4 - u_1}{u_3 - u_2} \quad (13)$$

A seguir, as relações com os processos 1-2 e 3-4, onde  $r$  representa a razão de compressão, e  $V_r$  a razão entre o volume máximo e o volume mínimo verificados durante o ciclo do interior do cilindro, expressa pelas Equações 14 e 15.

$$v_{r2} = v_{r1} \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = \frac{v_{r1}}{r} \quad (14)$$

$$v_{r4} = v_{r3} \left( \frac{V_4}{V_3} \right) = r v_{r3} \quad (15)$$

Observe que uma vez que (Equação 16):

$$V_3 = V_2 \text{ e } V_4 = V_1 \rightarrow r = V_1/V_2 = V_4/V_3 \quad (16)$$

O valor  $v_r$  é relacionando com a temperatura para o ar nas tabelas de propriedades como gás ideal. Visto que o ciclo de Otto é um processo isentrópico (entropia do sistema permanece constante), podemos obter as Equações 17 e 18.

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1} = r^{k-1} \quad (17)$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{k-1} = \frac{1}{r^{k-1}} \quad (18)$$

Onde  $k$  é constante, a razão entre as capacidades caloríficas específicas, Equação 19.

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (19)$$

Ainda, em relação ao diagrama da Figura 8, o autor Moran et al. (2005) conclui que no Ciclo de Otto, a eficiência térmica aumenta conforme a razão de compressão aumenta. Quando aumenta a razão de compressão, o ciclo 1-2-3-4-1 muda para 1-2'-3'-4-1. Quando o último ciclo é menor que a temperatura média da adição de calor, e ambos os ciclos fazem parte do mesmo processo de rejeição de calor, o ciclo 1-2'-3'-4-1 tem sua eficiência térmica maior. O aumento de sua eficiência térmica com a taxa de compressão, também pode ser mostrado pelo desenvolvimento com base no ar padrão. Como constante, a Equação 13 é substituída pela Equação 20:

$$\eta = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \left( \frac{\left(\frac{T_4}{T_1}\right) - 1}{\left(\frac{T_3}{T_2}\right) - 1} \right) \quad (20)$$

Pelas Equações 17 e 18,  $T_4/T_1 = T_3/T_2$ , logo (Equação 21):

$$\eta = 1 - \frac{T_1}{T_2} \quad (21)$$

E por fim, introduzindo a Equação 17, a equação de eficiência térmica do Ciclo de Otto de ar padrão por ser expressa pela Equação 22:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \quad (22)$$

Este tipo de ciclo tem sua maior utilidade em veículos leves de passeio, devido à alta potência que é gerada para movimentação do motor e por possuir três tipos de combustíveis compatíveis, o etanol, a gasolina e o gás natural veicular.

#### 4.2.2 Ciclo de Diesel

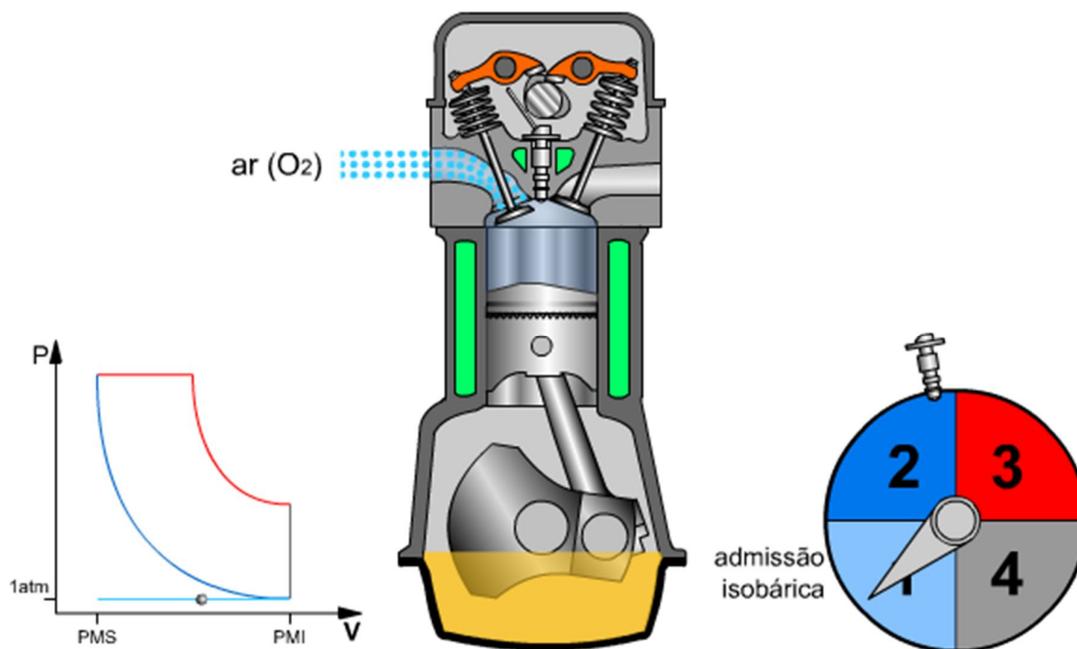
Rudolph Diesel foi quem idealizou um novo tipo de motor em 1892, capaz de queimar carvão pulverizado, segundo Obert (1971), o qual ficou conhecido como Ciclo de Diesel, muito semelhante ao Ciclo de Otto, com a diferença por ter alta razão de compressão e autoignição (ausência de centelha). Inicialmente Diesel propôs controlar a injeção, de maneira que a combustão fosse processada com temperatura constante, analisando a seguir, a impraticabilidade dessa ideia. Então, Diesel resolveu tentar controlar a injeção de combustível com uma combustão sob pressão constante. Com essa experiência, o cientista obteve êxito e concluiu que a injeção de combustíveis líquidos era muito melhor do que a injeção de carvão pulverizado, de acordo com Obert (1971).

Stefanelli (2014) em sua obra detalha o funcionamento de um motor de combustão interna operado com o ciclo de Diesel. A principal característica desse ciclo é a ignição à injeção de combustível, que se desenvolve pela compressão do ar, elevando-o a altas temperaturas, ocorrendo a combustão espontânea do combustível pelo superaquecimento do ar. Cada figura que explica cada etapa do ciclo acompanha um diagrama de Pressão x Volume idealizadas das curvas do Ciclo de Diesel teórico, facilitando o entendimento e estudo. É comum a utilização de

óleos combustíveis leves e pesados (que não são inflamáveis em contato com chama) nesse tipo de motor.

No primeiro tempo, com o pistão (êmbolo) no ponto morto superior, o comando de válvulas abre a válvula de admissão, e a inércia do virabrequim (eixo de manivelas) movimenta a biela que move o pistão para baixo, no caminho do ponto morto inferior. Esse movimento reduz a pressão interna do cilindro e o vácuo é criado, aspirando ar (oxigênio) filtrado sem quase alterar sua pressão, ficando próxima a pressão atmosférica (Figura 9).

Figura 9 – Ciclo Diesel, Admissão (pressão isobárica).

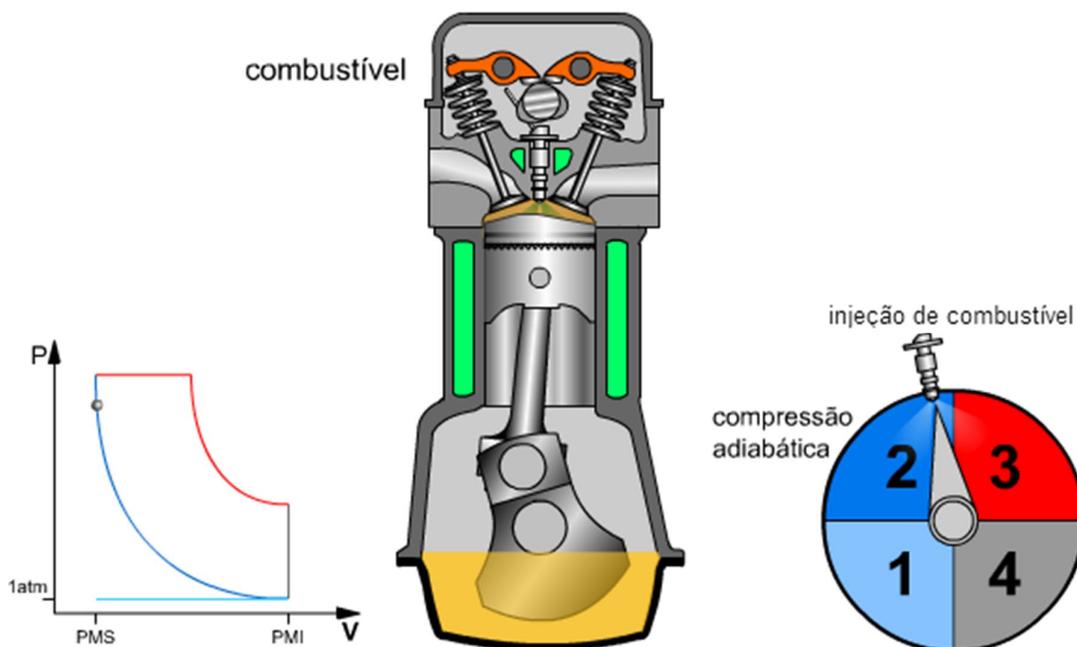


Fonte: Stefanelli ([2012?]).  
Nota: Adaptado pelo autor.

No segundo tempo, com as válvulas de admissão fechada, o virabrequim continua girando e empurra o pistão para cima, ponto morto superior, comprimindo assim o ar na câmara interna de combustão, sem haver troca de energia térmica com o meio. Os motores com ciclo de Diesel possuem uma taxa de compressão muito alta, e toda essa energia é transferida para o ar, aumentando assim sua temperatura e a pressão ao ponto que o combustível é inflamado. Pouco antes do pistão alcançar o ponto morto superior, o sistema injeta o combustível em forma de aerossol, que se volatiliza no ar superaquecido e inicia a sua queima. O processo de

volatilização do combustível necessita de um tempo, e por este motivo a injeção é realizada apenas no final do segundo tempo do ciclo. Então ocorre a autoignição (sem centelha, apenas pelo ar superaquecido pela compressão, diferente do Ciclo de Otto, o qual precisaria da centelha para a mistura ar-combustível entrar em combustão). Sua queima é lenta e constante. Essa energia de expansão força o pistão para baixo, movimentando-o até o ponto morto inferior, dando o torque ao motor, como vemos na Figura 10.

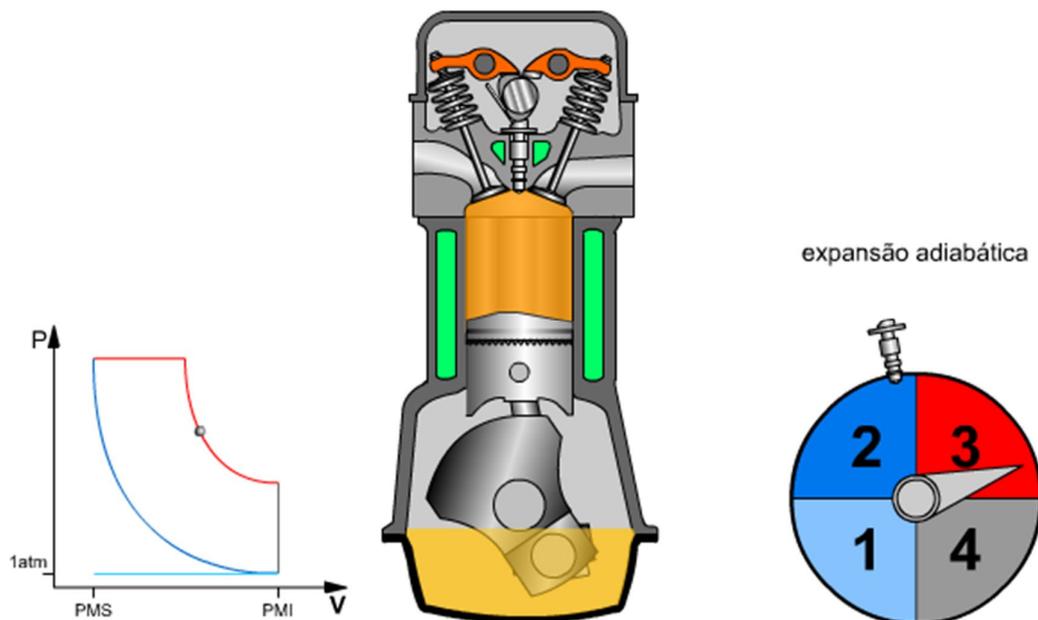
Figura 10 – Ciclo Diesel, Compressão (pressão adiabática).



Fonte: Stefanelli ([2012?]).  
Nota: Adaptado pelo autor.

No terceiro tempo ocorre a combustão do combustível que libera gases derivados da decomposição das moléculas de combustível (de longa cadeia) em pequenas moléculas de água ( $H_2O$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), e outros gases. Esses gases que contribuíram para a manutenção da pressão se reduzem provocando uma queda de pressão pela expansão do volume, não havendo troca de energia térmica no interior do cilindro, apenas o fornecimento de energia mecânica ao ciclo do motor, movimentando o pistão para baixo no ponto morto inferior, conforme mostra a Figura 11.

Figura 11 – Ciclo Diesel, Expansão (pressão adiabática).

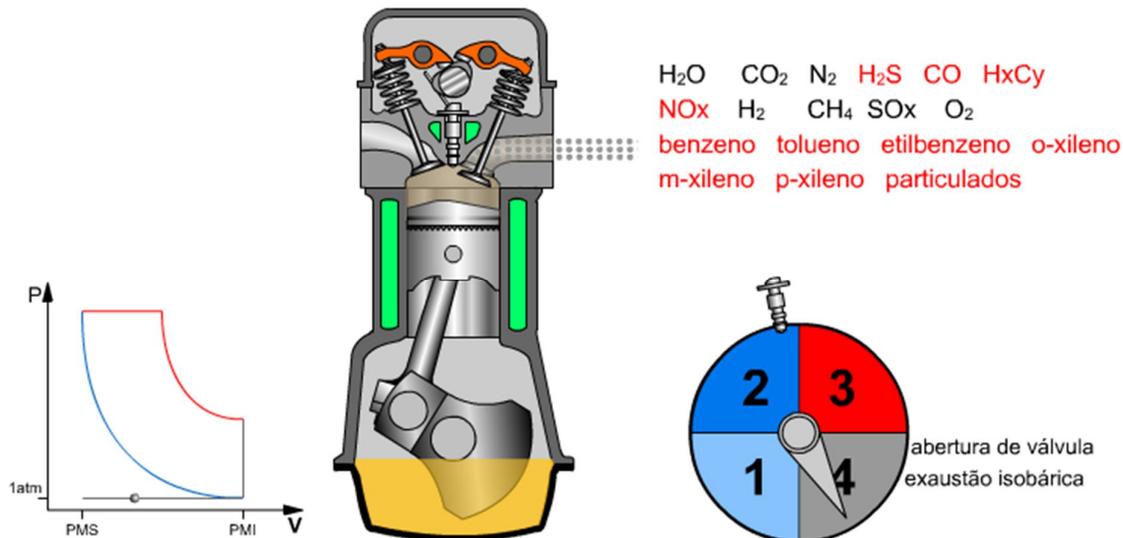


Fonte: Stefanelli ([2012?]).

Nota: Adaptado pelo autor.

Em seu último tempo do ciclo, o pistão está no ponto morto inferior, e a válvula de escape abre. O pistão é movimentado pela inércia do virabrequim para cima, retomando seu caminho ao ponto morto superior, expulsando todos os gases gerados pela queima da combustão do cilindro. Sua pressão interna cai para próximo da pressão atmosférica. Próximo ao ponto morto superior a válvula de admissão começa a se abrir, a diferença de temperatura e de densidade entre os gases da admissão e do escape, e a inércia dos gases, levam o resquício dos gases queimados para o duto de escapamento e a válvula de escape se fecha, se preparando para o reinício do ciclo de quatro tempos. (Figura 12).

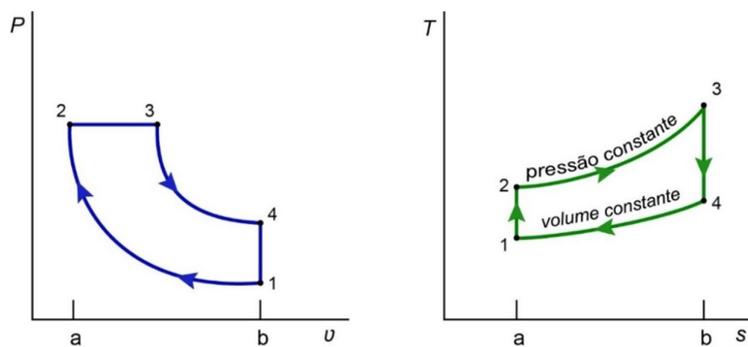
Figura 12 – Ciclo Diesel, Escape (pressão isobárica).



Fonte: Stefanelli ([2012?]).  
Nota: Adaptado pelo autor.

Segundo Obert (1971), o Ciclo de Diesel consiste em um motor com injeção de ar tardia. É possível ver na Figura 13 que no trajeto 1-2, é onde ocorre a compressão isentrópica (entropia do sistema permanece constante). O adição de calor à pressão constante representa 2-3. No percurso 3-4 acontece a expansão isentrópica. E finalmente no último processo do ciclo 4-1, com volume constante é onde tem a rejeição de calor.

Figura 13 – Diagramas p-v e T-S do ciclo de Diesel de ar padrão.



Fonte: Obert (1971).  
Nota: Adaptado pelo autor.

Ainda Obert (1971), para este ciclo (Equação 23 e 24):

$$Q_1 = c_p (T_3 - T_2) \quad Q_r = c_p (T_1 - T_4) \quad (23)$$

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_r}{Q_1} = 1 - \left(\frac{1}{k}\right) \left(\frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}\right) = 1 - \left(\frac{1}{k}\right) \left(\frac{T_1 \left(\frac{T_4}{T_1}\right)^{\frac{1}{k}} - 1}{T_2 \left(\frac{T_3}{T_2}\right)^{\frac{1}{k}} - 1}\right) \quad (24)$$

De acordo com o Diagrama do ciclo de Diesel (Figura 13) obtém-se a Equação 25 e 26,

$$\Delta S_{14} = \Delta S_{23} \quad (25)$$

$$\Delta S_{14 \text{ ou } 23} = c_v \ln \frac{T_4}{T_1} = c_p \ln \frac{T_3}{T_2} \quad \therefore \quad \left(\frac{T_3}{T_2}\right)^k = \left(\frac{T_4}{T_1}\right) \quad (26)$$

Ainda baseado na Figura 13 (Equação 27),

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \left(\frac{v_3}{v_4}\right)^{k-1} = \frac{T_4}{T_3} \quad \therefore \quad \frac{T_4}{T_1} = \frac{T_3}{T_2} \quad (27)$$

Logo (Equação 28),

$$\frac{T_1}{T_2} = \left(\frac{v_2}{v_1}\right)^{k-1} = \frac{1}{r^{k-1}} \quad (28)$$

Substituindo a expressão  $\frac{T_3}{T_2}$  por L, e juntando as Equações 26 e 28 com a Equação 24, tem-se a Equação 29:

$$\eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[ \frac{L^k - 1}{k(L-1)} \right] \quad (29)$$

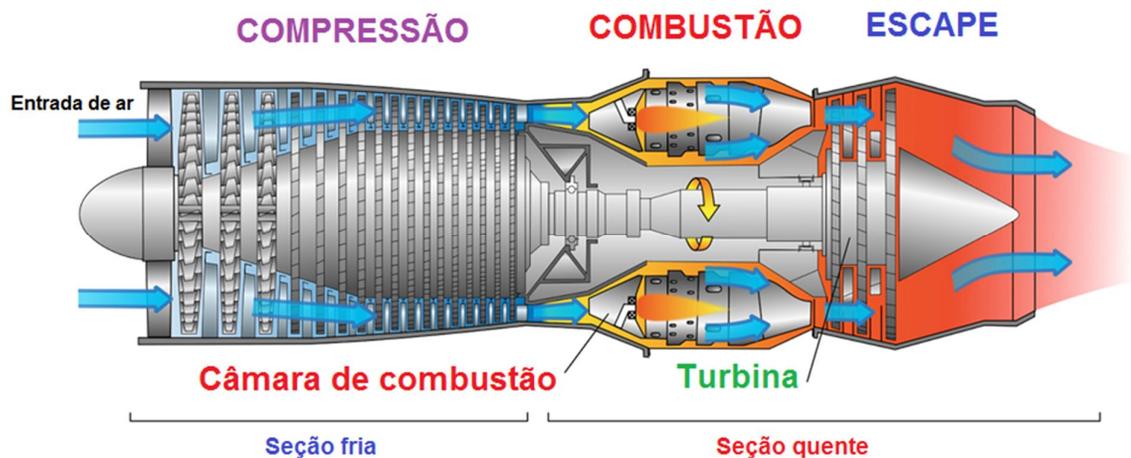
Este tipo de ciclo tem sua maior utilidade em veículos pesados e de cargas, devido ao forte torque em baixas rotações, resultantes da explosão à pressão constante que ocorre no terceiro processo do ciclo de Diesel. O tipo de combustível utilizado é o Diesel, o qual tem um melhor rendimento comparado com os outros descritos neste trabalho.

### 4.2.3 Ciclo Brayton

Os exemplos de combustão interna anteriores, como Ciclo de Otto e Ciclo de Diesel, são considerados modelos que não precisam de transferência de calor como uma fonte externa, pois eles utilizam diretamente a energia de gases a alta temperatura e alta pressão, para movimentar o êmbolo no interior do cilindro, explica Smith, Van Ness e Abbott (2007). E como o Ciclo Brayton é um ciclo termodinâmico utilizado em turbina a gás, Smith, Van Ness e Abbott (2007) diz que elas são mais eficientes que os outros ciclos.

Completando, Moran et al. (2005) continua a explicar que a turbina a gás é impulsionada por gases em elevadas temperaturas originados da câmara de combustão, como mostra a Figura 14. O processo de combustão é realizado por uma fonte externa, o qual o fluido de trabalho pode ser considerado um gás ideal.

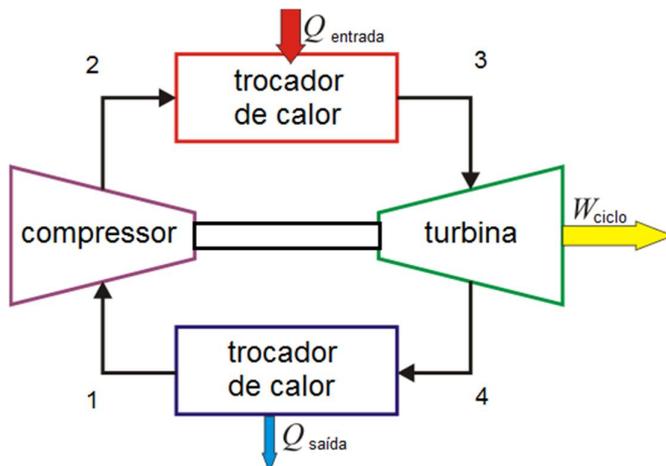
Figura 14 – Ciclo de Brayton, turbina a gás.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Considerando como gás ideal do ar padrão, o ar seria encaminhado para o compressor, a partir da vizinhança, e depois voltaria a sua vizinhança pelo escape com sua temperatura superior a temperatura ambiente.

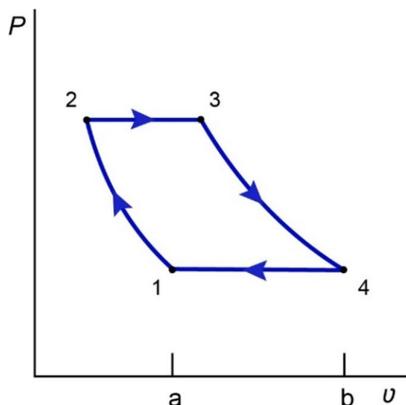
Figura 155 – Ciclo de Brayton de ar padrão com turbina a gás.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Smith, Van Ness e Abbott (2007) mostra no diagrama  $PV$  na Figura 16, a idealização do motor de turbina a gás, considerando que o fluido de trabalho o ar seja um gás ideal, com capacidades caloríficas constantes. Onde o caminho 1-2 é uma compressão adiabática reversível  $P_1$  (pressão atmosférica) até  $P_2$ . Continuando o ciclo o processo 2-3, ao invés de ter a combustão, o calor  $Q_{23}$  é adicionado a uma pressão constante, elevando assim a temperatura do ar. Em seguida ocorre uma expansão isentrópica (entropia do sistema permanece constante) do ar produtor de trabalho, que reduz a pressão de  $P_3$  para a pressão atmosférica  $P_4$ . Finalmente o processo 4-1 é onde ocorre o resfriamento a pressão constante, terminando assim o Ciclo de Brayton.

Figura 166 – Ciclo ideal para um motor de turbina a gás.  
Ciclo de Brayton.



Fonte: Smith, Van Ness e Abbott (2007).  
Nota: Adaptado pelo autor.

Segundo Smith, Van Ness e Abbott (2007), a eficiência térmica deste ciclo pode ser representada pela Equação 30:

$$\eta = \frac{|W_{\text{liquido}}|}{Q_{23}} = \frac{|W_{34}| - W_{12}}{Q_{23}} \quad (30)$$

O trabalho pelo compressor é representado por, Equação 31:

$$W = \Delta H \quad (31)$$

Logo, substituindo a equação 31 para um ar como gás ideal, com constantes capacidades caloríficas, tem-se, a Equação 32:

$$W_{12} = H_2 - H_1 = c_p(T_2 - T_1) \quad (32)$$

Os processos de adição de calor e na turbina (Equação 33):

$$Q_{23} = c_p(T_3 - T_2) \text{ e } |W_{34}| = c_p(T_3 - T_4) \quad (33)$$

Substituindo essas equações na Equação 30 e posterior simplificação obtemos a Equação 34:

$$\eta = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \quad (34)$$

Como os processos 1-2 e 3-4 são isentrópicos (Equações 35 e 36),

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{(k-1)/k} \quad (35)$$

$$\frac{T_4}{T_3} = \left(\frac{P_4}{P_3}\right)^{(k-1)/k} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{(k-1)/k} \quad (36)$$

Simplificando para obter a equação da eficiência térmica do ciclo (Equação 37):

$$\eta = 1 - \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{(k-1)/k} \quad (37)$$

Exemplos de máquinas que operam sob este ciclo são: aviões e navios.

#### 4.2.4 Ciclo de Carnot

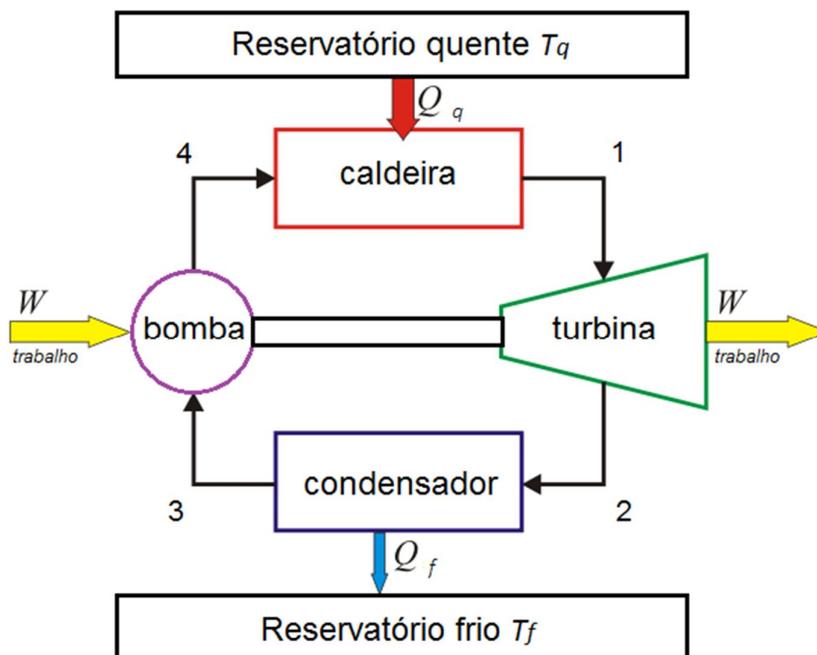
Moran et al. (2005) diz que segundo Carnot, engenheiro francês, nenhum ciclo de potência pode ter eficiência térmica de 100%. Sendo assim, Carnot estudou a eficiência teórica máxima, tal eficiência submetida em sistemas operando entre dois reservatórios a diferentes temperaturas (Figura 17).

Um ciclo considerado reversível é aquele que não possui irreversibilidade no sistema à medida que percorre o ciclo, e as transferências de calor e os reservatórios ocorrem reversivelmente.

A equação expressa para a eficiência máxima teórica elaborada por Carnot resume-se pela Equação 38:

$$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_q} \quad (38)$$

Figura 177 – Ciclo de Carnot de motor a vapor.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Esta equação refere-se a eficiência térmica de todos os ciclos de potência reversíveis que operam entre dois reservatórios a temperaturas  $T_q$  (temperatura quente, de entrada) e  $T_f$  (temperatura mais fria, de saída).

O mesmo autor comenta que os ciclos convencionais produzem uma eficiência em torno de 40%. Embora pareça baixo este valor, ele deve ser comparado com o valor limite apropriado pela equação de Carnot e não com 100%. Por exemplo, considerando um sistema de um ciclo de potência o qual a temperatura média de adição de calor é 745 K (temperatura em kelvin) e a temperatura média de calor que é descartado é de 298 K, substituindo a Equação 38, sua eficiência térmica teórica máxima seria (Equação 39):

$$\eta = 1 - \frac{298K}{745K} = 0,6 \text{ (60\%)} \quad (39)$$

É possível ver que a eficiência térmica real de um ciclo convencional de 40% comparada com a eficiência térmica teórica máxima, acaba não sendo tão baixa, pois o ciclo estaria operando a dois terços do máximo teórico.

Moran et al. (2005) ainda relatam que o ciclo de Carnot é um ciclo inteiramente reversível, com quatro processos sendo dois adiabáticos (não há troca

de calor com o meio externo) alternados com os outros dois processos isotérmicos (trocas de energias à temperatura constante), e no exemplo da Figura 16, estão operando entre dois reservatórios térmicos. Considerando uma de água neste ciclo em regime permanente através de 4 componentes interligados entre si, com características semelhantes a uma instalação simples a vapor, à medida que a água em estado líquido escoar pela caldeira, acaba sofrendo uma mudança de fase, passando de líquido para vapor a uma temperatura constante  $T_q$ , como resultado da transferência de calor pelo reservatório quente. Com a temperatura constante, a pressão se mantém a mesma durante a mudança de fase. Este vapor se expande sem troca de calor ao sair da caldeira através da turbina, onde é gerado trabalho. Na sequência a temperatura cai passando pelo reservatório frio, onde cai também sua pressão. Nessa passagem ocorre a transferência de calor do vapor para o condensador, e parte do vapor se condensa a uma temperatura constante  $T_f$ . Com a temperatura constante, a pressão também se mantém constante à medida que a água passa através do condensador. O último componente pode ser tanto uma bomba quanto um compressor, que recebe a mistura líquido-vapor do condensador e a transfere adiabaticamente (sem transferência de calor) para a entrada da caldeira. Este processo exige um trabalho de entrada para aumentar a pressão, e a temperatura acaba se elevando de  $T_f$  para  $T_q$ , completa Moran et al. (2005).

#### 4.3 COMPARATIVO DOS CICLOS TERMODINÂMICOS DE MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Diante dos modelos de ciclos termodinâmicos explicados nos tópicos anteriores, na Figura 18, é possível visualizar de forma mais resumida, alguns pontos importantes de cada ciclo. O qual mostra comparativamente a fórmula de rendimento de cada ciclo, o rendimento real aproximado e alguns exemplos de motores que operam nessas condições.

Figura 18 – Comparativo dos ciclos termodinâmicos de motores de combustão interna.

CICLOS	FÓRMULA DE RENDIMENTO	RENDIMENTO REAL APROXIMADO	PRINCIPAIS EXEMPLOS
Ciclo Otto	$\eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}}$	$\eta \cong 22 \text{ a } 40\%$	Veículos leves de passeio, motocicletas e pequenas bombas
Ciclo Diesel	$\eta = 1 - \frac{1}{r^{k-1}} \left[ \frac{L^k - 1}{k(L - 1)} \right]$	$\eta \cong 38 \text{ a } 47\%$	Veículos pesados, de carga pesada, navios de grande porte
Ciclo Brayton	$\eta = 1 - \left( \frac{P_1}{P_2} \right)^{(k-1)/k}$	$\eta \cong 26 \text{ a } 36\%$	Turbina a gás de aviões e navios
Ciclo de Carnot	$\eta = 1 - \frac{T_f}{T_q}$	$\eta \cong 60\%$	Ciclo teórico para calcular rendimento máximo

Fonte: Elaborado pelo autor.

#### 4.4 INFLUÊNCIA DOS COMBUSTÍVEIS

Os combustíveis tem grande influência no funcionamento dos motores, e atua de forma direta no desempenho de uma máquina térmica. A seguir será abordado as principais características dos tipos de combustíveis, mostrando também seus impactos positivos e negativos, assim como sua estrutura química e eficiência calorífica de cada um.

O número de octanas é usado para quantificar a resistência à detonação espontânea de um combustível, o quanto de compressão ele suporta antes da explosão. Quanto maior o número de moléculas com isoctanos (octanagem), maior será sua resistência à detonação espontânea, segundo Nascimento (2008).

Ainda Nascimento (2008) ressalta que para a mistura ar-combustível, existe uma relação estequiométrica com o combustível e ar injetados para compressão que varia para cada tipo de motor. Nos motores a gasolina essa relação estequiométrica ideal é entre 9:1 e 10:1 (no primeiro caso por exemplo, 9 partes de ar para 1 kg de combustível). Para o etanol, a relação encontra-se entre 12:1 e 13:1 (no primeiro caso por exemplo, 12 partes de ar para 1 kg de combustível). Havendo menor quantidade de ar do que a proporção ideal vista acima, terá sobra de combustível, enriquecendo a mistura e prejudicando o sistema de combustão. Além do gasto

excessivo do combustível, a queima do mesmo impactará mais no meio ambiente por lançar mais poluição e o motor pode afogar e apresentar problemas de partida. O oposto também é prejudicial, uma vez que, se a proporção de ar for maior, terá excesso de oxigênio e além de poluir com óxidos e dióxidos de nitrogênio, provocará também um desempenho inferior ao normal, danificando até mesmo o motor.

#### **4.4.1 Gasolina**

Nascimento (2008) diz que todo combustível derivado do petróleo é formado por combinações de carbono e hidrogênio, conhecida como hidrocarbonetos. A gasolina é uma mistura de hidrocarbonetos com cinco, seis, sete, oito e até nove átomos de carbono, extraída pela destilação e craqueamento do petróleo. Em sua composição também é possível encontrar compostos de enxofre e nitrogênio.

A gasolina traz algumas consequências negativas para o meio ambiente. Por não ter uma queima completa, a gasolina acaba gerando alguns resíduos ao meio ambiente, como por exemplo o monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e hidrocarbonetos não queimados. Esses resíduos saem em forma de névoa fotoquímica, conhecida como “*smog* fotoquímico”, trazendo consequências graves ao meio ambiente e contribuindo para o efeito estufa do planeta. Na prática em um litro de gasolina é possível liberar aproximadamente 0,7 kg de carbono na atmosfera.

Devido à grande poluição provocada pela gasolina, vem se desenvolvendo combustíveis mais ecológicos o qual emite menos gases que prejudicam o meio ambiente, a fim de substituir a gasolina, como por exemplo o etanol.

Por possuir uma extensa cadeia de hidrocarbonetos, este combustível entra em combustão espontânea com baixa compressão. A gasolina comum possui 87% de octanos e 13% de heptano. Uma gasolina com baixa octanagem, não resiste à alta compressão, ocasionando a autoignição (explosão espontânea). Isso prejudica e diminui a vida útil do motor, já que a explosão acontece antes do pistão alcançar o ponto morto superior, causando um contragolpe no eixo de manivelas (os gases da combustão contribuem com movimento contrário ao do pistão desacelerando-o). Assim como a centelha de ignição não pode acontecer com muito atraso ou adiantado em relação ao ponto morto superior. Porém, gasolinas que possuem quantidade igual ou superior a 87 octanas, suporta a compressão normal do motor entrando em combustão pela centelha de ignição.

A seguir algumas reações que podem ocorrer na queima de combustível (Equações 40, 41 e 42).

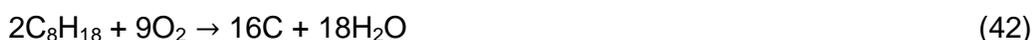
Reação de combustão ideal (completa):



Reação de combustão incompleta:



Reação de combustão onde se obtém fuligem:



#### 4.4.2 Etanol

O etanol ou álcool etílico é obtido pela fermentação de amido, sacarose da cana-de-açúcar, da uva, cevada, e outros processos sintéticos pela hidratação do etileno ( $C_2H_4$ ). Sua estrutura molecular é  $C_2H_5OH$ , um solvente líquido incolor, inflamável, volátil e polar.

Em contato com o ar após sua produção, acontece um processo químico espontâneo com o oxigênio, levando o álcool a formar grupamento funcional de ácidos carboxílicos ( $-COOH$ ), que indica aos compostos as características de ácido. Nascimento (2008) ainda resalta que o grupamento  $-OH$  é o grupamento funcional dos álcoois. A molécula de etanol possui também propriedades corrosivas, que pode refletir negativamente, trazendo danos ao motor de um veículo caso ele não esteja adaptado para esse tipo de combustível.

O álcool hidratado possui características mais corrosivas que o álcool anidro por causa da dissociação de íons de hidrogênio dissolvidos em água, liberando mais  $H^+$  do que  $OH^-$  em sua composição, tornando-o ácido.

Os problemas ambientais afligem diversos países em relação à poluição da queima de combustíveis dos veículos. O etanol é menos poluente do que os combustíveis derivados do petróleo, o qual se destaca em termos ecológicos.

Nascimento (2008) explica que o etanol, conhecido também por E100, possui concentrações aproximadas de 7% de água em sua composição. E o álcool anidro (aproximadamente 0,5% de água em sua composição) é adicionado à gasolina

como aditivo, na concentração entre 20 e 25%, exigido por lei. Lembrando que essas concentrações de água nos álcoois, é proveniente do próprio processo de destilação.

O álcool etílico possui uma octanagem maior que da gasolina, em torno de 110 (o termo octanagem citado só é utilizado aqui para estabelecer comparações com a gasolina, já que o álcool não possui octanas).

Reação do etanol (Equação 44):



#### 4.4.3 Diesel

Ferrari (2008) esclarece que o diesel é um combustível fóssil derivado do petróleo constituído basicamente de hidrocarbonetos. Em sua composição além de carbono e hidrogênio, pode-se encontrar baixas concentrações de enxofre, nitrogênio e oxigênio. Como combustível o diesel possui uma estrutura molecular  $\text{C}_{12}\text{H}_{26}$  (dodecano), conhecida também como óleo diesel leve, o qual apresenta-se na forma de um líquido amarelado viscoso, límpido, pouco volátil, com cheiro característico forte e marcante e considerado com nível de toxicidade mediano.

Algumas características do óleo diesel devem ser rigorosamente cumpridas, caso contrário ele afetará o funcionamento do motor. A ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis), especifica algumas características que determinam a qualidade do óleo diesel. Se o diesel estiver fora das especificações padrões de densidade, que deve estar entre 820 e 880  $\text{kg/m}^3$  à 20 °C, isso impactará na massa de combustível injetado pela bomba injetora, obtendo uma mistura de ar/combustível não balanceada. Outro exemplo é se o óleo diesel apresenta impurezas e não for límpido, nesse caso os contaminantes presentes podem diminuir a vida útil dos filtros dos veículos e outros equipamentos, prejudicando o motor e seu funcionamento.

O alto teor de enxofre no combustível diesel, é um grande problema para o meio ambiente e para a saúde. Na combustão do diesel, o trióxido de enxofre ao se juntar com a água, forma ácido sulfúrico, que corrói partes metálicas do motor. Se a concentração desse elemento for alta, o material particulado emitido também será

alto, assim como os poluentes primários como  $\text{SO}_2$  e  $\text{SO}_3$ , trazendo prejuízo à saúde humana, diz Ferrari (2008).

Devido à grande pressão da questão ambiental e saúde humana, os níveis de enxofre no diesel foram alterados. Em 1980, no Brasil, os combustíveis de óleo diesel tinham 13.000 mg/kg de enxofre. A partir de 2009 foram adotadas medidas para diminuir o teor de enxofre no diesel, passando para 1.800 mg/kg no interior e 500 mg/kg para capitais e cidades metropolitanas. Atualmente, encontra-se diesel com teor de enxofre de 50 mg/kg (S50) e de 10 mg/kg (S10) para os automóveis e S500 (com 500 mg/kg de enxofre) para uso rodoviário, explica Ferrari (2008) em seu relatório técnico.

#### **4.4.4 Gás Natural Veicular (GNV)**

Companhia (2008) diz que o gás natural é formado pela mistura de gases extremamente leves, com 90% de metano (etano, propano,  $\text{CO}_2$ ), um gás encontrado em abundância na natureza, inodoro, incolor, não tóxico e com inflamabilidade reduzida. É importante ressaltar que Gás Natural Veicular (GNV) é diferente do gás de cozinha, Gás Liquefeito de Petróleo (GLP), diferenciando-se por ser constituído por hidrocarbonetos entre a faixa do metano e do etano, enquanto o gás de cozinha está na faixa entre o propano e butano.

Este combustível, por ser mais barato que os outros, torna-se mais viável economicamente, e além disso polui menos, com uma emissão de monóxido de carbono reduzida em até 90% comparado com a gasolina. Sua combustão é completa e não deixa resíduos na câmara de combustão do motor, contribuindo com a vida útil do motor e do meio ambiente, segundo Companhia (2008).

Associação (2004) explica que é possível uma adaptação nos veículos que possuem motores à gasolina, e álcool para que possam utilizar o gás como combustível. Uma adaptação nesses motores pode ser feita por oficinas ou até mesmo provindo de fábrica. O carro adaptado nessas condições pode atuar como “bicombustível”, utilizando preferencialmente o GNV, porém, quando necessário pode alterar para o combustível original (no caso álcool ou gasolina).

Associação (2004) também diz que pode ser feita em veículos a diesel, mas que sua adaptação exige mais complexidade em sua conversão e por isso tem um custo mais elevado.

No Brasil, o gás natural veicular a princípio serviria para substituir os veículos de motores a diesel, na frota de veículos pesados (ônibus, caminhão) a fim de poluir menos e aumentar a economia de combustível nos transportes.

Com as adaptações adequadas, um motor com uso de GNV opera normalmente com altas taxas de compressão, entre 13/1 e 16/1, provenientes do alto poder antidetonante inerte do gás, apresentando uma eficiência térmica superior comparado com motores à gasolina ou álcool, diz Associação (2004).

## 5 CONCLUSÃO

Os motores são muito importantes para a sociedade contemporânea, pois a civilização convive diariamente com carros, motos, caminhões e outros meios de transportes que são movidos pelos motores de combustão interna. Para um ótimo desempenho desses motores, eles devem ser construídos cuidadosamente para que todo o conjunto de peças que formam os motores possam funcionar corretamente, além de destinar sua utilidade de forma a obter o melhor rendimento de cada ciclo.

As vantagens e desvantagens de cada ciclo termodinâmico compensam umas às outras de acordo com a sua utilidade. Comparando o Ciclo de Otto com o Ciclo de Diesel, a eficiência do Ciclo de Diesel é menor que a eficiência do Ciclo de Otto, quando é feita a comparação na mesma razão de expansão e para o mesmo meio que realiza o trabalho. Porém, o Ciclo de Diesel exerce mais trabalho comparado com o ciclo de Otto, e seu torque é ainda bem maior, devido à lenta velocidade da queima de combustível.

Ainda que a eficiência do Ciclo de Otto seja independente da carga, a eficiência do Ciclo de Diesel aumenta progressivamente com a diminuição da carga (e iguala a do ciclo de Otto na carga zero limite).

Os motores de Ciclo de Otto operam com taxas de compressão bem inferiores às do Ciclo de Diesel, permitindo motores mais leves e de menor complexidade. O mesmo ciclo, pela rápida queima do combustível, oferece ganho em potência e rápida variação de velocidade de rotação, de modo que o Ciclo de Diesel é preferido em caminhões e veículos pesados, pois além da economia de combustível ele tem um custo benefício relativamente bom.

O Ciclo de Diesel oferece maior torque, ótimo para arrancadas com cargas pesadas e o ciclo de Otto, onde os motores são de combustão por centelha, são mais utilizados em motores que usam como combustíveis o etanol, gasolina e o GNV, preferidos em veículos mais leves, onde buscam-se ganho de potência e aceleração.

O ciclo de Brayton tem como vantagens utilizar o ar como fluido de trabalho, descartando a necessidade de utilização de fluidos refrigerantes, e utiliza o ar frio produzido pelo sistema para climatização do habitáculo do veículo, extinguindo assim a necessidade de um trocador de calor (ciclo aberto). Além disso, por ser uma máquina térmica relativamente simples, apresenta menos custos de manutenção.

Sobre a influência dos combustíveis citados, é possível dizer que entre eles o mais correto ecologicamente e economicamente seria o gás natural veicular, cuja combustão completa não traz resíduos ao meio ambiente e seu preço é considerado baixo comparado com os outros combustíveis. Em contrapartida o diesel é o combustível mais poluente, porém é o que melhor se adequa em veículos pesados de grande porte, suportando altas compressões com um torque superior. O álcool menos poluente que a gasolina traz mais potência com sua octanagem ao motor do carro.

## REFERÊNCIAS

APARICIO, R. **Aula 03 - lei zero da termodinâmica**. Campinas, 2009. Disponível em: <[http://www.labec.iqm.unicamp.br/cursos/QG107/aula3\\_4x.pdf](http://www.labec.iqm.unicamp.br/cursos/QG107/aula3_4x.pdf)>. Acesso em: 05 set. 2014.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DO GÁS NATURAL VEICULAR. **O uso do GN em veículos (GNV)**, 2004. Disponível em: <[http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/artigos\\_energia/o\\_uso\\_do\\_gn\\_em\\_veiculos\\_\(gnv\).html](http://ambientes.ambientebrasil.com.br/energia/artigos_energia/o_uso_do_gn_em_veiculos_(gnv).html)>. Acesso em: 05 nov. 2014.

ATKINS, P. **Físico-química: fundamentos**. Tradução Edilson Clemente da Silva; Márcio José Estillac de Mello Cardoso; Oswaldo Esteves Barcia. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2009.

COMPANHIA DE GÁS DE MINAS GERAIS. **Gás natural veicular. Vale a pena**. Minas Gerais, 2008. (Relatório informativo).

CONCEIÇÃO, G. W. **A viabilidade técnica, econômica e ambiental da inserção do gás natural veicular em frotas do transporte coletivo urbano de passageiros**. 2006. 290 f. Dissertação (Mestrado em Planejamento Estratégico) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

FERRARI, F. F. **Desempenho de um motor diesel operando no modo bi-combustível diesel-álcool**. Rio de Janeiro: PUC, 2008. (Relatório técnico, Departamento de Engenharia Mecânica).

KORETSKY, M. D. **Termodinâmica para engenharia química**. Tradução Márcio José Estillac de Mello Cardoso; Oswaldo Esteves Barcia; Rosana Janot Martins. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

MORAN, M. J. et al. **Introdução à engenharia de sistemas térmicos: termodinâmica, mecânica dos fluidos e transferência de calor**. Tradução Carlos Alberto Biolchini da Silva. Rio de Janeiro: LTC, 2005.

NASCIMENTO, J. **Estudo dos processos físicos envolvidos nos motores que utilizam como combustível álcool e gasolina (Ciclo Otto)**. 2008. 68 f. Monografia (Licenciatura em Física) – Universidade Católica de Brasília, Brasília, 2008. Disponível em: <<http://www.ucb.br/sites/100/118/TCC/2%C2%BA2008/TCC03Joel.pdf>>. Acesso em: 20 nov. 2014.

OBERT, E. F. **Motores de combustão interna**. Tradução Fernando Luiz Carraro. 2. ed. Porto Alegre: Globo, 1971.

PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. **Manual de Engenharia Química**. Tradução Horácio Macedo; Luiza M. Barbosa; Paulo Emídio F. Barbosa. 5. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Dois, 1980.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à termodinâmica da engenharia química**. Tradução Eduardo Mach Queiroz; Fernando Luiz Pellegrini Pessoa. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007.

STEFANELLI, E. J. Motor de combustão interna quatro tempos à fagulha – Ciclo Otto. **Stefanelli**, [2012?]. Disponível em: <<http://www.stefanelli.eng.br/webpage/automobilistica/motor-4-tempos-funcionamento-ciclo-otto-fagulha.html>>. Acesso em: 23 set. 2014.

\_\_\_\_\_. Motor de combustão interna quatro tempos à injeção de combustível – Ciclo Diesel. **Stefanelli**, [2012?]. Disponível em: <<http://www.stefanelli.eng.br/webpage/automobilistica/motor-4-tempos-funcionamento-ciclo-diesel-injecao.html>>. Acesso em: 23 set. 2014.

TAYLOR, C. F. **Análise dos Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Edgard Blucher, 1988.