



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**ANTONIO VIEIRA DAMASCENO NETO**

**SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO PARA MOTORES CICLO OTTO: UM ESTUDO  
COMPARATIVO ENTRE CARBURADOR, INJEÇÃO ELETRÔNICA DIRETA E  
INDIRETA DE COMBUSTÍVEL**

**FORTALEZA**

**2023**

ANTONIO VIEIRA DAMASCENO NETO

SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO PARA MOTORES CICLO OTTO: UM ESTUDO  
COMPARATIVO ENTRE CARBURADOR, INJEÇÃO ELETRÔNICA DIRETA E INDIRETA  
DE COMBUSTÍVEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica  
do Centro de Tecnologia da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial à  
obtenção do bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Dra. Maria Aleksandra de  
Sousa Rios.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- D162s Damasceno Neto, Antonio Vieira.  
Sistemas de alimentação para motores ciclo otto : um estudo comparativo entre carburador, injeção eletrônica direta e indireta de combustível / Antonio Vieira Damasceno Neto. – 2023.  
45 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Curso de Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2023.  
Orientação: Profa. Dra. Maria Alexsandra de Sousa Rios.
1. Ciclo otto. 2. Desempenho. 3. Motor. I. Título.

CDD 620.1

---

ANTONIO VIEIRA DAMASCENO NETO

SISTEMAS DE ALIMENTAÇÃO PARA MOTORES CICLO OTTO: UM ESTUDO  
COMPARATIVO ENTRE CARBURADOR, INJEÇÃO ELETRÔNICA DIRETA E INDIRETA  
DE COMBUSTÍVEL

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao  
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica  
do Centro de Tecnologia da Universidade  
Federal do Ceará, como requisito parcial à  
obtenção do bacharel em Engenharia Mecânica.

Fortaleza, 14 de Julho de 2023.

BANCA EXAMINADORA

---

Dra. Maria Alessandra de Sousa Rios (Orientadora)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof Dr. Luís de França Camboim Neto  
Universidade do Estado do Amazonas (UEA)

---

Prof. Dr. Francisco Marcone Lima  
Centro Universitário Maurício de Nassau  
(UNINASSAU)

Dedico este trabalho aos meus pais e irmãos. Agradeço pelo amor, apoio e pelos valores que me transmitiram ao longo da minha jornada acadêmica. Sem o incentivo e a confiança que sempre depositaram em mim, este momento não seria possível.

## RESUMO

Este estudo teve como objetivo comparar os sistemas de alimentação de combustível utilizados em motores de ciclo Otto. O estudo se concentra nos três principais sistemas de alimentação de combustível usados na indústria: carburador, injeção eletrônica direta e indireta. A comparação considerou vários aspectos, como consumo de combustível, ruído, emissões, potência e relação custo-benefício. A pesquisa é importante pois pode ajudar a identificar o sistema de alimentação de combustível mais eficiente para motores de ciclo Otto, o que pode levar a redução do consumo de combustível, melhoria do desempenho e menores emissões. Para conduzir este estudo, foi realizada uma revisão da literatura de junho de 2022 a junho de 2023 e realizados testes de consumo e ruído com objetivo de analisar as diferenças entre os sistemas. Foi constatado que cada sistema de alimentação de combustível tem suas vantagens e desvantagens. Os sistemas de carburador são simples e de baixo custo, mas menos eficientes do que os sistemas de injeção. Os sistemas de injeção eletrônica são mais complexos e caros, mas oferecem um melhor desempenho e cerca de 50% mais econômico. A injeção direta é mais avançada e cara, mas também oferece um ganho de cerca de 5% de potência quando comparada a injeção eletrônica convencional. Portanto conclui-se que a escolha do sistema de alimentação de combustível dependerá da aplicação específica e dos requisitos do motor.

**Palavras-chave:** ciclo otto; desempenho; motor.

## ABSTRACT

This study aimed to compare the fuel delivery systems used in Otto cycle engines. The study focuses on the three main fuel delivery systems used in the industry: carburetor, direct electronic injection, and indirect electronic injection. The comparison considered various aspects such as fuel consumption, noise, emissions, power, and cost-effectiveness. The research is important as it can help identify the most efficient fuel delivery system for Otto cycle engines, leading to reduced fuel consumption, improved performance, and lower emissions. To conduct this study, a literature review was carried out from June 2022 to June 2023, and consumption and noise tests were performed to analyze the differences between the systems. It was found that each fuel delivery system has its advantages and disadvantages. Carburetor systems are simple and low-cost but less efficient than injection systems. Electronic injection systems are more complex and expensive but offer better performance and approximately 50% greater fuel efficiency. Direct injection is more advanced and costly but also provides a power gain of about 5% compared to conventional electronic injection. Therefore, it can be concluded that the choice of fuel delivery system will depend on the specific application and engine requirements.

**Keywords:** otto cycle; performance; engine.

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| Figura 1 – Representação de um Motor de Combustão Interna (MCI) . . . . .                   | 14 |
| Figura 2 – Representação dos sistemas de alimentação . . . . .                              | 16 |
| Figura 3 – Representação dos 4 tempos do ciclo Otto . . . . .                               | 17 |
| Figura 4 – Representação dos 2 tempos em um motor com ignição por centelha . . . . .        | 17 |
| Figura 5 – Representação dos processos em um motor 4 cilindros . . . . .                    | 18 |
| Figura 6 – Representação do processo interno em um carburador . . . . .                     | 21 |
| Figura 7 – Representação do processo de gerenciamento eletrônico do motor . . . . .         | 22 |
| Figura 8 – Unidade de Controle Eletrônico . . . . .   | 22 |
| Figura 9 – Luz de anomalia . . . . .  | 22 |
| Figura 10 – Representação do posicionamento do bico injetor no GDI . . . . .                | 27 |
| Figura 11 – Representação dos processos em um motor 4 cilindros . . . . .                   | 29 |
| Figura 12 – Rendimento do Ciclo Otto variando a taxa de compressão ( $\epsilon$ ) . . . . . | 31 |
| Figura 13 – Representação do diagrama pV considerando perdas . . . . .                      | 31 |
| Figura 14 – Geometria do motor . . . . .  | 32 |
| Figura 15 – Gol Geração 6 . . . . .   | 34 |
| Figura 16 – Buggy Equus . . . . .   | 35 |
| Figura 17 – Rota estabelecida em Paracuru (CE) . . . . .                                    | 36 |
| Figura 18 – Galão de emergência . . . . .   | 37 |
| Figura 19 – Decibelímetro Digital Lith . . . . .  | 38 |



## LISTA DE TABELAS

|   |    |
|---|----|
| Tabela 1 – Comparação de Torque e Potência do Buggy e Gol 1.6 . . . . .     | 40 |
| Tabela 2 – Comparação de Consumo e Combustível utilizado . . . . .          | 40 |
| Tabela 3 – Comparação dos Níveis de Ruído em Diferentes Situações . . . . . | 41 |

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

|          |  |
|----------|--|
| ECU      | <i>Electronic Central Unit</i> - Central eletrônica de controle          |
| GDI      | <i>Gasoline Direct Injection</i> - Injeção Direta de Gasolina            |
| IBAMA    | Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis |
| MAP      | <i>Manifold Absolute Pressure</i> - Sensor de Pressão Absoluta           |
| MCI      | Motor de Combustão Interna   |
| MPI      | <i>Multi Point Injection</i> - Injeção Multiponto                        |
| MSI      | <i>Multi Stratified Injection</i> - Injeção Multiponto Estratificado     |
| PMI      | Ponto Morto Inferior   |
| PMS      | Ponto Morto Superior   |
| PROCONVE | Programa de Controle de Emissões Veiculares                              |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|           |   |
|-----------|---|
| $d$       | Distância em metros   |
| $F$       | Razão entre a massa de combustível e massa de ar                              |
| $F_e$     | Relação estequiométrica   |
| $t$       | Tempo   |
| $\lambda$ | Razão entre quantidade de ar real fornecida ao motor e quantidade de ar ideal |

## SUMÁRIO

|       |   |    |
|-------|---|----|
| 1     | <b>INTRODUÇÃO</b>                                   | 11 |
| 2     | <b>OBJETIVO</b>                                     | 13 |
| 2.1   | Objetivo Geral                                      | 13 |
| 2.2   | Objetivos Específicos                               | 13 |
| 3     | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                        | 14 |
| 3.1   | Motores de combustão interna                        | 14 |
| 3.2   | Ciclo Otto  | 16 |
| 3.2.1 | <i>Ciclo termodinâmico do motor a quatro tempos</i> | 16 |
| 3.2.2 | <i>Método de alimentação de combustível</i>         | 18 |
| 3.2.3 | <i>Relação combustível-ar</i>                       | 19 |
| 3.3   | Carburador  | 20 |
| 3.4   | Injeção eletrônica indireta                         | 21 |
| 3.4.1 | <i>Injeção eletrônica direta</i>                    | 26 |
| 3.5   | Eficiência energética do motor                      | 26 |
| 3.5.1 | <i>Rendimento dos ciclos teóricos</i>               | 27 |
| 3.5.2 | <i>Ciclo teórico a um volume constante</i>          | 28 |
| 3.5.3 | <i>Eficiência do ciclo Otto</i>                     | 28 |
| 3.6   | Parâmetros Geométrico do Motor                      | 30 |
| 4     | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>                          | 34 |
| 4.1   | Veículos  | 34 |
| 4.2   | Testes  | 36 |
| 5     | <b>RESULTADOS E DISCUSSÃO</b>                       | 40 |
| 6     | <b>CONCLUSÃO</b>                                    | 43 |
|       | <b>REFERÊNCIAS</b>                                  | 44 |

## 1 INTRODUÇÃO

Os primeiros motores a combustão interna apareceram no século XVIII. Em 1885, o cientista Gottlieb Daimler inventou o que é reconhecido como primeiro protótipo de um motor alimentado a gasolina. De acordo com Pantaneiro Capas (2022), com um cilindro apenas, este motor equipava a "*Reitwagen*", a primeira motocicleta.

Com o crescimento populacional e conseqüentemente a frota veicular, nasce a necessidade de uma regulamentação maior a respeito da emissão de gases poluentes oriundos de motores a combustão interna. Medidas mais restritivas ao longo do tempo, requerendo assim emissões mais baixas e um consumo de combustível menor. Para atingir essas demandas combinado ao avanço tecnológico, os engenheiros automotivos passaram a adotar sistemas de controle eletrônico nos motores. No Brasil, com a implementação do PROCONVE por meio do IBAMA, observou uma redução de 98% de emissão de poluentes advinda dos veículos (IBAMA, 2022).

Nos primeiros motores alimentados com os combustíveis atuais, havia o carburador como misturador de ar e combustível. Esse componente do sistema que realizava a mistura para ser admitida na câmara de combustão. No Brasil o uso do carburador em carros durou até o final da década de 90, quando a Volkswagen Kombi em 1997 passou a contar com injeção eletrônica (Reparação Automotiva, 2022).

Ressalta-se que grande parte da frota que circula no Brasil ainda conta com o carburador como controlador da mistura admitida, componente puramente mecânico impossibilitando um acerto com controle instantâneo dos parâmetros de combustão.

A alimentação de motores a combustão interna é uma questão crucial na engenharia mecânica. Portanto, o presente estudo realizou uma análise comparativa entre os sistemas de alimentação para motores ciclo Otto, sendo eles: carburador, injeção eletrônica e injeção direta de combustível. Avaliando o desempenho de cada sistema em relação aos parâmetros, tais como: consumo de combustível, emissão de poluentes, potência gerada, entre outros.

O estudo foi dividido em quatro etapas principais: revisão bibliográfica, análise dos sistemas, experimentos e resultados. A revisão bibliográfica visou aprofundar o conhecimento teórico sobre os sistemas de alimentação em motores ciclo Otto. Foram consultados artigos científicos, livros e teses de doutorado que abordam o tema em plataformas como: Google Acadêmico, Scielo, refseek e repositórios de Universidades. A análise dos sistemas consistiu na comparação dos sistemas de alimentação, levando em conta os parâmetros já mencionados.

Foram realizados testes em motores com cada um dos sistemas para coletar dados e, em seguida, foram comparados os resultados. Por fim, os resultados obtidos foram analisados e discutidos.

Esse estudo é de grande relevância para a engenharia mecânica, pois permite a comparação direta entre sistemas de alimentação utilizados em motores a combustão interna. Além disso, a pesquisa contribui para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e menos poluentes. A partir dos resultados obtidos, é possível identificar qual sistema de alimentação é mais vantajoso em termos de eficiência energética e redução de emissões de poluentes.

Sendo assim, este trabalho busca contribuir para a discussão e aprimoramento dos sistemas de alimentação em motores ciclo Otto, auxiliando no desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e sustentáveis para o setor automotivo. Espera-se que os resultados obtidos possam ser utilizados por empresas e pesquisadores para o desenvolvimento de novos sistemas de alimentação e, conseqüentemente, para a melhoria da eficiência e redução da poluição gerada por motores a combustão interna.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Objetivo Geral**

Realizar um estudo comparativo entre os sistemas de alimentação utilizados em motores ciclo Otto, avaliando o desempenho e eficiência de cada um dos sistemas estudados.

### **2.2 Objetivos Específicos**

- Identificar as principais características do carburador, injeção eletrônica e injeção direta, destacando suas vantagens e desvantagens.
- Analisar o desempenho dos diferentes sistemas de alimentação em termos de potência, torque, consumo de combustível e emissão de poluentes.
- Comparar os resultados obtidos para cada um dos sistemas de alimentação, apontando qual apresenta o melhor desempenho em termos de eficiência e potência.

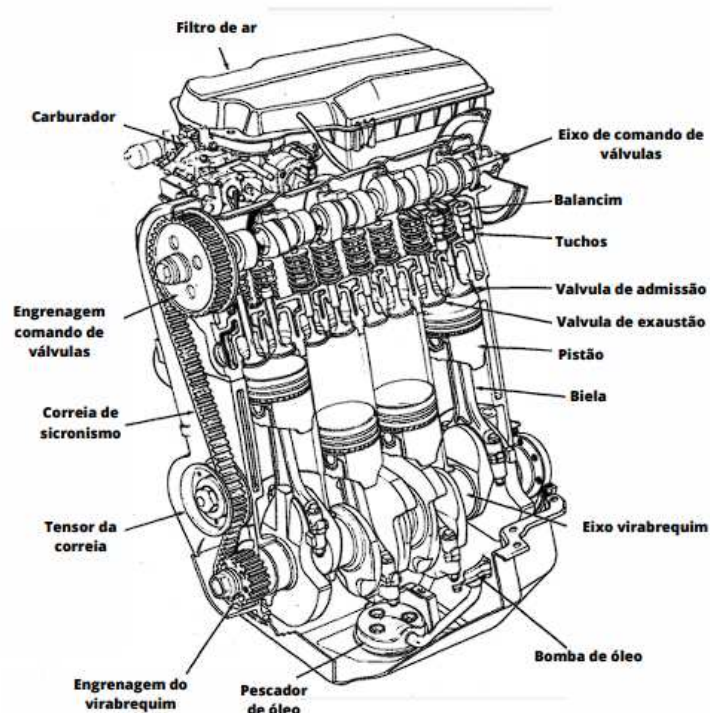
### 3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

#### 3.1 Motores de combustão interna

Motores de combustão interna são amplamente utilizados em diversas áreas da engenharia, sendo uma das principais e mais utilizadas fontes de energia para propulsão de veículos automotivos, geração de energia elétrica e aplicações industriais. Por meio de um processo de combustão controlada acontece a conversão da energia química do combustível em energia mecânica (SORGATO, 2014).

Na Figura 1 é evidenciado alguns componentes do motor de combustão interna (MCI). Na imagem é possível observar um motor com 4 pistões em linha, alimentado por carburador e com duas válvulas em cada cilindro, uma pra admissão da mistura ar e combustível e a outra para a exaustão dos gases provenientes do processo de combustão.

Figura 1 – Representação de um MCI



Fonte: Heywood (1988).

Corroborando Heywood (1988), o funcionamento básico de um motor de combustão interna envolve a queima de um combustível no interior de uma câmara de combustão, onde ocorre a expansão dos gases resultantes, gerando movimento e potência.

A importância dos motores de combustão interna reside na sua eficiência, versatili-



dade e facilidade de transporte e armazenamento de combustíveis líquidos. Além disso, esses motores são capazes de fornecer uma grande quantidade de energia em um curto espaço de tempo, tornando-os ideais para aplicações que requerem alto desempenho.

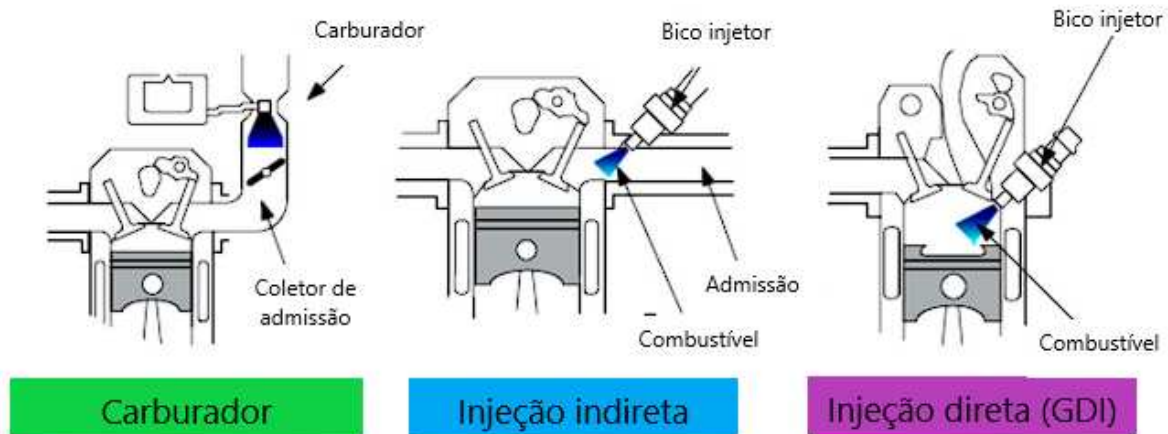
Neste contexto, é fundamental compreender o funcionamento dos motores de combustão interna, suas características, desempenho e eficiência. A partir desse conhecimento, é possível identificar e implementar melhorias nos sistemas de combustão, visando a otimização do desempenho e a redução de emissões de poluentes, contribuindo para a sustentabilidade e eficiência energética.

Martins (2013) classifica os motores de combustão interna de acordo com várias características, incluindo o ciclo de operação, o tipo de combustível, o tipo de ignição, o número de tempos, a disposição dos cilindros e o método de controle de carga. Seguem abaixo as classificações propostas:

- Aplicação: Automóvel, locomotiva, Aviões leves, Marinhas ou motores estacionários;
- Geometria do motor: Motores alternativos (Cilindros em linha, em V, radial ou cilindros opostos) e Rotativos (Motor wankel);
- Ciclo de trabalho: 4 tempos podendo ser Aspirado, supercharger e turboalimentado ou 2 tempos sendo convencional, supercharger e turboalimentado;
- Arranjo das válvulas: Motores com válvulas comandadas por eixo ou por hastes;
- Combustível: Gasolina, óleo diesel, gás natural, petróleo líquido, álcool (Metanol ou Etanol), hidrogênio e flex (Mistura de dois tipos de combustíveis);
- Método de mistura: Carburador e injeção eletrônica direta ou indireta;
- Método de ignição: Ignição por centelha ou por compressão (Motores alimentado com óleo diesel);
- Projeto da câmara de combustão: Câmara aberta ou câmara dividida;
- Método de controle de carga: Controlando a mistura de combustível e ar juntas ou controlando somente o combustível de acordo com o ar admitido;
- Método de resfriamento: Refrigerado a água, a ar, ou sem refrigeração.

Portanto, este trabalho teve como foco o estudo e a análise do método de mistura em motores de combustão interna com ignição por centelha, ou seja, motores que trabalham utilizando o ciclo Otto. A fim de investigar a influência da mistura de ar e combustível no desempenho e na eficiência desses motores. Explorando diferentes abordagens e tecnologias de mistura (Figura 2): carburador, injeção direta e indireta.

Figura 2 – Representação dos sistemas de alimentação



Fonte: Adaptado de Khayal (2010).

### 3.2 Ciclo Otto

Brunetti (2012) afirma que o motor com ignição por centelha de 4 tempos é um dispositivo que opera seguindo uma sequência de quatro etapas: admissão, compressão, combustão e exaustão. Essa configuração foi inicialmente proposta por Beau de Rochas em 1862, apresentando os princípios básicos de funcionamento do motor. No entanto, foi Nikolaus August Otto quem aprimorou e aplicou esses conceitos na prática em 1876. Devido à contribuição significativa de Otto para o desenvolvimento e popularização desse tipo de motor, ele é frequentemente referido como "Ciclo Otto". Essa denominação é uma forma de homenagear o trabalho pioneiro de Nikolaus August Otto nessa área.

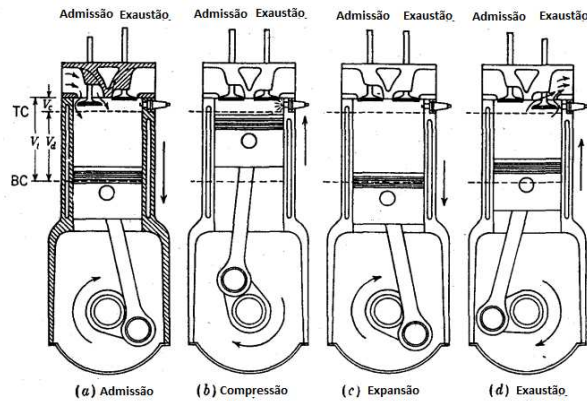
Ainda de acordo com Brunetti (2012), entende-se por tempo o curso do pistão, não podendo confundir o tempo do processo, pois, ao longo do ciclo ocorrerão diversos processos. Visto anteriormente que podem ser dividido em dois grupos, os motores que funcionam em 4 tempos (figura 3) e os motores que funcionam em apenas 2 tempos (figura 4).

#### 3.2.1 Ciclo termodinâmico do motor a quatro tempos

De acordo com Martins (2013), nesse tipo de motor o pistão tem 4 fases, onde cada fase corresponde a meia volta no eixo virabrequim do motor, eixo esse responsável por transmitir a velocidade angular dos pistões para o conjunto de carga do motor, que em um automóvel seria o conjunto de transmissão dos veículos:

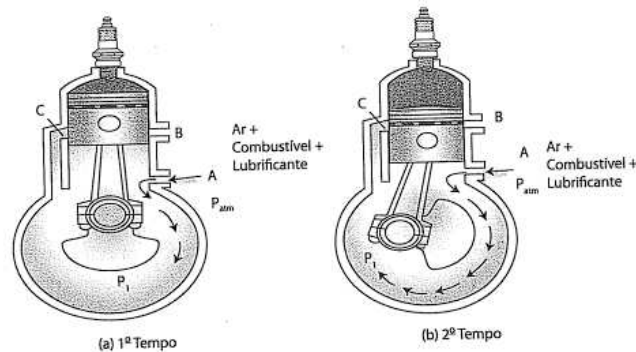
- 1º tempo (Admissão): O pistão desloca do ponto morto superior (PMS) até o ponto morto

Figura 3 – Representação dos 4 tempos do ciclo Otto



Fonte: Heywood (1988).

Figura 4 – Representação dos 2 tempos em um motor com ignição por centelha



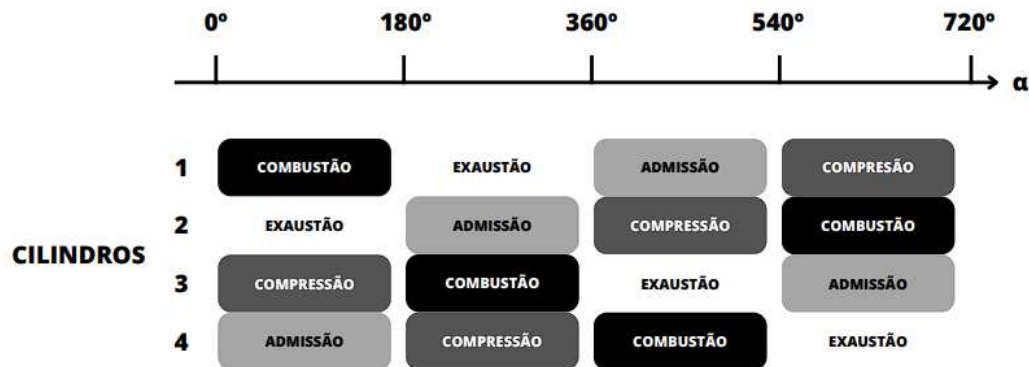
Fonte: Brunetti (2012).

- inferior (PMI), gerando uma pressão negativa causando um fluxo de gases por meio da válvula de admissão que encontra-se aberta. Preenchendo o cilindro com uma mistura ar/combustível ou somente ar nos motores com injeção direta de combustível (GDI).
- 2º tempo (Compressão): Nesse momento as duas válvulas estão fechadas e o pistão desloca do PMI ao PMS, comprimindo a mistura admitida no processo anterior.
  - 3º tempo (Combustão): Nas proximidades em que o pistão encontra-se no PMS é disparado uma centelha, provocando a combustão da mistura. A combustão provoca um grande aumento da pressão interna, fazendo com o que o pistão seja empurrado para o PMI. Nesse processo é onde se realiza o trabalho útil do motor.
  - 4º tempo (Exaustão): Com a válvula de exaustão aberta o pistão é deslocado do PMI ao PMS, empurrando para fora do cilindro todos gases provenientes da combustão, para logo em seguida iniciar o processo de admissão e repetir o ciclo.

Em motores ciclo Otto esses processos acontecem de maneira alternada, a fim de aproveitar sempre o trabalho útil gerado no processo de combustão. Na figura 5 é apresentado uma representação dos processos que ocorrem simultaneamente nos cilindros em um motor de 4

cilindros. Vale ressaltar que essa representação na figura 5 é apenas um exemplo, pois em um motor com 4 cilindros podem ter mais arranjos quanto a ordem de ignição dos cilindros.

Figura 5 – Representação dos processos em um motor 4 cilindros



Fonte: Adaptado de Brunetti (2012).

### 3.2.2 Método de alimentação de combustível

No início da era dos motores a combustão, a mistura ar/combustível era admitida por meio do uso do carburador. Esse componente foi desenvolvido antes mesmo da concepção dos primeiros motores que adotaram o princípio proposto por Nikolaus Otto.

Conforme Onate e Frías (2019) destacam em estudos, a carburação como ciência, começou em 1795 quando Robert Street conseguiu então evaporar terebintina com óleo de alcatrão em um motor que trabalhava com pressão atmosférica, ou seja, até então sem compressão. Já em 1824 os cientistas estadunidenses Samuel Morey e Erskine Hazard, um advogado de patentes, conseguiram criar um carburador com um sistema de preaquecimento para facilitar na evaporação. Só então em 1885 Nikolaus Otto conseguiu os resultados utilizando em seus motores uma versão melhorada do carburador, alimentando o motor com um petróleo refinado (Gasolina e Benzina mineral).

O carburador por ser um sistema puramente mecânico, foi por muito tempo a principal forma de admissão do combustível. Porém, com o desenvolvimento da tecnologia ele foi substituído pelo gerenciamento eletrônico da mistura, método esse conhecido como injeção eletrônica.

Os mesmos autores complementam que a injeção eletrônica veio como solução de diversos problemas que o carburador carregava, como diminuição do consumo de combustível, redução na emissão de gases poluentes, aumento de potência e um melhor gerenciamento da

combustão.

### 3.2.3 Relação combustível-ar

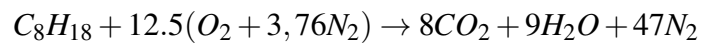
É a relação entre a massa de ar ( $m_a$ ) e a massa de combustível ( $m_c$ ) que formam a mistura (equação 3.1).

$$F = \frac{m_c}{m_a} \quad (3.1)$$

Destacam algumas literaturas de preparação automotiva é mais comumente usado o inverso dessa relação (equação 3.2), a relação ar/combustível (A/F) (FUELTECH, 2019).

$$F^{-1} = \frac{1}{F} = \frac{m_a}{m_c} \quad (3.2)$$

Para uma melhor eficiência da combustão é importante manter a relação estequiométrica ( $F_e$ ) da mistura, ou seja, supondo uma combustão completa do combustível com a gasolina tendo uma composição média de  $C_8H_{18}$  e o ar admitido, aproximadamente, 21% de Oxigênio e 79% de Nitrogênio (equação 3.3):



Massa atômica dos elementos químicos:

- C: 12
- H: 1
- O: 16
- N: 14

Logo,

$$\text{Combustível: } 8 \cdot 12 + 18 + 1 = 115$$

$$\text{Ar: } 12,5 \cdot 32 + 47,0 \cdot 28 = 1.716$$

$$F^{-1} = \frac{m_a}{m_c} = \frac{1.716}{114} = 14,92 \quad (3.3)$$

Portanto, a relação ideal de massa de ar por massa de combustível é de aproximadamente igual a 15 (6,67% de combustível na mistura). Valor esse utilizado como referência para estudos teóricos utilizando a gasolina como combustível.

Devido à diferença significativa na composição dos produtos da combustão entre misturas com excesso de ar ou misturas ricas em combustível, a relação estequiométrica depende da composição do combustível. A razão entre a relação real ar e combustível e a relação estequiométrica (equação 3.4) é o parâmetro mais significativo para definir o estado da mistura. Representado por  $\lambda$ , significa a razão entre a A/F atual e a A/F ideal (HEYWOOD, 1988).

$$\lambda = \frac{A/F_{atual}}{A/F_{ideal}} \quad (3.4)$$

O valor  $\lambda$  indica se a mistura ar/combustível está mais rica (com excesso de combustível) ou mais pobre (com excesso de ar) em relação à mistura estequiométrica ideal. Uma mistura estequiométrica é aquela em que a quantidade de ar é exatamente suficiente para reagir com todo o combustível. Nesse contexto, o valor  $\lambda$  é uma medida crucial para avaliar a eficiência da combustão:

- $\lambda > 1$  indica que a mistura está pobre, excesso de ar
- $\lambda = 1$  indica que a mistura está na proporção ideal
- $\lambda < 1$  indica que a mistura está rica, excesso de combustível

De acordo com Brunetti (2012), o comportamento da mistura não depende apenas da sua composição média, mas também da homogeneização do vapor de combustível no ar. Em algumas condições uma mistura com  $\lambda < 1$  pode apresentar característica de mistura pobre por falta de homogeneização. Citando como exemplo a partida a frio, onde apresenta uma mistura rica porém causa sinais de excesso de ar devido a falta de vaporização.

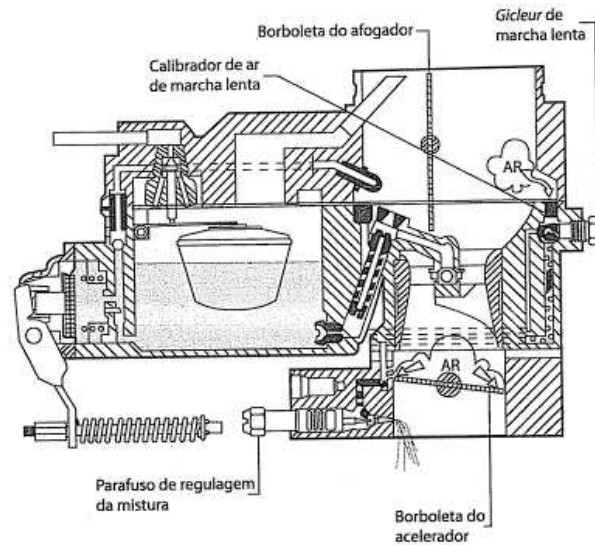
### 3.3 Carburador

O carburador (Figura 6) é um elemento mecânico que promove a mistura ar/combustível, dosando uma certa quantidade de combustível dado uma certa quantidade de ar admitido.

Para Albuquerque (1997), o carburador tem que conter alguns sistemas auxiliares para que atenda as necessidades do motor:

- Marcha lenta e progressão: Dada uma certa carga no motor ou a ausência dela o carburador tem que manter o motor em funcionamento, sem excesso ou falta de combustível.
- Faixa econômica: Evitar o enriquecimento da mistura em acelerações, também conhecido como sistema de correção em cargas médias.

Figura 6 – Representação do processo interno em um carburador



Fonte: Brunetti (2012).

- Máxima potência: tem a função de garantir a máxima potência do motor.
- Acelerações rápidas: Evitar que a mistura empobreça em aberturas muito bruscas da borboleta.
- Partida a frio: Enriquecimento da mistura em partidas para que o motor funcione logo, sistema também conhecido como afogador.

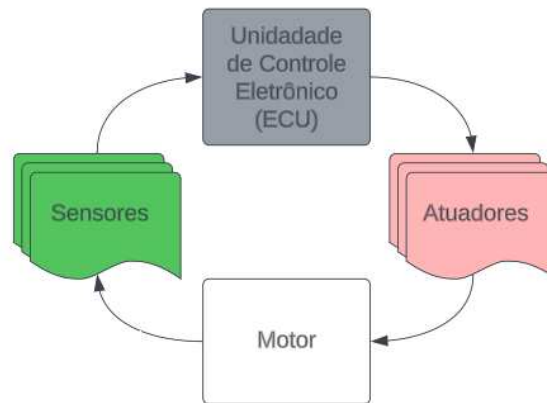
### 3.4 Injeção eletrônica indireta

A injeção eletrônica indireta, ou também conhecida apenas como injeção eletrônica foi inicialmente desenvolvida por Robert Bosch em 1912, porém só em 1989 com o veículo Volkswagen Gol que foi chegar ao Brasil. O sistema é composto por sensores, atuadores e a ECU (*Electronic Central Unit*) módulo responsável por gerenciar todo o funcionamento do veículo. A ECU recebe as informações em tempo real dos sensores do que está acontecendo no motor, já os atuadores são controlados de modo a gerenciar as atuações mecânicas para comandar funções do motor (ALMEIDA, 2019).

#### *ECU*

A Unidade de Controle Eletrônico (ECU), figura 8, é o componente principal dos sistemas de injeção eletrônica, responsável por comandar e monitorar o funcionamento do sistema. Para isso, ela trabalha em conjunto com uma série de sensores e atuadores, que recebem e atuam em diferentes partes do motor para garantir o perfeito funcionamento do sistema. O

Figura 7 – Representação do processo de gerenciamento eletrônico do motor



Fonte: Elaboração própria (2023).

tempo de injeção, a variação do avanço da ignição e o acionamento do ventilador elétrico do sistema de arrefecimento são exemplos de funções desempenhadas pela ECU. Além disso, ela possui uma memória interna onde registra e armazena os erros nos parâmetros de funcionamento quando ocorrem, indicando ao motorista a existência de uma anomalia no sistema que precisa ser verificada. Isso geralmente é sinalizado pelo acendimento da luz de anomalia (Figura 9) do sistema de injeção (ALMEIDA, 2019).

Figura 8 – Unidade de Controle Eletrônico



Fonte: Elaboração própria (2023).

Figura 9 – Luz de anomalia



Fonte: Elaboração própria (2023).

### ***Sensores e Atuadores***

O correto funcionamento do motor depende do bom desempenho dos sensores e atuadores, o que proporciona um melhor rendimento, menor consumo de combustível e controle



adequado das emissões de poluentes. Os sensores são fabricados com tecnologia e qualidade de ponta, desempenhando um papel essencial no funcionamento adequado do veículo. Eles têm aplicações que vão desde o sistema de gerenciamento do motor até o monitoramento de emissões (BOSCH, 2004).

Os sensores são dispositivos eletrônicos responsáveis por transformar parâmetros físicos do motor, como pressão, temperatura e rotação, em sinais elétricos. É explicado no manual da Bosch (2004), que esses sinais são lidos pela unidade de comando do veículo, que utiliza essas informações para tomar decisões e ajustar o funcionamento do motor. Por outro lado, os atuadores são componentes controlados pelos sinais enviados pela unidade de comando. Eles têm a função de manter o motor em funcionamento nas melhores condições possíveis, respondendo aos comandos da unidade de comando.

### **Válvula cânister**

Ainda de acordo com o manual, a válvula cânister é o atuador responsável por aproveitar os gases presentes no tanque de combustível que seriam expelidos a atmosfera são redirecionados ao coletor de admissão, logo após o corpo de borboleta, fazendo com que os gases sejam admitidos dentro da câmara de combustão.

### **Atuador de marcha lenta**

De acordo com Almeida (2019), entre os principais atuadores do motor o atuador de marcha lenta, ou também conhecido por motor de passo, por meio dele a ECU regula a velocidade do motor quando este está em marcha lenta. O motor de passo está instalado no corpo de borboleta e permite uma variação na passagem de ar quando a borboleta está fechada, ou seja, quando o pedal do acelerador não está sendo pressionado. Assim, a ECU controla a rotação do motor conforme a programação estabelecida.

### **Bicos injetores**

Menciona Almeida (2019), que os bicos injetores são componentes avançados que funcionam sob comando eletrônico do módulo de injeção. Eles operam por meio de pulsos elétricos que os fazem abrir e fechar em questão de segundos, pulverizando a quantidade adequada de combustível nos dutos do coletor de admissão. Esses injetores são facilmente

identificáveis e estão localizados no coletor de admissão. Nos veículos mais modernos, eles desempenham um papel fundamental na câmara de combustão, no que é conhecido como sistema de injeção direta, proporcionando um melhor aproveitamento do combustível.

### **Eletro ventilador**

O ventilador do radiador, desempenha um papel essencial no controle da temperatura do motor. Sua função é forçar a troca de calor entre o radiador, onde está localizado o líquido de arrefecimento responsável por regular a temperatura do motor, e o ambiente externo.

Ele realiza essa tarefa ao puxar o ar por entre as aletas de alumínio do radiador, promovendo a dissipação do calor. É destacado no manual da Bosch (2004), que o ventilador do radiador trabalha em conjunto com o sensor de temperatura do motor, que monitora a temperatura do motor em tempo real e envia essas informações para a ECU. Com base nessas informações, a ECU pode realizar o acionamento do ventilador do radiador para garantir que a temperatura do motor permaneça dentro dos limites adequados.

### **Bomba de combustível**

Ainda em consonância com o manual da Bosch (2004), as características dos veículos com injeção eletrônica, a bomba de combustível desempenha um papel essencial no sistema. Essa bomba é do tipo elétrica e pode estar localizada internamente no tanque de combustível ou conectada à linha de combustível. Sua principal função é pressurizar o combustível, garantindo a vazão e a pressão necessárias para o correto funcionamento do motor.

Dessa forma, a bomba de combustível elétrica desempenha um papel fundamental no sistema de alimentação de veículos com injeção eletrônica, garantindo que o motor receba o combustível necessário para seu funcionamento adequado.

### **Sensor de oxigênio (Sonda lambda)**

A sonda lambda é um componente essencial no sistema de controle de emissões dos veículos. Ela é responsável por monitorar o teor de oxigênio nos gases de escape e fornecer informações à unidade de controle do veículo (CHERATO, 2021). Com base nesses dados, a unidade de controle ajusta a quantidade de combustível injetado para manter uma mistura ar-combustível ideal.

Ao medir a quantidade de oxigênio nos gases de escape, a sonda lambda ajuda a determinar se a mistura ar-combustível está rica (excesso de combustível) ou pobre (excesso de ar). Com essas informações, a unidade de controle pode realizar ajustes precisos na injeção de combustível para garantir uma queima eficiente e reduzir as emissões de poluentes.

Assim, a sonda lambda desempenha um papel crucial no controle das emissões veiculares, contribuindo para um melhor desempenho do motor, economia de combustível e redução do impacto ambiental, ao garantir uma mistura adequada de ar e combustível durante o funcionamento do veículo.

### **Sensor de temperatura**

Dentro do contexto da injeção eletrônica em motores de veículos, o sensor de temperatura desempenha um papel crucial. Ele é responsável por medir a temperatura do motor ou do ar de admissão e fornecer essas informações à unidade de controle eletrônico (BOSCH, 2004).

Com base na leitura do sensor de temperatura, a unidade de controle pode ajustar a quantidade de combustível injetado para garantir uma mistura ar-combustível adequada às condições térmicas do motor. Isso é essencial para o funcionamento eficiente e o desempenho ideal do motor, bem como para reduzir as emissões de poluentes.

Além disso, o sensor de temperatura também pode ser usado para proteção do motor, monitorando o superaquecimento e acionando alertas ou medidas de segurança, como a redução de potência ou o desligamento do motor em casos extremos.

### **Sensor MAP**

O sensor MAP (sensor de pressão absoluta), é responsável por medir a pressão absoluta do coletor de admissão, fornecendo informações vitais para o controle do sistema de injeção eletrônica. Ele ajuda a determinar a quantidade adequada de combustível a ser injetada e auxilia no controle do avanço de ignição, contribuindo para um melhor desempenho, economia de combustível e redução das emissões de poluentes (BOSCH, 2004).

## **Sensor de rotação**

O sensor de rotação, também conhecido como sensor de posição do virabrequim ou sensor de fase, é um componente importante em sistemas de ignição e injeção eletrônica de motores de combustão interna. Sua função principal é monitorar a rotação do virabrequim do motor e fornecer informações precisas sobre a posição dos pistões (BOSCH, 2004).

O sensor de rotação geralmente utiliza um sinal magnético ou de efeito Hall para detectar os movimentos do virabrequim. Ele registra as mudanças no campo magnético ou a passagem dos dentes de uma roda dentada especial acoplada ao virabrequim. Com o auxílio do sensor de rotação, a unidade de controle pode ajustar o momento correto para a injeção de combustível e a ignição da faísca, garantindo a eficiência da combustão e o desempenho ideal do motor.

### **3.4.1 Injeção eletrônica direta**

A injeção direta de combustível (GDI) é um sistema avançado utilizado em motores de combustão interna, que tem como principal função introduzir o combustível diretamente na câmara de combustão do motor (Figura 10), em vez de injetá-lo previamente no coletor de admissão. Esse método permite um controle mais preciso da quantidade de combustível e do momento exato da injeção.

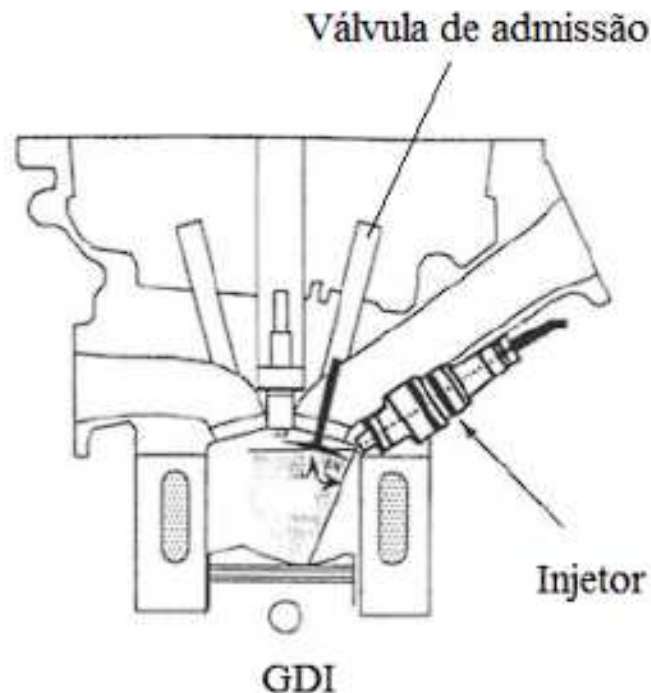
No processo de injeção direta, o combustível é pulverizado em forma de finas partículas diretamente na câmara de combustão, onde ocorre a mistura com o ar necessário para a queima (semelhante ao modelo de combustão Diesel). Essa pulverização é realizada por meio de injetores posicionados estrategicamente, que são controlados eletronicamente para garantir uma pulverização adequada.

Uma das principais vantagens da injeção direta é a melhoria na eficiência de combustível. Ao injetar o combustível diretamente na câmara de combustão, é possível obter uma queima mais completa e eficiente, o que resulta em um melhor aproveitamento da energia do combustível e, conseqüentemente, em um consumo reduzido.

## **3.5 Eficiência energética do motor**

De modo a realizar uma análise quantitativa dos fenômenos físico químicos que o fluido é submetido, Martins (2013) propõe recorrer a aproximações teóricas. Utilizando as

Figura 10 – Representação do posicionamento do bico injetor no GDI



Fonte: Guzzo (2017).

seguintes hipóteses para ar padrão:

- O fluido operante apresenta sempre as propriedades de ar;
- O fluido operante comporta-se como gás perfeito;
- O processo de combustão é substituído pela adição de calor a partir de uma fonte externa;
- O processo de escape é substituído pela rejeição de calor, restaurando o fluido ao seu estado inicial.

Assumindo também, a consideração do calor específico do ar constante, e temperatura ambiente (25 °C). Segundo Martins (2013), essas hipóteses apresentadas levam a simplificação para evitar erros significativos, já que visto anteriormente a quantidade de combustível adicionada no ar é baixa (cerca de 7% para a gasolina), permitindo então o estudo qualitativo das influências dos principais parâmetros no desempenho dos motores.

### 3.5.1 *Rendimento dos ciclos teóricos*

A modelagem do ciclo de um motor é obtida (Equação 3.5) por meio da 1ª lei da termodinâmica, que é dada por (SZERWINSKI, 2016):

$$\Delta U = Q - W \quad (3.5)$$

Também é importante ressaltar que a segunda lei afirma para produção de trabalho útil, tem de haver troca de calor entre duas fontes térmicas, uma mais quente ( $T_Q$ ) e outra mais fria ( $T_F$ ), onde não é possível transformar todo o calor em trabalho. Portanto o rendimento de uma máquina térmica (equação 3.6) que funcione de maneira reversivelmente entre as duas fontes é obtida por:

$$\eta_{MT} = 1 - \frac{T_F}{T_Q} \quad (3.6)$$

Logo, aplicando a primeira lei da termodinâmica (equação 3.7) no ciclo do motor temos que:

$$W_{ciclo} = Q_Q - Q_F \quad (3.7)$$

Ou seja, o trabalho obtido pelo motor é dado pela diferença de calor entre a fonte quente ( $Q_Q$ ) e a fonte fria ( $Q_F$ ). Portanto, o rendimento será a razão entre o trabalho útil e a energia gasta (equação 3.8):

$$\eta_{MT} = 1 - \frac{W}{Q_Q} \quad (3.8)$$

### 3.5.2 Ciclo teórico a um volume constante

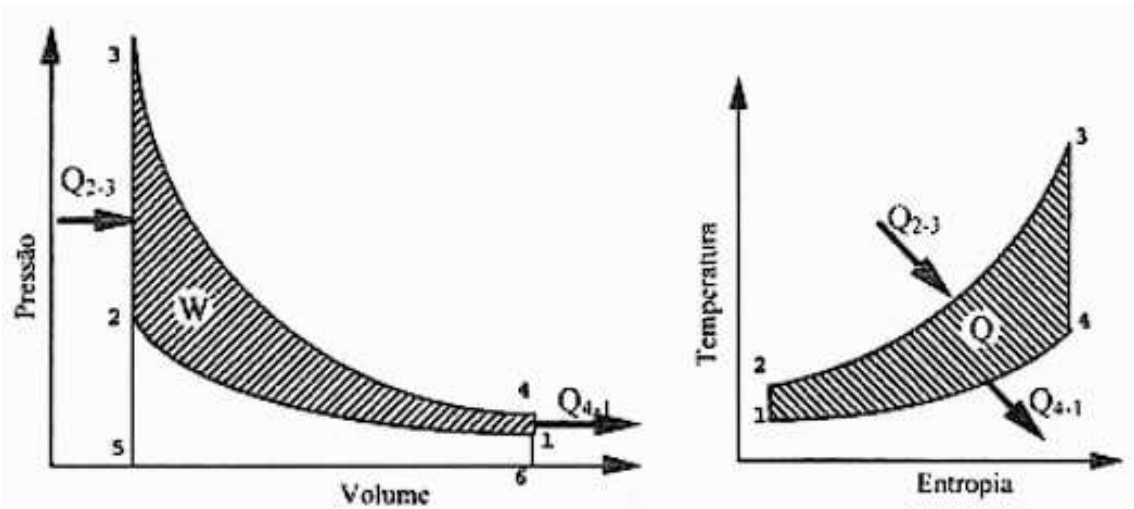
Martins (2013) divide o ciclo teórico do motor Otto em 4 partes (Figura 11), onde as transformações termodinâmicas são as seguintes:

- 1 - 2 **Adiabática (Isentrópica)**. O fluido é comprimido pela realização de trabalho  $W_{1,2}$ , definido pela área (1-2-5-6) do diagrama pV da figura 11.
- 2 - 3 **Isocórica**. Acontece no PMS a explosão instantânea da mistura ar/combustível. A quantidade de calor fornecida pela reação é definida por  $Q_{2,3} = C_v(T_3 - T_2)$ , onde  $C_v$  é a capacidade calorífica do combustível utilizado.
- 3 - 4 **Adiabática (Isentrópica)**. O fluido é expandido. Realizando o trabalho  $W_{3,4}$ , definido pela área (4-3-5-6-4) do diagrama pV.
- 4 - 1 **Isocórica**. Corresponde à perda de calor explicitada no diagrama  $T - S$  abaixo da linha 4-1. O calor perdido é definido por  $Q_{4,1} = C_v(T_4 - T_1)$ .

### 3.5.3 Eficiência do ciclo Otto

De acordo com Szerwinski (2016), o trabalho realizado é dado pela diferença entre o calor fornecido pela combustão e o calor liberado no momento de abertura das válvulas de

Figura 11 – Representação dos processos em um motor 4 cilindros



Fonte: Martins (2013).

escape. Logo, pode-se definir matematicamente (equações 3.9 e 3.10) a eficiência do ciclo Otto, como:

$$\eta_{Otto} = \frac{W}{Q_{2,3}} = \frac{Q_{2,3} - Q_{4,1}}{Q_{2,3}} = 1 - \frac{Q_{4,1}}{Q_{2,3}} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_1}{T_2} \frac{\frac{T_4}{T_1} - 1}{\frac{T_3}{T_2} - 1} \quad (3.9)$$

Definindo a taxa de compressão ( $\epsilon$ ) e a razão dos calores específicos ( $\gamma$ ) como:

$$\begin{aligned} \epsilon &= \frac{V_1}{V_2} \\ \gamma &= \frac{C_p}{C_v} \\ \frac{T_1}{T_2} &= \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \frac{1}{\epsilon^{\gamma-1}} \\ \frac{T_4}{T_3} &= \left(\frac{V_3}{V_4}\right)^{\gamma-1} = \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{\gamma-1} = \frac{T_1}{T_2} \end{aligned}$$

Logo:

$$\boxed{\eta = 1 - \frac{1}{\epsilon^{\gamma-1}}} \quad (3.10)$$

Martins (2013) define que o rendimento de um motor de ciclo Otto depende apenas da taxa de compressão (Figura 12), porém o funcionamento real desses motores utilizando gasolina comum estão sujeitas a uma anomalia na combustão, conhecida como "grilar", sendo causada pela taxa de compressão elevada. Contudo, o motor ciclo Otto tem seu  $\epsilon$  limitado em 12, em motores normais utilizando gasolina, embora ultrapassando os 15 utilizando combustíveis especiais.

Porém essa eficiência é para o ciclo teórico, logo não pode ser utilizada para o ciclo real. Para definir o trabalho e eficiência do ciclo real, é importante entender os fenômenos de perda de rendimento envolvidos em todo o processo:

- *Time Loss*: A perda por tempo de combustão refere-se a perda no intervalo entre o disparo da centelha e o instante do início da combustão. Stone (1992) indica que a centelha é disparada pouco antes do PMS para melhor aproveitamento do trabalho útil da combustão.
- *Heat Loss*: A Perda por transferência de calor compreende ao instante que o fluido começa a ser comprimido, sua temperatura eleva e parte dela é transferida para as paredes do cilindro. Szerwinski (2016) apud Ribeiro (2006) indica que a temperatura no momento da compressão não é tão alta, portanto é desprezada.
- *Exhaust blowdown loss*: Embora em carros de passeio, as válvulas de escape são projetadas para abrir cerca de 47 graus antes do PMS, o que é conhecido como ângulo de abertura de escape. Essa configuração é utilizada para maximizar a eficiência de exaustão e desempenho do motor. A Perda por esvaziamento de exaustão é provocada pela quantidade de gases de escape residual que permanece no cilindro e não é totalmente liberada no instante da exaustão (SZERWINSKI, 2016).
- *Pumping Loss*: A perda por bombeamento refere-se à energia consumida pelo motor para realizar a compressão e a expansão dos gases no ciclo de combustão. Durante a fase de compressão, o pistão comprime a mistura ar-combustível no cilindro, o que requer energia mecânica. Já durante a expansão a energia da combustão empurra o pistão para baixo, produzindo trabalho.

A Figura 13 (SZERWINSKI, 2016) representa o diagrama pV considerando as perdas citadas anteriormente.

### 3.6 Parâmetros Geométrico do Motor

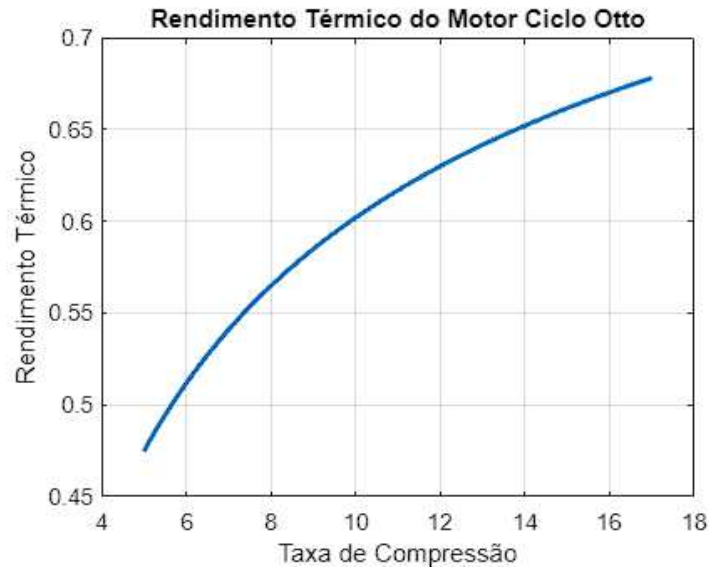
Embora motores que tenham a mesma cilindrada, possam apresentar valores de potencia diferentes, os parâmetros de projeto define (equações 3.11, 3.12 e 3.13) o qual eficiente o motor vai ser, tais como o diâmetro e quantidade de cilindros, a taxa de compressão ou desenho da câmara de combustão, etc. Esse valores são conhecidos como parâmetros geométricos (Figura 14) do motor e os mais importantes de acordo com Martins (2013) são:

- Taxa de compressão ( $\epsilon$ )

$$\epsilon = \frac{V_{PMI}}{V_{PMS}} = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_v + V_{cc}}{V_{cc}} \quad (3.11)$$

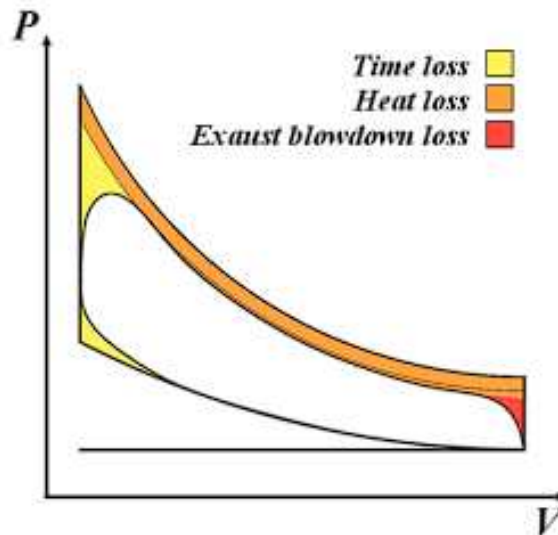


Figura 12 – Rendimento do Ciclo Otto variando a taxa de compressão ( $\epsilon$ )



Fonte: Adaptado de Martins (2013).

Figura 13 – Representação do diagrama pV considerando perdas



Fonte: Szerwinski (2016).

- Relação diâmetro-curso do pistão ( $R_{DC}$ )

$$R_{DC} = \frac{D}{C} \quad (3.12)$$

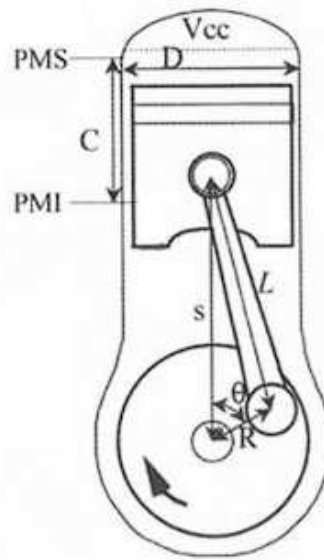
- Relação comprimento biela - raio do virabrequim ( $R_{BV}$ )

$$R_{BV} = \frac{L}{R} \quad (3.13)$$

Observando a figura que representa a geometria do motor podemos tirar algumas conclusões:

- $C = 2R$

Figura 14 – Geometria do motor



Fonte: Martins (2013).

$$- V = V_{cc} + \frac{\pi \cdot D^2}{4} (L + R - s)$$

– Onde  $s$  é em função de  $\theta$

$$s = R \cos \theta + (L^2 - R^2 \sin^2 \theta)^{1/2}$$

Portanto, é possível escrever  $V$  como uma equação em função de  $\theta$ :

$$V = V_{cc} \left[ 1 + 0,5(\varepsilon - 1)(R_{BV} + 1 - \cos \theta - \sqrt{R_{BV}^2 - \sin^2 \theta}) \right] \quad (3.14)$$

De acordo com Martins (2013) a área de transferência de calor e a velocidade instantânea do pistão são respectivamente:

$$A = A_{cc} + A_p + \frac{\pi \cdot DL}{2} \left( R_{BV} + 1 - \cos \theta - \sqrt{R_{BV}^2 - \sin^2 \theta} \right) \quad (3.15)$$

$$v_p = v_{med} \cdot \frac{\pi}{2} \sin \theta \left[ 1 + \frac{\cos \theta}{\sqrt{R_{BV}^2 - \sin^2 \theta}} \right] \text{ (rot/s)} \quad (3.16)$$

Onde  $v_{med}$  é a velocidade média do pistão:  $v_{med} = 2 \cdot CN$

$N$  é a velocidade do motor (rot/s).

Em motores gasolina os valores habituais para velocidade média do pistão é cerca de 15 m/s, podendo chegar a 25 m/s em motores de competição.

Ao longo deste capítulo, foram apresentados os principais fundamentos teóricos relacionados aos sistemas de alimentação para motores ciclo Otto, com foco em um estudo comparativo entre carburador, injeção eletrônica direta e indireta de combustível. Foram discutidos os princípios de funcionamento, características e vantagens de cada sistema.

O carburador, amplamente utilizado no passado, é um dispositivo responsável pela mistura de ar e combustível antes de serem admitidos no motor. Apresenta simplicidade de construção, porém, tem limitações em termos de eficiência e controle preciso da mistura ar-combustível.

Já a injeção eletrônica, tanto direta quanto indireta, trouxe avanços significativos na eficiência e controle do processo de combustão. A injeção eletrônica direta permite a pulverização direta de combustível nos cilindros, proporcionando melhor aproveitamento e desempenho. Por outro lado, a injeção eletrônica indireta realiza a injeção do combustível antes da admissão no coletor de admissão, garantindo uma mistura adequada e controlada.

Nesse sentido, é fundamental destacar que a escolha do sistema de alimentação adequado para um determinado veículo depende de diversos fatores, como desempenho desejado, eficiência energética, emissões de poluentes e custos de produção. Cada sistema possui suas próprias características e requisitos de manutenção.

No próximo capítulo, será apresentada a metodologia adotada neste estudo comparativo, detalhando os procedimentos de teste e análise realizados para avaliar o consumo de combustível, emissões de gases e outros parâmetros relevantes.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste estudo foi realizado um teste prático de consumo de combustível em dois veículos: o Volkswagen Gol Geração 6 e o Buggy Equus, ambos equipados com motores 1.6. O objetivo principal foi comparar o consumo de combustível e emissão de ruído entre esses dois veículos em condições reais de condução.

A metodologia adotada consistiu em realizar um percurso de teste pré-determinado, que abrangeu diferentes tipos de vias, como estradas urbanas e rodovias. Durante o teste, foram registrados os dados de consumo de combustível, incluindo a quantidade de combustível consumida ao longo do percurso e a distância percorrida.

Após a conclusão do teste, os dados de consumo de combustível foram coletados e analisados, onde foi feita uma comparação direta entre o consumo de combustível do Volkswagen Gol G6 e do Buggy Equus, levando em consideração a distância percorrida e a quantidade de combustível consumida por cada veículo.

### 4.1 Veículos

#### *Volkswagen Gol G6*

O Volkswagen Gol G6 (Figura 15) é um veículo equipado com um sistema de gerenciamento eletrônico de injeção. Utilizando injeção eletrônica indireta este veículo é equipado com diferentes opções de motorização, incluindo motores a gasolina e flex, ou seja, também pode ser utilizado o etanol como combustível.

Figura 15 – Gol Geração 6



Fonte: Elaboração própria (2023).

Uma das opções de motor é o 1.0L MPI, que proporciona uma potência de aproximadamente 72 cavalos a 5.250 rpm e um torque de cerca de 9,7 kgfm a 3.850 rpm. Para aqueles que buscam um motor mais potente, o Gol G6 também oferece o motor 1.6L MSI, com uma potência de cerca de 104 cv a 5.250 rpm e um torque de aproximadamente 15,6 kgfm a 2.500 rpm. Ambos com sua injeção eletrônica gerenciada por uma ECU Bosch Motronic.

### ***Buggy Equus***

Esse veículo conta com um motor 1600 também de fabricação Volkswagen. Alimentado com o uso de carburador e sistema de ignição por distribuidor mecânico esse motor tem uma refrigeração a ar e a disposição de cilindros opostos. Amplamente utilizado em veículos como o Fusca e a Kombi, esse motor apresenta características técnicas únicas e um design reconhecido em todo o mundo.

Com um deslocamento de aproximadamente 1,6 litros, cada cilindro contribui com cerca de 0,4 litros. Essa capacidade, combinada com a configuração de quatro cilindros, oferece um equilíbrio entre potência e eficiência.

Figura 16 – Buggy Equus



Fonte: Elaboração própria (2023).

A potência e o torque podem variar dependendo do modelo e da configuração específica do motor, mas em geral, o motor 1600 da Volkswagen pode entregar uma potência de cerca de 50 a 60 cavalos, com um torque de aproximadamente 11 a 13 kgfm.

## 4.2 Testes

### *Teste de consumo*

Inicialmente, os veículos foram abastecidos com exatamente 5 litros de combustível em seus tanques. Essa quantidade padronizada foi utilizada para garantir a equidade nos testes.

Para a condução dos testes de autonomia dos veículos, foi estabelecida uma rota específica na cidade de Paracuru(CE). Essa rota abrange diferentes tipos de terreno, como áreas urbanas e estradas rodoviárias, proporcionando uma variedade de condições de tráfego para os veículos em teste.

O percurso em Paracuru (Figura 17) foi selecionado levando em consideração fatores como a disponibilidade de vias adequadas, a segurança dos condutores e a representatividade das condições de condução do dia a dia.

Figura 17 – Rota estabelecida em Paracuru (CE)



Fonte: Elaboração própria (2023).

Durante o teste, foram registradas as quilometragens iniciais de cada veículo, assegurando um ponto de partida consistente. Ambos os veículos foram mantidos com as mesmas configurações, como desligar o ar-condicionado e manter ajustes de direção e suspensão padrão.

A condução foi realizada em conformidade com as leis de trânsito, buscando uma condução estável e constante. Foram evitadas acelerações bruscas e frenagens repentinas, a fim de não afetar a eficiência do consumo de combustível.

Foram feitos registros regulares da quilometragem percorrida, permitindo o acompanhamento do consumo de combustível. A cada intervalo de 10 minutos e foram anotadas as

informações.

O volume de combustível utilizado nos testes foi de 5 L, com um auxílio de um galão com o devido selo do INMETRO semelhante ao da Figura 18

Ao finalizar os testes, foi calculada a autonomia de cada veículo dividindo a quilometragem percorrida pelo volume de combustível utilizado (5 litros). Esse cálculo fornecerá a média de autonomia em km/l para cada veículo.

Figura 18 – Galão de emergência



Fonte: Loja do Mecânico (2023).

É importante destacar que a realização dos testes foi feita em conformidade com as normas de segurança e legislação de trânsito vigentes, visando a precisão e integridade dos resultados, bem como a segurança dos condutores e demais usuários das vias públicas.

### ***Teste de ruído***

Foi realizado um teste de ruído para avaliar o nível de ruído gerado pelos veículos selecionados. O teste foi conduzido em um ambiente controlado, onde obteve-se medições precisas do ruído emitido pelos motores.

Para realizar o teste, foi utilizado um medidor de decibéis digital (Figura 19), capaz de quantificar a intensidade do som em decibéis (dB). O veículo foi colocado em uma área isolada, minimizando a interferência de ruídos externos.



Figura 19 – Decibelímetro Digital Lith



Fonte: LITH (2023).

Durante o teste, o veículo foi ligado e submetido a quatro situações:

- Marcha lenta (Funcionamento entre 700 e 800 RPM)
- Aceleração (Com pico de 4000 RPM)
- Velocidade Constante (2000 RPM)
- Desaceleração

As medições de ruído foram registradas e os valores obtidos foram analisados estatisticamente para obter uma média e valores máximos e mínimos do nível de ruído emitido pelos veículos em estudo. Essas informações foram utilizadas para comparar e avaliar a diferença de ruído entre os veículos testados.

### **Injeção direta e indireta**

A metodologia adotada para avaliar a diferença entre injeção direta e indireta foi de natureza teórica. Nesse sentido, foi realizada uma revisão bibliográfica detalhada, buscando compreender os princípios de funcionamento e as características de cada tipo de injeção. Foram analisadas pesquisas, estudos e artigos científicos que abordassem os aspectos técnicos, benefícios e limitações de cada sistema.

Foram considerados diversos fatores, tais como desempenho do motor, eficiência energética, consumo de combustível, emissões de poluentes e custo-benefício. Foram comparadas as vantagens e desvantagens de cada tipo de injeção, levando em conta as condições de uso, as regulamentações ambientais e as demandas dos consumidores.



A partir dessa análise teórica, foram traçados cenários hipotéticos e realizadas projeções sobre o desempenho dos veículos com injeção direta e indireta. Essas informações foram fundamentais para as conclusões sobre as diferenças entre os sistemas e suas aplicações práticas. Vale ressaltar que, por se tratar de uma análise teórica, os resultados obtidos devem ser considerados como indicações e direcionamentos para futuras investigações experimentais e testes práticos.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir é apresentada a Tabela 1 que ilustra os valores de torque e potência entre o Buggy e o Gol 1.6. Esses dois veículos foram selecionados para análise, visando a compreensão das diferenças de desempenho entre eles. O torque é uma medida do poder de rotação do motor, enquanto a potência representa a capacidade dos veículos de realizar trabalho. A tabela fornece os valores de torque e potência para o Buggy 1600 e o Gol 1.6, permitindo uma base sólida para a comparação de desempenho entre esses modelos.

Tabela 1 – Comparação de Torque e Potência do Buggy e Gol 1.6

| Modelo  | Torque (kgfm) | Potência (cv) |
|---------|---------------|---------------|
| Buggy   | 11,8          | 56            |
| Gol 1.6 | 15,6          | 104           |

Fonte: Elaboração própria (2023).

### *Consumo*

A tabela 2 apresenta uma comparação entre os consumos e as quantidades de combustível gasto do Buggy e do Gol 1.6. O objetivo dessa análise é fornecer uma visão objetiva das diferenças de eficiência no consumo de combustível entre esses dois modelos. Os valores de consumo são expressos em quilômetros por litro, indicando a distância percorrida por unidade de combustível. A tabela permite uma avaliação direta das diferenças nos consumos e nas quantidades de combustível utilizadas por esses veículos.

Tabela 2 – Comparação de Consumo e Combustível utilizado

| Modelo  | Consumo (km/l) | Combustível utilizado (litros) |
|---------|----------------|--------------------------------|
| Buggy   | 6,34           | 3,8                            |
| Gol 1.6 | 11,48          | 2,1                            |

Fonte: Elaboração própria (2023).

Importante observar que as distancias obtidas nos odômetros dos veículos apresentaram diferença de cerca de 300 metros e de mais de 1 km em relação ao software de navegação (Google Maps), visto que os dois utilizam sistemas diferentes para essa aferição portanto apresentam erros de medição. No entanto, o valor utilizado para os cálculos (24,1 km) foi a média das distâncias.

Nenhum dos veículos consumiram totalmente os 5 litros de combustível disponíveis para o teste. Essa informação é relevante para compreender que os valores de consumo e as quantidades de combustível gasto apresentados na tabela 2 correspondem a essa distância específica. Portanto, considerando o consumo registrado nesse percurso, é possível fazer uma análise mais precisa da eficiência dos veículos em termos de consumo de combustível.

Analisando os resultados identifica-se uma grande vantagem da injeção eletrônica em comparação ao carburador, e como resposta a essa diferença, o desligamento seletivo dos bicos injetores na injeção eletrônica é uma estratégia utilizada para reduzir ainda mais o consumo de combustível em determinadas situações.

Assim como afirma Andrade e França (2021), quando o veículo está em desaceleração ou em marcha lenta, por exemplo, a demanda de combustível é menor. Nesses casos, alguns sistemas de injeção eletrônica possuem a capacidade de desligar temporariamente um ou mais bicos injetores, interrompendo a injeção de combustível nos cilindros que não estão em uso. Isso resulta em uma economia de combustível significativa, uma vez que apenas os cilindros ativos recebem a quantidade necessária de combustível para manter o funcionamento adequado do motor.

### **Ruído**

A tabela 3 apresenta uma comparação dos níveis de ruído entre o Buggy e o Gol 1.6 em diferentes situações. Essa análise tem como objetivo avaliar as variações de ruído geradas por esses veículos em diferentes cenários de operação. Os níveis de ruído são expressos em decibéis (dB) e foram medidos em quatro situações distintas: marcha lenta, aceleração, velocidade constante e desaceleração. A tabela 3 permite uma comparação direta dos níveis de ruído registrados para cada veículo em cada uma dessas condições, fornecendo *insights* sobre as diferenças de ruído entre o Buggy e o Gol 1.6.

Tabela 3 – Comparação dos Níveis de Ruído em Diferentes Situações

| Situação             | Nível de Ruído no Buggy | Nível de Ruído no Gol 1.6 |
|----------------------|-------------------------|---------------------------|
| Marcha Lenta         | 82,8                    | 77,0                      |
| Aceleração           | 100,8                   | 91,2                      |
| Velocidade Constante | 89,6                    | 80,64                     |
| Desaceleração        | 78,8                    | 76,47                     |

Fonte: Elaboração própria (2023).

Tabela 3 construída após análise de variância, tomando as seguintes considerações:

- Para valor de marcha lenta, foi utilizado o valor da média como parâmetro de análise.
- Para aceleração foi utilizado o valor máximo obtido nas leituras, visto que tem que considerar os picos de aceleração.
- Para velocidade constante foi utilizado o valor da média.
- Para desaceleração foi utilizado o valor mínimo das medições, visto que são momentos onde o motor opera apenas por inércia.

### **Injeção Direta**

Peneda (2021) defende que uma das principais vantagens da injeção direta é a melhoria na eficiência de combustível. Ao injetar o combustível diretamente na câmara de combustão, é possível obter uma queima mais completa e eficiente, o que resulta em um melhor aproveitamento da energia do combustível e, conseqüentemente, em um consumo reduzido.

Além disso, o autor acrescenta que a injeção direta oferece uma maior flexibilidade no controle do motor. É possível ajustar a quantidade e o momento da injeção de combustível de acordo com as condições de operação do veículo, permitindo um melhor desempenho em termos de potência, resposta do acelerador e redução de emissões de poluentes.

No entanto, a injeção direta também apresenta alguns desafios. Devido à alta pressão necessária para pulverizar o combustível, são exigidos sistemas de alimentação de combustível mais robustos. Além disso, a formação de depósitos de carbono nos injetores pode ser um problema, requerendo uma manutenção adequada.

No geral, a injeção direta de combustível é uma tecnologia que traz benefícios significativos em termos de eficiência energética, desempenho e redução de emissões. Para Peneda (2021), sua utilização está cada vez mais presente em veículos modernos, contribuindo para um melhor aproveitamento do combustível e uma maior sustentabilidade no setor automotivo.

## 6 CONCLUSÃO

Com base na comparação entre o carburador, injeção eletrônica direta e injeção eletrônica indireta em termos de consumo de combustível, é evidente que a tecnologia de injeção eletrônica oferece vantagens significativas. Tanto a injeção eletrônica direta quanto a indireta mostraram-se mais eficientes em relação ao carburador, resultando em um menor consumo de combustível. Todavia, a injeção eletrônica direta destacou-se como a opção mais eficiente, permitindo uma pulverização precisa do combustível diretamente no cilindro, o que resulta em uma melhor queima e, conseqüentemente, em um consumo reduzido.

Embora tenha apresentado uma diferença significativa nos resultados do teste de ruído entre os veículos, ele não foi conclusivo para determinar qual sistema é melhor em termos de poluição sonora. Verificou-se que a emissão de ruído está mais relacionada aos componentes mecânicos do que aos componentes de injeção de combustível.

É importante ressaltar que a escolha entre os diferentes sistemas de injeção dependerá de diversos fatores, como o tipo de veículo, as condições de uso e as diretrizes do projeto. Contudo, os resultados obtidos neste estudo demonstram claramente os benefícios da injeção eletrônica em termos de eficiência e consumo de combustível, indicando a direção para o aprimoramento contínuo dos sistemas de propulsão veicular.

## REFERÊNCIAS

- ALBUQUERQUE, D. M. J. **Motores de Combustão Interna**. Piracicaba, São Paulo, Brasil: FATEC, 1997.
- ALMEIDA, P. R. L. Metodologia de didatização de medições elétricas em sistemas de injeção eletrônica automotiva. **Revista Eletrônica de Engenharia Elétrica e Engenharia Mecânica**, v. 1, n. 1, p. 73–86, 2019.
- ANDRADE, M. L.; FRANÇA, C. A. de. **Desenvolvimento de um sistema para economia de combustível com rede neural artificial**. 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/17681>. Acesso em: 15 maio 2023.
- BOSCH, R. **Manual de Tecnologia Automotiva**. São Paulo, Brasil: Editora Bosch, 2004.
- BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna**. São Paulo: Blucher, 2012. Vol 1.
- CHERATO, C. E. **Estudo para Instalação de uma Injeção Eletrônica Programável em um Motor 4 Cilindros**. Dissertação (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Santa Catarina, Santa Catarina, Brasil, 2021.
- FUELTECH. **Manual do WB-O2 Nano**. Brasil: [S. n.], 2019. Disponível em: [https://ftmanager.fueltech.com.br/downloads/manual/Portugues/WB-O2\\_Nano.pdf](https://ftmanager.fueltech.com.br/downloads/manual/Portugues/WB-O2_Nano.pdf). Acesso em: 15 maio 2023.
- GUZZO, M. E. **Desenvolvimento de Métodos Computacionais para Análise da Injeção Direta de Combustíveis Líquidos**. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Minas Gerais, 2017.
- HEYWOOD, J. B. **Internal Combustion Engine Fundamentals**. 2. ed. New York: McGraw-Hill, 1988.
- IBAMA. **Programa de Controle de Emissões Veiculares (PROCONVE)**. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>. Acesso em: 25 mar. 2023.
- KHAYAL, O. M. E. S. Gasoline direct injection. **Department of Mechanical Engineering**, Faculty of Engineering and Technology. Nile Valley University: Atbara, Sudan, 2010.
- LITH, F. **Decibelímetro Digital 31.5HZ A 8.5KHZ • LT2406**. 2023. Disponível em: <https://lithferramentas.com.br/produto/decibelimetro-digital-31-5hz-a-8-5khz-lt2406>. Acesso em: 17 Jun. 2023.
- MARTINS, J. **Motores de Combustão Interna**. 4. ed. Braga, Portugal: Editora Publindustrias - Edições Técnicas, 2013.
- MECÂNICO, L. **Galão de Combustível Bombona 5 Litros - LAPEK-LPK-BI5**. 2023. Disponível em: <https://www.lojadomecanico.com.br/produto/140775/22/249/galao-de-combustivel-bombona-5-litros-lapek-lpk-bi5?origin=autocomplete>. Acesso em: 17 Jun. 2023.

ONATE, Q.; FRÍAS, J. **Diseño y construcción de un dispositivo electrónico, adquiriendo y modificando las señales base de los sensores para aumentar la eficiencia y funcionamiento del motor de combustión interna.** Monografía – Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, 2019.

Pantaneiro Capas. **Primeira Moto do Mundo.** 2022. Disponível em: <https://blog.pantaneirocapas.com.br/primeira-moto-do-mundo>. Acesso em: 27 mar. 2023.

PENEDA, T. dos R. **Injeção direta como base para melhorar a eficiência em motores ciclo Otto reduzindo a emissão de poluentes.** Monografia – Faculdade Pitágoras de Contagem, Minas Gerais, Brasil, 2021.

Reparação Automotiva. **História do Carburador.** 2022. Disponível em: <https://www.reparacaoautomotiva.com.br/2022/08/25/historia-do-carburador>. Acesso em: 25 mar. 2023.

RIBEIRO, B. R. de S. **Thermodynamic optimisation of spark ignition engines under part load conditions.** Tese (Doutorado) – Universidade do Minho, Braga, Portugal, 2006.

SORGATO, R. **Análise da eficiência de diferentes sistemas de alimentação de combustível em motores de combustão interna.** Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil, 2014.

STONE, R. **Introduction to Internal Combustion Engines.** 2. ed. London, England: THE MACMILLAN PRESS LTD, 1992.

SZERWINSKI, J. P. **Análise de um Motor à Combustão Interna: simulação numérica do ciclo otto.** Monografia – Universidade de Brasília Faculdade do Gama, Brasília, 2016.