

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**

**GABRIEL DE OLIVEIRA**

**ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL  
DE UM MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA PARA COMPETIÇÃO DE  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**LONDRINA**

**2022**

**GABRIEL DE OLIVEIRA**

**ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL  
DE UM MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA PARA COMPETIÇÃO DE  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

**Adequacy of the fuel supply system of an internal  
combustion engine for energy efficiency competition**

Trabalho de conclusão de curso de graduação apresentado como requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica da Universidade Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Janaina Fracaro de Souza Gonçalves.

**LONDRINA**

**2022**



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Esta licença permite compartilhamento, remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es). Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

**GABRIEL DE OLIVEIRA**

**ADEQUAÇÃO DO SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DE COMBUSTÍVEL  
DE UM MOTOR A COMBUSTÃO INTERNA PARA COMPETIÇÃO DE  
EFICIÊNCIA ENERGÉTICA**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação  
apresentado como requisito para obtenção do título  
de Bacharel em Engenharia Mecânica da  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
(UTFPR).

Data de aprovação: 28/Novembro/2022

---

Janaina Fracaro de Souza Gonçalves  
Doutorado em Engenharia Aeronáutica e Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Claudia Santos Fiuza Lima  
Doutorado em Engenharia Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

---

Rafael Sene de Lima  
Doutorado em Engenharia Mecânica  
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

**LONDRINA**

**2022**

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente, agradeço ao meu pai Luiz Carlos, por ser o meu maior orgulho.

A minha mãe Gisele, por me apoiar em todos os momentos durante meus anos de graduação, e por todos os esforços feitos para me permitir estar onde estou agora.

A minha família, que me incentivou e suportou os meus momentos de ausência.

Aos meus amigos de classe, por estarem ao meu lado durante esta caminhada, servindo de apoio emocional para seguirmos em frente.

A minha orientadora, por toda ajuda e conhecimento compartilhado.

A todos os professores que contribuíram de alguma forma para ajudar a me tornar um profissional capaz e competente.

## RESUMO

A empresa Shell promove anualmente a competição Shell Eco-marathon Brasil na cidade do Rio de Janeiro, desafiando equipes de estudantes de todo o país a projetarem e construírem protótipos de veículos voltados para a eficiência energética. A equipe TubaTurbo da UTFPR - Londrina tem como um de seus objetivos a sua participação nesta competição, devendo fabricar um protótipo que siga todas as exigências do regulamento disponibilizado pela Shell. Este trabalho teve como objetivo adequar o atual sistema de alimentação de combustível do motor a combustão interna pertencente ao projeto, de maneira a cumprir com os requisitos do regulamento da competição, com o foco na troca da bomba de combustível elétrica por uma mecânica, que seja acionada somente pelo motor.

Palavras-chave: motor; bomba de combustível; eficiência energética.

## **ABSTRACT**

The Shell company annually promotes the Shell Eco-marathon Brasil competition in the city of Rio de Janeiro, challenging teams of students from all over the country to design and build prototype vehicles aimed at energy efficiency. The UTFPR - Londrina TubaTurbo team has as one of its objectives your participation in this competition, having to manufacture a prototype that follows all the requirements of the regulation made available by Shell. This work aims to adapt the current fuel supply system of the internal combustion engine belonging to the project, in order to comply with the requirements of the competition regulation, with a focus on replacing the electric fuel pump with a mechanical one, which is powered by the engine only.

Keywords: engine; fuel pump; energy efficiency.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Diagramas P-V e T-S para o ciclo de Otto.....	18
Figura 2 - Os quatro tempos do motor alternativo.....	19
Figura 3 - Circuito genérico de alimentação de combustível.....	23
Figura 4 - Bomba mecânica de combustível.....	24
Figura 5 - Regulador de pressão de combustível.....	25
Figura 6 - Componentes de um tanque de combustível.....	26
Figura 7 - Esquema de um sistema de carburador.....	27
Figura 8 - Bico injetor externo no tubo distribuidor.....	30
Figura 9 - Sensor de oxigênio.....	30
Figura 10 - Carros alinhados na competição Shell Eco-marathon Brasil no Rio de Janeiro.....	33
Figura 11 - Diagrama do sistema de alimentação de combustível.....	34
Figura 12 - Fluxograma das tarefas a serem realizadas durante o projeto.....	35
Figura 13 - Motor atual do projeto TubaTurbo com todos seus componentes.	36
Figura 14 - Bomba de combustível elétrica utilizada atualmente.....	36
Figura 15 - Bico injetor instalado no corpo de injeção do motor.....	37
Figura 16 - Regulador de pressão do sistema de injeção de combustível atual.....	37
Figura 17 - Acionamento de uma bomba de combustível mecânica.....	39
Figura 18 - Bomba de combustível mecânica com pino de acionamento.....	39
Figura 19 - Modelagem 3D do eixo de acionamento.....	40
Figura 20 - Desenho 2D do eixo de acionamento.....	40
Figura 21 - Modelagem 3D do suporte da bomba.....	41
Figura 22 - Desenho 2D do suporte da bomba.....	41
Figura 23 - Modelagem 3D do projeto de acionamento da bomba mecânica...	42
Figura 24 - Modelagem 3D do motor acoplado ao eixo de acionamento.....	42
Figura 25 - Eixo de comando de válvulas.....	43
Figura 26 - Eixo de cames fabricado para o projeto.....	43
Figura 27 - Eixo de cames para acionamento da bomba.....	44
Figura 28 - Eixo de cames acoplado ao motor.....	44
Figura 29 - Bomba de combustível Nakata NKBC03141.....	45
Figura 30 - Suporte para fixação da bomba de combustível no motor.....	45
Figura 31 - Sistema de acionamento da bomba de combustível mecânica.....	46
Figura 32 - Bomba de combustível mecânica acoplada ao motor.....	46
Figura 33 - Modelo de tanque de combustível exigido pela Shell.....	47
Figura 34 - Tanque de combustível utilizado para o projeto.....	48
Figura 35 - Válvula para controle da vazão de saída de combustível.....	48
Figura 36 - Configuração elaborada para o novo circuito de alimentação de combustível.....	49
Figura 37 - Circuito de alimentação de combustível instalado em bancada....	50
Figura 38 - Motor com todos seus componentes instalados.....	51
Figura 39 - Sistema de acionamento da bomba de combustível instalado.....	51
Figura 40 - Acionamento mínimo e máximo da bomba de combustível mecânica.....	52

## LISTA DE TABELAS

<b>Tabela 1 - Controle dos itens para o novo projeto.....</b>	<b>38</b>
---	-----------



## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ECU	Electronic Control Unit
ECM	Engine Control Module
FA	Fluido Ativo
MCI	Motor de Combustão Interna
PMS	Ponto Morto Superior
PMI	Ponto Morto Inferior
UTFPR	Universidade Tecnológica Federal do Paraná

## LISTA DE SÍMBOLOS

$\lambda$	Lambda
P	Pressão
T	Temperatura
V	Volume
S	Entropia
m	Massa

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>12</b>
<b>1.1</b>	<b>Objetivo.....</b>	<b>13</b>
1.1.1	Objetivo geral.....	13
1.1.2	Objetivos específicos.....	13
<b>1.2</b>	<b>Justificativa.....</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>15</b>
<b>2.1</b>	<b>Máquinas térmicas.....</b>	<b>15</b>
2.1.1	Motores de combustão interna.....	16
2.1.2	O ciclo padrão a ar.....	16
2.1.3	O ciclo Otto.....	17
2.1.4	Classificação do ciclo de operação de motores de combustão interna..	19
2.1.5	Mistura e injeção de combustível no motor ciclo Otto.....	20
2.1.6	Coeficiente de excesso de ar.....	22
<b>2.2</b>	<b>Circuito de alimentação de combustível.....</b>	<b>22</b>
2.2.1	Bomba de combustível.....	23
2.2.2	Regulador de pressão.....	25
2.2.3	Tanque de combustível.....	26
2.2.4	Carburador.....	27
<b>2.3</b>	<b>Injeção eletrônica.....</b>	<b>28</b>
2.3.1	Sensores e atuadores.....	29
2.3.2	Bico injetor.....	29
2.3.3	Sensor de oxigênio.....	30
<b>2.4</b>	<b>Eficiência energética.....</b>	<b>31</b>
2.4.1	A Shell eco-marathon.....	32
2.4.2	Técnicas de pressurização de combustível para a competição.....	33
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA.....</b>	<b>35</b>
<b>3.1</b>	<b>Projeto do sistema de pressurização de combustível.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2</b>	<b>Fabricação e instalação dos componentes do sistema de acionamento da bomba de combustível mecânica.....</b>	<b>43</b>
<b>3.3</b>	<b>Seleção do tanque de combustível.....</b>	<b>46</b>
<b>3.4</b>	<b>Projeto do circuito de alimentação de combustível.....</b>	<b>48</b>
<b>3.5</b>	<b>Verificação de desempenho.....</b>	<b>48</b>

<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>50</b>
<b>4.1</b>	<b>Instalação dos componentes do novo sistema de alimentação de combustível.....</b>	<b>50</b>
<b>4.2</b>	<b>Avaliação do projeto de acionamento da bomba mecânica.....</b>	<b>52</b>
<b>4.3</b>	<b>Resultados e avaliação do desempenho do motor.....</b>	<b>52</b>
<b>4.4</b>	<b>Propostas de melhorias futuras.....</b>	<b>53</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO.....</b>	<b>54</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>55</b>

## 1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, as empresas fabricantes de motores a combustão interna buscam cada vez mais se aperfeiçoar em tecnologias focadas na eficiência energética, em consequência das normas de emissões de poluentes cada vez mais rigorosas. Um grande passo neste seguimento foi a criação de sistemas de injeção eletrônica, substituindo os carburadores em motores de veículos e consolidando cada vez mais esta tecnologia no passar dos anos.

Os sistemas de alimentação de combustível nos veículos atuais são projetados para que a injeção de combustível nos motores ocorra de maneira mais próxima do ideal, de acordo com a potência requisitada, fazendo os carburadores serem cada vez menos utilizados devido ao pouco controle da mistura ar-combustível e altos índices de emissão de poluentes. O gerenciamento eletrônico da injeção de combustível permitiu o controle mais eficiente deste processo por meio de uma central chamada de ECU (Eletronic Control Unit), capaz de gerenciar todo o sistema de admissão e injeção do motor por meio de dispositivos instalados em pontos estratégicos do motor chamados de sensores e atuadores. Para o sistema de injeção funcionar corretamente, é necessário um sistema de alimentação e pressurização de combustível bem projetado para que o combustível chegue na câmara de combustão, possuindo alguns componentes de extrema importância como a bomba de combustível, que pode ser elétrica ou mecânica.

Moreira (2021) diz que é possível caracterizar ações de eficiência energética como qualquer ato que permita a redução do consumo de energia de um sistema, mantendo o mesmo grau de serviço prestado, sendo estas ações responsáveis por aumentar a razão entre o nível de energia produzida e o nível de energia consumida.

O projeto de eficiência energética TubaTurbo da UTFPR - Londrina tem como objetivo a sua participação na competição Shell Eco-marathon, sendo organizada pela empresa Shell com o intuito de desafiar os estudantes a construir um protótipo de veículo com foco na eficiência energética, ganhando a equipe que projetar e fabricar o protótipo que percorrer a maior distância possível consumindo a menor quantidade de energia, podendo ser nas categorias gasolina, etanol e bateria elétrica. Um dos desafios das equipes que participam da Shell Eco-marathon é garantir que o protótipo siga todas as exigências do regulamento da competição, que é disponibilizado pela própria Shell, sendo atualizado ano após ano.

## 1.1 Objetivo

Neste tópico serão apresentados o objetivo geral e os objetivos específicos relativos a este trabalho.

### 1.1.1 Objetivo geral

O objetivo geral deste trabalho é adequar o atual sistema de alimentação de combustível de um motor a combustão interna do projeto de eficiência energética da UTFPR - Londrina, de modo a seguir todas as exigências do regulamento da competição Shell Eco-marathon.

### 1.1.2 Objetivos específicos

Os objetivos específicos são:

- Adaptar uma bomba de combustível mecânica que seja acionada pela rotação do motor;
- Selecionar e instalar o modelo mais adequado de tanque de combustível;
- Elaborar o circuito de alimentação de combustível;
- Verificar se todos os componentes do sistema de alimentação de combustível estão respeitando o regulamento da competição.

## 1.2 Justificativa

Para a competição Eco-marathon, a empresa Shell dispõe de um regulamento contendo todos os requisitos que devem ser obedecidos no processo de fabricação do protótipo, sendo necessário o cumprimento de todas as exigências para a participação da equipe de eficiência energética neste grande evento.

O regulamento atual da competição Shell Eco-marathon não permite que os motores a combustão interna usados nos protótipos utilizem uma bomba de combustível elétrica, que é o modelo atualmente usado, sendo permitido somente sistemas de pressurização do tanque de combustível ou bombas mecânicas acionadas somente pela rotação do motor.

Diante desta necessidade, surgiu a ideia de realizar uma adequação no sistema de alimentação de combustível atual do motor utilizado no projeto, com foco principalmente na troca da bomba de combustível elétrica usada atualmente por uma bomba mecânica, de modo a cumprir os requisitos necessários para a participação da equipe na competição.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta seção será abordado uma revisão de literatura a respeito de motores a combustão interna, sistemas de alimentação de combustível, eficiência energética e trabalhos realizados sobre o tema.

### 2.1 Máquinas térmicas

O surgimento das máquinas térmicas, de acordo com Teixeira (2018), teve início no século XVIII com um grande interesse na produção de artifícios para propulsão de máquinas. No começo da Revolução Industrial, ocorreu a inclusão das máquinas térmicas nos processos produtivos, com o objetivo de aumentar a capacidade de produção das indústrias, dando início a uma grande abrangência de sua utilização em diversas áreas, como meios de transporte e conversão de energia. Essa diversificação de sua utilização ocasionou a necessidade do desenvolvimento de áreas como a metalurgia, processo de fabricação e materiais, tal como as suas aplicações na área de eficiência energética, sendo amplamente presentes até os dias atuais em diversas áreas da tecnologia, sendo fundamental o seu entendimento.

Já segundo Brunetti (2018), o conceito de máquinas térmicas abrange dispositivos que possibilitam a conversão de calor em trabalho, sendo o calor obtido de diferentes fontes, como a combustão e a energia elétrica. O caso mais comum é o de calor obtido pela queima de combustível, transformando a energia química da combustão em trabalho mecânico.

Ainda segundo Brunetti (2018), para se obter trabalho proveniente da queima de combustível, é realizado uma série de processos em uma substância denominada “fluido ativo (FA)”, formado por uma mistura de ar e combustível na entrada do volume de controle em análise, sendo classificados em duas formas de acordo com o comportamento deste fluido ativo:

- Motores de combustão externa: é classificado quando a combustão acontece fora do fluido ativo, que neste caso será o agente de transporte da energia térmica que será transformada em trabalho, como em uma máquina a vapor, por exemplo;
- Motores de combustão interna: é classificado quando o fluido ativo participa de modo direto na combustão, cujo será o foco deste trabalho.



### 2.1.1 Motores de combustão interna

Conforme Moreira (2021), nos motores de combustão interna ocorre uma mistura de ar atmosférico com o combustível, sofrendo uma reação de combustão e liberando calor, além de originar gases dos produtos da combustão. Neste processo de operação do motor, a composição química da mistura de ar-combustível é modificada, e uma vez que ocorre uma modificação na composição do fluido, além dos processos de admissão e exaustão do mesmo, a operação de um motor de combustão não pode ser modelada precisamente como um ciclo termodinâmico completo.

Ainda de acordo com Moreira (2021), um motor de combustão interna não pode ser chamado estritamente de uma máquina térmica por conta dos seguintes motivos, baseados nas definições dos conceitos termodinâmicos:

- O fluido de trabalho (mistura ar-combustível) não realiza um ciclo termodinâmico completo, como já constatado;
- Não ocorre uma troca de calor com os reservatórios térmicos de alta e baixa temperatura, ocorrendo na realidade o processo de admissão da mistura ar-combustível, sua reação de combustão e a liberação dos gases dos produtos de combustão na atmosfera.

### 2.1.2 O ciclo padrão a ar

Para Brunetti (2018), o estudo de um ciclo real de um motor de combustão interna torna-se difícil devido a complexidade dos processos envolvidos, e desta forma, uma maneira de facilitar o entendimento e poder extrair conclusões quantitativas de um ciclo real de um MCI, foi conceber o chamado ciclo padrão a ar, que aproxima o comportamento do ciclo termodinâmico real a um ciclo termodinâmico mais simples, de acordo com as seguintes hipóteses:

- O ar atmosférico é sempre tratado como o fluido de trabalho, sendo considerado um gás ideal, ignorando-se a transformação química que acontece no processo de combustão da mistura ar-combustível;
- A combustão é desconsiderada, sendo substituída por um processo de transferência de calor, com um reservatório a alta temperatura transferindo calor para o ar;

- Para completar o ciclo, um processo de transferência de calor com o meio ambiente é considerado, com os produtos de exaustão sendo substituídos por uma troca de calor com um reservatório a baixa temperatura;
- Todos os processos que ocorrem no ciclo padrão a ar são internamente reversíveis;
- O ar atmosférico utilizado no ciclo possui calores específicos constantes.

No estudo do ciclo padrão a ar em motores de combustão interna, mais precisamente nos motores de ignição por faísca a 4 tempos, foi adotado o ciclo Otto, que representa o ciclo real do motor e adotando as hipóteses apresentadas anteriormente (BRUNETTI, 2018).

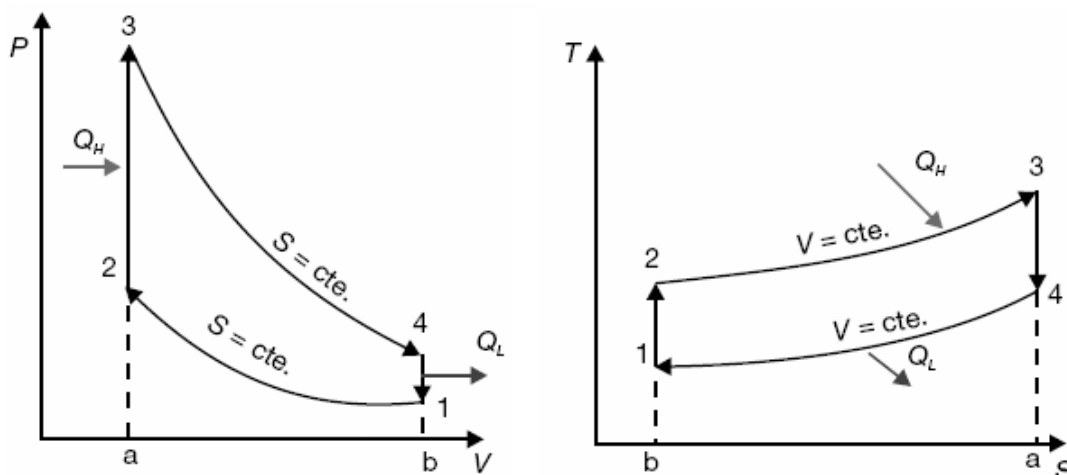
### 2.1.3 O ciclo Otto

O ciclo Otto de quatro tempos empregado em motores de combustão interna foi desenvolvido inicialmente por Nikolaus Otto, sendo testado pela primeira vez em 1876 e sendo consistido por um motor de ignição por vela, que atualmente é utilizado na maioria dos automóveis ao redor do mundo. Desde seu desenvolvimento inicial há mais de 130 anos, recebe melhorias e aprimoramentos contínuos, e conseqüentemente a partir do momento que estes motores se tornaram seguros e confiáveis, foram empregados em larga escala em diversas aplicações. Algumas características deste motor são a capacidade de fornecer uma quantidade considerável de energia, ser compacto, ter uma boa partida e funcionamento em várias condições ambientais, sob uma ampla escala de temperaturas (KROSS e POTTER, 2016).

Segundo Moreira (2021), o ciclo Otto é considerado como um ciclo de potência ideal que mais se aproxima de um motor de combustão interna de quatro tempos, com ignição por centelha, movido a gasolina, etanol, gás natural e gás liquefeito de petróleo.

A figura 1 demonstra os diagramas P-V (Pressão x Volume) e T-S (Temperatura x Entropia) para o ciclo de Otto:

Figura 1 - Diagramas P-V e T-S para o ciclo de Otto



Fonte: Moreira (2021)

Ainda de acordo com Moreira (2021), os processos apresentados nos diagramas P-V e T-S são definidos como:

- Trabalho específico de compressão (Processo 1-2): ocorre a compressão reversível e adiabática (isentrópica) do ar, com este processo modelando e substituindo a compressão da mistura ar/combustível;
- Calor adicionado ao ciclo (Processo 2-3): ocorre a adição de calor  $Q_H$ , realizando-se a volume constante, com este processo substituindo e modelando a combustão da mistura de ar/combustível;
- Trabalho específico de expansão (Processo 3-4): efetua-se a expansão reversível e adiabática (isentrópica) do ar, substituindo e modelando o processo de expansão dos produtos dos gases de combustão, ocorrendo a realização de trabalho;
- Calor rejeitado pelo ciclo (Processo 4-1): é realizado a rejeição de calor  $Q_L$  sob volume constante, com este processo substituindo e modelando a exaustão dos produtos de combustão para o meio ambiente, e também a nova admissão da mistura de ar/combustível.

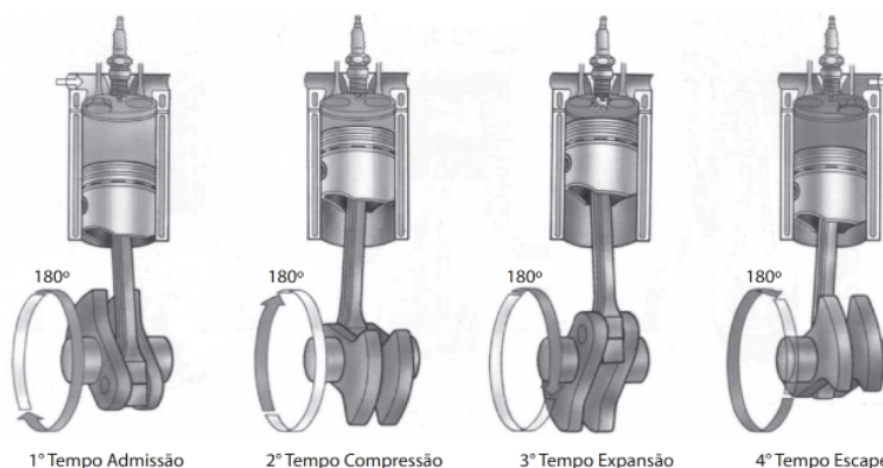
## 2.1.4 Classificação do ciclo de operação de motores de combustão interna

Pode-se definir o ciclo de operação de motores de combustão interna, de acordo com Brunetti (2018), em dois grupos: motores alternativos a quatro tempos (4T) e motores alternativos a dois tempos (2T), tal que o ciclo de operação pode ser tratado como a sequência de processos sofridos pelo fluido ativo, com etapas que se repetem frequentemente para a aquisição de trabalho útil. Cada tempo pode ser entendido como o curso que o pistão realiza dentro do cilindro do motor, não devendo ser confundido com os processos realizados em cada etapa, pois ao longo de um tempo pode-se ocorrer mais de um processo.

A definição de motores de dois tempos, de acordo com Moreira (2021), são motores que possuem um ciclo estabelecido pela produção de trabalho mecânico a cada uma volta do virabrequim, englobando todas as etapas de admissão, compressão, combustão e exaustão. Por possuir esta característica, o próprio pistão atua como uma válvula, abrindo e fechando as janelas de admissão e exaustão localizadas nas paredes do cilindro do motor, sendo muito utilizado em motores de pequeno porte, já que sua construção é mais simples e não necessita de um comando de válvulas. A sua grande desvantagem em relação aos motores quatro tempos é que seus índices de poluição são elevados.

Os motores de quatro tempos, cujo é o foco deste trabalho, é classificado por Brunetti (2018, p.30) como uma operação em que o trajeto do pistão se dá em quatro cursos, totalizando duas voltas no virabrequim do motor e completando-se um ciclo, conforme a figura 2 a seguir:

**Figura 2 - Os quatro tempos do motor alternativo**



**Fonte: Brunetti (2018)**

Segundo Oliveira e Rosa (2003, p.14), os quatro tempos do motor alternativo se resume a repetição ordenada dos seguintes movimentos:

- 1º Tempo - Admissão: neste momento, a válvula de escape está fechada e a válvula de admissão se abre gradualmente, com o êmbolo do pistão se deslocando do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior do cilindro (PMI), criando uma região de baixa pressão e aspirando a mistura ar/combustível para dentro do cilindro;
- 2º Tempo - Compressão: nesta etapa, a válvula de escape se mantém fechada e a válvula de admissão se fecha, com o êmbolo do pistão agora invertendo seu movimento do PMI para o PMS, ocasionando na compressão da mistura de ar/combustível dentro da câmara de combustão;
- 3º Tempo - Combustão: com ambas as válvulas fechadas, a mistura comprimida dentro do cilindro é inflamada por meio de uma centelha fornecida pela vela de ignição, promovendo a reação de combustão dentro do cilindro, formando-se gases que se expandem e produzem trabalho, impulsionando o pistão para o PMI;
- 4º Tempo - Escapamento: com a válvula de admissão fechada, a válvula de escape se abre à medida que o pistão se desloca do PMI para o PMS, resultando na expulsão dos gases de combustão de dentro do cilindro, e assim, repetindo o processo.

#### 2.1.5 Mistura e injeção de combustível no motor ciclo Otto

O funcionamento de um motor de combustão interna depende diretamente da proporção certa de ar e combustível na mistura, tal como a propagação da chama no motor ciclo Otto. A posição da válvula borboleta, que é controlada pelo acelerador, tem como função variar a carga e/ou rotação do motor por meio da alteração da vazão de ar que é aspirada pelo sistema. Conhecendo-se esta vazão de ar, a quantidade certa de combustível é dosada por meio de um dispositivo automático instalado no trajeto do ar que entra no motor. Este dispositivo pode ser um carburador, no caso dos veículos mais antigos, ou um sistema injetor, utilizado nos veículos mais atuais (BRUNETTI, 2018, p.441).

Ao se falar de mistura ar-combustível, é necessário introduzir o conceito de mistura estequiométrica, que de acordo com Turns (2013), é a quantidade necessária de oxidante para queimar totalmente uma dada quantidade de combustível. Se por acaso esta quantidade de oxidante for maior do que a do balanço estequiométrico, é dito que esta mistura é pobre em combustível. Da mesma forma, se a quantidade de oxidante for menor que a estequiométrica para uma certa quantidade de combustível, dizemos que esta mistura é rica. Para encontrarmos a razão estequiométrica oxidante-combustível, ou como é mais conhecida, razão ar-combustível, é necessário realizar um simples balanço atômico, utilizando como hipótese que o combustível irá reagir formando um conjunto ideal de produtos de combustão.

Ainda segundo Turns (2013), de uma maneira simplificada a razão estequiométrica ar-combustível pode ser representada com a equação 1:

$$(A/F)_{esteq} = \left( \frac{m_a}{m_f} \right)_{esteq} \quad (1)$$

Com:

$$m_a = \text{massa de ar (kg)} \quad \text{e} \quad m_f = \text{massa de combustível (kg)}$$

O manual automotivo da Bosch (2005) diz que para a operação de um motor ciclo Otto, é necessário uma relação da mistura ar-combustível de aproximadamente 14,7:1 para uma queima total, sendo chamado de relação estequiométrica. Isto sugere que para a queima de 1 kg de massa de combustível, é preciso 14,7 kg de massa de ar. Esta proporção da mistura ar-combustível determina diretamente o consumo específico de combustível de um motor ciclo Otto, ou seja, para a queima total e o consumo mínimo de combustível possível é preciso um excesso de ar limitado, devido a inflamabilidade da mistura e também da duração da queima. Esta mistura estequiométrica também exerce uma grande influência na eficácia dos sistemas de tratamento dos gases de escape, pois grande maioria dos catalisadores de três vias equipados nos motores são projetados para atingir sua eficiência ideal operando com a relação estequiométrica da mistura. Com este dispositivo, é permitido reduzir em mais de 98% os produtos tóxicos da combustão dos gases de escape.

### 2.1.6 Coeficiente de excesso de ar

Para estabelecer o quanto a mistura ar-combustível disponível para a reação de combustão desvia da mistura estequiométrica, ainda de acordo com o manual automotivo da Bosch (2005), foi determinado o coeficiente de excesso de ar ou relação de ar  $\lambda$  (Lambda), que indica a massa de ar admitida em relação à necessária para a queima estequiométrica:

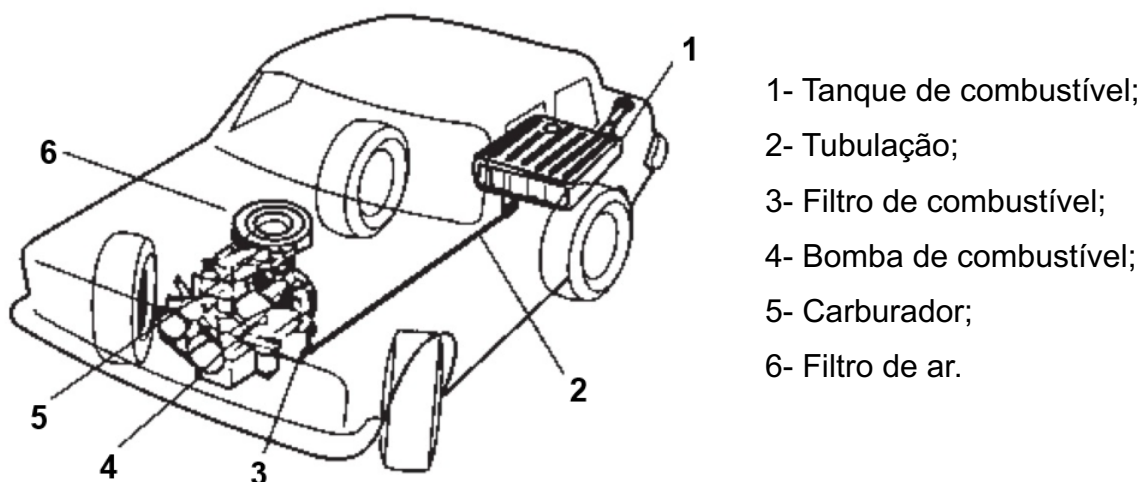
- Para  $\lambda = 1$ : a massa de ar admitida pelo motor coincide com a massa de ar teórica necessária para a combustão;
- Para  $\lambda < 1$ : indica a falta de ar em relação a massa de ar teórica necessária para a combustão, sendo denominada de mistura rica, com a potência máxima do motor se manifestando com  $\lambda = 0,85...0,95$ ;
- Para  $\lambda > 1$ : indica o excesso de ar em relação a massa de ar teórica necessária para a combustão, sendo chamado de mistura pobre, sendo característico para um menor consumo de combustível e consequentemente menor potência.

## 2.2 Circuito de alimentação de combustível

Conforme já apresentado, o motor a combustão interna precisa de dois elementos para funcionar, sendo o ar e o combustível. Para Capelli (2010), o ciclo de combustão se fecha adicionando o elemento detonante, que seria a faísca fornecida pelo sistema de ignição. No circuito de alimentação de combustível em motores carburados, o acionamento da bomba de combustível é realizado pelo próprio motor, transferindo o combustível armazenado no tanque para o carburador por meio de mangueiras e tubulações, e no mesmo momento, ar é admitido pelo carburador após passar pelo filtro de ar. No carburador, é feita a mistura de ar e combustível vaporizado na dosagem certa para ser admitida pela câmara de combustão. Em veículos mais modernos que utilizam injeção eletrônica, esta mistura é realizada nos bicos injetores.

Existem várias configurações e modelos de circuitos de alimentação de combustível nos motores, variando de acordo com os fabricantes, sendo um sistema genérico demonstrado a seguir na figura 3, servindo para base de estudos:

**Figura 3 - Circuito genérico de alimentação de combustível**



Fonte: Capelli (2010)

### 2.2.1 Bomba de combustível

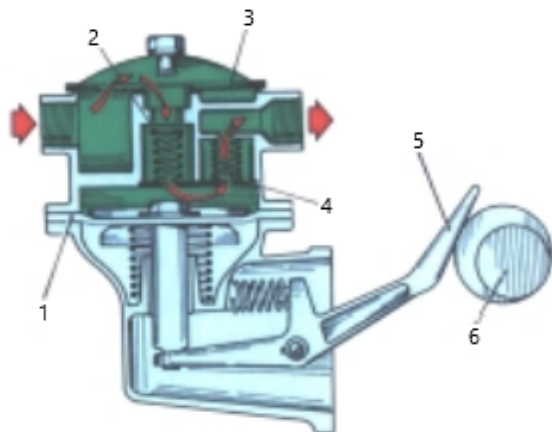
Existem 2 tipos principais de bombas utilizadas nos sistemas de alimentação de combustível de motores a combustão interna, que são as bombas mecânicas e as bombas elétricas.

A bomba mecânica, conforme Oliveira e Rosa (2003, p.73), é um dispositivo instalado no motor com a finalidade de sugar o combustível do tanque e enviá-lo para o carburador, sendo acionadas por um came contido no comando de válvulas ou comando auxiliar. Em seu funcionamento, no momento em que o came aciona a haste de acionamento, surge uma depressão dentro da bomba e por consequência disto, o combustível é aspirado do tanque para a bomba, passando por meio de uma válvula de aspiração. Quando o came deixa de acionar a haste, ela volta para sua posição original e o combustível é enviado para o carburador por meio da válvula de envio.



A figura 4 apresenta os componentes de uma bomba mecânica:

**Figura 4 - Bomba mecânica de combustível**



- 1- Membrana elástica (diafragma);
- 2- Válvula de aspiração;
- 3- Filtro de tela;
- 4- Válvula de envio;
- 5- Haste de acionamento;
- 6- Came da árvore de comando.

**Fonte: Oliveira e Rosa (2003, p.73)**

A entrada de combustível no carburador vindo da bomba mecânica é controlada por uma boia e uma válvula, sendo acumulado em uma cuba. Assim que o combustível alcança o nível máximo da cuba, sendo controlado pela boia, obriga a válvula a fechar e impedir a entrada de mais combustível no carburador. Nos circuitos de alimentação que não possuem retorno de combustível, a válvula de saída da bomba permanece fechada, com o diafragma estático, e apenas a haste de acionamento é movimentada, até que seja diminuído o nível de combustível contido na cuba (CAPELLI, 2010).

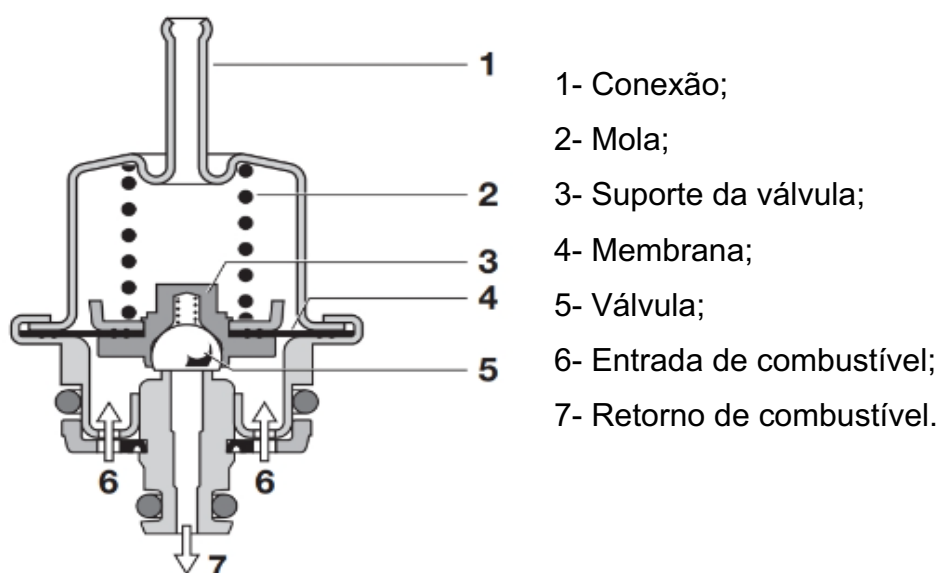
Já a bomba elétrica é um dispositivo que contém duas camadas denominadas de aspiração e de espição, conectadas entre si por meio de um cilindro que possui um êmbolo em seu interior, realizando um movimento de vaivém capaz de criar uma zona de baixa pressão na câmara de aspiração, e uma zona de pressão na câmara de espição, capaz de puxar o combustível do tanque e empurrá-lo para o carburador. Este êmbolo é fabricado com um material magnético, que interage com um solenóide alimentado eletricamente por uma bateria, causando este movimento de vaivém por meio da atração magnética e uma mola de retorno do êmbolo para a posição inicial. Existe também uma pequena válvula, localizada na extremidade onde fica situada a câmara de aspiração, com a função de controlar o fluxo de enchimento da bomba (EEEP, 2022).

### 2.2.2 Regulador de pressão

Em sistemas contínuos de alimentação de combustível, com bombas acionadas pelo eixo de comando de válvulas do motor, não é possível o ajuste de vazão da bomba. Sendo assim, o combustível que não é necessário para a injeção e manutenção da pressão, deve ser aliviado por uma válvula de controle de pressão, fazendo o combustível retornar para o circuito de baixa pressão. Este regulador de pressão é ativado pela unidade de controle do motor, com o ajuste da pressão desejada sendo guiada conforme o ponto de operação do sistema. Este dispositivo de controle de pressão serve também como válvula limitadora de pressão mecânica, pois na maioria dos sistemas de alimentação contínuos, é comprimido mais combustível do que o necessário, aumentando a pressão de operação do sistema. Em contrapartida, isto custa potência do motor, e a vazão de combustível excedente que é aliviada pelo regulador de pressão acaba esquentando o combustível (BOSCH, 2005, p.598).

Os componentes de um regulador de pressão de combustível são apresentados na figura 5:

**Figura 5 - Regulador de pressão de combustível**



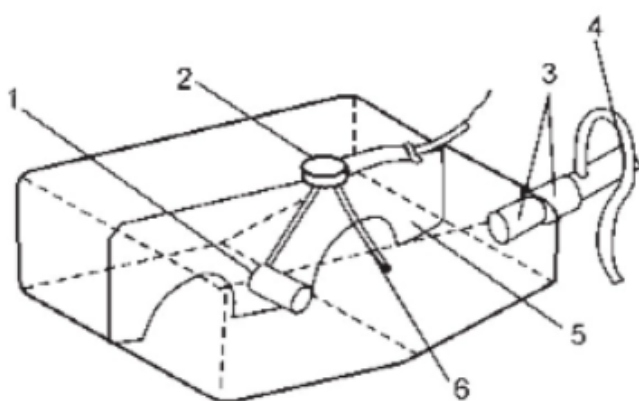
Fonte: Bosch (2005)

### 2.2.3 Tanque de combustível

A função principal de um tanque é armazenar combustível com uma capacidade que permita o veículo percorrer longas distâncias sem a necessidade de reabastecimento, sendo esta distância chamada de autonomia. Nos veículos antigos, os tanques eram fabricados de chapas de aço revestidas internamente com um material que preservava o metal da corrosão causada pelos combustíveis. Esse material dependia do tipo de combustível que o veículo utilizava, podendo ser de camadas de estanho, cromo ou chumbo. Atualmente, os tanques são fabricados de material plástico, com a vantagem de serem mais leves, resistentes à corrosão e possuírem boa deformabilidade, impedindo vazamentos. Além disso, o tanque possui alguns componentes, como uma boia usada para indicar o nível de combustível contido no tanque, localizada no seu interior e ligada a um dispositivo mecânico ou elétrico, que faz a comunicação com o marcador de combustível no painel do veículo. O canal de abastecimento do tanque é formado por um tubo de enchimento contendo um bocal com tampa e uma mangueira flexível, sendo localizado na parte externa no veículo para facilitar seu abastecimento, possuindo também um respiro que permite a entrada de ar no tanque e facilita a saída do combustível para o motor. Nos veículos mais atuais, este respiro não tem contato com a atmosfera, com o objetivo de diminuir a poluição causada pela evaporação do combustível (CAPELLI, 2010).

Na figura 6 é demonstrado os componentes básicos contidos em um tanque de combustível:

**Figura 6 - Componentes de um tanque de combustível**



- 1- Boia de comando do indicador de combustível;
- 2- Comando do indicador de combustível;
- 3- Tubo de enchimento;
- 4- Respiro;
- 5- Divisórias internas;
- 6- Tubo de saída do combustível.

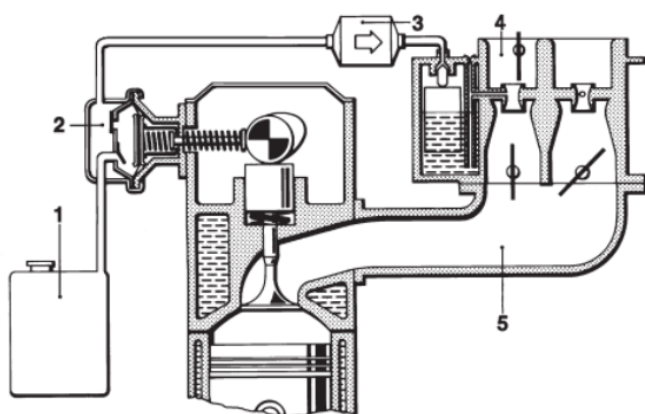
## 2.2.4 Carburador

Para Brunetti (2018) os carburadores foram usados durante anos como um dispositivo que estabelece a relação de ar-combustível para motores ciclo Otto, sendo que hoje em dia é pouco utilizado. Ele tinha a capacidade de dosar a quantidade desejada de combustível para uma determinada vazão de ar admitida pelo motor. Este dispositivo era formado por um reservatório de combustível, chamado de cuba, onde o nível do combustível contido neste reservatório era mantido constante por uma boia e uma válvula de agulha, regulando a entrada de combustível fornecido pela bomba. Já a vazão de ar é regulada por uma válvula borboleta aceleradora, por meio da perda de carga, a qual pode ser controlada pelo acelerador. Após passar por meio de um tubo de Venturi, o ar aumenta de velocidade, causando uma queda de pressão e conseqüentemente a sucção do combustível contido na cuba

Atualmente, devido às leis de emissões de poluentes estarem cada vez mais rígidas, o setor automotivo foi obrigado a substituir o carburador totalmente pela injeção de combustível. Estes sistemas de injeção, particularmente os eletrônicos, trabalham para uma melhor manutenção dos limites definidos para a composição da mistura ar-combustível. Com isso, entregam maiores vantagens a respeito do consumo de combustível, dirigibilidade e potência (BOSCH, 2005, p.606).

A figura 7 representa um sistema de carburador com seus componentes:

**Figura 7 - Esquema de um sistema de carburador**



- 1- Tanque de combustível;
- 2- Bomba de combustível;
- 3- Filtro de combustível;
- 4- Carburador;
- 5- Coletor de admissão.

Fonte: Bosch (2005)

## 2.3 Injeção eletrônica

A principal motivação para o surgimento do controle eletrônico de motores a combustão foram dois marcos históricos: a criação de novas regras de emissões de poluentes no mundo em 1967, e a crise do petróleo em 1973. A partir deste momento, fabricar motores a combustão que poluem menos e que consumam a menor quantidade de combustível mantendo a sua performance, foi de extrema importância para a indústria automobilística, em especial para indústrias que fabricavam motores potentes que possuíam de oito até doze cilindros (CAPELLI, 2010).

Ao falarmos de injeção eletrônica, é importante ressaltar o conceito de gerenciamento eletrônico de motores, que de acordo com Capelli (2010), surgiu primeiramente em 1939, onde o primeiro sistema de injeção direta de gasolina em aviões era testado, pela empresa Bosch. Já em 1954, foi fabricado o primeiro automóvel com o sistema de injeção eletrônica, que foi o Mercedes Benz 300 SL. Anos mais tarde, o primeiro veículo com injeção eletrônica fabricado no Brasil, em 1989, foi o Volkswagen Gol GTI, possuindo um sistema analógico com somente um bico injetor, sendo o primeiro passo para mudar para sempre o rendimento dos carros. No entanto, é importante ressaltar que o conceito de injeção eletrônica é diferente de gerenciamento eletrônico, pois quando falamos de injeção eletrônica, estamos falando de sistemas que controlam somente a injeção de combustível, sendo o gerenciamento eletrônico um termo mais abrangente, que controla as principais funcionalidades do motor, ou até de todo o veículo, com a injeção eletrônica fazendo parte de somente uma destas funções. O componente que faz este controle é chamado de central, que é o módulo de gerenciamento do carro. Em motores, é comum encontrarmos os termos ECU (Electronic Control Unit) e ECM (Engine Control Module) para designar esta central de gerenciamento.

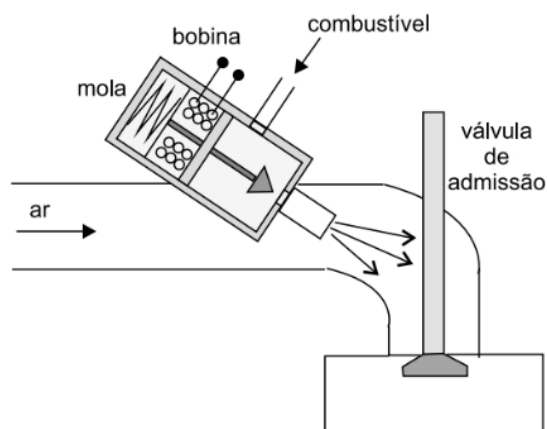
Para Brunetti (2018, p.465), a definição de ECU é um microprocessador que tem como finalidade operar um programa de controle com base nas informações que chegam dos sensores, e efetuar comandos necessários para a ação dos dispositivos atuadores.

### 2.3.1 Sensores e atuadores

De acordo com Capelli (2010), os sensores são dispositivos instalados em vários pontos estratégicos do motor e tem como finalidade coletar dados e enviar para a central de gerenciamento do motor (ECU). Alguns exemplos destes componentes são o sensor de temperatura do motor, o sensor de rotação, sensor de demanda do acelerador, etc. Já os atuadores são dispositivos que recebem as informações da ECU e atuam diretamente no motor, alterando principalmente o volume de combustível disponível para a combustão. Por exemplo, atuadores de marcha lenta, atuadores de ignição, etc.

### 2.3.2 Bico injetor

A definição de bico injetor, de acordo com Filho (2014), é uma válvula controlada eletronicamente, com a função de se abrir e fechar continuamente e muitas vezes por segundo, se assemelhando com uma seringa de injeção. Um obturador localizado na base desta válvula é responsável por manter o bico do injetor fechado, com o combustível em alta pressão contido antes do bico. Uma haste envolvida por uma mola fica inserida dentro de uma bobina eletromagnética situada no topo do injetor, e quando esta bobina é submetida a uma corrente elétrica, provoca a atração da haste, comprimindo a mola e causando a abertura do obturador. O combustível em alta pressão é expelido pelo bico no topo do injetor, gerando uma nuvem atomizada, propiciando uma boa mistura com o ar. Quando a corrente elétrica é interrompida na bobina eletromagnética, a atração com a haste se encerra, com esta voltando a posição inicial devido a expansão da mola, com o obturador voltando a fechar o bocal do injetor. Este processo de abertura e fechamento pode se repetir muitas vezes por minuto, com a energização da bobina controlada pelo sistema de controle eletrônico, e o tempo que o injetor fica aberto determina a quantidade de combustível que será fornecida ao motor, sendo este tempo chamado de largura de pulso. Os bicos injetores estão situados no tubo distribuidor acima das válvulas de admissão, de acordo com a figura 8:

**Figura 8 - Bico injetor externo no tubo distribuidor**

Fonte: Filho (2014)

### 2.3.3 Sensor de oxigênio

Na figura 9 é demonstrado o sensor de oxigênio, que também conhecido como sonda lambda, e tem como função a medição e leitura da quantidade de oxigênio presente nos gases de exaustão do motor, provenientes da queima de combustível. Se a mistura estiver rica (quantidade de combustível contida na mistura real superior a mistura estequiométrica), ou estiver pobre (quantidade de combustível presente na mistura real inferior a mistura estequiométrica), a sonda envia um sinal elétrico para a ECU do motor, com a finalidade de fornecer informações para a unidade gerenciadora de injeção realizar ajustes conforme a situação atual de funcionamento do motor, injetando mais ou menos combustível e promovendo um melhor desempenho do motor, com uma maior economia de combustível e uma taxa de emissão de poluentes mais baixa (MTE-THOMSON, 2022).

**Figura 9 - Sensor de oxigênio**

Fonte: MTE-THOMSON (2022)

## 2.4 Eficiência energética

Segundo a agenda parlamentar do CREA-PR (2016), de uma forma geral a eficiência energética avalia a qualidade do uso da energia para uma determinada finalidade que serve a sociedade. Hoje em dia, qualquer atividade realizada pela sociedade moderna só é possível devido ao uso de uma ou mais formas de energia, procedentes de várias fontes de produção deste recurso fundamental. Ao observar os Balanços Energéticos Nacionais e Estaduais, dentre as diversas formas de energia disponíveis, é de interesse particular aquelas processadas pelas grandes empresas transformadoras de energia, que as colocam à disposição da sociedade para consumo, como a eletricidade, que provém de diversas fontes de produção, podendo ser a energia eólica e solar, a energia produzida nas hidrelétricas e os combustíveis fósseis como a gasolina, o diesel e o etanol, além dos meios energéticos menos intensos, como o carvão, o biogás e a biomassa, entre outros. Este uso de energia se dá em diferentes níveis de intensidade por parte do consumo da população em geral, que levam em consideração as questões de aspectos geográficos, como o clima e a localização, assim como aspectos socioeconômicos, como o PIB per capita e setorial. Há também os indicadores tecnológicos, podendo ser os rendimentos de equipamentos, intensidade energética de sistemas de energia, tal como a taxa de introdução de tecnologias recém desenvolvidas. Conseqüentemente, a população escolhe um conjunto de bens e serviços que satisfaçam suas necessidades conforme as suas condições, englobando itens que vão desde alimentos até itens de conforto, envolvendo mecanismos de mobilidade e também questões culturais.

A energia de uma forma geral pode ser utilizada em aparelhos de uso doméstico (lâmpadas, televisores, pequenos motores elétricos, etc) ou em sistemas mais complexos que reúnem vários tipos de equipamentos (geladeiras, freezers, veículos), com estes equipamentos e sistemas transformando formas de energia em sua operação, sendo que parte esta energia é necessariamente perdida devido às condições ambientais e as características dos materiais usados neste processo. Fazendo uma analogia aos veículos, a sua eficiência é medida em função da distância que ele percorre e o quanto de combustível ele consome neste trajeto, e com sua distância percorrida em quilômetros dividida pelos litros de combustível consumidos obtém-se a sua eficiência. Com este valor conhecido, é possível realizar



melhorias que são capazes de aumentar a sua eficiência, como a substituição do combustível ou medidas que melhorem o desempenho do sistema energético do veículo em questão (CREA-PR, 2016).

#### 2.4.1 A Shell eco-marathon

De acordo com a empresa Shell (2022), de ano em ano a competição Shell Eco-marathon Brasil é realizada com o objetivo de desafiar os jovens estudantes a pensar, desenhar e construir protótipos de carros focados na eficiência energética, com as categorias de combustível a gasolina, etanol e também a bateria elétrica. Esta competição recebe muitos universitários na cidade do Rio de Janeiro anualmente com a finalidade de responder aos desafios do futuro do uso da energia na mobilidade global. O principal desafio a ser superado é projetar, construir e dirigir o protótipo de carro que percorre a maior distância possível com a menor quantidade de energia, alcançando o título de protótipo automotivo de maior eficiência energética em uma das três alternativas de combustível. É importante ressaltar que esta é uma iniciativa global, com a Eco-marathon sendo criada em 1939 em meio a uma aposta entre colaboradores da Shell que desafiava quem conseguisse percorrer a maior distância possível usando a mesma quantidade de combustível. Hoje em dia, após mais de 80 anos, a competição ganhou fama tal que se expandiu por três continentes, realizando eventos anuais nas Américas, Europa e Ásia. No Brasil, a competição reúne no Rio de Janeiro centenas de estudantes de vários estados, além de outros países localizados na América Latina. No quesito eficiência energética, a Shell Eco-marathon Brasil é considerada como uma das principais referências deste assunto da companhia no país, sendo um dos pilares da Shell no debate sobre transição energética, que vem sendo muito discutido mundialmente. A Shell aposta na pesquisa aliada com a tecnologia e inovação como os pilares desta competição, estimulando futuros engenheiros a encontrar formas criativas de reduzir as emissões de carbono, além de desenvolver maiores eficiências energéticas na mobilidade urbana, lidando com seus múltiplos desafios ao longo do caminho.

Na figura 10 é exibido alguns dos protótipos fabricados para a competição Shell Eco-marathon:

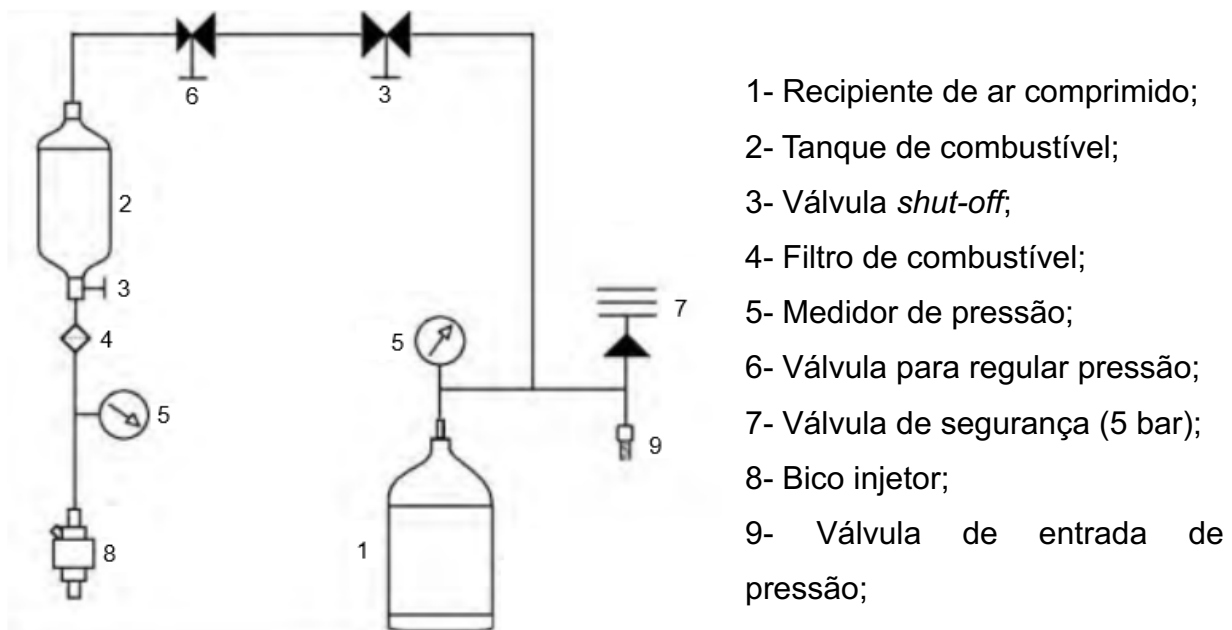
**Figura 10 - Carros alinhados na competição Shell Eco-marathon Brasil no Rio de Janeiro**



**Fonte: Shell (2022)**

#### 2.4.2 Técnicas de pressurização de combustível para a competição

Algumas técnicas de pressurização de combustível são usualmente utilizadas pelas equipes participantes da competição Shell Eco-marathon, e de acordo com o projeto de Acosta, Betancourt e Pinheiro (2012), na construção de um protótipo de eficiência energética, a utilização de bombas de combustível elétricas são proibidas, sendo necessário um sistema de pressurização de combustível para o funcionamento do motor. Em seu projeto de pressurização de combustível, optou-se pela utilização de ar comprimido para pressurização do tanque, sendo que algumas normas de segurança tiveram que ser seguidas, como por exemplo, a pressão máxima do sistema de armazenamento de ar comprimido não deve exceder 5 bar, além da utilização de válvulas de segurança, medidores para monitoramento da pressão e um recipiente transparente para armazenamento do ar sob pressão. O diagrama do projeto de pressurização de combustível é apresentado na figura 11:

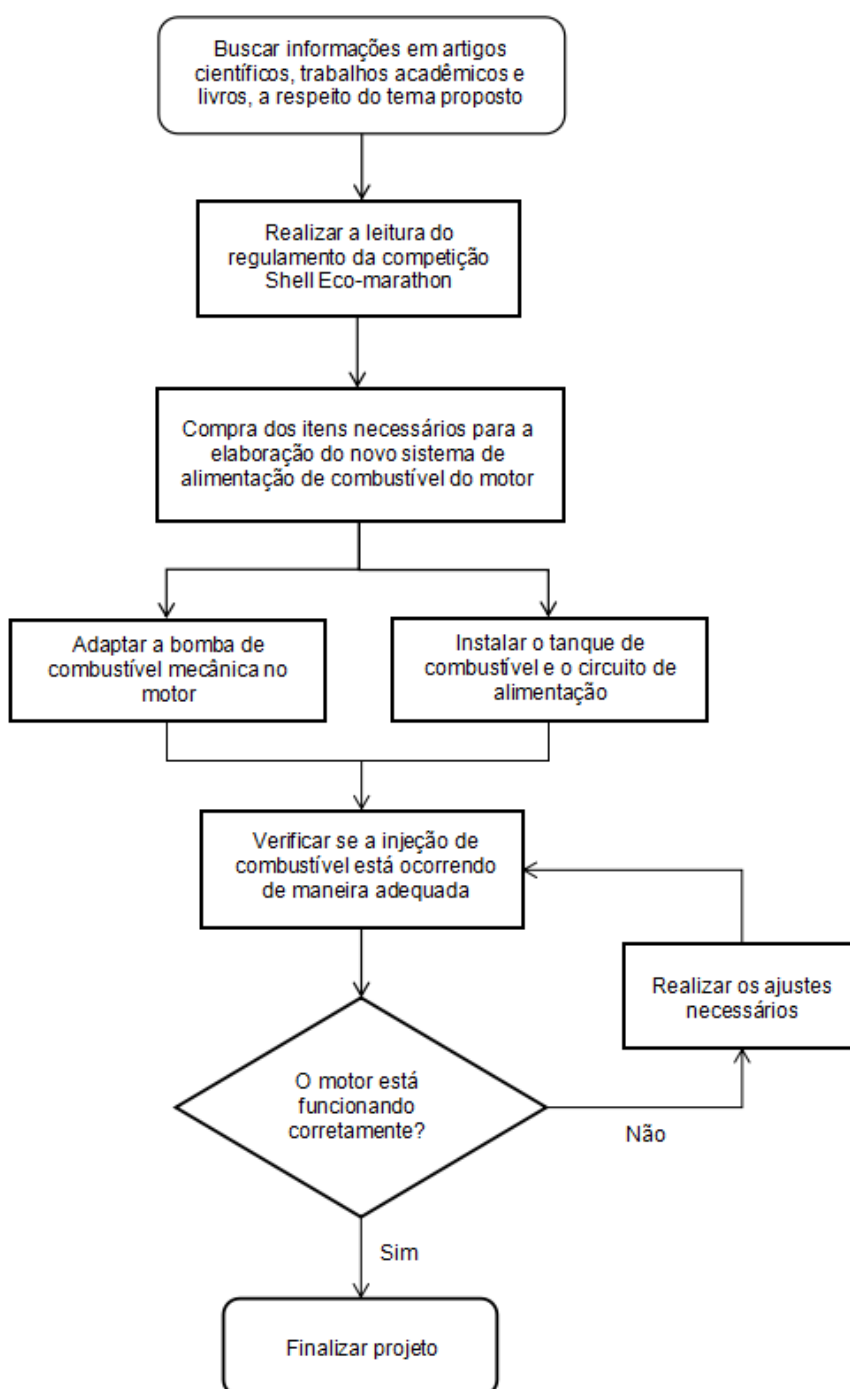
**Figura 11 - Diagrama do sistema de alimentação de combustível**

Fonte: Acosta, Betancourt e Pinheiro (2022)

### 3 METODOLOGIA

Para um intuito de planejamento, foi realizado um fluxograma para uma visualização mais facilitada das tarefas a serem realizadas durante este trabalho, de acordo com o esquema da figura 12:

**Figura 12 - Fluxograma das tarefas a serem realizadas durante o projeto**

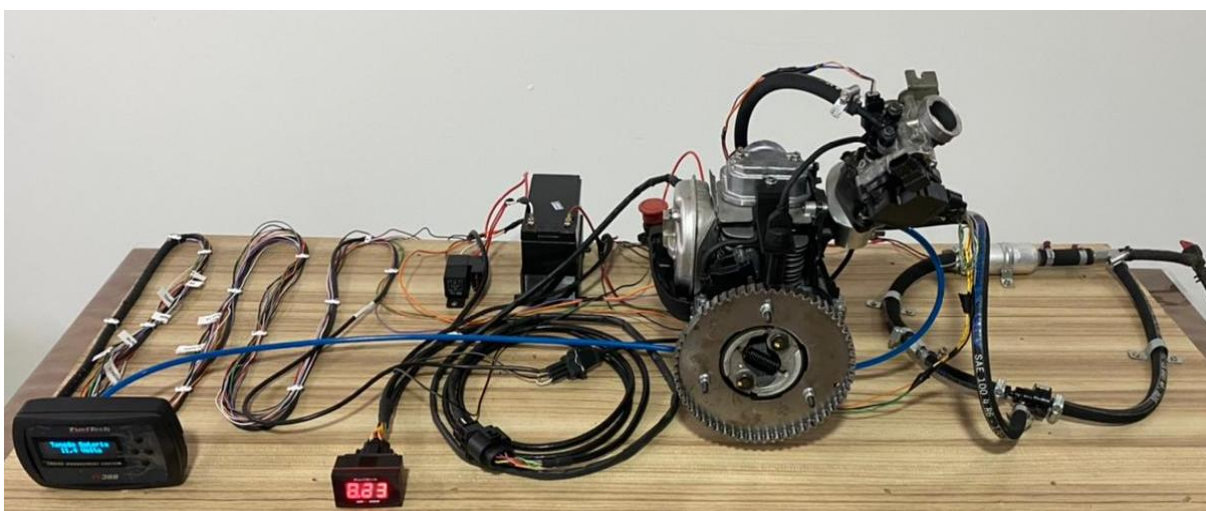


Fonte: Próprio Autor (2022)

Inicialmente, foi feita uma pesquisa para reunir informações a respeito de sistemas de alimentação de combustível, tal como os componentes utilizados e suas respectivas funções, com o intuito de elaborar um método de pressurização de combustível do sistema atual do motor, de modo a cumprir com as exigências contidas no regulamento da competição Shell Eco-marathon.

Após esta etapa, foi realizado um balanço dos componentes atuais do motor que possam ser reutilizados no novo sistema de alimentação de combustível. O sistema antigo pode ser visualizado na figura 13 abaixo:

**Figura 13 - Motor atual do projeto TubaTurbo com todos seus componentes**

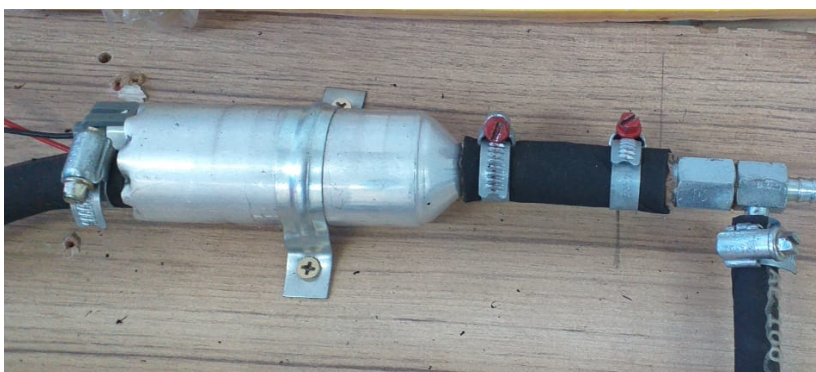


Fonte: Barion (2021)

Depois de efetuar o balanço dos itens, foi constatado que o sistema atual de alimentação de combustível possui os seguintes componentes a seguir:

- Bomba de combustível elétrica:

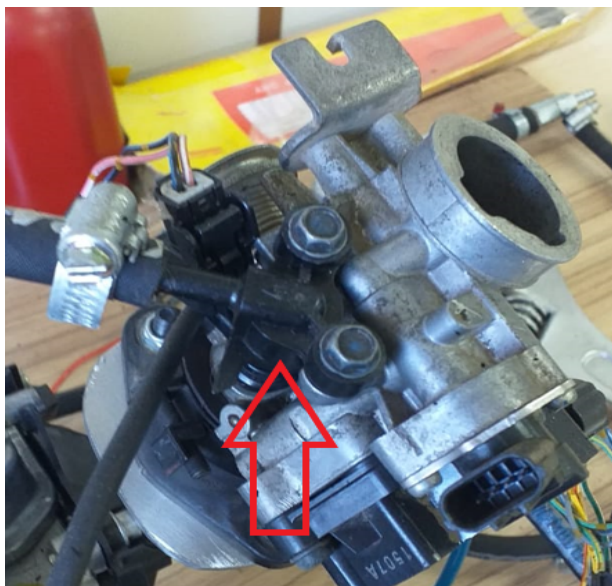
**Figura 14 - Bomba de combustível elétrica utilizada atualmente**



Fonte: Próprio Autor (2022)

- Bico injetor:

**Figura 15 - Bico injetor instalado no corpo de injeção do motor**



**Fonte: Próprio Autor (2022)**

- Regulador de pressão:

**Figura 16 - Regulador de pressão do sistema de injeção de combustível atual**



**Fonte: Próprio Autor (2022)**

- Mangueiras para o escoamento de combustível.

Com as informações dos componentes atuais, foi elaborado a tabela 1 para o controle do que foi necessário comprar e o que foi reutilizado no novo sistema de alimentação de combustível do motor:

**Tabela 1 - Controle dos itens para o novo projeto**

<b>Componente Atual</b>	<b>Reutilizar</b>	<b>Componente Novo</b>
Bomba de combustível elétrica	Não	Bomba de combustível mecânica
Regulador de pressão	Sim	-
Bico injetor	Sim	-
-	(Não possui)	Tanque de combustível
Mangueiras de combustível	Sim	-

**Fonte: Próprio Autor (2022)**

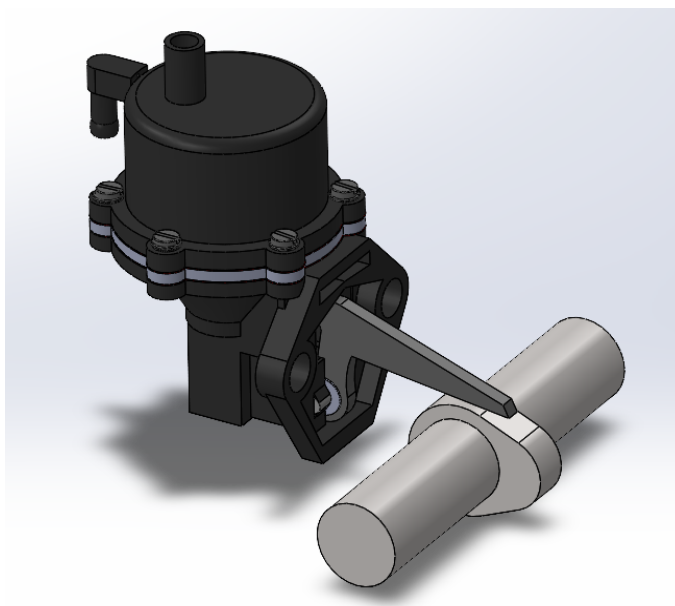
### **3.1 Projeto do sistema de pressurização de combustível**

Para o sistema de pressurização de combustível, optou-se pela utilização de uma bomba de acionamento mecânico, por conta das seguintes vantagens listadas abaixo:

- Simplicidade de operação, sem a necessidade de dispositivos de segurança;
- Não é necessário pressurizar o tanque de combustível;
- Não é preciso utilizar um sistema de ar comprimido.

E assim, para o motor realizar o seu acionamento foi necessário projetar um sistema de transmissão que transforme o movimento de rotação de um eixo acoplado ao motor em um movimento de translação da haste de acionamento da bomba, por meio de um eixo de cames acoplado ao virabrequim do motor, conforme a figura 17 a seguir:

**Figura 17 - Acionamento de uma bomba de combustível mecânica**



**Fonte: Próprio Autor (2022)**

Para a escolha do modelo de bomba mecânica para ser utilizado neste projeto, foi realizado um orçamento juntamente com a equipe do projeto de eficiência energética para a compra do modelo que seja mais adequado para este tipo de aplicação, com a ajuda financeira da UTFPR de acordo com um edital para projetos de extensão. Logo, foi optado por comprar um modelo de bomba mecânica utilizada em veículos com motores carburados, com acionamento pelo eixo de comando, conforme modelo representado na figura 18:

**Figura 18 - Bomba de combustível mecânica com pino de acionamento**



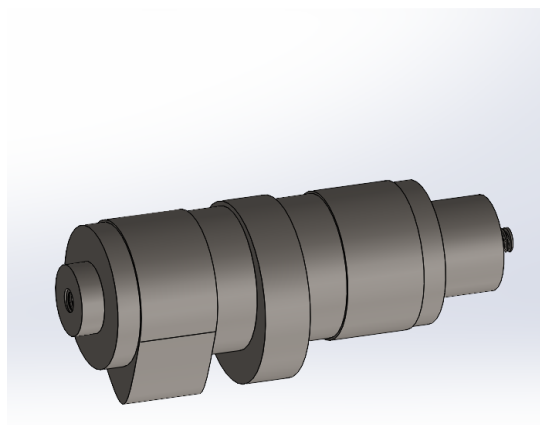
**Fonte: Auto Z (2022)**



Para o projeto de transmissão do torque do motor para o acionamento da bomba, foi realizada uma modelagem em 3D dos componentes necessários para fabricação, por meio do software SOLIDWORKS, com a finalidade de validar as dimensões e gerar os desenhos técnicos para fabricação das peças.

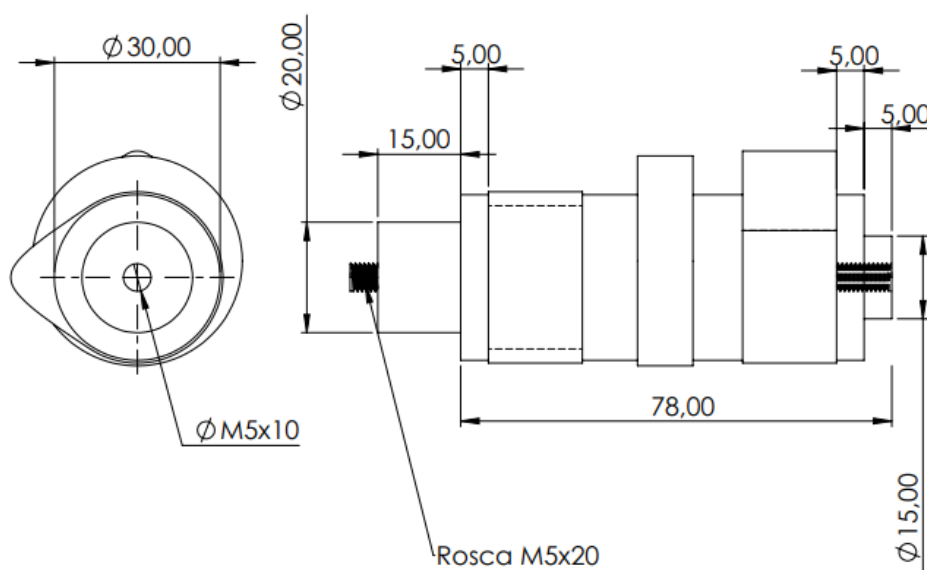
Para o eixo de acionamento, a modelagem deste componente e seu respectivo desenho técnico pode ser visto nas figuras 19 e 20:

**Figura 19 - Modelagem 3D do eixo de acionamento**



Fonte: Próprio Autor (2022)

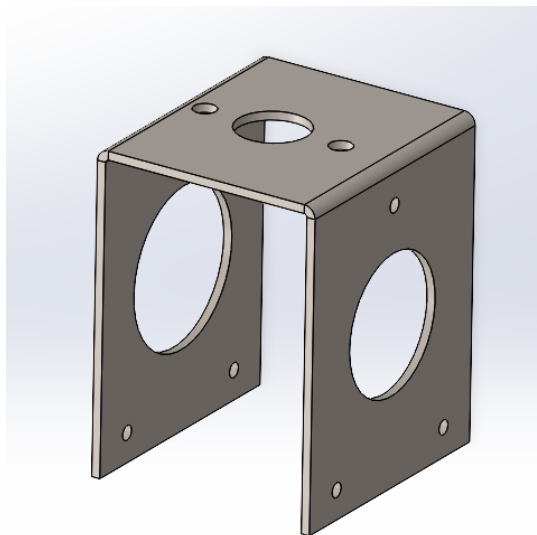
**Figura 20 - Desenho 2D do eixo de acionamento**



Fonte: Próprio Autor (2022)

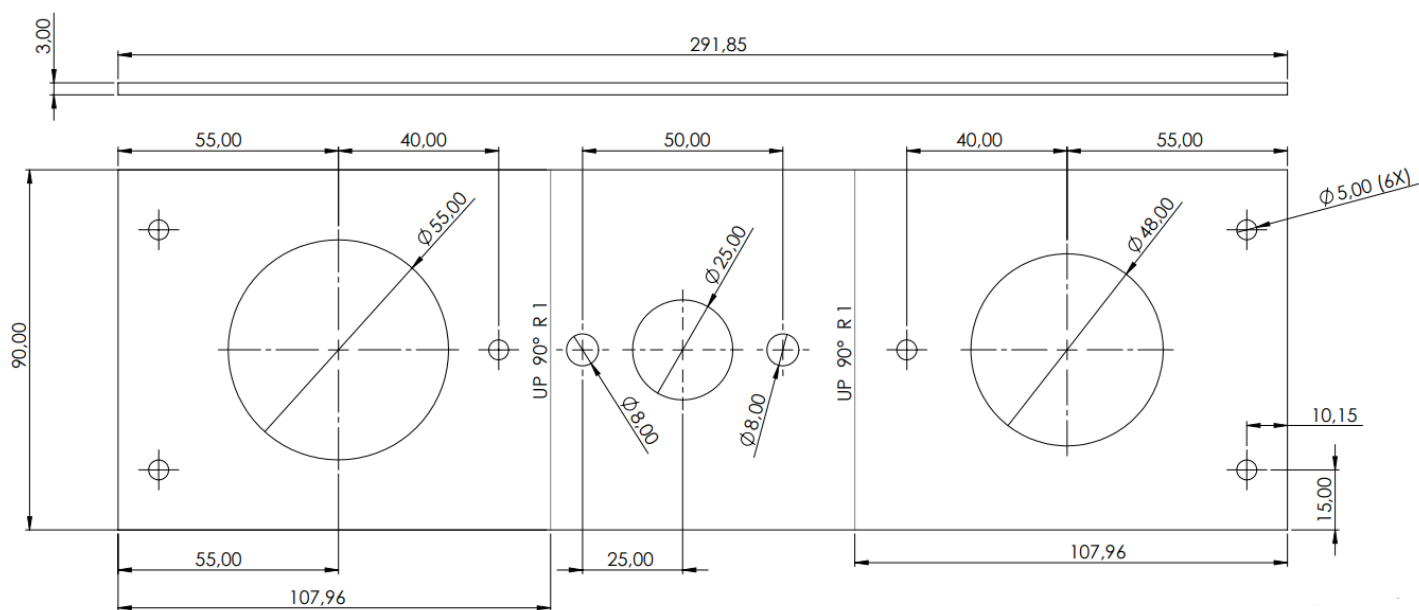
Já para o suporte da bomba, sua modelagem e desenho técnico são apresentados nas figuras 21 e 22:

**Figura 21 - Modelagem 3D do suporte da bomba**



**Fonte: Próprio Autor (2022)**

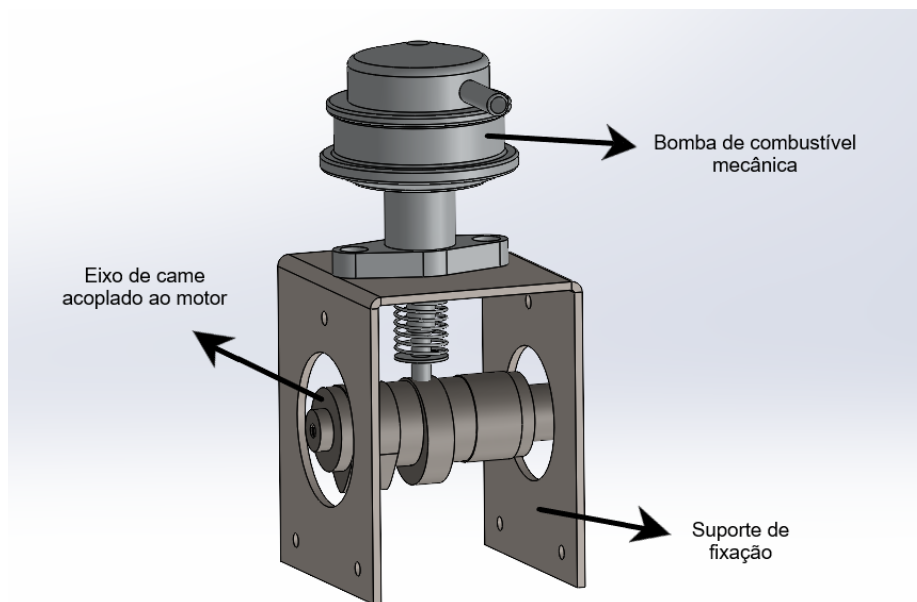
**Figura 22 - Desenho 2D do suporte da bomba**



**Fonte: Próprio Autor (2022)**

A montagem 3D dos componentes modelados também é demonstrada na figura 21 abaixo:

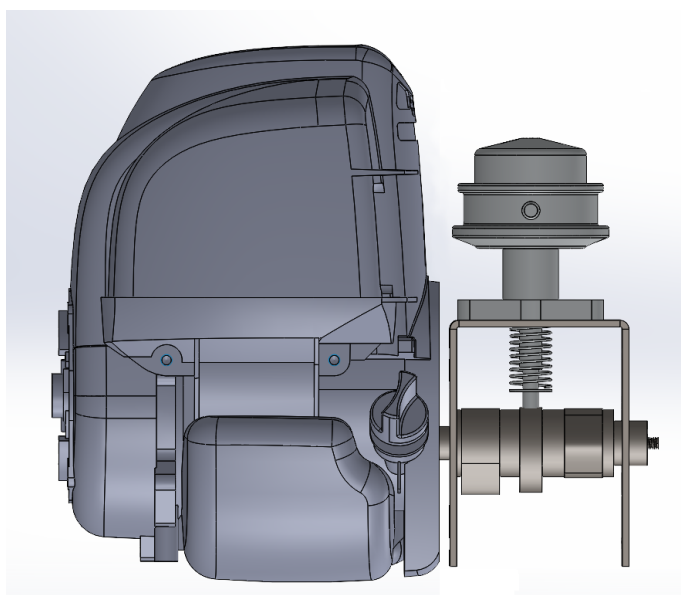
**Figura 23 - Modelagem 3D do projeto de acionamento da bomba mecânica**



**Fonte: Próprio Autor (2022)**

Conforme a figura 22, foi preciso projetar um sistema de acoplamento do eixo de comando a ser acionado pelo motor, de modo a transferir a rotação do motor para o came de acionamento da bomba mecânica:

**Figura 24 - Modelagem 3D do motor acoplado ao eixo de acionamento**



**Fonte: Próprio Autor (2022)**

### 3.2 Fabricação e instalação dos componentes do sistema de acionamento da bomba de combustível mecânica

Devido a complexidade de fabricação de um eixo de cames, foi optado pela utilização de um eixo de comando de válvulas usado, passando por um processo de usinagem para atingir a forma requerida para o projeto. Na figura 25 é demonstrado o eixo de comando em sua forma original:

**Figura 25 - Eixo de comando de válvulas**



Fonte: Próprio Autor (2022)

Com o desenho técnico, foi possível fabricar o novo eixo passando por um processo de usinagem em torno mecânico, possibilitando deixar o eixo de cames na forma desejada para o projeto, conforme a figura 26:

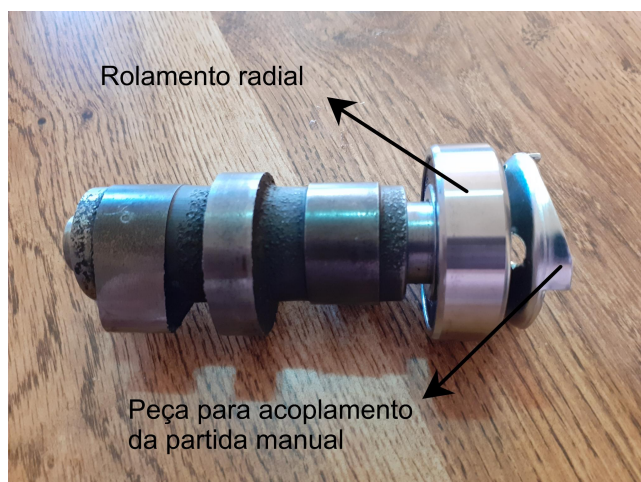
**Figura 26 - Eixo de cames fabricado para o projeto**



Fonte: Próprio Autor (2022)

Para o sistema funcionar corretamente, foi acoplado ao eixo um rolamento radial e o mecanismo de acoplamento da partida manual, que já fazia parte do projeto do motor e foi adaptado para sua utilização no novo projeto de acionamento da bomba de combustível mecânica, de acordo com a figura 27:

**Figura 27 - Eixo de cames para acionamento da bomba**



**Fonte: Próprio Autor (2022)**

Por fim, de acordo com a figura 28, o eixo de cames foi rosqueado junto ao virabrequim do motor, permitindo a conexão total do motor com ao sistema de partida manual:

**Figura 28 - Eixo de cames acoplado ao motor**



**Fonte: Próprio Autor (2022)**

Para a escolha da bomba de combustível mecânica, foi optado pelo modelo Nakata NKBC03141 para motores a gasolina e álcool, demonstrado na figura 29.

**Figura 29 - Bomba de combustível Nakata NKBC03141**

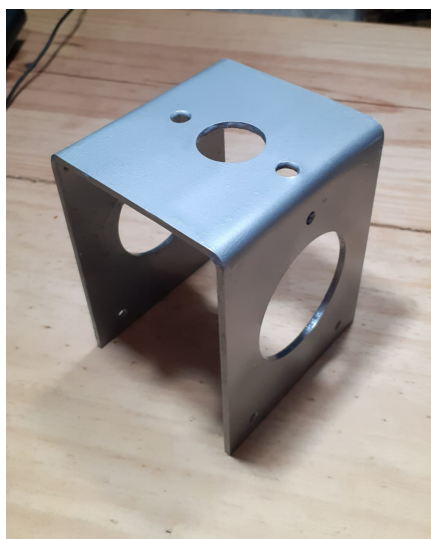


**Fonte: Próprio Autor (2022)**

Para a fixação de todos os componentes do sistema de acionamento da bomba mecânica, foi fabricado um suporte por meio de um procedimento de corte a laser e dobra de chapas, e posteriormente passando por um processo de pintura com uma tinta multiuso para evitar a corrosão do aço, utilizado como matéria-prima.

A figura 30 exibe o suporte fabricado para o projeto de acionamento da bomba:

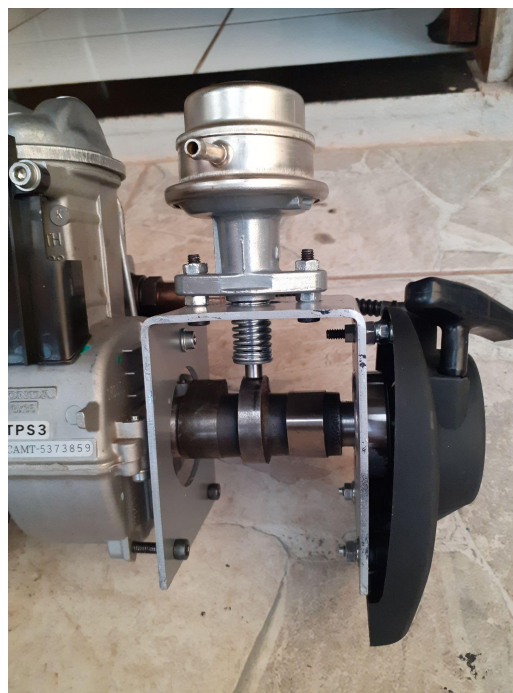
**Figura 30 - Suporte para fixação da bomba de combustível no motor**



**Fonte: Próprio Autor (2022)**

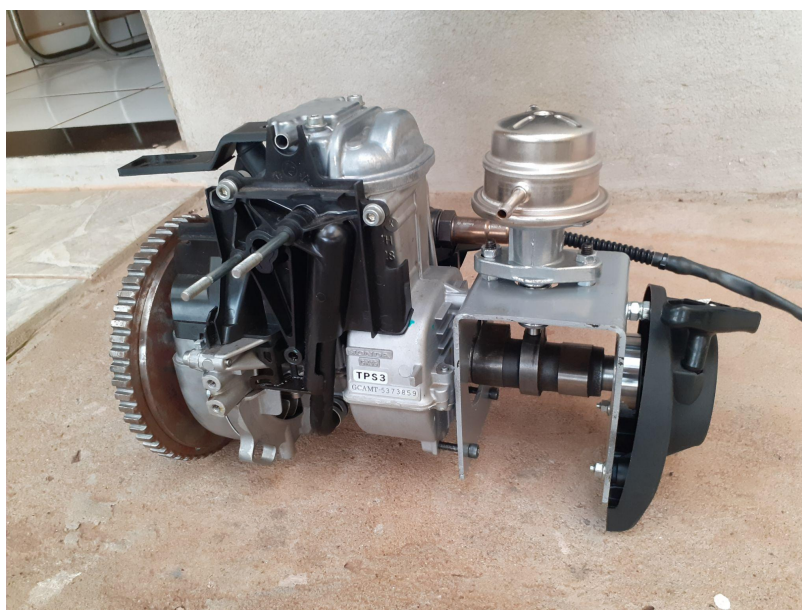
Com todos os componentes comprados e fabricados, foi possibilitado a montagem do sistema de acionamento da bomba de combustível mecânica, como pode ser visto nas figuras 31 e 32 a seguir:

**Figura 31 - Sistema de acionamento da bomba de combustível mecânica**



Fonte: Próprio Autor (2022)

**Figura 32 - Bomba de combustível mecânica acoplada ao motor**



Fonte: Próprio Autor (2022)

### 3.3 Seleção do tanque de combustível

Para a escolha e compra do tanque de combustível, foram analisados alguns requisitos do regulamento, com o intuito de efetuar a compra de um tanque que atendesse todas as exigências de padronização e segurança da competição Shell Eco-marathon, conforme modelo da figura 33. Os requisitos que o tanque deve possuir são:

- Capacidade de 30, 100 ou 250ml;
- O tanque de combustível deve permitir ser montado em uma posição vertical acessível e que permita seu enchimento com uma bureta de aproximadamente 1 metro de altura;
- A tampa do tanque de combustível pode ser a prova de vazamento ou perfurada.

**Figura 33 - Modelo de tanque de combustível exigido pela Shell**



Fonte: Benyoucef (2014)



Devido ao modelo recomendado pela Shell só ser fornecido durante a competição de eficiência energética, foi optado pela compra de um tanque de combustível que atendesse todos os requisitos do regulamento e que se assemelhasse ao máximo com o modelo recomendado. A figura 34 mostra o tanque de combustível que foi utilizado neste projeto, possuindo uma capacidade de 250ml e uma válvula para controle da vazão de saída do combustível.

**Figura 34 - Tanque de combustível utilizado para o projeto**



**Fonte: Próprio Autor (2022)**

**Figura 35 - Válvula para controle da vazão de saída de combustível**

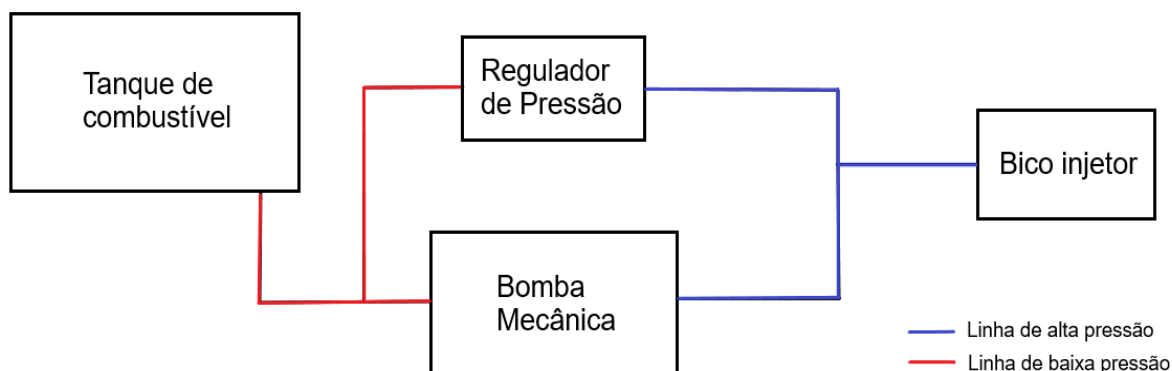


**Fonte: Próprio Autor (2022)**

### 3.4 Projeto do circuito de alimentação de combustível

Foi definido a seguinte configuração para ser elaborado o circuito de alimentação de combustível do motor, representado na figura 36:

Figura 36 - Configuração elaborada para o novo circuito de alimentação de combustível



Fonte: Próprio Autor (2022)

Conforme a configuração do circuito projetado, foi necessário a utilização do regulador de pressão para fazer o alívio da pressão excedente de combustível que não será utilizado pelo bico injetor, retornando para as linhas de baixa pressão, localizadas depois do tanque de combustível e antes da bomba mecânica. Vale ser destacado que foi optado por não utilizar um filtro de combustível, pois é proibido pelo regulamento da competição.

### 3.5 Verificação de desempenho

Para analisar se a bomba de combustível mecânica e os demais componentes instalados no sistema de alimentação de combustível do motor estão funcionando corretamente, foi observado alguns pontos citados a seguir:

- A partida do motor ocorre de maneira rápida e sem grande esforço para acionamento;
- O motor funciona sem apresentar engasgos e perda de potência em marcha lenta e sob alta rotação;
- O coeficiente de excesso de ar ( $\lambda$ ) não sofre alterações bruscas (conforme configuração da ECU).

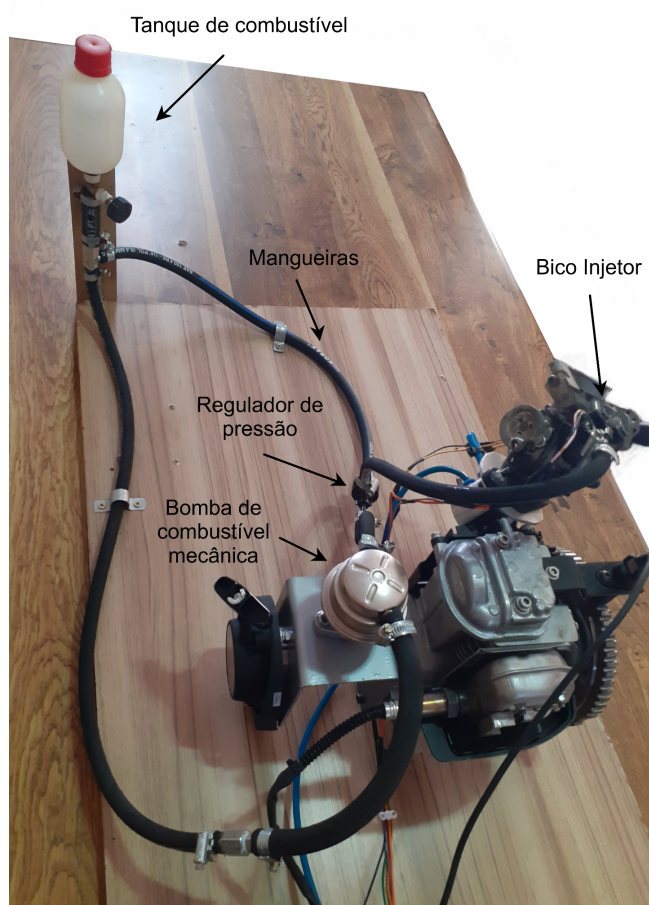
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste tópico serão abordados os resultados obtidos após a realização de todas as etapas contidas na seção 3 deste trabalho.

### 4.1 Instalação dos componentes do novo sistema de alimentação de combustível

Após a instalação de todos os componentes que compõem o sistema de alimentação de combustível em uma bancada, obteve-se a seguinte configuração:

**Figura 37 - Circuito de alimentação de combustível instalado em bancada**

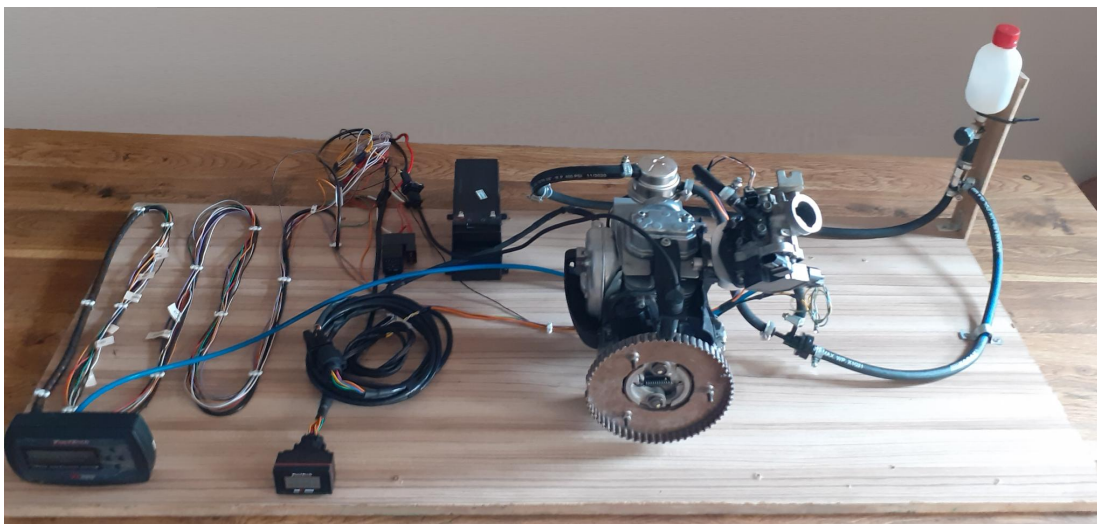


**Fonte: Próprio Autor (2022)**

Como pode ser visualizado na figura 37, utilizou-se a configuração proposta na figura 36, para realizar a montagem do circuito de alimentação de combustível do motor, composto pela bomba mecânica, o tanque de combustível de 250ml, o regulador de pressão, o bico injetor e as mangueiras para o escoamento do combustível em alta pressão.

O restante dos componentes do motor, inclusive os que compõem o sistema de injeção eletrônica, apropriadamente instalados na bancada, podem ser vistos na figura 38:

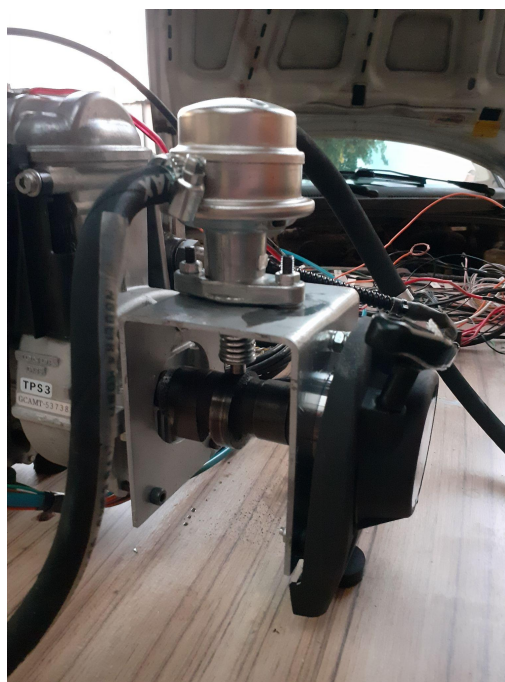
**Figura 38 - Motor com todos seus componentes instalados**



**Fonte: Próprio Autor (2022)**

Já o sistema de acionamento da bomba de combustível mecânica devidamente acoplado ao motor, juntamente com as mangueiras de entrada e saída de combustível e o sistema de partida manual, é demonstrado na figura 39.

**Figura 39 - Sistema de acionamento da bomba de combustível mecânica instalado**

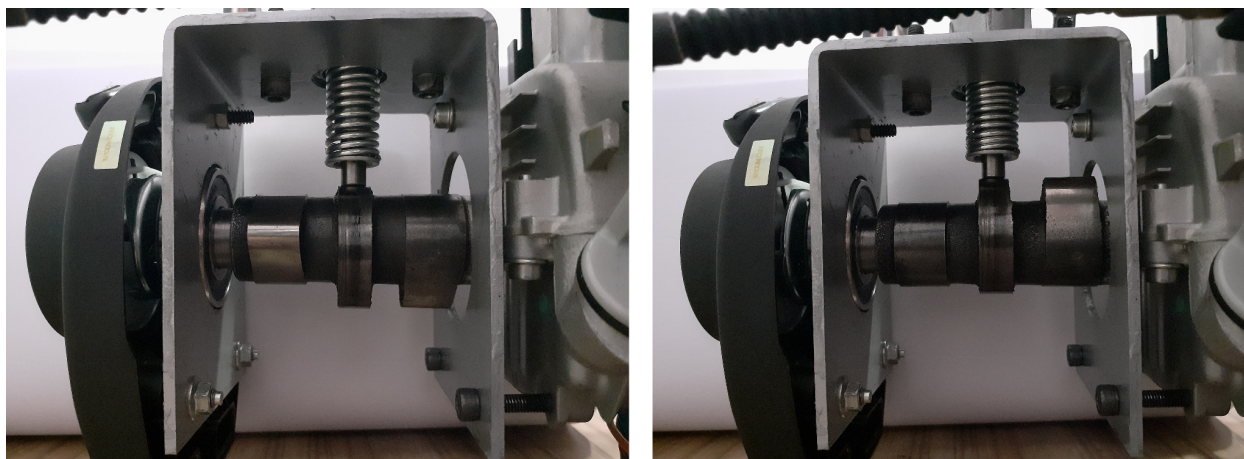


**Fonte: Próprio Autor (2022)**

## 4.2 Avaliação do projeto de acionamento da bomba mecânica

Para o sistema de acionamento da bomba mecânica, foi verificado que o eixo de cames utilizado no projeto funcionou de forma adequada, realizando o completo acionamento da bomba por meio do pino de bombeamento, conforme a figura 40:

**Figura 40 - Acionamento mínimo e máximo da bomba de combustível mecânica**



Fonte: Próprio Autor (2022)

Observa-se que na imagem à esquerda, a bomba está com sua mola em repouso, com o pino de acionamento em contato com a região de menor raio do came utilizado. Já na imagem à direita, o came realiza a compressão quase total da mola com sua região de maior raio, e assim, efetua o completo acionamento da bomba de combustível. Com isso, promove um aumento da pressão do combustível para a alimentação do motor.

## 4.3 Resultados e avaliação do desempenho do motor

Inicialmente, foram realizados testes para verificar a vazão de combustível fornecida pela bomba mecânica acionada pela partida manual, com a mangueira de saída de combustível voltada para um ambiente externo (desconectada do bico injetor), com a finalidade de avaliar visualmente a vazão de gasolina, utilizada como combustível. Os resultados foram aceitáveis, tendo em vista que a bomba utilizada para este projeto é utilizada geralmente em motores carburados com 4 cilindros ou mais, sendo mais que suficiente para o motor monocilíndrico utilizado neste trabalho.

Já para o funcionamento do motor, os resultados obtidos não foram satisfatórios, pois o sistema proposto não foi capaz de promover a combustão da mistura, não sendo possível extrair dados de tempo de injeção, rotação do motor e coeficiente de excesso de ar, por meio do módulo de injeção programável que o motor possui, de acordo com os requisitos do item 3.5.

Sendo assim, o desempenho da bomba de combustível mecânica a princípio foi considerado insatisfatório para aplicação neste projeto. Um dos prováveis motivos para isto ter ocorrido é a diferença de pressão de trabalho da bomba mecânica e do bico injetor. Ao verificar no catálogo dos fabricantes destes componentes, o bico injetor é idealizado para trabalhar a uma pressão média de 3 bar, e já a bomba mecânica, por possuir um diafragma e ser um processo mecânico, consegue liberar o combustível pressurizado em torno de 1 bar, dependendo da rotação do motor. Considerando que na partida manual a rotação do motor é baixa, foi notado que a bomba mecânica não é capaz de pressurizar o combustível de acordo com a necessidade do bico injetor.

#### **4.4 Propostas de melhorias futuras**

Para que o sistema de alimentação de combustível proposto neste presente trabalho funcione adequadamente, recomenda-se um estudo e a realização de testes efetuando a pressurização do tanque de combustível antes da partida, promovendo um aumento da pressão do sistema como um todo, e assim, complementando o trabalho exercido pela bomba mecânica para alcançar a pressão de trabalho do bico injetor.

Já para trabalhos futuros, recomenda-se a retirada da partida manual e a instalação de um sistema de partida elétrica no motor, sendo essa uma das exigências da competição Shell Eco-marathon. Com a utilização de um motor de arranque, a partida do motor irá ocorrer de forma mais rápida e fácil, e já no ponto de vista deste presente projeto, é válido utilizar o motor de arranque para acionar o eixo de cames, e conseqüentemente, o acionamento bem mais eficaz da bomba de combustível mecânica. Com isso, possibilitará um bombeamento mais rápido e uma maior pressurização do combustível devido a alta rotação promovida pelo sistema de partida elétrica.

## 5 CONCLUSÃO

Após a finalização deste trabalho, com todos os componentes do sistema de alimentação de combustível devidamente instalados, permitiu-se uma visualização mais clara de como é o funcionamento deste sistema, tal como a importância de cada componente e suas aplicações em motores a combustão. O entendimento deste assunto é de grande relevância para a aplicação em um projeto de eficiência energética, pois cabe a cada equipe projetar e adequar da forma mais otimizada possível este sistema, possibilitando aplicar alguns conceitos aprendidos durante a graduação.

Para a participação da equipe de eficiência energética Tuba Turbo na Shell Eco-marathon, foi necessário realizar as adequações no antigo sistema de alimentação de combustível do motor atualmente utilizado pela equipe, permitindo o cumprimento dos requisitos contidos no regulamento da competição. Uma das grandes dificuldades deste trabalho foi elaborar um método de acionamento de uma bomba de combustível mecânica somente pela rotação do motor, onde obteve-se resultados satisfatórios de vazão de combustível. No entanto, foi percebido que a pressão fornecida pela bomba mecânica não foi suficiente para uma operação adequada do bico injetor, dificultando o início da combustão do motor. Um dos grandes fatores para ocasionar este problema é a baixa rotação do eixo de acionamento da bomba devido ao sistema de partida manual do motor, sendo que este é um fator de extrema importância para a pressurização do combustível pela bomba mecânica.

Para estudos e melhorias futuras, é aconselhado a realização de testes de partida do motor pressurizando o tanque de combustível, de modo a aumentar a pressão de todo o sistema de alimentação de combustível para alcançar a pressão de trabalho ideal do bico injetor. Outra recomendação é a retirada do sistema de partida manual do motor e a instalação de um sistema de partida elétrica, por meio de um motor de arranque. Com isso, a partida do motor ocorrerá sob uma alta rotação para o acionamento da bomba mecânica, aumentando sua capacidade de pressurização de combustível.

## REFERÊNCIAS

- ACOSTA, B.; BETANCOURT, M.; PINHEIRO, F. **Shell Eco-marathon: 100% do relatório final**. Flórida: Universidade Internacional da Flórida, 2021. Disponível em: <https://mme.fiu.edu/wp-content/uploads/2013/04/R-T1-ShellEcoMarathon.pdf>  
Acesso em: 04 de jun. de 2022.
- AUTO Z. **Bomba Combustível Mecânica Kadett Ipanema Monza Alcool/Gasolina 243141**. São Paulo: 2022. Disponível em: <https://www.autoz.com.br/bomba-combustivel-mecanica-alcool-gasolina-243141-brosol/p>. Acesso em: 20 de out. de 2022.
- BARION, P. H. **Implantação de um sistema de injeção eletrônica programável em um motor monocilíndrico para projeto de eficiência energética**. Londrina: UTFPR, 2021.
- BENYOUCEF, S. **Fuel Tank Shell Eco**. 2014. Disponível em: [https://grabcad.com/library/fuel-tank-shell-eco-1/details?folder\\_id=652528](https://grabcad.com/library/fuel-tank-shell-eco-1/details?folder_id=652528)  
Acesso em: 22 de mai. de 2022.
- BOSCH. **Manual de tecnologia automotiva**. São Paulo: Editora Blucher, 2005.
- BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. 2. ed. Editora Blucher, 2018.
- CAPELLI, A. **Eletroeletrônica Automotiva - Injeção Eletrônica, Arquitetura do Motor e Sistemas Embarcados**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2010.
- CREA-PR. **Eficiência Energética: Série de Cadernos Técnicos da Agenda Parlamentar**. 2016. Disponível em: <https://www.crea-pr.org.br/ws/wp-content/uploads/2016/12/eficiencia-energetica.pdf>  
Acesso em: 01 de mai. de 2022.
- EEEP, Curso Técnico em Manutenção Automotiva. **Motores de Combustão Interna Ciclo Otto Mod. II**. Ceará: Secretaria da Educação, 2022. Disponível em: [https://educacaoprofissional.seduc.ce.gov.br/images/material\\_didatico/manutencao\\_automotiva/manutencao\\_automotiva\\_motores\\_de\\_combustao\\_interna\\_ciclo\\_otto\\_II.pdf](https://educacaoprofissional.seduc.ce.gov.br/images/material_didatico/manutencao_automotiva/manutencao_automotiva_motores_de_combustao_interna_ciclo_otto_II.pdf). Acesso em: 22 de abr. de 2022.
- FILHO, G. F. **Máquinas Térmicas Estáticas e Dinâmicas**. São Paulo: Érica, 2014.
- KROSS, K. A.; POTTER, M. C. **Termodinâmica para Engenheiros**. São Paulo: Cengage Learning Brasil, 2016.
- MOREIRA, J. S. **Energias Renováveis, Geração Distribuída e Eficiência Energética**. 2. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2021.
- MTE-THOMSON. **O que é uma Sonda Lambda ou Sensor de Oxigênio?**. 2022. Disponível em: <https://www.mte-thomson.com.br/sonda-lambda/>  
Acesso em: 21 de mai. de 2022.



OLIVEIRA, C. A.; ROSA, A. **Motores de combustão interna – álcool e gasolina.** Santa Maria, CEP SENAI Roberto Barbosa Ribas, 2003.

SHELL. **Shell Eco-marathon Brasil.** 2022. Disponível em: <https://www.shell.com.br/energia-e-inovacao/ecomarathon/shell-eco-marathon-brasil.html>. Acesso em: 28 de abr. de 2022.

TEIXEIRA, Gerson, P. e Felipe Costa Novo Malheiros. **Máquinas térmicas.** Grupo A, 2018.

URNS, Stephen R. **Introdução à Combustão.** 3. ed. Porto Alegre:AMGH, 2013.