



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO**  
**ESCOLA DE MINAS**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA**



**JOÃO CARLOS HENRIQUE MOREIRA**

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DA REDUÇÃO DE  
CONSUMO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DO BAJA  
COM USO DE MISTURA GASOLINA – HIDROGÊNIO**

**OURO PRETO - MG**

**2018**

**JOÃO CARLOS HENRIQUE MOREIRA**

**jcmoreira@gmail.com**

**ANÁLISE TEÓRICA E EXPERIMENTAL DA REDUÇÃO DE  
CONSUMO DE UM MOTOR DE COMBUSTÃO INTERNA DO BAJA  
COM USO DE MISTURA GASOLINA – HIDROGÊNIO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação  
em Engenharia Mecânica da Universidade  
Federal de Ouro Preto como requisito para a  
obtenção do título de Engenheiro Mecânico.

**Professor orientador:** Elisângela Martins Leal, PhD

**OURO PRETO - MG**

**2018**

M838a	<p>Moreira, João Carlos Henrique. Análise teórica e experimental da redução de consumo de um motor de combustão interna do BAJA com uso de mistura gasolina-hidrogênio [manuscrito] / João Carlos Henrique Moreira. - 2018.</p> <p>61f.: il.: color; grafs; tabs.</p> <p>Orientadora: Profª. Drª. Elisângela Martins Leal.</p> <p>Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia Mecânica.</p> <p>1. Energia. 2. BAJA. 3. Motor de combustão interna. 4. Hidrogênio. 5. Eletrólise. I. Leal, Elisângela Martins. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.</p> <p>CDU: 621</p>
-------	--



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

**ATA DA DEFESA**

Aos 7 dias do mês de dezembro de 2018, às 10h30min, na sala 20, localizada na Escola de Minas, Campus Morro do Cruzeiro da Universidade Federal de Ouro Preto, foi realizada a defesa de monografia do aluno João Carlos Henrique Moreira, sendo a comissão examinadora constituída pelos professores: Prof. DSc. Luis Antonio Bortolaia, Prof. MSc. Leandro Augusto de Souza e Profa. DSc. Elisângela Martins Leal. O candidato apresentou o trabalho intitulado: "**Análise teórica e experimental da redução de consumo de um motor de combustão interna do BAJA com uso de mistura gasolina-hidrogênio**", sob orientação da Profa. DSc. Elisângela Martins Leal. Após as observações dos avaliadores, em comum acordo os presentes consideram o aluno aprovado.

Ouro Preto, 7 de dezembro de 2018.

Profa. DSc. Elisângela Martins Leal  
**Professora Orientadora**

Prof. DSc. Luis Antonio Bortolaia  
**Professor Avaliador**

Prof. MSc. Leandro Augusto de Souza  
**Professor Avaliador**

João Carlos Henrique Moreira  
**Aluno**

Dedico este trabalho aos meus pais, João e Sandra, e ao meu tio Paulo por esta etapa vencida.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus por me guiar ao longo da graduação, aos meus pais pelo incentivo e motivação para finalizar a graduação. A todos da família que de alguma forma me ajudaram, em especial ao meu tio Paulinho e ao meu sobrinho João Vitor por me dar alegria e motivação na vida. Aos meus irmãos Romulo e Júlio por me apoiarem nas situações. Agradeço a República Engenho que é minha segunda família que encontrei na cidade de Ouro Preto, a todos que passaram por esta casa e aos anos de vivência e aprendizado. Aos amigos que sempre estiveram ao meu lado, as amizades que fiz durante a graduação que também fizeram parte dessa família ouro-pretana. Em especial ao meu grande amigo Thiago, pelo foco, motivação, perseverança e risadas nesta reta final. Aos mestres que puderam me passar todos os ensinamentos e a minha orientadora pela paciência.

*“Não existe nada fora de você que permita que você se torne melhor, mais forte, mais rico, mais rápido ou mais inteligente. Tudo vem de dentro. Tudo existe. Não procure nada fora de si mesmo”.*  
*MUSASHI, Miyamoto.*

## RESUMO

MOREIRA, João Carlos Henrique. Análise teórica e experimental da redução de consumo de um motor de combustão interna do BAJA com uso de mistura Gasolina – Hidrogênio. Monografia. Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Ouro Preto. 2018.

Os combustíveis fósseis são utilizados como os principais recursos energéticos no mundo, porém sua fonte é limitada. Devido a isto, há uma grande preocupação e busca por novas alternativas de geração energética. Esta pesquisa apresenta o desenvolvimento de um experimento de injeção de um gás resultante de eletrólise em um motor de combustão interna para redução do consumo de combustível principal. Este motor utiliza gasolina como principal combustível e o gás de eletrólise usado como aditivo. O gás de eletrólise é injetado junto a admissão de ar do motor. O desempenho de um motor pode ser elevado com este elemento aditivo devido a sua grande capacidade calorífica e sua alta velocidade de combustão. Por outro lado, ainda é alvo de constantes análises devido aos riscos no que se diz respeito ao seu armazenamento. Este experimento consiste em caracterizar a redução do consumo médio da gasolina por meio do comparativo entre o funcionamento original do motor e o funcionamento com o aditivo. Foram adotados como parâmetros de estudo, o tempo de funcionamento, a variação de rotação, a vazão do gás de eletrólise devido ao aumento da corrente na célula eletrolítica e o consumo médio de combustível. Os principais resultados coletados mostram que o consumo reduz em cerca de 88% com a adição do hidrogênio no motor de combustão interna.

**Palavras-chave:** energia, BAJA, motor de combustão interna, hidrogênio, eletrólise, análise de desempenho.



## **ABSTRACT**

*MOREIRA, João Carlos Henrique. Theoretical and experimental analysis of the reduction of consumption of an internal combustion engine of the BAJA with use of mixture Gasoline - Hydrogen. Monograph. Bachelor degree in Mechanical Engineering. Federal University of Ouro Preto. 2018.*

*The fossil fuels are used as the main energy resources in the world, but their source is limited. Due to this, there is a great concern and search for new alternatives of energy generation. This research presents the development of an experiment of injection of a gas resulting from electrolysis in an internal combustion engine to reduce the main fuel consumption. This engine uses gasoline as the main fuel and the electrolysis gas used as an additive. The electrolysis gas is injected next to the engine air intake. The performance of an engine can be high with this additive element due to its high heat capacity and high combustion rate. On the other hand, it is still subject to constant analysis due to the risks in regards to its storage. This experiment consists in characterizing the reduction of the average gasoline consumption by means of the comparison between the original operation of the engine and the operation with the additive. The operating time, the rotation variation, the flow rate of the electrolysis gas due to the increase of the current in the electrolytic cell and the average fuel consumption were adopted as study parameters. The main results show that consumption reduces by about 88% with the addition of hydrogen in the internal combustion engine.*

**Keywords:** *Energy, BAJA, internal combustion engine, fuel, hydrogen, electrolysis, performance analysis.*

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Matriz energética do mundo no ano de 2015 .....	10
Figura 2: Os quatro tempos para o ciclo Otto.....	15
Figura 3: Principais partes dos motores do ciclo Otto de dois tempos.....	16
Figura 4: Funcionamento de um motor Otto de dois tempos: (a) primeiro tempo e (b) segundo tempo .....	16
Figura 5: Competição Nacional BAJA SAE Brasil.....	19
Figura 6: Alternativas de produção do hidrogênio .....	25
Figura 7: Fluxograma do Ciclo de Vida do Hidrogênio.....	27
Figura 8: Célula para geração de eletrólise. ....	35
Figura 9: Fonte Reguladora Instrutherm DC FA-2030 .....	36
Figura 10: Análise do pH das amostras em indicador de pH em vareta.....	37
Figura 11: Condutivímetro utilizado na análise, Modelo CD-850 .....	38
Figura 12: Imagem ilustrativa do sensor Hall .....	39
Figura 13: Imagem ilustrativa do sensor de fluxo Modelo YF-S402 .....	40
Figura 14: Análise das medições para calibração do sensor de fluxo (Vazão x Pulso). ....	40
Figura 15: Equipamento para análise de vazão da célula eletrolítica.....	44
Figura 16: Especificações do Motor Briggs&Stratton 10 HP. ....	48
Figura 17: Bancada para análise de consumo de combustível. ....	51
Figura 18: Pico de aumento de consumo de combustível. ....	53

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Oferta de energia no mundo em 2015 .....	11
Tabela 2: Informações do hidrogênio.....	21
Tabela 3: Propriedades físicas do hidrogênio e outros combustíveis.....	22
Tabela 4: Propriedades do hidrogênio combustível em comparação com a gasolina .....	24
Tabela 5: Resultados de condutividade das soluções coletados em microSiemens. ....	38
Tabela 6: Variável e Indicadores .....	41
Tabela 7: Tabela de valores coletados na produção de hidrogênio de acordo com a corrente adicionada na célula, com a proporção de 12,5 gramas de KOH.....	44
Tabela 8: Tabela de valores coletados na produção de hidrogênio de acordo com a corrente adicionada na célula, com a proporção de 15 gramas de KOH.....	45
Tabela 9: Tabela de valores coletados na produção de hidrogênio de acordo com a corrente adicionada na célula, com a proporção de 17,5 gramas de KOH.....	45
Tabela 10: Tabela de valores coletados na produção de hidrogênio de acordo com a corrente adicionada na célula, com a proporção de 20 gramas de KOH.....	46
Tabela 11: Resultado do cálculo ideal para motor a combustão interna .....	49
Tabela 12: Resultados dos cálculos para um motor ideal.....	50
Tabela 13: Resultados das análises de rotação e consumo médio sem adição do hidrogênio..	51
Tabela 14: Consumo (ml/s) de gasolina devido a adição de hidrogênio .....	53

## LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

SAE - *Society of Automotive Engineers* (Sociedade dos Engenheiros de Mobilidade)

OECD - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

PMS -Ponto Morto Superior

PMI - Ponto Morto Inferior

C - Carbono

O - Oxigênio

H - Hidrogênio

S - Enxofre

KOH - Hidróxido de potássio

pH – Potencial hidrogeniônico

mS - microSiemens

N - Nitrogênio

Ar - Argônio

Xe - Xenônio

He - Hélio

Kr - Criptônio

s - segundos

## LISTA DE SÍMBOLOS

$m$	Massa [kg]
$m_{ar}$	Massa do ar [kg]
$m_{comb}$	Massa do combustível [kg]
$N_c$	Potência do ciclo [kW]
$p$	Pressão [kPa]
$P_1$	Pressão de admissão [kPa]
$P_2$	Pressão de compressão [kPa]
$n$	Rotação do motor [rpm]
$RC$	Relação de compressão de um motor de combustão interna [-]
$T$	Temperatura [K]
$T_1$	Temperatura de admissão [K]
$T_2$	Temperatura de compressão [K]
$T_3$	Temperatura na exaustão [K]
$T_4$	Temperatura no escape [K]
$x$	Fator de tempos do motor [-]
$W$	Trabalho [kJ]
$W_{compr}$	Trabalho de compressão [kJ]
$W_{exp}$	Trabalho de expansão [kJ]
$W_c$	Trabalho do ciclo [kJ]
$H$	Entalpia [kJ]
$h$	Entalpia específica [kJ/kg]
$V$	Volume [m <sup>3</sup> ]
$v$	Volume específico [m <sup>3</sup> /kg]
$v_1$	Volume específico de admissão [m <sup>3</sup> /kg]
$v_2$	Volume específico de compressão [m <sup>3</sup> /kg]
$V_1$	Volume no ponto morto inferior [m <sup>3</sup> ]
$V_2$	Volume no ponto morto superior [m <sup>3</sup> ]

## SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Formulação do Problema.....	1
1.2. Justificativa.....	5
1.3. Objetivos.....	5
1.3.1. Geral.....	5
1.3.2. Específicos.....	5
1.4. Estrutura do Trabalho.....	6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1. Energia.....	7
2.2. Histórico do Motor de combustão interna de quatro tempos.....	11
2.3. Motores do Ciclo Otto de Quatro Tempos.....	14
2.4. Motores do Ciclo Otto de Dois Tempos.....	15
2.5. Análise teórica de motores de combustão.....	17
2.6. BAJA.....	18
2.7. Hidrogênio.....	20
2.8. Geração de Hidrogênio.....	25
2.9. Eletrólise.....	28
2.10. Impactos Ambientais.....	30
2.11. Redução de Consumo.....	30
2.12. Análise Experimental.....	32
3. METODOLOGIA.....	33
3.1. Tipo de pesquisa.....	33
3.2. Materiais e Métodos.....	34
3.2.1. Análise do pH e da condutividade nas soluções eletrolíticas.....	36
3.2.2. Sensor de rotação.....	38
3.2.3. Sensor de fluxo.....	39
3.3. Variáveis e indicadores.....	41
3.4. Instrumentos de coleta de dados.....	42
3.5. Tabulação de dados.....	42

3.6. Considerações finais do capítulo .....	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	43
4.1. Análise de vazão devido a cada porcentagem de KOH .....	43
4.1.2. Estequiometria da combustão da gasolina e mistura gasolina-hidrogênio .....	46
4.1.3. Análise ideal para um motor de combustão interna.....	48
4.1.4. Análise de consumo médio de combustível.....	50
4.1.5. Análise de consumo médio de combustível com hidrogênio como aditivo .....	52
4.2. Adaptação de componentes ao sistema.....	54
5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES .....	55
5.1. Conclusões .....	55
5.2. Recomendações .....	56
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	57

## **1. INTRODUÇÃO**

Neste primeiro capítulo será apresentada a definição e conceitos básicos do funcionamento de motores a combustão interna, conceituação de energia, utilização de hidrogênio e seu emprego como aditivo e combustível do futuro. Sendo assim, a finalidade do primeiro capítulo está vinculada na apresentação do problema, os motivos de sua origem, justificativas para realização, os objetivos e estrutura do trabalho.

### **1.1. Formulação do Problema**

Energia é tratada na educação científica de forma conceitual e matemática muito aprofundada. De maneira qualitativa e descritiva, muitos que não entendem do assunto acabam construindo sua própria visão. Pensando nisso, Hierrezuelo e Molina (1990) agregaram aspectos formais e conceituais para uma definição descritiva de energia para gradativamente ir agregando novos atributos por possuir um aspecto muito amplo. Por este ponto de vista os autores definiram que “energia é uma propriedade ou atributo de todo corpo ou sistema material em virtude da qual este pode transformar-se, modificando sua situação ou estado, assim como atuando sobre outros, originando neles processos de transformação”.

A partir dessa definição, pode-se integrar o conceito de energia associada ao movimento e colisões gerando uma gama de conversões, elástica, sonora ou térmica como nos motores a combustão. De forma a analisar a conservação ou não da energia sugerida por Michinel e D'Alessandro (1994), energia é uma magnitude física que se apresenta sob diversas formas, está envolvida em todos os processos de mudanças de estado, se transforma e se transmite, depende do sistema de referência e, fixado este, se conserva.

Estevão (2008) demonstra que até o desenvolvimento das máquinas a vapor em meados do século XVIII, a potência mecânica era realizada por animais, vento, água e até o ser humano. O advento do motor de combustão interna pode ser considerado recente. Por volta do ano de 1860, o francês Jean Joseph Lenoir apareceu com uma patente de motor de



combustão interna, porém, em 1862, Beau de Rochas estabeleceu os princípios de funcionamento de tais motores.

Segundo Barger *et al.* (1966) *apud* Varella (2010), os princípios de Beau de Rochas para máxima eficiência do ciclo são: (a) a relação superfície-volume do cilindro deve ser a menor possível; (b) o processo de expansão deve ser o mais rápido possível; (c) a expansão deve ser a máxima possível; e (d) a pressão deve ser a máxima possível no início da expansão. Os dois primeiros itens têm como objetivo de reduzir a perda de calor através das paredes do cilindro; o terceiro item considera que maior expansão (curso) produz maior trabalho e o quarto item considera que quanto maior a pressão, maior é o trabalho produzido na expansão.

O ciclo de funcionamento é o conjunto de transformações da termodinâmica no interior da câmara, desde a sua admissão até a sua eliminação. O ciclo Otto foi descrito por Nikolaus A. Otto em 1876, também conhecido como motor Otto silencioso. Quando o motor completa o ciclo em dois cursos do pistão é chamado de motor de dois tempos e quando completa o ciclo em quatro cursos é chamado motor de quatro tempos (BARGER *et al.*, 1966 *apud* VARELLA, 2010).

Segundo Lepecki (2011), o uso atual do hidrogênio inclui processos industriais, combustível para foguetes e propulsão para cápsulas espaciais. Com a pesquisa e desenvolvimento mais avançados, este combustível também pode ser utilizado como uma fonte alternativa de energia para o aquecimento e iluminação de residências, geração de eletricidade e como combustível de automóveis.

O hidrogênio apresenta características interessantes que o habilita a ser usado em motores de combustão interna, porém como aditivo ao combustível principal. Essas características vão desde sua densidade energética de 38 kWh/kg, sua energia mínima de ignição de 0,04 mJ, e sua ampla faixa de limite inferior (4%) e superior (75%) de flamabilidade (ESTEVÃO, 2008).

De acordo com Silva (2009), o hidrogênio promete ser essencial para a produção de energia nos próximos anos. Essa revelação se deve as emissões de gases que necessita de intervenção por parte do homem. O hidrogênio, produzido a partir da eletrólise tem sido muito utilizado na forma de combustível alternativo por possuir grande quantidade de energia por unidade de massa e o produto gerado na combustão ser água. Possui símbolo químico H,

composto por um átomo de próton e um de elétron e é o elemento mais leve da tabela periódica.

Para Zan (2010), as vantagens do hidrogênio são dadas devido a redução da emissão de gases poluentes para a atmosfera; o combustível apresenta uma velocidade de combustão superior à de todos os outros combustíveis, é o elemento mais abundante do universo (recurso ilimitado) e mesmo sendo obtido através de combustíveis fósseis, pode diminuir em 50% a emissão de dióxido de carbono. Já as desvantagens são o elevado custo de produção, seu armazenamento e sua distribuição.

Devido ao seu alto poder energético, espera-se que o hidrogênio trabalhando como aditivo no processo de combustão reduza efetivamente o consumo de gasolina. Devido a sua ampla faixa de inflamabilidade (4% a 75% em volume), e adicionando algo em torno de 5% de hidrogênio a gasolina em um processo de combustão, pode-se reduzir a emissão de gases poluentes em cerca de 30 a 40%, segundo o *site* Portal São Francisco (2017).

Conforme demonstra D'Agosto (2012), o desenvolvimento de novas tecnologias para o controle do consumo de combustíveis e emissão de poluentes concentra-se nos laboratórios das montadoras e das empresas da cadeia automobilística, e se aplicam essencialmente aos veículos novos. Porém, estudos demonstram que há amplas possibilidades de desenvolvimento de tecnologias aplicáveis aos veículos em operação.

Por via de experimentos realizados em um veículo popular, Wollmann (2013) teve como resultado o ganho médio de 6 a 43% de redução do consumo de gasolina, mostrando que o hidrogênio regula a queima tornando o ciclo da combustão mais eficiente, assim utilizando menos combustível para um dado percurso.

O ganho de potência e a redução do consumo de gasolina originada pela adição do hidrogênio resultariam na redução da probabilidade de "pane seca" durante o enduro realizado na competição da SAE.

Segundo *site* da SAE BRASIL (1991), o programa BAJA SAE BRASIL é um desafio lançado aos estudantes de Engenharia que oferece a chance de aplicar na prática os conhecimentos adquiridos em sala de aula, visando incrementar sua preparação para o mercado de trabalho. Ao participar do programa BAJA SAE, o aluno se envolve com um caso real de desenvolvimento de um veículo Off-Road, desde sua concepção, projeto detalhado,

construção e testes. E o mais estimulante é que as equipes vencedoras são convidadas a participar da competição internacional, nos Estados Unidos.

Os alunos que participam do BAJA SAE BRASIL devem formar equipes que representarão a Instituição de Ensino Superior à qual estão ligados. Estas equipes são desafiadas anualmente a participar da competição, que reúne os estudantes e promove a avaliação comparativa dos projetos. No Brasil, a competição nacional recebe o nome de Competição BAJA SAE BRASIL e as competições regionais são nomeadas como Etapa Sul, Sudeste e Nordeste. As etapas da competição não são complementares e a equipe vencedora do BAJA nacional ganha o direito de competir da etapa internacional da prova nos Estados Unidos (SITE SAE BRASIL, 1991).

Segundo a SAE BRASIL (1991), o projeto BAJA SAE foi criado na Universidade da Carolina do Sul, Estados Unidos, sob a direção do Dr. John F. Stevens, sendo que a primeira competição ocorreu em 1976. O ano de 1991 marcou o início das atividades da SAE BRASIL, que, em 1994, lançava o Projeto BAJA SAE BRASIL. No ano seguinte, em 1995, era realizada a primeira competição nacional, na pista Guido Caloi, bairro do Ibirapuera, cidade de São Paulo. No ano seguinte a competição foi transferida para o Autódromo de Interlagos, onde ficaria até o ano de 2002. A partir de 2003 a competição passou a ser realizada em Piracicaba, interior de São Paulo, no ECPA – Esporte Clube Piracicabano de Automobilismo. Desde 1997 a SAE BRASIL também apoia a realização de eventos regionais do BAJA SAE BRASIL, através de suas Seções Regionais. Desde então dezenas de eventos foram realizados em vários estados do país como Rio Grande do Sul, São Paulo, Minas Gerais e Bahia.

A análise teórica e experimental é importante para constatar o que é esperado na teoria, ou seja, o ganho de potência e a redução do consumo. A revisão dos atributos essenciais e da definição dos conceitos ocorre por meio de análise conceitual, processo que incorpora um exame completo dos elementos básicos que compõem um pensamento, ideia ou noção. Essa análise deve ser empreendida quando um conceito, já introduzido, definido e clarificado na literatura de uma disciplina específica, necessita de estudo adicional para movê-lo ao próximo nível de desenvolvimento, de modo a torná-lo aplicável eficazmente na pesquisa e na prática dessa disciplina, ampliando seu entendimento entre aqueles que o utilizam (FERNANDES, 2011).

Diante do contexto, surge a seguinte problemática:

**Qual a influência do uso de hidrogênio como aditivo na redução do consumo de um motor usado no veículo BAJA?**

## **1.2. Justificativa**

O trabalho proposto é justificado pelo potencial de energia do hidrogênio e as resultantes de redução de poluentes, redução do consumo de combustível líquido. Outro fator é a constante preocupação com as fontes renováveis de energia. Atualmente a base para os combustíveis se originam de fontes fósseis que geram grandes porcentagens de poluentes e não são renováveis, assim o hidrogênio vem sendo estudado por emitir menores concentrações de poluentes e possuir um maior poder calorífico comparado aos hidrocarbonetos.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Geral**

Analisar o desempenho de um motor de combustão interna de um veículo BAJA de 10 HP utilizando misturas de gasolina e hidrogênio como aditivo, visando a redução de consumo do combustível fóssil.

### **1.3.2. Específicos**

- Realizar revisão bibliográfica a respeito de motor de combustão interna, veículo BAJA, hidrogênio, entre outros;
- Realizar estudo teórico, através de simulação computacional, do motor operando com gasolina como combustível com e sem a adição de hidrogênio descrevendo a metodologia adotada, apontar as variáveis e os indicadores do estudo e apresentar a instrumentação de coleta e tabulação dos dados obtidos;

- Realizar experimentação da influência da adição de hidrogênio no motor e coletar dados.
- Recomendar trabalhos futuros.

#### **1.4. Estrutura do Trabalho**

A divisão deste trabalho ocorrerá em cinco capítulos seguindo as normas ABNT de trabalhos científicos focado na área da Engenharia, com a seguinte estrutura:

No primeiro capítulo será apresentada a formulação do problema, a justificativa para a realização do trabalho e os objetivos gerais e específicos.

O segundo capítulo trata da fundamentação teórica dos conceitos e teorias a respeito dos motores a combustão interna, da análise de desempenho de um motor de combustão interna e da utilização de hidrogênio como aditivo e combustível. Também são relatados a redução de consumo e o aumento de potência do motor.

O terceiro capítulo apresenta o processo metodológico adotado na pesquisa, bem como as ferramentas utilizadas para a coleta de dados que são partes essenciais na obtenção dos resultados.

No quarto capítulo são relatadas as discussões e resultados encontrados na simulação e nos testes com o motor de combustão do veículo BAJA

O quinto capítulo encerra o trabalho com as conclusões e recomendações para trabalhos futuros.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentado todo o embasamento teórico utilizado para a efetivação deste trabalho.

### 2.1. Energia

A concepção física do conceito de energia está associada ao modelo conceitual incorporado a comunidade científica e tal conceito não é estático, ele evolui, passando por reelaborações contextualizadas historicamente.

No caso do ensino do conceito de energia esta abordagem assume um certo “reducionismo conceitual” ao apresentá-lo como uma ideia abstrata, inventada pelos cientistas para que lhes ajudasse na investigação quantitativa dos fenômenos (HIERREZUELO; MOLINA, 1990, p.23).

As mudanças pelas quais passa um determinado sistema estão diretamente relacionadas com as interações que envolvem o mesmo, nestas mudanças manifesta-se uma propriedade comum a qualquer tipo de sistema denominada energia. As interações se referem às forças fundamentais da natureza gravitacional, eletromagnética, forte e fraca. A energia de modo geral se refere à configuração (parte potencial) e à movimentação (parte cinética) de qualquer sistema, tanto do ponto de vista macroscópico, quanto microscópico. Esta configuração e movimentação serão alteradas durante as mudanças. Assim, as transferências ou transformações promovidas pelas interações (forças) podem ser analisadas observando-se as modificações ocorridas na energia (configuração-movimentação) dos sistemas.

O conceito de energia admite quatro formas básicas: a cinética, a potencial, a da massa (energia de repouso) e a dos campos gravitacional e eletromagnético (SOLBES; TARÍN, 1998, p.391); apesar de que talvez as duas últimas possam ser incorporadas pelas duas primeiras. Termos como: energia química, energia elétrica, energia mecânica, etc., não devem ser entendidos como novas formas de energia, mas sim como manifestações das formas básicas em diferentes sistemas. Havendo, inclusive, a possibilidade de conversão entre estes diferentes tipos de manifestação da energia, conforme a possibilidade de interação entre as diferentes configurações-movimentações possíveis de serem assumidas pelos sistemas.

Quando não se deixa claro este caráter sistêmico e relativo da energia, acaba-se por dar oportunidade ao desenvolvimento de concepções sobre a energia que a associam a um corpo isolado. Por trás de tudo isto está a ideia equivocada de se querer interpretar as medidas de energia como se fossem valores absolutos, sem ter claro que só podemos medir a energia quando ocorre alguma variação em seu valor, justamente devido à ocorrência de algum processo de transformação ou transferência (FARIAS, 2011).

Considerando que para a transferência de energia será necessária que algo seja uma onda, uma partícula ou um sistema de partículas, e que esta transferência será denominada de trabalho - se envolver interações macroscópicas - ou de calor - se envolver interações microscópicas (incluindo aqui a radiação eletromagnética como uma forma de calor). Sabemos também que a energia é uma “função de estado”, e o calor e o trabalho são “processos” que envolvem mudanças de estado. Sabe-se ainda que enquanto a energia se conserva, o calor e o trabalho não se conservam (MICHINEL; D’ALESSANDRO, 1994, p.373). Assim, após uma primeira aproximação do conceito de energia, é preciso que o mesmo seja diferenciado e integrado com os conceitos de trabalho e calor.

As pesquisas sobre concepções alternativas (HIERREZUELO; MONTERO, 1988; DRIVER; WARRINGTON, 1985) mostram que tendem a associar o conceito de trabalho à ideia de esforço físico, com uma clara influência da linguagem cotidiana. Sugere-se, portanto, buscar uma diferenciação entre esta linguagem cotidiana e a científica.

E geralmente antes do conceito de energia, parece não favorecer esta diferenciação. Autores como Doménech (2003) sugerem que se utilize também para o conceito de trabalho uma definição mais qualitativa do tipo: “trabalho corresponde ao ato de transformar a matéria aplicando forças”, esclarecendo seu caráter de processo de transferência de energia e não o limitando apenas às situações específicas da mecânica.

O grau de desenvolvimento das civilizações sempre esteve associado ao uso da energia. Desde as primeiras descobertas revolucionárias como o controle do fogo, produção de ferramentas agricultura e a pecuária, armazenando energia excedente dos animais e alimentos. (FONSECA, 1972; HÉMERY; BEBIER; DELÉAGE, 1993).

A partir de então, cada vez mais, pode dedicar-se a outras atividades para potencializar seu trabalho (TESSMER, 2002). O crescimento industrial começou a partir da utilização do

carvão e logo a descoberta do petróleo. Com a evolução da tecnologia várias fontes de energia foram sendo catalogadas e usadas em diversas áreas. No século XX o petróleo intensificou os processos de industrialização e de desenvolvimento econômico, fazendo com que aumentasse a eficiência energética dos processos de conversão de energia, porém a geração termelétrica foi priorizada em muitos países, provinda da energia do carvão e da energia nuclear. Amaral (2010) destaca que, com o início da Revolução Industrial, se iniciou a era dos combustíveis de origem fóssil. O carvão mineral foi o primeiro desses combustíveis utilizado em grande escala, ao substituir a lenha e ser usado na combustão direta para a produção de vapor nas máquinas de Watt. Formado por troncos, raízes, galhos e folhas de árvores gigantes que cresceram há mais de 250 milhões de anos em pântanos rasos, essas partes vegetais, após morrerem, depositaram-se no fundo lodoso e ficaram encobertas. As condições de pressão da terra e o tempo transformaram o material acumulado em uma massa negra homogênea, as jazidas de carvão. Até 1961, o carvão era a principal fonte primária de energia no mundo, quando foi ultrapassado pelo petróleo.

O ano de 1859 é considerado o marco zero da industrialização do petróleo, quando Edwin Drake descobriu petróleo a uma profundidade de 21 metros em Tutsville, nos EUA. Até então, o petróleo aproveitado era o que aflorava na superfície, o que era possível devido a sua característica de constante movimentação no subsolo, no caso de não encontrar formações rochosas. O petróleo é outro combustível fóssil, de provável origem de restos de vida aquática animal acumulados no fundo de oceanos primitivos e cobertos por sedimentos. A explosão do mercado automotivo com o surgimento do modelo Ford-T em 1908 fez com que, já em 1911, a venda de gasolina ultrapassasse a de querosene. O surgimento da indústria petroquímica em 1930 deu origem a vários outros subprodutos para produção de equipamentos, objetos, produtos, entre outros, tendo a gasolina como principal produto. Nas refinarias, são produzidos os seguintes derivados: gás liquefeito, gasolinas, naftas, óleo diesel, querosenes, óleos combustíveis, asfaltos, lubrificantes, solventes, parafinas, coque de petróleo e resíduos (AMARAL, 2010).

Por meio de um ciclo combinado o gás natural passou também a ser largamente utilizado para a geração de energia elétrica. Apesar de existirem várias fontes de energia, o mundo ainda é altamente dependente do petróleo onde os combustíveis fósseis são os mais consumidos, conforme mostrado na Figura 1.



A disponibilidade de recursos energéticos e o domínio tecnológico são fatores que determinam a utilização de cada fonte energética.

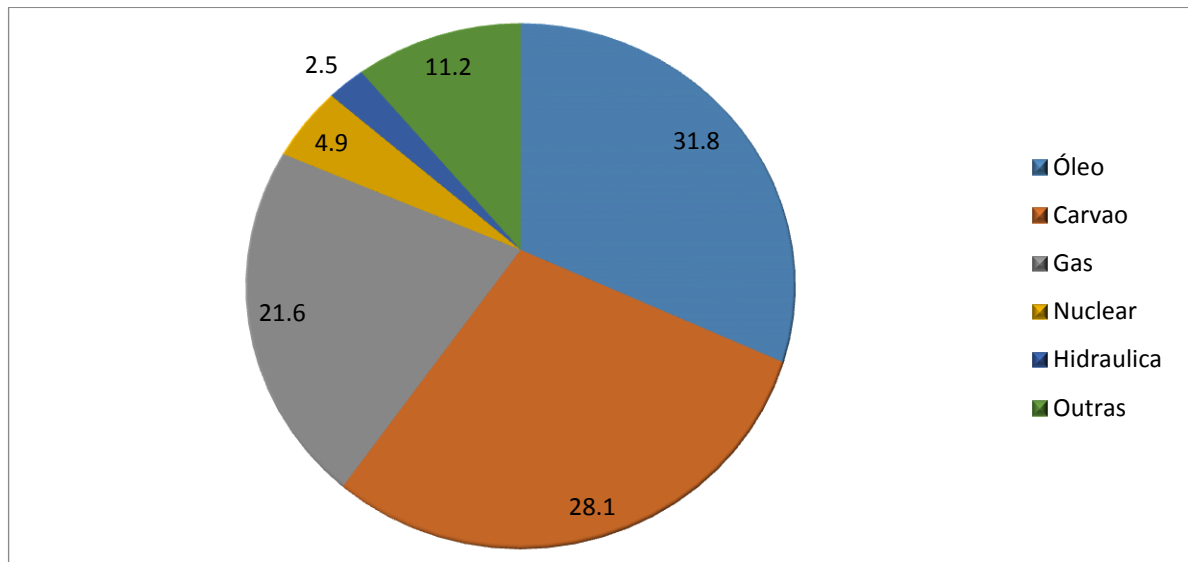


Figura 1: Matriz energética do mundo no ano de 2015

Fonte Energia no Mundo - Matrizes e Indicadores 2017- Ministério de Minas e Energia

Não se pode imaginar um país em desenvolvimento sem acesso adequado à energia. Em sua maioria são fontes não renováveis como visto no gráfico anteriormente apresentado. Mesmo com o crescimento econômico dos países a utilização de fontes renováveis tem um percentual bem menor que as já utilizadas, no Brasil a utilização de fontes renováveis no ano de 1970 era superior aos dias atuais devido a predominância da lenha. Hoje em dia com formas mais eficientes porém não renováveis essa porcentagem diminuiu consideravelmente como mostrado na Tabela 1.

Tabela 1: Oferta de energia no mundo em 2015

<b>Tipo</b>	<b>Brasil</b>	<b>OECD</b>	<b>Mundo</b>
Óleo (%)	39,7	36,1	31,8
Carvão (%)	5,9	17,9	28,1
Gás (%)	11,8	26,1	21,6
Nuclear (%)	1,3	9,8	4,9
Hidráulica (%)	11,4	2,3	2,5
Outras (%)	29,9	7,8	11,2
<b><i>Taxas (%) a.a.</i></b>	<b><i>3,12</i></b>	<b><i>0,81</i></b>	<b><i>1,93</i></b>

Fonte: Ministério de Minas e Energia, 2018.

Com base no Ministério de Minas e Energia (2018), o mundo consumiu cerca de 96,6 Mbbl/d (milhões de barris de petróleo por dia), com um crescimento decenal de 12,6 % no ano de 2016 comparado ao ano anterior. Mesmo com tal crescimento, o comparativo ao longo de 42 anos.

Percebe-se que o consumo de óleo foi reduzido consideravelmente, sendo que as outras fontes de energia obtiveram um grande aumento ao longo desse período, oferta de Energia no mundo comparada ao Brasil e a Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OECD).

## **2.2. Histórico do Motor de combustão interna de quatro tempos**

Motor é um equipamento que transforma algumas formas de energia em energia mecânica para realizar trabalho. O motor de combustão interna realiza este processo através de ciclos que envolvem expansão, compressão e mudança de temperaturas de gases. Neste equipamento o combustível é queimado no interior do motor e seguem o princípio de que os gases se expandem quando há elevação de sua temperatura. Segundo o relatório de projeto da Faculdade de Engenharia de Porto (2014), descreve-se resumidamente uma ordem cronológica da criação dos motores de combustão interna a seguir.

No século XVII, ainda antes de ter aparecido a máquina a vapor, o físico holandês Christian Huygens construiu o primeiro modelo daquilo que seriam os motores de combustão interna. Ele construiu um motor em que a explosão de pólvora dentro de um cilindro fazia levantar um pistão, que ao voltar à sua posição inicial conseguia levantar um peso devido à pressão atmosférica. Também Sir Samuel Morland usou o mesmo combustível para movimentar bombas de água.

Em 1859, Jean Joseph Étienne Lenoir construiu um motor de dupla ação onde a combustão acontecia de ambos os lados do pistão. O processo de funcionamento era o seguinte: através das válvulas de admissão eram introduzidos gás e ar durante a primeira metade do movimento do pistão, esta carga era queimada mediante uma faísca, e com o aumento da pressão os gases queimados empurravam o pistão até ao fim do primeiro movimento. Depois, no segundo movimento, os gases eram expelidos pelas válvulas de exaustão, enquanto do outro lado do pistão ocorria uma nova combustão. Foram então construídos 5000 destes motores com uma potência de cerca de 6 cavalos, e em que o melhor valor de eficiência obtido foi perto de 5%.

Em 1862, Beau de Rochas patenteou o princípio de um motor a 4 tempos, sem, no entanto, o desenvolver comercialmente. Ele concluiu que era obtido um melhor desempenho do motor segundo as condições: “menor relação superfície/volume para o cilindro do pistão, processo de expansão o mais rápido possível, máxima expansão possível e máxima pressão possível no começo do processo de expansão dos gases dentro do cilindro”. Estas condições visavam reduzir as perdas de calor conservando a energia nos gases de combustão e obter o máximo de potência possível. Ele indicou também a sequência de movimentos desejável para um motor, sequência essa utilizada até hoje.

Já em 1867, Nicolaus Otto fez a primeira realização prática do motor a 4 tempos com a ajuda de Eugen Langen. Otto construiu um motor baseado no conceito de “pistão livre” que tinha uma eficiência de 11% e foram construídos cerca de dez mil modelos do mesmo tipo, pois ele foi muito popular no seu tempo. Em 1876, Nicolaus Otto, usando o princípio patenteado por Beau de Rochas, produziu com sucesso o primeiro motor a 4 tempos a utilizar gasolina (um 1º tempo de admissão, 2º de compressão da mistura, 3º de Combustão e um 4º tempo para a Exaustão). Apesar de este motor apresentar uma eficiência próxima da do

anterior, foi a “enorme redução em tamanho, peso e volume e o seu potencial para evolução no futuro” que explica o seu sucesso, tendo marcado a história da humanidade.

Em 1883, Gottlieb Daimler e Wilhelm Maybach revolucionaram a indústria automóvel com a criação do seu motor monocilíndrico de quatro tempos, que comparado com os motores na época existentes, atingia uma velocidade muito superior e tinha muita maior potência comparando-o com os do mesmo peso. Este motor atingia 600 rotações por minuto e o de Otto atingia apenas 130 rotações por minuto.

Em 1879, Karl Benz dedicando-se aos motores de combustão interna a 2 tempos, “em que os processos de exaustão e admissão ocorriam no fim da combustão e no início da compressão”, conseguiu um funcionamento satisfatório destes motores.

Em 1886, Benz desenvolveu um motor com uma potência de cerca de  $\frac{3}{4}$  cavalos e que andava a uma velocidade de 15 km/h. Este motor, que era refrigerado a água e estava ligado por uma correia à transmissão e ao diferencial, foi utilizado num automóvel com 3 rodas de bicicleta, automóvel esse a qual foi atribuído o estatuto de primeiro automóvel do mundo.

Em 1892, Rudolf Diesel desenvolveu um motor que é até hoje utilizado nos transportes públicos, de cargas e marítimos. Este tipo de motor apresentou um rendimento nunca antes obtido em motores de combustão interna, porque funciona através de autoignição, isto é, era iniciada a combustão através da injeção de um combustível líquido para o ar, que aquecido apenas pela compressão, inflamava por si mesmo, o que permitia aumentar a eficiência para o dobro.

Em 1893, Diesel aumentou ainda mais a eficiência, com o ciclo a pressão constante. A eficiência elevou-se de 16% para 26.2% e nasceu assim o motor de ciclo diesel. Desde então, que vários foram os que apareceram com novas invenções, contribuindo para o aumento da indústria dos motores de combustão interna e da indústria automóvel um exemplo é o motor Wankel.

### 2.3. Motores do Ciclo Otto de Quatro Tempos

Tais motores utilizam a energia da centelha elétrica da vela de ignição para dar início à reação da combustão. Segundo VARELLA (2010), nos motores de quatro tempos é admitida a mistura de ar e combustível e nos motores de dois tempos é admitida a mistura de ar, combustível e óleo lubrificante. Nos motores de dois tempos no primeiro curso são realizadas as fases de admissão e compressão e no segundo curso as fases de expansão e descarga. Nos motores de quatro tempos cada fase do ciclo é realizada em um curso. Um motor de 4 tempos (conforme mostra a Figura 2) possui quatro fases de funcionamento, descritas a seguir.

**1º tempo:** Nesta fase, chamada Admissão o pistão movimenta-se do ponto morto superior (PMS) ao ponto morto inferior (PMI) provocando uma depressão no interior do cilindro, com a válvula de admissão aberta ocorre a mistura de ar/combustível em seu interior.

**2º tempo:** Fase conhecida como compressão, ocorre a subida do pistão para o ponto morto superior comprimindo a mistura ar/combustível admitidos na câmara de combustão. Essa compressão vai elevar a turbulência e a temperatura da mistura.

**3º tempo:** A expansão ou combustão, fase em que ocorre com a geração de uma faísca originada dos eletrodos da vela, realizando a queima dos gases. Assim, uma pressão muito elevada provoca a descida do pistão ao ponto morto inferior gerando trabalho.

**4º tempo:** Escape ou exaustão, a válvula de escape se abre no final do ciclo expelindo os gases queimados, o movimento do pistão limpa o interior da câmara e assim que ele chega no ponto morto superior reinicia-se o ciclo.

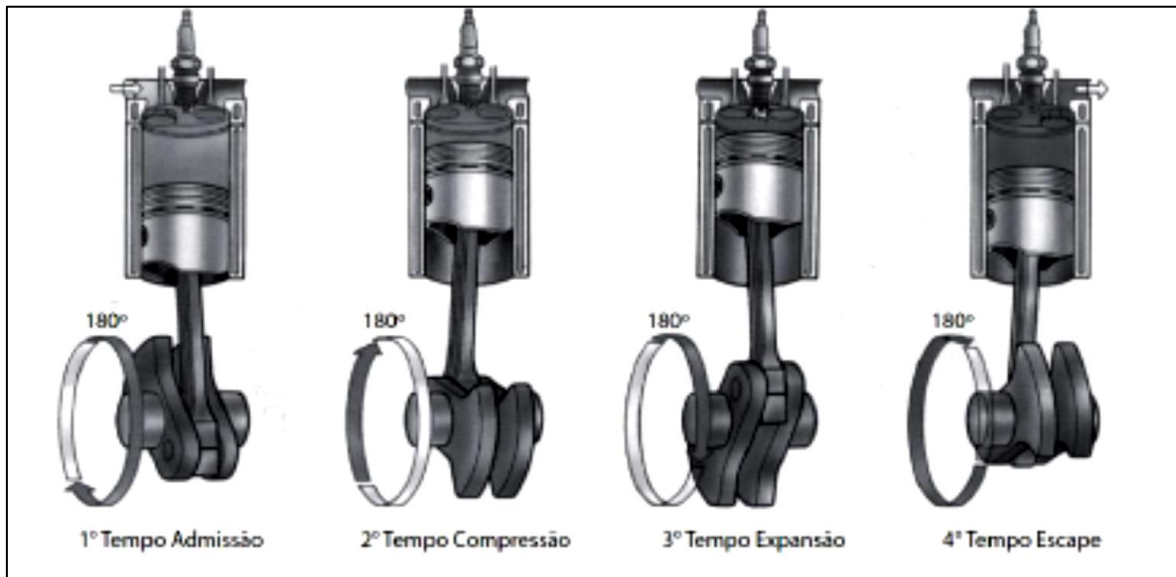


Figura 2: Os quatro tempos para o ciclo Otto

Fonte: Brunetti, 2012.

## 2.4. Motores do Ciclo Otto de Dois Tempos

Estes motores recebem essa denominação porque realizam o ciclo de funcionamento em dois cursos do pistão. A lubrificação do motor é feita através da mistura de óleo lubrificante no combustível. Não possuem sistema de válvulas, sendo a admissão feita em duas etapas: primeiro no cárter e depois no cilindro. Apresentam 4 fases assim como nos motores 4 tempos, porém a fase de admissão ocorre durante a fase de compressão e a fase de escape ocorre durante a fase de expansão. A Figura 3 mostra as principais partes de um motor Otto de dois tempos. Já a Figura 4 mostra o ciclo de funcionamento desse motor.

**1º tempo:** O pistão se desloca do ponto morto superior (PMS) para o ponto morto inferior (PMI). No primeiro curso ocorre a compressão e a admissão (Figura 4a).

**2º tempo:** O pistão se desloca do ponto morto inferior (PMI) para o ponto morto superior (PMS). Neste curso ocorre a expansão, a admissão da mistura no cilindro e a descarga dos resíduos da combustão (Figura 4b).

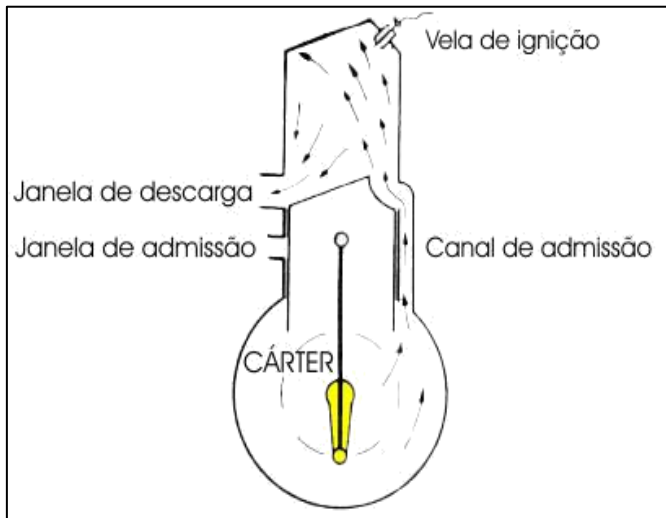


Figura 3: Principais partes dos motores do ciclo Otto de dois tempos

Fonte: Princípio de Funcionamento dos Motores de Combustão Interna. UFRRJ Varela, 2010.

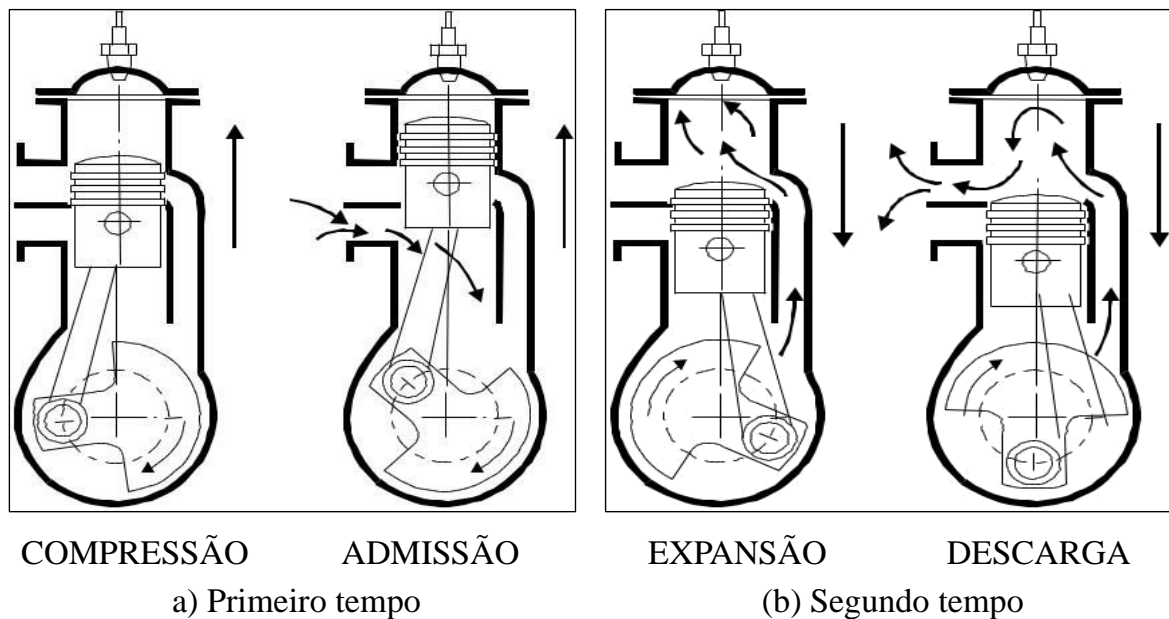


Figura 4: Funcionamento de um motor Otto de dois tempos: (a) primeiro tempo e (b) segundo tempo

Fonte: Varela, 2010

Assim são definidos tais ciclos termodinâmicos, onde estas séries de processos se deslocam de um estado inicial e retornam ao seu estado original tendo como elementos fundamentais as fontes de calor, substâncias de trabalho e máquinas térmicas.

O ciclo de Carnot idealizado por Nicholas Carnot em 1823 tinha como ideal que uma máquina térmica atingiria 72% de rendimento, apesar de ser fisicamente impossível devido às perdas térmicas. Assim ele é teoricamente descrito em fases: a) Admissão isobárica; b) Compressão Adiabática; c) Expansão Adiabática d) Exaustão isobárica.

## 2.5. Análise teórica de motores de combustão

De forma objetiva tem-se as seguintes equações para o cálculo estequiométrico para um motor de ciclo Otto ideal. A equação do gás perfeito é dada por (BRUNETTI, 2012):

$$Pv = RT \quad (1)$$

Segunda Lei da Termodinâmica para o processo de compressão (1-2), adota-se (BRUNETTI, 2012):

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_1}{P_2}\right)^{k-1} \quad (2)$$

Para o cálculo da pressão no estado 2 (BRUNETTI, 2012):

$$\frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^k \quad (3)$$

O volume específico é (BRUNETTI, 2012):

$$v_2 = v_1/RC \quad (4)$$

Primeira Lei da termodinâmica aplicada ao processo de fornecimento de calor (2-3) (BRUNETTI, 2012):

$$q_H = u_3 - u_2 = C_v(T_3 - T_2) \quad (5)$$

Processo a volume constante (2-3), tem-se (BRUNETTI, 2012):

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{P_3}{P_2} \quad (6)$$

Segunda Lei da termodinâmica para processo de expansão (3-4) (BRUNETTI, 2012):



$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^{k-1} \quad (7)$$

$$\frac{P_3}{P_4} = \left(\frac{V_4}{V_3}\right)^k \quad (8)$$

A eficiência teórica térmica do motor será (BRUNETTI, 2012):

$$N_{th} = 1 - 1/RC^{k-1} \quad (9)$$

O trabalho no ciclo será (BRUNETTI, 2012):

$$W_{ciclo} = m * C_v * [(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)] \quad (10)$$

$$W_{ciclo} = m * w_{ciclo} \quad (11)$$

A massa de ar será (BRUNETTI, 2012):

$$m = V_1 - V_2 / (v_1 - v_2) \quad (12)$$

A pressão Média do Ciclo será (BRUNETTI, 2012):

$$pmc = W_{ciclo} / C \quad (13)$$

$$pmc = W_{ciclo} * \frac{n}{X} \quad (14)$$

A potência do ciclo será (BRUNETTI, 2012):

$$N_{ciclo} = W_{ciclo} * \frac{n}{X} \quad (15)$$

## 2.6. BAJA

Trata-se de um projeto de competição onde alunos de diversas engenharias podem trabalhar em equipe, aplicar conhecimentos técnicos e teóricos adquiridos em sala de aula, vivenciar o dia a dia de uma microempresa, lidar com futuros problemas no meio de trabalho,

estimular a convivência, integração e disputa saudável entre os competidores, criar o contato do aluno com profissionais da área automobilística, uma vez que o Comitê Técnico e os Juízes são profissionais da mesma. E também a integração entre componentes de outras equipes da competição BAJA SAE BRASIL.



Figura 5: Competição Nacional BAJA SAE Brasil

Fonte: Pesquisa dieta, 2018.

Na competição os alunos participantes devem formar equipes que representarão a instituição de ensino superior a quais estão matriculados. Estas equipes são colocadas a prova anualmente, em situações que avaliam e comparam os projetos dos veículos apresentados. No Brasil este evento recebe o nome de Competição Baja SAE BRASIL, com etapas regionais e a nacional onde o vencedor da mesma ganha o direito de participar da etapa internacional da prova nos Estados Unidos, a Figura 5 mostra a prova de enduro com duração média de 4 horas na etapa nacional.

## 2.7. Hidrogênio

Segundo Lanz *et al* (2001), o hidrogênio tem um amplo limite de flamabilidade em comparação com todos os outros combustíveis. Como resultado, ele pode ser queimado no motor de combustão interna ao longo de uma ampla gama de misturas de combustível-ar. A grande vantagem disso é que o hidrogênio pode ser utilizado em uma mistura pobre, que é aquela em que a quantidade de combustível é menor do que a quantidade teórica, estequiometricamente ideal para a combustão com uma dada quantidade de ar.

Quando se trata da difusividade do hidrogênio falamos da sua facilidade em se dispersar no ar, o que é vantajoso por duas razões principais: por um lado, facilita a formação de uma mistura uniforme de ar e combustível; em segundo lugar, se houver um vazamento de hidrogênio, ele se dispersará rapidamente. Assim, as condições inseguras podem ser evitadas ou minimizadas (NORTH, 1992).

O átomo de hidrogênio de acordo com Rifkin (2003) foi descoberto em 1776, por Henry Cavendish, através de experimentos onde se realizava a decomposição da água. A partir de então, começaram os estudos sobre este importante elemento. Anos depois, com o avanço da ciência e dos estudos sobre o átomo de hidrogênio, cientistas constataram que ele é o elemento mais simples e abundante do universo, presente em 93% das moléculas.

Na Terra, principalmente devido à sua presença na molécula de água, o hidrogênio aparece em 75% da superfície terrestre, segundo SOUZA (2009). O átomo de hidrogênio é representado quimicamente pela letra H e, como elemento mais simples descoberto, é composto por apenas um próton e um elétron, o que o torna também o mais leve. Com características muito particulares ele não se encaixa em nenhum grupo de elementos, isto porque sua natureza eletropositiva o assemelha à família dos metais alcalinos, porém também se assemelha aos halogêneos, por aceitar apenas um elétron na sua camada de valência. Em 1785 Antoine Lavoisier (1743–1794), deu nome de hidrogênio ao elemento químico e provou que a água é composta desse elemento e de oxigênio. Também observou que quando o era queimado na presença de oxigênio, havia a formação de orvalho. Como o hidrogênio necessita apenas de um elétron a mais para alcançar seu nível estável ele pode ser encontrado na forma de hidrogênio molecular ( $H_2$ ), que nada mais é que dois átomos ligados, que partilham seus únicos elétrons em uma ligação denominada covalente. Essa molécula, que à temperatura ambiente se encontra em forma de gás, possui uma quantidade de energia por

unidade de massa superior a qualquer outro combustível conhecido, com 120,7 kJ/g, possui também a maior quantidade de energia por unidade de peso, 141,9 kJ/g, ou seja, aproximadamente 2,5 vezes mais do que a mesma quantidade de gasolina (SANTOS, 2005). A Tabela 2 mostra informações sobre o hidrogênio.

Tabela 2: Informações do hidrogênio.

Símbolo químico	H	
Cor	Incolor	
Estado físico a temperatura e pressão ambiente	Gás	
Temperatura de autoignição	584°C	
Poder calorífico Inferior (Hidrogênio Líquido)	3kWh/Nm <sup>3</sup>	10.8 MJ/Nm <sup>3</sup>
	2.359 kWh/l	8.945 MJ/l
	33 kWh/kg	1220 MJ/kg
Poder calorífico Superior (Hidrogênio Líquido)	3.54kWh/Nm <sup>3</sup>	12.75 MJ/Nm <sup>3</sup>
	2.790 kWh/l	10.04 MJ/l
	39.41kWh/kg	141.86 MJ/kg
Poder calorífico Superior	142000 J/g	
Massa específica (0°C e 1 atm)	0.0899 kg/m <sup>3</sup>	70.79 kg/m <sup>3</sup> (H <sub>2</sub> líquido)
Ponto de Ebulição	-252.8°C (na pressão de 1 atm)	
Limite de flamabilidade no ar	Inflamável entre as concentrações de 4% a 75% de H <sub>2</sub> por vol.	
Coeficiente de difusão	0.61 cm <sup>2</sup> /s	
<p>A energia contida em 1 m<sup>3</sup>de H<sub>2</sub> equivale a 0.34 litros de gasolina</p> <p>A energia contida em 1 litro de hidrogênio líquido equivale a 0.26 litros de gasolina</p> <p>A energia contida em 1 kg de H<sub>2</sub> equivale a 2.75 kg de gasolina (baseado em valor calorífico)</p> <p>Massa atômica do H<sub>2</sub> = 1.00784 uma = 1.00784 mol</p>		

Fonte: Gomes Neto, 2005.

Segundo Angheben (2013), com dados de Souza (2009) e Saravanan (2010) as propriedades físicas do hidrogênio quando comparada com outros combustíveis utilizados nos dias de hoje, podem ser encontradas na Tabela 3.

Tabela 3: Propriedades físicas do hidrogênio e outros combustíveis.

Propriedades	H <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	Gasolina
Temperatura de autoignição (°C)	585	540	237
Temperatura de chama (°C)	2.045	1.875	2.2
Limite de flamabilidade do ar (%v.)	4.0-75	5.3-15	1.0-7.6
Velocidade de propagação da chama no ar (m/s)	2.65	0.4	0.4
Coeficiente de difusão no ar (cm <sup>2</sup> /s)	0.61	0.6	0.05
Toxicidade	Não	Não	Sim

Fonte: Agheben, 2013.

É possível perceber, através dos dados da Tabela 3, que o hidrogênio, possui uma velocidade de propagação de chama no ar muito maior do que o dos demais combustíveis. Essa propriedade permite, por exemplo, que a combustão de uma mistura ar-gasolina hidrogênio seja mais rápida e eficiente, uma vez que o tempo de combustão será reduzido. Outro fator importante é a temperatura de autoignição que, apesar de maior, contribui para o controle da combustão da gasolina, algo procurado séculos atrás a fim de melhorar o desempenho do motor de combustão interna.

Segundo Estevão (2008), o gás hidrogênio, por ser o menor dos elementos conhecidos até hoje apresenta como grande barreira o seu armazenamento de forma segura. O átomo pode ser armazenado de duas formas, a primeira é em estado líquido arrefecido até -253°C e a segunda em forma do próprio gás, que deve ser pressurizado para que se consiga uma quantidade razoável armazenada, do mesmo jeito, deve-se redobrar o cuidado, uma vez que o tamanho do átomo é muito pequeno e o seu armazenamento requer muitos cuidados.

A utilização do hidrogênio como combustível ainda está muito longe de se tornar um grande sucesso, pois segundo Martins (2002) a mistura ar-hidrogênio não apresenta um poder calorífico tão elevado quando comparado com os demais combustíveis fósseis. Porém,

segundo Estevão (2008) engenheiros defendem o uso do hidrogênio como aditivo para diversos combustíveis, principalmente para a gasolina. A adição de pequenas quantidades de hidrogênio à gasolina, aumenta a velocidade da chama em todas as relações equivalente da gasolina, tornando possível o motor trabalhar com uma mistura menor de ar/gasolina.

Ainda segundo Estevão (2008) o conceito de utilização de hidrogênio associado à gasolina tem tido mais importância do que a utilização do hidrogênio puro, pois implica em modificações menores nos motores atuais, além de permitir a redução da emissão de poluentes e melhorias na eficiência térmica.

O átomo de hidrogênio é quimicamente muito ativo e raramente é encontrado sem nenhuma ligação, isto é, apenas como átomo (H) ou molécula (H<sub>2</sub>), estando, na maioria das vezes, associado a combustíveis fósseis e, principalmente, a água, presente em todos os organismos vivos. Assim, para trabalhar apenas com o gás se faz necessária a separação dos átomos dos outros elementos.

Existem, atualmente, diversos processos de separação do hidrogênio dos demais átomos que diferem conforme o ambiente de trabalho. No laboratório: reação de hidretos metálicos, reação de liga de ferro-titânio, cloroplastos artificiais, reação de liga de níquel-magnésio, reações de metais com ácidos.

Na indústria: eletrólise da água, decomposição da amônia, decomposição do metanol, reações de carvão ou hidrocarbonetos com vapor de água em alta temperatura. O hidrogênio pode ser assim obtido através de inúmeros processos, no entanto, aquele que apresenta menor relação custo benefício é a reação de reforma do metano (SMR), onde se retira o hidrogênio o gás natural, encontrado com certa abundância na natureza. Porém, apesar dos benefícios desse processo e de sua eficiência já comprovada, na atualidade, o processo de eletrólise da água vem sendo muito empregado.

O hidrogênio tem sido cada vez mais visto como uma possibilidade energética, devido ao seu baixo impacto ambiental e seu alto valor energético. O fato de poder ser armazenado e consumido quando necessário, além de poder ser convertido na fonte primária original (eletricidade, por exemplo), ou em outra forma de energia, faz do hidrogênio “um excelente vetor energético, servindo de elo e de conversão entre diferentes fontes e formas de energia” (SILVA, 1991).

O hidrogênio, apesar de conhecido desde o século XVI, só a partir do desenvolvimento do processo de síntese da amônia em 1913 e da I Guerra Mundial, passou a apresentar um interesse industrial, sendo produzido em maior quantidade. Entretanto, apenas a partir da II Guerra Mundial através da redução dos custos devido ao desenvolvimento tecnológico e aos baixos preços do gás natural é que passou a ser produzido em longa escala. As tecnologias modernas de geração do hidrogênio são ainda mais recentes, datando dos anos 60, a partir dos programas espaciais (SILVA 1991). Atualmente, um grande número de pesquisadores e recursos é envolvido em estudos com o hidrogênio, promovendo avanços em sua arte e permitindo-o cada vez mais ser visto como uma “moeda energética” forte para os tempos de hoje e vindouros.

Na Tabela 4 são comparadas as propriedades fundamentais relevantes do hidrogênio e da gasolina referente à combustão interna. Com um índice de octano elevado, o hidrogênio permite taxas de compressão altas. No entanto, o baixo consumo de energia mínima de ignição o leva a dificuldades na prevenção da pré-ignição, o que limita a potência e torque (GNÖRICH, 2008).

Gnörich (2008) aponta que na conversão de um motor do Ciclo Otto para operar com hidrogênio, algumas medidas são necessárias para reduzir o problema da pré-ignição, tais como: melhor refrigeração da câmara de combustão, comando de válvulas para redução de resíduos presos, melhor controle de óleo (para reduzir os depósitos e outras fontes de ignição), temperatura do combustível baixa para injeção (disponível com armazenamento de hidrogênio líquido).

Tabela 4: Propriedades do hidrogênio combustível em comparação com a gasolina

	Unidade	Gasolina	Hidrogênio
Poder Calorífico Inferior	MJ/Kg	44,4	120
Índice de Octanos	RON	95	130
Energia Mínima de Ignição	MJ	0,25	0,02
Temperatura da chama adiabática	K	2270	2384
Velocidade da chama laminar	m/s	0,3	1,9
Relação Ar/combustível (estequiométrico)	---	14,5	34,3
Limites de Flamabilidade (relação ar/combustível)	---	25-4	345-5

Fonte: Gnorich, (2008)

## 2.8. Geração de Hidrogênio

Hidrogênio pode ser produzido a partir de fontes primárias de energia, tais como os combustíveis fósseis (carvão, petróleo, gás natural), a partir de intermediários químicos (tais como os produtos de refinaria, amônia, etanol) e a partir de fontes alternativas de energia tais como a biomassa, biogás e gás de lixo. (PIETROGRANDE; BEZZECCHERI, 1993)

Para obtê-lo é necessário extraí-lo de substâncias onde ele está presente, como a água e os compostos orgânicos. Existem vários processos de extração do hidrogênio e todos eles requerem energia. (TOLMASQUIN, 2003).

A Figura 6 mostra os processos utilizados, de acordo com o Centro Nacional de Referência de Hidrogênio (CENEH), localizado na Universidade de Campinas (UNICAMP).

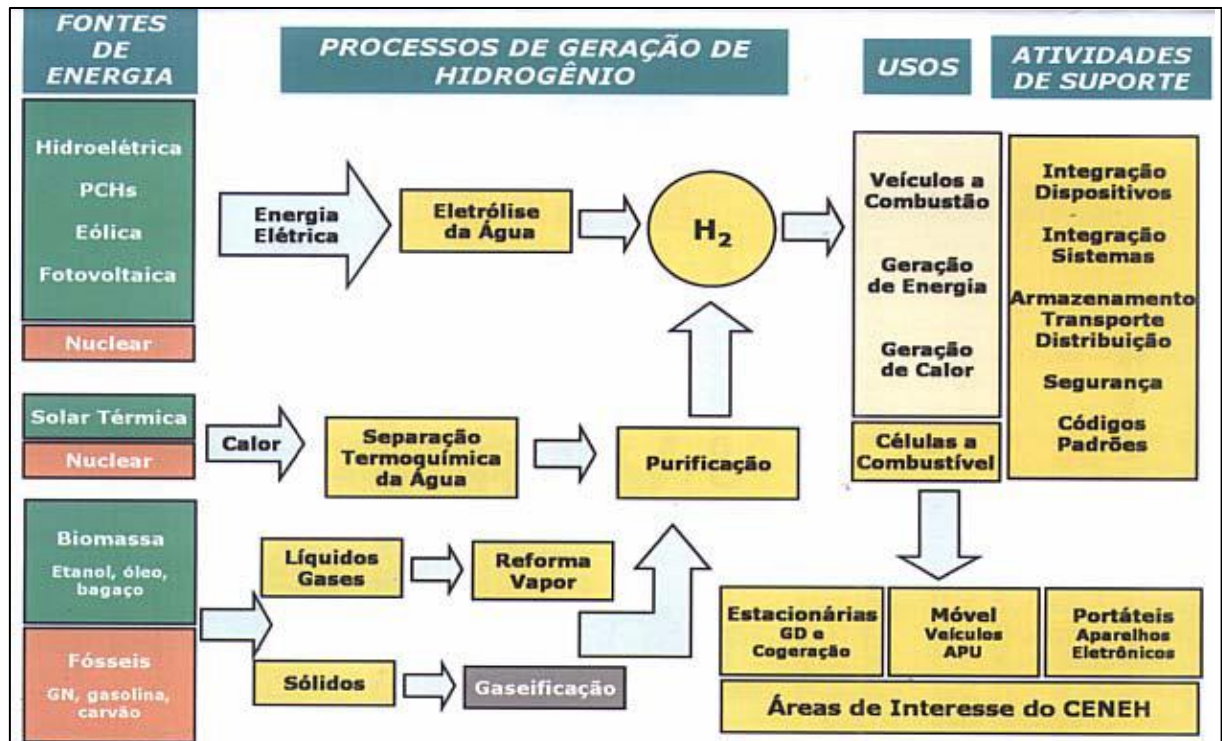


Figura 6: Alternativas de produção do hidrogênio

Fonte: CENEH, 2006



Como dito anteriormente, a produção de  $H_2$  necessita de insumos energéticos razoáveis. Na 1ª coluna da Figura 6, observa-se em *verde* os insumos energéticos renováveis que, de maneira geral, se apresentam como fontes alternativas para os combustíveis fósseis. Atenta-se aqui para a reforma a vapor de combustíveis líquidos ou gasosos provenientes da biomassa, como o etanol e o biogás. Devido a grande capacidade de biomassa no Brasil e a considerada simplicidade no método de reforma a vapor, tais processos são vistos com grande consideração. Em *laranja* estão explicitados os insumos não renováveis. Percebe-se em acordos internacionais de cooperação científica e em Congressos Internacionais que as companhias energéticas baseadas em combustíveis fósseis sugerem fortemente a produção de hidrogênio proveniente de insumos fósseis, alegando maior conhecimento e segurança da tecnologia.

Por não ter átomos de carbono ele se torna o elemento mais leve da tabela periódica e com a maior energia por unidade de peso comparado a qualquer outro combustível, assim sua energia de explosão é aproximadamente 2,5 vezes maior que a dos hidrocarbonetos normais, ou seja, para a mesma massa ele é mais destrutivo e rápido. O hidrogênio normalmente existe combinado com outros elementos, como o oxigênio na água, o carbono no cloro, e na maioria dos compostos orgânicos.

Como é quimicamente muito ativo, raramente permanece sozinho como um único elemento  $H_2$ , estando associado ao petróleo, carvão, metano, água, gás natural, proteínas, hidratos de carbono e também em todo o tipo de vegetação.

Estas razões conduzem a uma necessidade de separação dos átomos de hidrogênio dos restantes elementos aos quais se encontra associado. O hidrogênio tem propriedades que o afirmam como um combustível poderoso, e cabe analisar se a energia usada para o separar é compensatória para a que ele nos fornece. Na Figura 7 está indicado o ciclo de vida do Hidrogênio.

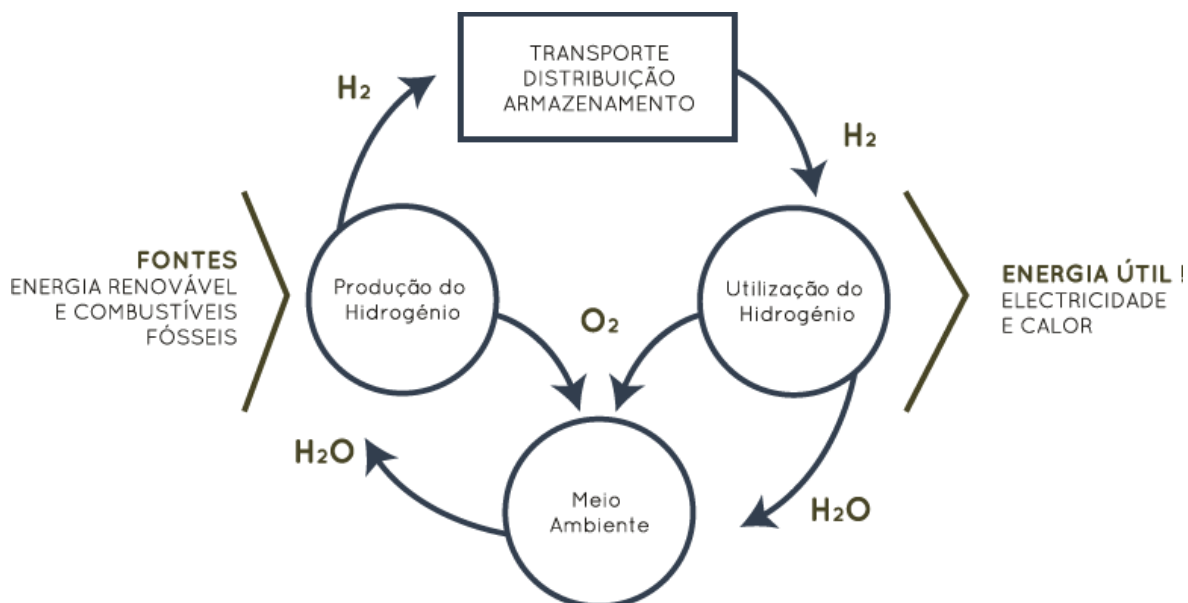


Figura 7: Fluxograma do Ciclo de Vida do Hidrogênio.

Fonte: Adaptado de Estevão, 2008.

Para a separação do hidrogênio estão disponíveis diversos processos; em laboratório é obtido pela reação de ácidos com metais:

- Reação de hidretos metálicos
- Reação de liga de ferro - titânio
- Cloroplastos artificiais (Melvin Klain)
- Reação de liga de níquel - magnésio
- Reações de metais com ácidos industrialmente é obtido pela eletrólise:
- Eletrólise da água
- Decomposição da amônia
- Decomposição do metanol
- Reações de carvão ou hidrocarbonetos com vapor de água a alta temperatura.

## 2.9. Eletrólise

Por meio da eletrólise, pode-se gerar energia em horários de ponta ou servir de combustível para automóveis, tanto utilizando o hidrogênio em células a combustível, como em motores a combustão interna, misturando-o com os combustíveis tradicionais, aumentando assim sua eficiência e economia (GOMES NETO, 2005).

O processo de eletrólise da água consiste na decomposição química da água em seus elementos constituintes, hidrogênio e oxigênio, com a utilização de eletricidade. Quando uma corrente elétrica atravessa a água, a ligação entre os elementos se rompe gerando dois átomos de hidrogênio carregados positivamente, e um átomo de oxigênio carregado negativamente (MARQUES *et al*, 2004).

Segundo Estevão (2008), a eletrólise é um processo eletroquímico em que os íons de um eletrólito de carga elétrica positiva e negativa são transportados pela corrente elétrica e transformados em partículas neutras. No caso de se tratar de um composto dissolvido, este sofre uma decomposição mais ou menos completa por ação da água, quando esta se dissocia em íons.

Para efetuar a eletrólise, mergulham-se dois eletrodos, um polo positivo e outro negativo, na solução do eletrólito que permite a passagem da corrente elétrica derivada de uma fonte. Os íons de carga positiva, são então atraídos para o catodo que captam os elétrons e os neutralizam, enquanto os íons negativos deslocam-se para o anodo, onde depositam o excesso de elétrons e também se neutralizam, como pode ser visto na Figura 11. Sendo assim, a eletrólise converte a energia elétrica em energia química para a quebra das moléculas (ESTEVÃO, 2008).

A corrente sai de uma fonte geradora de 9 a 12 V e é conduzida até uma placa metálica imersa em uma solução eletrolítica. Esta mesma corrente é forçada a passar pela solução em direção a uma segunda placa carregada negativamente. Durante a passagem, a corrente, dissocia a solução eletrolítica em moléculas de hidrogênio (H<sub>2</sub>) e oxigênio (O<sub>2</sub>). Esses produtos são então liberados em forma de bolhas e captados conforme a necessidade do sistema, (PASSOS, 2017).

Souza (1998) define que os eletrolisadores são classificados em unipolares ou bipolares (tipo tanque) e bipolares (tipo filtro). Quando os eletrodos possuem uma única polaridade positiva ou negativa passam a ser chamados de unipolar. Assim, cada eletrodo processa uma única reação e, conseqüentemente, produz somente um gás ( $H_2$  para o eletrodo negativo ou  $O_2$  para o eletrodo positivo). Os eletrodos são arranjados em paralelo em um reservatório, onde circula uma corrente elétrica com baixa tensão.

O mesmo autor também diz que os eletrolisadores tipo bipolar são aqueles onde cada eletrodo processa duas reações, sendo de um lado (catodo) o  $H_2$  e o outro lado  $O_2$  (anodo), onde o arranjo elétrico dos eletrodos é feito em série, possuindo baixas correntes e altas tensões.

O gás hidrogênio e oxigênio produzidos pela célula eletrolítica (eletrolisador) são conhecidos como Gás de Brown, gás hidróxi ou gás HHO. A mistura estequiométrica é relacionada com a da água. O gás de Brown foi desenvolvido e patenteado pelo professor Yull Brown em 1977 com a finalidade de demonstrar a possibilidade de produzir aquecimento através do gás proveniente da água (AL-ROUSAN, 2010).

O gás HHO ou gás hidróxi é formado por  $H_2$  e  $O_2$  separados por moléculas distintas em seu estado atômico com um único átomo por molécula gerado pelo processo de eletrólise da água, normalmente com eletrólitos de NaOH, KOH ou aditivos como o NaCl (YILMAZ; ULUDAMAR; AYDIN, 2010), ao qual que neste trabalho foi utilizado o hidróxido de potássio (KOH).

Um eletrolisador do tipo molhado é caracterizado por ter as placas submersas por completo na solução eletrolítica. A distribuição das placas é feita de tal forma a permitir a passagem da corrente e o seu melhor aproveitamento para a eletrólise, isto é, o maior número de placas e área em contato com a solução. Para isso uma entrada de corrente e uma saída, é determinado pelo usuário. Além disso, este tipo de eletrolisador possui um borbulhador, contendo uma esponja metálica para evitar que gotas de água com eletrólito sejam carregadas para o motor (atuação como *demister*) (PASSOS, 2018).

O hidrogênio pode ser armazenado de algumas formas, porém são necessárias precauções. Para ser armazenado no seu estado líquido ele requer grande gasto de energia (cerca de 30 % de sua energia total) pois precisa ser arrefecido em  $-253^\circ\text{C}$ . Para o

armazenamento de cerca de 0,5 kg de hidrogênio são necessários aproximadamente 5 kW/h de energia elétrica. Este elemento também pode ser armazenado no estado gasoso, o qual utiliza menos energia do que no seu estado líquido. Para ser armazenado no estado gasoso o hidrogênio precisa ser pressurizado. Da mesma forma que o gás natural ele pode ser encanado e levado para as residências para usá-lo como combustível de aquecimento.

## **2.10. Impactos Ambientais**

O uso do hidrogênio, como combustível, provoca em geral pouquíssimos impactos ambientais, sendo justamente este o fator que tem promovido os estudos que objetivam uma presença mais significativa deste elemento no consumo de energia de inúmeros países. A queima do hidrogênio junto ao ar provoca praticamente a emissão de  $\text{NO}_2$ . Mesmo assim as quantidades emitidas são inferiores aos teores medidos no caso dos combustíveis tradicionais. No uso em células à combustível, a baixa temperatura a emissão de poluentes é quase nula, resultando significativamente apenas água no processo (TOLMASQUIN, 2003).

Porém, para uma análise ambiental mais profunda do uso do combustível como um todo, devem-se considerar as emissões provocadas na sua geração, armazenamento e transporte, enfim todo seu ciclo de vida.

## **2.11. Redução de Consumo**

De acordo com o artigo publicado pela Ghent University (2013), a velocidade de chama do hidrogênio auxilia na combustão, melhorando a eficiência do processo. A formação da mistura e o tempo de injeção influenciam diretamente a principal fase da combustão.

Para satisfazer à mesma quantidade de energia de um hidrocarboneto são necessárias 2,5 vezes menos massa de hidrogênio, de acordo com Santos (2005). Sem levar em conta que os gases poluentes provenientes da combustão do gás hidrogênio são insignificantes, quando comparados também à queima de hidrocarboneto.

Segundo Leal (2016), na maior parte das aplicações de combustão, o oxidante considerado é o ar atmosférico, cuja composição volumétrica é dada na Tabela 3. Para fins de cálculo, considera-se o ar como tendo 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio.

Assume-se que as frações molares do oxigênio ( $x_{O_2}$ ) e do nitrogênio ( $x_{N_2}$ ) no ar são de 0,21 e 0,79, respectivamente, o que se presume que o ar contém, aproximadamente 3,76 moléculas de nitrogênio para cada molécula de oxigênio. Sendo as massas moleculares de oxigênio e nitrogênio gasosos iguais a 32 e 28 g/gmol, a composição mássica do ar será de 23,2% de oxigênio e 76,8% de nitrogênio.

ESTEVIÃO (2008) cita que em uma publicação da *SAE International*, os engenheiros responsáveis por um estudo do uso do hidrogênio como um aditivo da gasolina, defendiam que, a queima do hidrogênio e da gasolina, juntos, pode ser feita através de uma larga variedade de misturas. A adição de pequenas quantidades de hidrogênio à gasolina, aumenta a velocidade da chama em todas as relações equivalentes da gasolina, tornando possível o motor trabalhar com uma mistura pobre de ar gasolina. Esta necessidade de utilização do hidrogênio nos motores a gasolina aumentou com a crise energética e com fatores como a poluição.

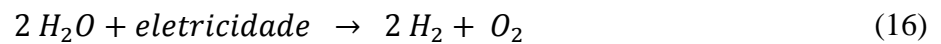
O conceito de utilização de hidrogênio associado à gasolina tem tido mais importância do que a utilização do hidrogênio puro, pois implica modificações menores nos motores. Estas misturas gasolina e hidrogênio permitem boas prestações, reduzem as emissões poluentes e melhoram a eficiência térmica.

Infelizmente, como já foi mencionado o hidrogênio apresenta limitações de armazenamento, e se colocar grandes garrafas de armazenamento num veículo, este perderá qualidades aerodinâmicas pois aumentará o seu peso. Alguns problemas derivam da ausência de sistemas de distribuição. O ideal será, portanto, com uma mistura pobre de ar – gasolina, utilizar o hidrogênio misturado com esta, sem que a performance do veículo diminua.

## 2.12. Análise Experimental

Os procedimentos para análise experimental consistem em adicionar hidrogênio ao motor através de um eletrolisador para geração de hidrogênio a partir da eletrólise da água.

Este método baseia-se na utilização da energia elétrica, para separar os componentes da água (hidrogênio e oxigênio), conforme mostra a equação 16. A corrente elétrica decompõe a molécula da água e os gases são produzidos nos eletrodos ( $H_2$  no catodo e  $O_2$  no anodo). Sendo o rendimento global do processo da ordem dos 95% segundo Santos (2005).



O trabalho experimental consiste também em adicionar o hidrogênio junto a carburação do motor do veículo BAJA, modelo Briggs&Stratton e realizar a manutenção corretiva e aferição para o bom funcionamento do motor.

A análise da influência do hidrogênio durante o ciclo de combustão poderá ser notada através do aumento de rotação para um mesmo estado e a redução do consumo de combustível líquido.

A partir deste trabalho pode se ter base para aplicações em outros motores para diversas utilizações, como por exemplo, geradores de energia, que obteria uma maior eficiência e economia no consumo de combustível.

### **3. METODOLOGIA**

Neste capítulo será mostrado o desenvolvimento da pesquisa sobre a influência do hidrogênio na redução do consumo de gasolina e o aumento de potência no motor a combustão interna. Será apresentada a tabulação de dados coletados, os meios de coleta de tais, o tipo de pesquisa e as variáveis do sistema.

#### **3.1. Tipo de pesquisa**

Segundo o dicionário Aurélio, pesquisar tem o sentido de investigar, com a finalidade de descobrir novos conhecimentos, recolher elementos para o estudo de algo, ou seja, é uma prática teórica constante em qualquer atividade.

Esta pesquisa é classificada como exploratória com base nos objetivos gerais, ou seja, este grupo de pesquisa tem como objetivo proporcionar maior familiaridade com o problema, com vistas a torná-lo mais explícito ou a constituir hipóteses. Pode-se dizer que estas pesquisas têm como objetivo principal o aprimoramento de ideias ou a descoberta de intuições. Seu planejamento é muito flexível, de modo que possibilite a implementação de mais variáveis no estudo. Essas pesquisas envolvem: (a) levantamento bibliográfico; (b) entrevistas com pessoas que tiveram experiências práticas com o problema pesquisado; e (c) análise de exemplos que "estimulem a compreensão" (Selltiz 1967).

Com caráter qualitativo esta pesquisa visa o levantamento de dados para compreender e interpretar o comportamento do hidrogênio como aditivo na combustão, caracterizando-se assim por manipular diretamente as variáveis relacionadas com os fins da pesquisa.



### 3.2. Materiais e Métodos

Foi realizado um estudo bibliográfico a fim de auxiliar na análise de desempenho dos efeitos do hidrogênio como aditivo de um motor de combustão interna, descrevendo as propriedades do gás hidrogênio, as formas de obtenção, e os efeitos na combustão. Foram abordados o conceito de energia interligado a combustíveis e as fontes energéticas, o funcionamento dos motores de combustão interna e algumas de suas classificações, a especificação do motor Briggs&Stratton e o que poderia gerar de benefícios caso fosse implantado na competição BAJA SAE, a análise da redução de consumo por utilização do hidrogênio como aditivo, os métodos para realização dos experimentos e os resultados teóricos esperados.

A análise de desempenho e redução do consumo de gasolina será baseada desde os dados técnicos do motor e as propriedades do hidrogênio favoráveis à combustão. Assim, na primeira etapa, o motor deve estar ajustado e funcionando em suas características normais para logo em seguida aplicar o gás hidrogênio no sistema de aspiração e ajustá-lo novamente para o melhor funcionamento possível.

O equipamento da Figura 8 conhecido como célula eletrolítica a seco funciona através de placas de aço inox carregados por uma potência vinda de uma fonte geradora. O principal entrave da utilização do eletrolisador seria o custo da eletricidade gasta na geração do hidrogênio, pois apenas 4% do hidrogênio produzido atualmente se devem ao processo de eletrólise. Este processo consiste na decomposição química de uma solução líquida em hidrogênio e oxigênio por meio da eletricidade.

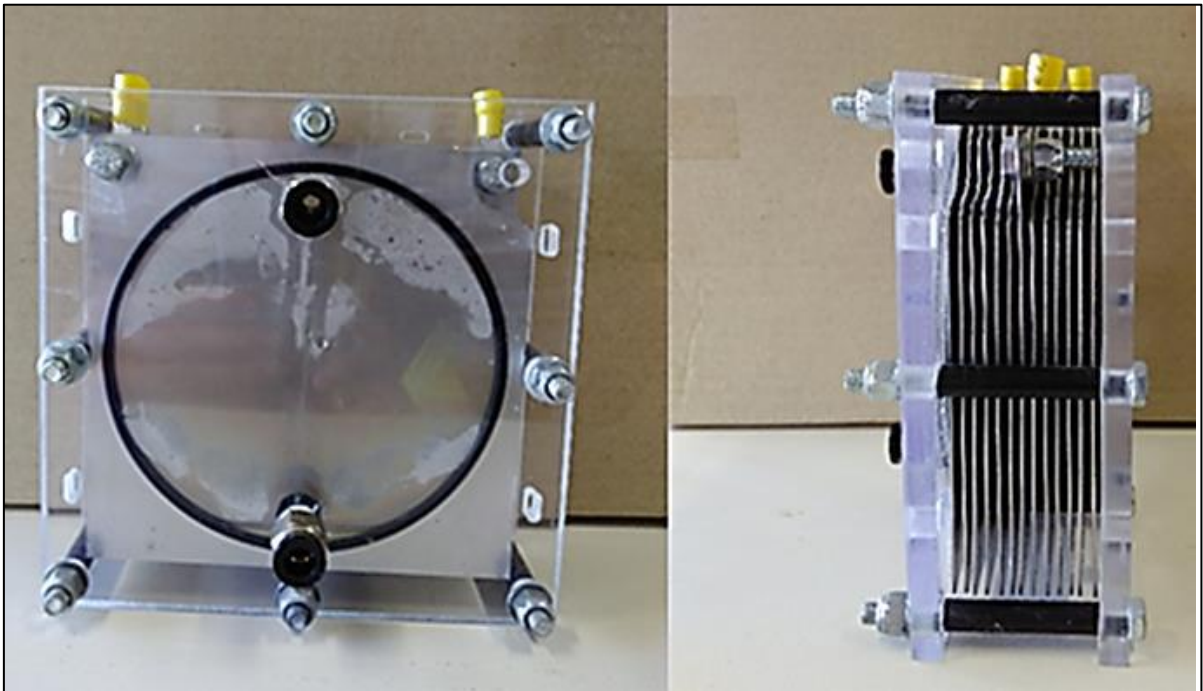


Figura 8: Célula para geração de eletrólise.

Fonte: Pesquisa direta, 2018.

Com a passagem da corrente elétrica através da solução, ocorre o rompimento dos elementos gerando dois átomos de hidrogênio positivamente carregados e oxigênio carregado negativamente. Adicionando um composto químico, ácido ou base, no caso água destilada com um composto conhecido como KOH. Este composto é o hidróxido de potássio, uma base forte na qual os íons se movimentam gerando a transferência de carga.

Para sanar a necessidade de produção de energia elétrica é utilizada uma fonte de alimentação (Figura 9) onde pode-se controlar a tensão e a corrente necessária para produzir o hidrogênio. Caso este não real no veículo BAJA, no qual necessitaria de outra fonte para produção dessa energia. No veículo a corrente se mantém constante, porém a uma menor porção necessária para a geração suficiente de hidrogênio.



Figura 9: Fonte Reguladora Instrutherm DC FA-2030

Fonte: Manual Instrutherm, 2018.

### 3.2.1. Análise do pH e da condutividade nas soluções eletrolíticas

O fluido utilizado na eletrólise para geração de hidrogênio é uma substância básica formada por água destilada junto a proporções pré-definidas de KOH (hidróxido de potássio) que é uma base forte na forma de um sólido branco cristalino, com coloração branca opaca ou transparente, sendo tal substância tóxica e corrosiva. Sua massa molecular é de 56,108 g/mol, sendo comumente utilizado na fabricação de sabão, sabonetes e fertilizantes. Assim por meio do indicador de pH, pode-se verificar o pH de cada mistura mostrado na Figura 10.



Figura 10: Análise do pH das amostras em indicador de pH em vareta.

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

Neste indicador, a solução se identifica como ácida quando o papel fica nitidamente vermelho indicado na escala pelos números iniciais e básica quando tende ao azul e aos números finais. Embora o valor compreenda uma faixa de 0 a 14 unidades, estes não são os limites para o pH. É possível valores acima e abaixo desta faixa, como exemplo, uma solução que fornece  $\text{pH} = -1,00$ , apresenta matematicamente  $-\log [\text{H}^+] = -1,00$ , ou seja,  $[\text{H}^+] = 10 \text{ mol/L}^{-1}$ . Este é um valor de concentração facilmente obtido em uma solução concentrada de um ácido forte, como o HCl. Outra análise realizada foi à condutividade de cada solução, tal análise efetuada por um condutivímetro, equipamento mostrado na Figura 11. Os resultados de condutividade são mostrados na Tabela 5.



Figura 11: Condutivímetro utilizado na análise, Modelo CD-850

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

Tabela 5: Resultados de condutividade das soluções coletados em microSiemens.

Parâmetros/Amostra	12,5g	15,0g	17,5g	20,0g	Água destilada	Água comum
0.2~2mS	-	-	-	-	0,0036	0,038
0~200uS	-	-	-	-	37,1	39,3
2~20mS	-	-	-	-	0,09	0,09
20~200mS	23,70	28,60	33,30	36,30	0,80	0,80

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

Como dito anteriormente, com o aumento da proporção de hidróxido de potássio a solução passa a ter maior condutividade.

### 3.2.2. Sensor de rotação

O sensor usado para a rotação é o sensor de efeito Hall, conforme mostra a Figura 12. Este sensor de efeito Hall funciona com base em uma diferença de potencial aplicada a um material condutor onde flui uma corrente e este material é submetido a um campo magnético.

Esta corrente tem sua trajetória desviada acumulando cargas nas suas laterais, assim gerando uma diferença de potencial, em outras palavras quando um condutor tem sua corrente desviada pela ação do campo magnético uma tensão Hall é gerada e aproveitada pelo circuito para executar uma ação. O efeito Hall pode ser utilizado em diversas aplicações como sensores de deslocamento, indicadores de níveis detector de metais e no caso deste trabalho a rotação do motor. Através de pulsos digitais captados no eixo do motor e repassando essa informação ao sistema de Arduino pode-se aferir a rotação por minuto em tempo real de funcionamento do motor. O cálculo de rotação definido pela equação 17, foi implementado na programação do Arduino, assim com uma interrupção no sensor se contabiliza uma rotação do motor.

$$Rotação = \left(\frac{n}{m}\right) * 60 \quad (17)$$

Sendo  $n$  o número de interrupções e  $m$  o número de marcações fixadas no eixo do motor.

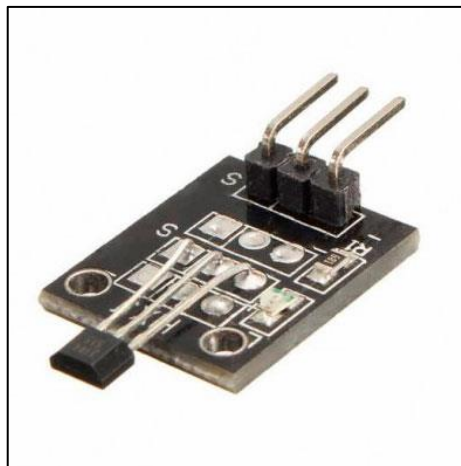


Figura 12: Imagem ilustrativa do sensor Hall

Fonte: Blog Baú da Eletrônica, 2018.

### 3.2.3. Sensor de fluxo

O sensor apresentado na Figura 13 também tem um funcionamento bem simples assim como o sensor de rotação. Sua estrutura consiste em uma válvula em formato de cata-vento

com um ímã acoplado que trabalha em conjunto com um sensor hall para enviar um sinal ao equipamento de tratamento de dados. Através destes pulsos é possível mensurar a vazão de água.



Figura 13: Imagem ilustrativa do sensor de fluxo Modelo YF-S402

Fonte: Blog Baú da Eletrônica

Com seu funcionamento apenas com gasolina será feita uma média de consumo de combustível por hora. Assim foi realizada a calibração do sensor de fluxo e através de uma equação da reta que incorporada junto à programação dos sensores pode-se obter a calibração do mesmo, como mostrado na Figura 14.

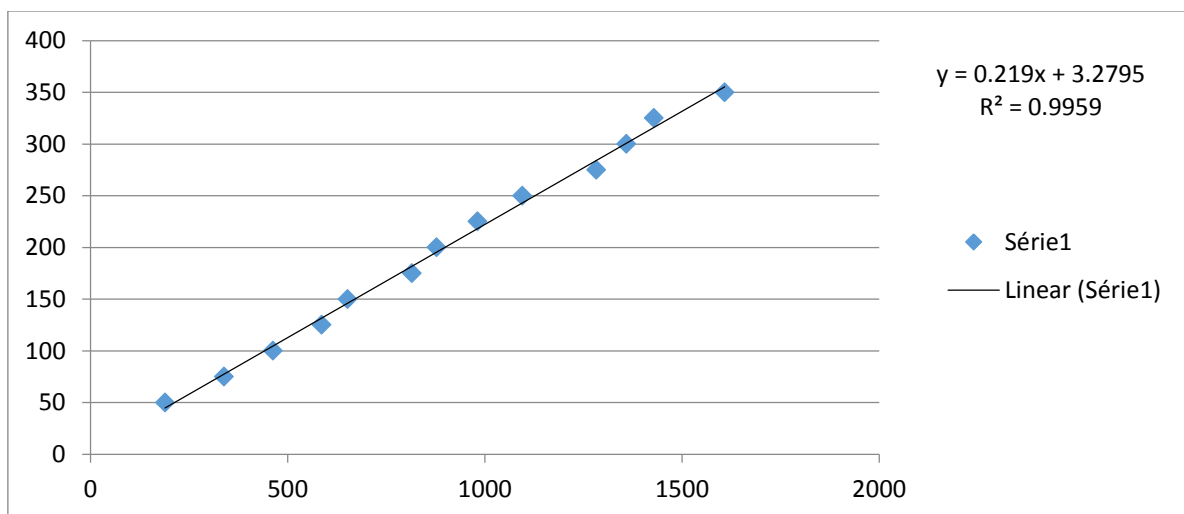


Figura 14: Análise das medições para calibração do sensor de fluxo (Vazão x Pulso).

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

A vazão volumétrica do fluido de trabalho ( $\dot{Q}$ ), a gasolina pode ser medida através da equação 18.

$$\dot{Q} = \frac{V}{t} \quad (18)$$

Tendo-se que  $\dot{Q}$  é a vazão volumétrica em (m<sup>3</sup>/s), V é o volume do líquido obtido (m<sup>3</sup>) e t o tempo (s), assim calculando o volume de combustível pela equação 19.

$$V = (0.219 \times P) + 3,2795 \quad (19)$$

Sendo: P o número de pulsos gerados pelo sensor.

### 3.3. Variáveis e indicadores

Segundo KERLINGER (1980) o termo variável se define como: um conceito ou um constructo que é similar onde se expressa uma abstração formada por uma generalização de particulares como a massa, energia e força. Uma variável, uma expressão de um elemento especificado em um conjunto, este conjunto formado por todos os elementos ou variáveis podem substituir uns aos outros, assim esta variação pode ser observada e mensurada. Como mostrado na Tabela 6.

Tabela 6: Variável e Indicadores

Variável	Indicadores
Consumo do motor	Vazão mássica de entrada do combustível
	Vazão mássica de entrada do hidrogênio
	Rotação do motor

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.



### **3.4. Instrumentos de coleta de dados**

A coleta de dados se baseia na reunião de informações necessárias e suficientes para o tema e agrupa-las para facilitar uma análise futura. Esta etapa informa os fenômenos que estão ocorrendo na pesquisa e é feita no caso, através de manuais, tabelas, normas e bibliografias já existentes. Após a obtenção destas informações será realizada uma análise experimental onde será realizada uma coleta com o experimento em funcionamento para determinação de respostas para a pergunta problemática, ou seja, será realizada uma observação direta no experimento proposto.

### **3.5. Tabulação de dados**

Com os dados obtidos pela análise direta do experimento e as pesquisas bibliográficas serão realizadas uma interação entre os dados por meio de cálculos e análises através do software Excel devido as variáveis em uma mesma formulação. Assim os resultados serão alocados em uma tabela comparando os valores e características antes e depois da implementação do hidrogênio como aditivo da combustão e gerado um relatório para discussão dos resultados obtidos.

### **3.6. Considerações finais do capítulo**

Neste capítulo foram mostradas o tipo de pesquisa e a classificação referente, as ferramentas e métodos utilizados para análise do desenvolvimento da aplicação de hidrogênio no motor de combustão interna utilizando o hidrogênio como aditivo na combustão. Também foi exposta a área de ocorrência da pesquisa e as formas de coleta de explanação dos dados obtidos teórico e experimentalmente.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Este capítulo apresentará as análises e experimentos realizados a fim de se obter o comparativo do consumo médio do motor Briggs&Stratton de 10 HP em seu funcionamento normal e quando se adiciona um gás produto de eletrolise no seu processo de combustão.

### **4.1. Análise de vazão devido a cada porcentagem de KOH**

Para gerar a tensão e corrente necessárias para o funcionamento da célula eletrolítica utilizou-se a fonte presente na Figura 9, na qual fornece uma tensão de até 32V e corrente de até 20A. Após a realização de uma análise estatística com cada porcentagem de solução utilizada na célula eletrolítica para aferir a produção do gás de eletrólise (hidrogênio). Assim obtendo a vazão e capacidade de produção de cada um. No caso as porcentagens de adição de KOH a cada 1 litro de água destilada foram de 12,5 g, 15,0 g, 17,5 g e 20,0 g.

A Figura 16 mostra o equipamento utilizado para análise da vazão do gás de eletrólise gerado pela célula. A Tabela 7, Tabela 8, Tabela 9 e Tabela 10 demonstram a vazão de hidrogênio na célula devido ao aumento da corrente e do hidróxido de potássio. Nota-se que a vazão aumenta gradativamente de acordo com o aumento da corrente. Outro ponto a ser notado, é no qual o aumento da vazão se deve também ao aumento da proporção de KOH em cada mistura analisada.

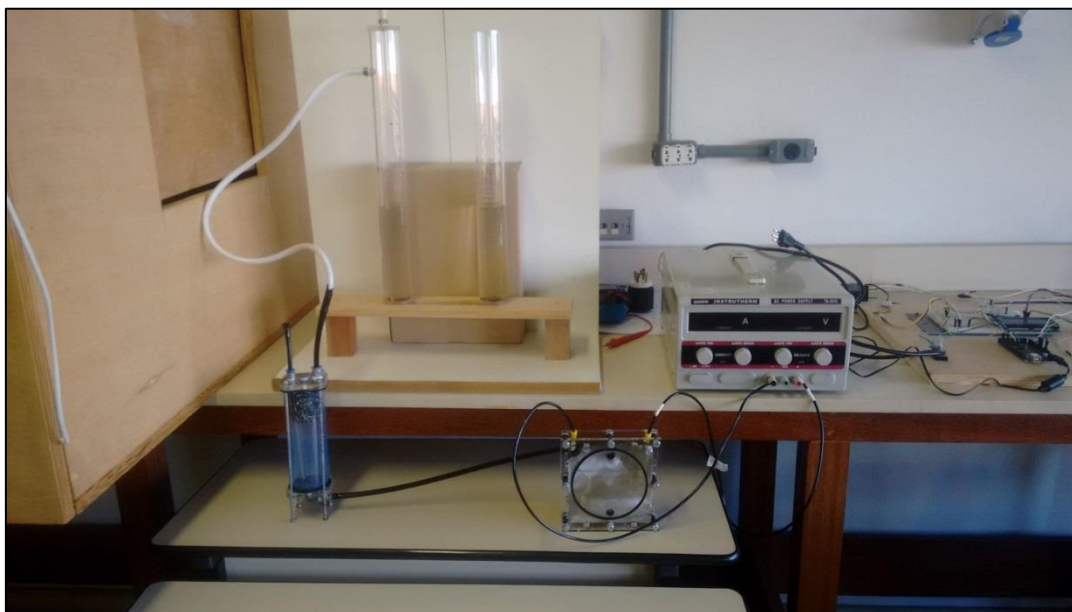


Figura 15: Equipamento para análise de vazão da célula eletrolítica.

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.

Tabela 7: Tabela de valores coletados na produção de hidrogênio de acordo com a corrente adicionada na célula, com a proporção de 12,5 gramas de KOH.

<b>Corrente [A]</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>Amostragem</b>	<b>Vazão</b>	<b>Vazão</b>	<b>Vazão</b>	<b>Vazão</b>	<b>Vazão</b>	<b>Vazão</b>	<b>Vazão</b>	<b>Vazão</b>	<b>Vazão</b>	<b>Vazão</b>
1	20,41	6,86	4,03	2,93	21,69	18,15	15,41	13,71	12,43	10,86
2	20,49	6,34	3,96	3,03	21,15	18,05	15,27	13,35	12,11	10,95
3	19,89	6,99	3,96	2,96	21,76	17,91	15,29	12,97	12,37	10,89
4	19,92	6,98	4,24	3,33	21,75	18,08	15,4	13,74	11,88	10,86
5	20,25	6,99	4,11	3,11	22,05	18,01	15,55	13,48	11,93	10,98
6	19,52	7,04	4,28	3,22	21,61	18,17	15,57	13,63	11,97	10,8
7	19,94	7,05	4,17	3,24	21,43	18,14	15,53	13,4	12,15	10,97
8	19,9	7,00	4,3	3,11	21,64	18,57	15,54	13,83	12,14	10,99
9	19,22	7,00	4,06	3,1	21,59	18,04	15,68	13,56	12,18	10,96
10	20,93	6,75	4,02	3,14	21,48	18,2	15,71	13,54	12,25	10,81
Média	20,05	6,90	4,113	3,117	21,62	18,13	15,49	13,52	12,14	10,91
Vazão (ml/s)	0,499	1,449	2,431	3,208	4,626	5,515	6,454	7,396	8,237	9,168
Vazão (l/min)	0,030	0,087	0,146	0,192	0,278	0,331	0,387	0,444	0,494	0,550

Fonte: Figueiredo, 2018.

Tabela 8: Tabela de valores coletados na produção de hidrogênio de acordo com a corrente adicionada na célula, com a proporção de 15 gramas de KOH.

Corrente [A]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Amostragem</b>	<b>Vazão</b>									
1	20,93	8,22	3,91	2,97	21,08	17,33	14,75	12,91	11,51	10,35
2	21,00	7,83	4,21	2,9	20,96	17,6	14,97	12,94	11,71	10,28
3	22,06	7,77	4,11	3,04	21,31	17,38	14,69	12,98	11,47	10,45
4	21,44	7,62	4,15	2,84	21,2	17,8	14,64	12,66	11,42	10,37
5	22,05	7,66	4,09	2,93	21,57	17,45	14,69	13,03	11,53	10,31
Média	21,50	7,82	4,094	2,936	21,22	17,51	14,75	12,90	11,53	10,35
Vazão (ml/s)	0,465	1,28	2,44	3,41	4,63	5,71	6,78	7,75	8,67	9,66
Vazão (l/min)	0,028	0,07	0,14	0,20	0,277	0,342	0,406	0,465	0,520	0,58

Fonte: Figueiredo, 2018.

Tabela 9: Tabela de valores coletados na produção de hidrogênio de acordo com a corrente adicionada na célula, com a proporção de 17,5 gramas de KOH.

Corrente [A]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>Amostragem</b>	<b>Vazão</b>									
1	26	8,27	4,79	3,32	22,21	18,74	15,82	13,93	11,83	10,71
2	25,57	8,45	4,73	3,46	22,23	18,8	15,76	13,7	11,96	10,84
3	25,14	8,10	4,78	3,4	22,18	18,71	15,73	13,56	11,73	11,11
4	25,83	8,28	4,84	3,35	22,78	19,23	16,3	13,59	11,88	10,79
5	25,88	8,12	4,66	3,41	22,55	18,93	15,85	13,76	12	10,83
Média	25,68	8,24	4,76	3,388	22,39	18,88	15,89	13,70	11,88	10,85
Vazão (ml/s)	0,389	1,213	2,101	2,952	4,466	5,296	6,292	7,295	8,417	9,211
Vazão (l/min)	0,023	0,073	0,126	0,177	0,268	0,317	0,377	0,437	0,505	0,552

Fonte: Figueiredo, 2018.

Tabela 10: Tabela de valores coletados na produção de hidrogênio de acordo com a corrente adicionada na célula, com a proporção de 20 gramas de KOH.

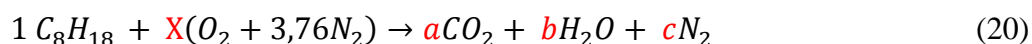
Corrente [A]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Amostragem	Vazão									
1	18,76	6,82	3,76	2,81	21,32	17,38	14,77	12,98	11,65	9,55
2	18,86	6,45	3,85	2,87	21,15	17,38	14,74	12,99	10,14	9,47
3	18,53	6,19	3,96	2,86	21,15	17,25	14,62	12,89	10,18	9,52
4	18,52	6,78	3,59	2,81	21,29	17,32	14,62	12,83	10,21	9,38
5	19,06	6,19	3,76	2,89	21,05	17,49	14,92	12,85	10,57	9,46
Média	18,74	6,49	3,784	2,848	21,19	17,36	14,73	12,90	10,55	9,476
Vazão (ml/s)	0,533	1,542	2,643	3,511	4,718	5,759	6,787	7,747	9,478	10,55
Vazão (l/min)	0,032	0,093	0,159	0,211	0,283	0,345	0,407	0,464	0,568	0,633

Fonte: Figueiredo, 2018.

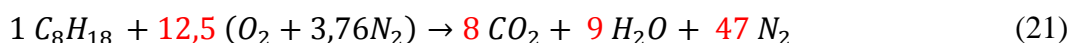
A média entre essas soluções de mínimas e máximas proporções de KOH estudadas quando a corrente se mantém em 10 A é de 9,65 mL/s, assim gerando 9,168 mL/s para 12,5g/L de KOH e de 10,553 mL/s para 20 g/L da mesma substância.

#### 4.1.2. Estequiometria da combustão da gasolina e mistura gasolina-hidrogênio

A gasolina por sua vez é uma mistura de hidrocarbonetos, que tipicamente é representada por  $C_8H_{18}$ . Assim, a estequiometria da combustão completa da gasolina para um processo ideal sem a adição do hidrogênio se define pela razão estequiométrica.



Como resultante tem-se a equação:

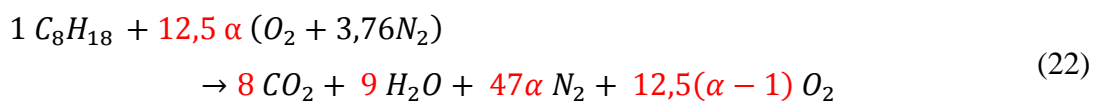


Estas proporções estabelecem a quantidade mínima de ar necessária para fornecer a quantidade de oxigênio requerida para queima completa dos combustíveis, adotando que o ar atmosférico possui 21% de oxigênio e 79% de nitrogênio.

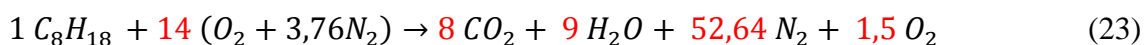
A proporção estequiométrica da mistura ar-combustível é:

- Combustível: 114 kg
- Ar: 1716 kg
- Razão ar-combustível (RAC) = 15,05 kg ar / kg combustível

Calculando a razão da mistura ar/combustível (RAC), nota-se que são necessários 15,05 kg ar / kg combustível, ou seja, são necessárias 15.05 unidades de massa de ar para cada unidade de massa de gasolina injetada no motor. Pelos dados de combustão da gasolina, em geral, nota-se que o excesso de ar na combustão pode atingir valores de até 12%, resultando no balanço estequiométrico mostrado na equação 7:



Admitindo  $\alpha = 1.12$ , tem-se que:



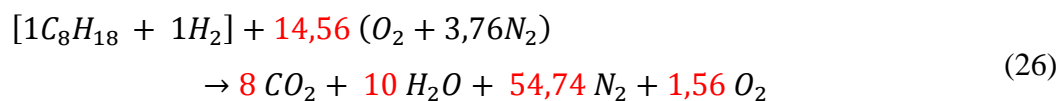
Da mesma forma, fez-se o balanço do combustível, porém com o hidrogênio ( $H_2$ ) como aditivo no mesmo.



Assim, o balanceamento da equação do combustível com o hidrogênio será:



Adotando que o excesso de ar neste caso também será de 12%, tem-se que:



#### 4.1.3. Análise ideal para um motor de combustão interna

A análise do motor de combustão interna foi realizada utilizando-se das especificações do fabricante fornecidas na Figura 16 para início do dimensionamento. Utilizaram-se as equações (1) á (15). Os resultados da análise do motor são apresentados nas Tabelas 11 e 12.

<p>Cilindrada: 305 cc          Potência: 10 HP          Número de cilindros: 1          Diâmetro do cilindro: 79,2 mm          Curso do pistão: 62,0 mm          Capacidade do tanque: 3,81 litros          Válvulas: OHV          Filtro de ar: duplo (espuma e papel)          Lubrificação: splash          Peso: 23,4 kg</p>	
--	---

Figura 16: Especificações do Motor Briggs&Stratton 10 HP.

Fonte: Manual Briggs&Stratton, 2018.

Tabela 11: Resultado do cálculo ideal para motor a combustão interna

<b>Estado 1: Admissão</b>		
	<b>Unidade</b>	<b>Valores</b>
Pressão	(kPa)	101,325
Temperatura	(K)	298,15
Volume específico	(m <sup>3</sup> /kg)	0,845
Relação de compressão	---	8,500
<b>Estado 2: Compressão</b>		
	<b>Unidade</b>	<b>Valores</b>
Calor específico a volume constante	(kJ/kg.K)	0,820
Temperatura	(K)	630,567
Pressão	(kPa)	214,24
Volume específico	(m <sup>3</sup> /kg)	0,0994
Vazão Mássica	(kg/s)	0,00041
<b>Estado 3: Expansão</b>		
	<b>Unidade</b>	<b>Valores</b>
Calor de entrada	(kJ/kg)	1150
Calor específico a volume constante	(kJ/kg.K)	0,820
Temperatura	(K)	2033,0
Pressão	(kPa)	5871,27
Coeficiente dos gases	(kJ/kg.K)	0,287
Volume específico	(m <sup>3</sup> /kg)	0,0994
<b>Estado 4: Escape</b>		
	<b>Unidade</b>	<b>Valores</b>
Calor específico a volume constante	(kJ/kg.K)	0,820
Temperatura	(K)	961,26
Pressão	(kPa)	326,60
Volume específico	(m <sup>3</sup> /kg)	0,845

Fonte: Pesquisa Direta, 2018.



Tabela 12: Resultados dos cálculos para um motor ideal.

Eficiência Teórica ( $N_{th}$ )	0,52717 (52,72%)
Trabalho específico no ciclo ( $w_{ciclo}$ )	606,25 kJ/kg
Massa do sistema	0,00041 kg
Trabalho no ciclo ( $W_{ciclo}$ )	0,248 kJ
Pressão média do ciclo (pmc)	813,39 kPa
Potência do ciclo $N_{ciclo}$	7,45 kW (10,12 CV)
Calor na entrada do sistema ( $Q_H$ )	0,471 kJ
Calor rejeitado pelo sistema ( $Q_L$ )	0,2228 kJ
Calor específico de entrada no sistema ponto 2-3 ( $q_H$ )	1150 kJ/kg

Fonte: Pesquisa direta, 2018.

Após o equacionamento em parâmetros ideais, pode-se obter a temperatura máxima de trabalho na câmara de combustão de 2033 K, assim como a taxa de calor de entrada e rejeitada da mesma, com valores respectivos de 0,471 kJ e 0,222 kJ. Assim a potência do motor foi obtida, valor este que gira em torno de 10,12 CV, assim como apresentada pelo manual da fabricante Briggs&Stratton.

#### 4.1.4. Análise de consumo médio de combustível

Nesta etapa pode-se observar o consumo real de combustível durante um período pré-determinado e ajustado com as condições do motor. Devido à condição física do mesmo que se encontrava já desgastado pelo constante uso nas competições nas quais fora utilizado, o motor estudado apresentava desgaste nos anéis de segmento (anéis de raspagem), que trabalham junto ao pistão. Assim certa porcentagem de óleo lubrificante adentrava na câmara de combustão durante seu funcionamento. Mesmo com tal defeito, a análise pode ser efetuada e com resultados satisfatórios. Através dessas medições o consumo médio aferido foi de 0.8608 ml/s, demonstrado na Tabela 13.

Tabela 13: Resultados das análises de rotação e consumo médio sem adição do hidrogênio

	<b>Somatório</b>	<b>Pontos</b>	<b>Média</b>	<b>Tempo</b>
<b>Rotação</b>	8062440 rpm	3182	2524.25 rpm	3194 s
<b>Vazão</b>	2739.058 mL/s	3182	0.8608 mL/s	3194 s

Fonte: Pesquisa direta, 2018.

No total foram 53,23 minutos de análise efetivada divididas em 4 análises devido a eventuais paradas da programação. Essas paradas totalizaram 6,77 minutos de interrupção nas análises. A rotação média durante os experimentos foi de 2524,25 rpm.

A Figura 17 mostra a bancada para análise do consumo de combustível utilizada neste trabalho.



Figura 17: Bancada para análise de consumo de combustível.

Fonte: Pesquisa direta, 2018.

#### **4.1.5. Análise de consumo médio de combustível com hidrogênio como aditivo**

Algumas precauções foram tomadas devido ao aumento do poder calorífico no processo de combustão, o hidrogênio como já dito possui alta inflamabilidade, assim se faz necessário alguns cuidados na sua utilização como aditivo. Fez-se necessário a utilização de uma válvula anti-retorno, esta com a funcionalidade de evitar uma possível ignição do H<sub>2</sub> no sistema de eletrolisação. O carburador é do tipo horizontal e poderá sofrer algumas alterações no giclê. O giclê é uma pequena peça com uma furação no interior dos carburadores responsável em controlar a passagem de combustível que é misturado ao ar. Assim, quanto maior esse furo, maior a quantidade de combustível consumida. Com a adição do hidrogênio ao processo de combustão faz-se necessário uma menor injeção de combustível no processo. Logo pequenas alterações ou substituições no giclê puderam acontecer.

Devido as recorrentes falhas no motor geradas pelo desgaste do mesmo e o acúmulo de óleo na câmara de combustão, fizeram com que o tempo de análise da combustão com o hidrogênio fosse reduzido consideravelmente. No decorrer das análises pode-se observar nitidamente o aumento da rotação quando adicionado o hidrogênio, no caso, a proporção adicionada fora de 9.2115 ml/s a uma corrente de 10 A. Nota-se também que o consumo de combustível líquido foi reduzido a tal maneira que o sensor de fluxo não conseguira medir pois a faixa mínima de medição do sensor é de 0.3 l/min, na interface observava-se que os valores sempre tendiam a zero. Ao se reduzir a produção do hidrogênio pela diminuição da corrente imposta a célula de eletrólise notava-se picos de aumento de consumo de combustível líquido, representação esta de que a combustão necessitava deste aumento para ocorrer.

Time:	1222	Counter:	0	Vazao:	0
3120 rpm					
Time:	1223	Counter:	0	Vazao:	0
3120 rpm					
Time:	1224	Counter:	0	Vazao:	0
3120 rpm					
Time:	1225	Counter:	0	Vazao:	0
3120 rpm					
Time:	1226	Counter:	0	Vazao:	0
3120 rpm					
Time:	1227	Counter:	0	Vazao:	0
3060 rpm					
Time:	1228	Counter:	0	Vazao:	0
3120 rpm					
Time:	1229	Counter:	0	Vazao:	0
3120 rpm					
Time:	1230	Counter:	0	Vazao:	0
3120 rpm					
Time:	1231	Counter:	18	Vazao:	7.2216
Time:	1232	Counter:	0	Vazao:	0
3060 rpm					
Time:	1233	Counter:	0	Vazao:	0
3120 rpm					

Figura 18: Pico de aumento de consumo de combustível.

Fonte: Pesquisa direta, 2018.

Após o consumo médio aferido, verificou-se o parâmetro de rotação, no qual foi constatado o seu aumento médio no valor de 3126,165 rpm como mostrado na Tabela 14.

Tabela 14: Consumo (ml/s) de gasolina devido a adição de hidrogênio

	Somatório	Pontos	Média	Tempo
<b>Rotação</b>	7849800 rpm	2511	3126.165 rpm	2779 s
<b>Vazão</b>	525.7956 ml/s	2769	0.1899 ml/s	2779 s

Fonte: Pesquisa direta, 2018.

## **4.2. Adaptação de componentes ao sistema**

A admissão do hidrogênio ocorre pela mesma entrada do filtro de ar, assim à medida que se aspira o ar ambiente para a combustão também se injeta hidrogênio na mistura. Devido aos desgastes de componentes internos do motor não é necessário intervir na modificação de componentes da carburação, fato este que não alterariam os resultados devido aos defeitos já presentes no motor.

## 5. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

### 5.1. Conclusões

Perante os experimentos realizados pode-se notar a redução do consumo de combustível líquido, no caso a gasolina, onde sua redução teve um valor considerável de 88% no consumo. Fato este devido a melhoria no processo de combustão pela adição de  $H_2$ . A análise feita no motor sem a adição de  $H_2$  na combustão, aferiu a média de consumo de 0,8608 ml/s, mesmo em condições não ideais para o funcionamento do mesmo. Os desgastes encontrados no motor devido ao tempo e constante utilização nas competições da equipe só poderiam ser sanados, caso fosse realizada a retifica do mesmo, porém condição inviável devido a não utilização posterior do motor pela equipe. A presença de óleo lubrificante na câmara de combustão foi de grande interferência no tempo de realização dos experimentos.

Os ajustes cabíveis para tentar aproximar ao máximo das condições ideais para que o experimento acontecesse, foi o ajuste das válvulas, a limpeza e ajuste do sistema de carburação e a troca de óleo. Após a realização destes ajustes foi aferido o consumo com a adição de  $H_2$ . O primeiro parâmetro observado que constatava que a adição de  $H_2$  estava sendo efetiva no processo de combustão foi o aumento da rotação, assim quanto maior a adição de  $H_2$  no sistema, maior era este aumento. Estabilizando a produção do gás de eletrolise na célula com a corrente de 10 A, assim como já mostrado na Tabela 8, a vazão deste era de 9,211 ml/s. Assim o consumo médio aferido durante o tempo de experimento em que o motor não apresentou os defeitos devido ao desgaste, foi de 0,1899 ml/s. Com estes valores pode-se notar que a redução do consumo foi de 88%. Este valor muito alto se deve as características do motor, por ser de pequeno porte e de consumo relativamente muito baixo, concluindo assim que o  $H_2$  de fato regula a queima do processo de combustão, tornando o ciclo mais eficiente.

Durante a experimentação com o gás de eletrolise, notou-se na interface da programação, um alto índice de valores tendentes à zero. Foi averiguado que tal acontecimento ocorreu perante o sensor de fluxo não dispor de um alto valor de precisão na medição.

Outro ponto notado como mostrado na Figura 18, foi o fato de ocorrerem picos de aumento no consumo instantâneo de gasolina, este fato foi atribuído a redução da produção de H<sub>2</sub> injetado no processo de combustão.

## 5.2. Recomendações

Durante a realização dos experimentos, foi pontuada a necessidade de uma maior precisão nos valores dos sensores para que se obtivesse um aumento na exatidão do consumo do combustível. Como recomendação a trabalhos futuros, é indicado realizar os mesmos experimentos com a utilização de equipamentos com maior qualidade e precisão. Assim o sensor FS2012 SERIES da marca IDT com um *range* de até 797,80 sccm (*standard cubic centimeters per minute - cm<sup>3</sup>/min*), faixa de temperatura de trabalho de 0°C a 85°C e pressão de trabalho de 10 bar pode ser introduzido ao sistema de monitoramento.

Outra recomendação seria utilizar um motor em boas condições físicas, a fim de analisar as emissões dos poluentes gerados no processo de combustão e analisar a redução dos óxidos de nitrogênio quando se adiciona o hidrogênio ao processo.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALMEIDA, A. T. e MOURA, P. S. **Hidrogênio e células de combustível**. Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, Gazeta da Física, p51-55, 2005.
- AL-ROUSAN, AMMAR A.; **Reduction of fuel consumption in gasoline engines by introducing HHO gas into intake manifold**. International Journal Of Hydrogen Energy, Mutah, p. 12930-12935. 30 ago. 2010. (AL-ROUSAN, 2010).
- BERNARDE JR, P. **Alternativas para a Produção de Hidrogênio nas Regiões Brasileiras Visando a Geração de Energia Elétrica Distribuída**. Tese de Doutorado, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo – SP, 153p. 2009.
- BEZERRA FILHO, J. G. **Células a combustível a hidrogênio: estudo de caso comparativo com um motor a combustão**. Trabalho de final de curso. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará – Mecatrônica Industrial, 70p. 2008.
- BORBA, B. S. M. C. **Metodologia de Regionalização do Mercado de Combustíveis Automotivos no Brasil**. Tese de Mestrado - Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2008.
- CARNIELETTO, R. **Aproveitamento de Energia Vertida Turbinável para Produção de Hidrogênio e Geração Distribuída**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Elétrica – Universidade Federal de Santa Maria, 174p, 2011.
- CEMIG. **Alternativas Energéticas: Uma Visão Cemig. Companhia Energética de Minas Gerais**, Belo horizonte, p164-170, 2012.
- ÇENGEL, Y. A. **Termodinâmica**. 5. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2006.
- ESTEVIÃO, T. E. R. **O Hidrogênio como combustível**. Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2008.



- ESTEVEES, G. R. T. **Custo da Poluição dos Transportes na Saúde Pública na Região Metropolitana de São Paulo**. Tese de Doutorado. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Estadual de Campinas, 2007.
- FONSECA, J. J. S. **Metodologia da pesquisa científica**. Fortaleza: UEC, 2002. Apostila.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1999.
- GOMES NETO, EMILIO H. **Hidrogênio Evoluir Sem Poluir**. 1ª. ed. Curitiba: Brasil H2 Fuel Cell Energy, 2005. 240 p.
- GNÖRICH, B. **Hydrogen Internal Combustion Engine**. Roads2 Hy, 2008.
- LANZ, A. **Hydrogen Fuel Cell Engines and Related Technologies**. College of the Desert, 2001.
- LOPES, R. A. **Célula combustível a hidrogênio: Fonte de energia da nova era**. São Paulo, Ed. Artliber, 2004.
- MARTINS, J. **Motores de Combustão Interna**. 2. ed. Porto: PUBLINDÚSTRIA EDIÇÕES TÉCNICAS, 2006. 437 P.
- MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **Energia no Mundo 2015-2016**. Disponível em <http://www.mme.gov.br/documents/10584/3580498/14+-+Energia+no+Mundo+-+Matrizes+e+Indicadores+2017+-+anos+ref.+2015+-+16+%28PDF%29/60755215-705a-4e76-94ee-b27def639806;jsessionid=23A29A5505323A1DD0ED0E7D02E956E2.srv155>. Acesso em 20/06/2018.
- MUSMAR, SA'ED A.; AL-ROUSAN, Ammar A. **Effect of HHO gas on combustion emissions in gas oline engines**. Fuel: Elsevier, Mutah, p. 10016-10021. 01 jun. 2011.
- NORBECK, J. M. **Hydrogen fuel for surface transportation**. New York, Ed. Society of Automotive Engineers, 2003.

- PARIZZI, J. B. **Utilização Avançada da Capacidade Excedente de Sistemas de Transmissão CCAT para produção de Oxigênio e Hidrogênio.** Centro de Tecnologia da Universidade Federal de Santa Maria (Tese de Doutorado), 208 p, 2008
- RIFKIN, J. **A economia do hidrogênio.** São Paulo: M. Books, 2003. 301 p. 71
- SAITO, GIOVANA CAROLYN DOMINGUES, **O uso do hidrogênio como aditivo a combustíveis em motores de combustão interna.** Iniciação Científica – FATEC Sorocaba. Disponível em <http://www.fatecsorocaba.edu.br/iniciacao/relatorio-Giovana-Saito.pdf>. Acesso em 20/06/2018.
- SANTOS JR, A. C. F. **Análise da viabilidade econômica da produção de hidrogênio em usinas hidrelétricas: estudo de caso em ITAIPU.** Dissertação de mestrado (Pós-graduação em engenharia de produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, 143p. 2004.
- SANTOS, A. M. R. **Tendências Tecnológicas das Células a Combustível para o Uso do Hidrogênio Derivado de Petróleo e Gás Natural.** Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 130 p. 2008.
- SANTOS, F. A.; SANTOS, F. M.; **O Combustível Hidrogênio.** Revista do ISPV, no35, Maio de 2005.
- SILVA, C. R. O. **Metodologia do trabalho científico.** Fortaleza: Centro Federal e Educação Tecnológica do Ceará, 2004.
- SILVA, E. P. **Introdução à Tecnologia e Economia do Hidrogênio.** Campinas: Editora da UNICAMP, 204p. 1991.
- SORENSEN, B. **Hydrogen and Fuel Cells,** Academic Press, 2005.
- SOUZA, RODRIGO G.; SILVA, FABIO M.; BASTOS, ADRIANO C. **Desempenho de um conjunto moto gerador adaptado a biogás.** Ciências Agro técnicas, Lavras/MG, p. 190-195. 2010.
- TAYLOR, C. F. **Análise dos motores de combustão interna.** São Paulo: Edgard Blucher, 1988.

- TOLMASQUIM, M. **Fontes renováveis de energia no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência/CENERGIA, 2003.
- VAN WYLEN, G. J. **Fundamentos da Termodinâmica**. 6. ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 2003. 577 p.
- WENDT, H. et al. **Tecnologia de Célula a Combustível**. Química Nova, p 538-546, 2000.
- YILMAZ, ALI CAN; ULUDAMAR, ERINC<sub>3</sub>; AYDIN, KADIR. **Effect of hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines**. International Journal Of Hydrogen Energy: Elsevier, Adana, p. 11366-11372. 11 ago. 2010.



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA



### DECLARAÇÃO

Certifico que o aluno **João Carlos Henrique Moreira**, autor do trabalho de conclusão de curso intitulado "**Análise teórica e experimental da redução de consumo de um motor de combustão interna do BAJA com uso de mistura gasolina-hidrogênio**", efetuou as correções sugeridas pela banca examinadora e que estou de acordo com a versão final do trabalho.

Ouro Preto, 17 de dezembro de 2018.

A handwritten signature in blue ink, reading 'Elisângela Martins Leal', is written over a horizontal line.

Profa. Dra. Elisângela Martins Leal

Orientadora