

# APLICAÇÃO VEÍCULAR DO GÁS HÍDROGÊNIO COMO AUXILIADOR DE COMBUSTÍVEL ALTERNATIVO

## VEHICULAR APPLICATION OF HYDROGEN GAS AS AN ALTERNATIVE FUEL AID

Raul Ferreira de Lira<sup>1</sup>, Mateus Henrique Silva Rodrigues<sup>2</sup>, Lauriane Gomes Santin<sup>3</sup>, Ariane Martins Caponi Lima<sup>4</sup>, Marinés Chiquinquirá Carvajal Bravo Gomes<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Graduação em Engenharia Mecânica/FACEG – rauldelira@yahoo.com.br

<sup>2</sup> Graduação em Engenharia Mecânica/FACEG – mateushenrique\_99@hotmail.com

<sup>3</sup> Professor do curso de Engenharia Mecânica/FACEG: lauriane\_santin@hotmail.com

<sup>4</sup> Professor do curso de Engenharia Mecânica/FACEG: ariane.lima@faceg.edu.br

<sup>5</sup> Professor do curso de Engenharia Mecânica/FACEG: mariaeroing@gmail.com

**Resumo:** A escassez dos recursos provenientes de combustíveis fósseis, alinhados as grandes quantidades de gases poluentes lançados na atmosfera estão cada vez mais em evidência de estudo acerca de novas tecnologias para amenizar o impacto ambiental causado, dentre elas, a utilização de combustíveis limpos e dispositivos que possam auxiliar na queima de combustíveis fósseis em motores de combustão interna. Este trabalho visa o estudo da obtenção do gás hidrogênio através da eletrólise aquosa, processo pelo qual é passado uma corrente elétrica pela água e obtém-se o hidrogênio quebrando a molécula da água (H<sub>2</sub>O) em suas partículas fundamentais hidrogênio (H<sub>2</sub>) e oxigênio (O), feito por meio de um protótipo de gerador de hidrogênio desenvolvido no centro tecnológico da Faculdade Evangélica de Goianésia e sua implementação em um motor de combustão interna ciclo Otto, para medir a influência do hidrogênio na combustão. Para realização dos testes foi utilizado uma motocicleta a qual foi acoplado o sistema de geração de gás HHO, ligado na bateria do veículo e o gás conduzido para o interior da câmara de combustão através da entrada de ar do motor. Verificou-se que houve um rendimento de cerca de 40% após a implementação do protótipo no motor do veículo, saindo de um consumo médio de 0,23 litros/hora para aproximadamente 0,14 litros/hora, tais resultados se originaram a uma rotação constante de 1500 rpm e uma massa de combustível aplicada de 0,05 litros. Tal percentagem aumentou quando modificados os parâmetros de rotação do motor, continuou se mostrando eficiente em cerca de 45% melhor em rotações por volta de 3000 rpm. Constatou-se que o hidrogênio produzido pelo gerador, atuando como um auxiliador de combustível (gasolina), quando injetado no motor, promoveram uma melhora econômica satisfatória.

**Palavras-chave:** Combustíveis fósseis; Eletrólise; Rendimento.

**Abstract:** The scarcity of resources from fossil fuels, in line with the large quantities of polluting gases released into the atmosphere, are increasingly evident in the study of new technologies to mitigate the environmental impact caused, among them, the use of clean fuels and devices that can assist in the burning of fossil fuels in internal combustion engines. This work aims to study the obtaining of hydrogen gas through aqueous electrolysis, a process by which an electric current is passed through water and hydrogen is obtained by breaking the water molecule (H<sub>2</sub>O) into its fundamental particles hydrogen (H<sub>2</sub>) and oxygen (O), made using a prototype hydrogen generator developed at the technological center of the Faculdade Evangélica de Goianésia and its implementation in an Otto cycle internal combustion engine, to measure the influence of hydrogen on combustion. To carry out the tests, a motorcycle was used to which the HHO gas generation system was coupled, connected to the vehicle's battery and the gas was led into the combustion chamber through the engine's air intake. It was found that there was a yield of around 40% after implementing the prototype in the vehicle's engine, going from an average consumption of 0.23 liters/hour to approximately 0.14 liters/hour. constant speed of 1500 rpm and an applied fuel mass of 0.05 liters. This percentage increased when the engine speed parameters were modified, and continued to be efficient at around 45% better at speeds around 3000 rpm. It was found that the hydrogen produced by the generator, acting as a fuel booster (gasoline), when injected into the engine, promoted a satisfactory economic improvement.

**Keywords:** Fossil fuels; Electrolysis; Performance.

## INTRODUÇÃO

A produção industrial e os padrões de vida de cada país estão diretamente relacionados ao consumo e produção de energia per capita, a economia do país também é baseada no acesso à energia [1]. E por isso, os estudos acerca da produção de energia faz parte da vida de toda a humanidade, de suas diferentes formas e conversões, esteve presente e foi de grande importância para evolução mundial, uma vez que, apesar de um conceito complexo, conseguiu ser compreendida e apresentadas de diversas formas tais quais, potencial, cinética, sonora e térmica.

A pesquisa por soluções energéticas que sejam limpas e sustentáveis tem sido uma das grandes preocupações do século XXI. De acordo com a Agência

Internacional de Energia (AIE), a matriz energética global está fundamentada em derivados de petróleo e apesar da aparente abundância desse recurso, o esgotamento das reservas mundiais pode acontecer. Este fato aliado ao pronunciamento da Agência Nacional de Petróleo, gás natural e biocombustíveis (ANP) que diz “o volume de petróleo produzido no mundo em 2018 aumentou de forma significativa”, contribui com o processo da procura por alternativas sustentáveis [2].

O crescente impacto ambiental resultado do excessivo consumo de combustíveis fósseis, somada a imensa demanda do uso de veículos e máquinas movidas a motor de combustão interna intensifica a busca por possibilidades viáveis de formas alternativas de

combustíveis renováveis. Nesta conjuntura, o hidrogênio surge como uma predileção promissora no âmbito de auxiliar a queima destes combustíveis fósseis de modo a amenizar os impactos causados, pois seu poder calorífico é maior do que outros combustíveis usados atualmente, por exemplo a gasolina e o metanol [3].

Os motores de combustão interna desempenham um papel de extrema importância em nossa sociedade, foi através deles que houve a impulsionamento tecnológica e o progresso econômico em geral. Porém, com o avanço, houve também a dependência do uso dos combustíveis fósseis que contribuiu significativamente para o envio de gases de efeito estufa na atmosfera e com isso gerando impactos ambientais severos. Em 2017 um estudo inédito lançado pelo Instituto de Energia e Meio Ambiente (IEMA), revela que os automóveis são responsáveis por 72,6% das emissões de gases efeito estufa, principais vilões do aquecimento global. Desde modo, o desequilíbrio ambiental cada vez mais acentuado e a temperatura média global aumentando atribui-se ao fato destas emissões poluidoras. Resultado disso são o degelo das calotas polares, desequilíbrio do regime pluviométrico, estações climáticas com características alteradas, elevação do nível dos oceanos, etc [4].

Diante dessa realidade, o hidrogênio passa a se apresentar como uma alternativa propícia, pois é possível produzi-lo por uma célula de hidrogênio e o tornar como combustível no processo de combustão, oferecendo um potencial significativo para redução das emissões de gases nocivos ao ambiente alinhado aos objetivos de sustentabilidade global [5]. Por esse motivo, o estudo da utilização do hidrogênio em motores de combustão interna será apresentado neste trabalho, de modo a demonstrar através de um protótipo de um kit gerador de hidrogênio, as vantagens de sua aplicação como auxiliador de combustível alternativo.

Prontamente ao protótipo construído, e sua implementação a um motor a combustão interna, será realizado estudos acerca de desempenho e autonomia, além

de uma análise econômica retratando os benefícios em sua utilização rotineira.

## REFERENCIAL TEÓRICO

A frota veicular atual em sua grande maioria utiliza motores de combustão interna que possuem o ciclo de combustão em quatro tempos que converte energia contida no combustível em movimento. Nikolaus Otto foi o responsável pela invenção deste tipo de veículo e graças a ele originou-se o nome “ciclo Otto” em sua homenagem [6].

Economia e durabilidade são conceitos de extrema importância quando se trata de fabricação de motores de combustão interna, é necessária uma alta resistência com o mínimo de custo possível, em relação ao mercado, pois influencia diretamente no valor de venda do veículo. O procedimento de combustão interna gerada pelos motores produz trabalho através da queima de combustível, processo que envolve o aumento da pressão e pela reação de combustão da mistura ar e combustível gerando movimento de rotação do motor [7].

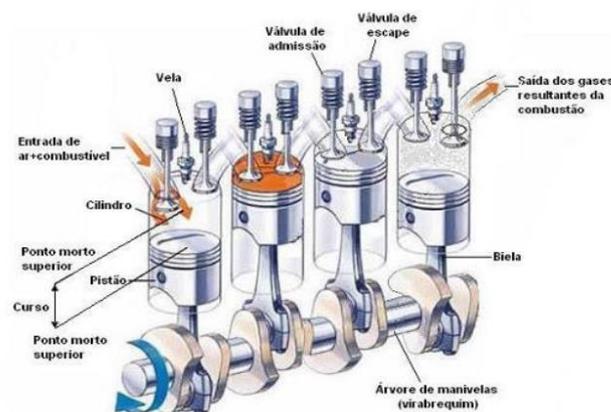


Figura 1 – Estrutura do motor de quatro tempos [7].

A construção dos motores na década de 80 era geralmente feito de aço e ferro fundido. Mas, com a evolução tecnológica e visando a economia e durabilidade esses mesmos motores estão sendo desenvolvidos de aço e alumínio, por serem materiais leves e de difícil oxidação. [6].

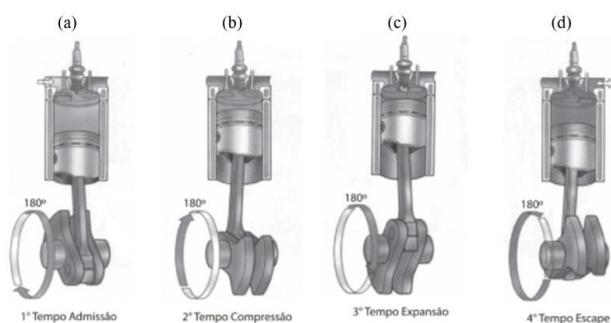
A realização de trabalho feita por um motor ocorre de forma intermitente ou interruptamente, passa por uma série fechada de processos termodinâmicos, denominado

de “tempos”. Desempenhando este processo repetidamente a cada estado neste ciclo, ressaltando que no motor real, este ciclo intercorre perdas, portanto não é um ciclo totalmente fechado.

**Tabela 1** – Diferenças dos motores 4 tempos e 2 tempos [8].

Diferenças	4T	2T
Tempos x Ciclo Útil	2 voltas manivela	1 volta manivela
Fator de tempos	$\chi = 2$	$\chi = 1$
Sistema mecânico	Mais complexo	Mais simples Ausência de: Válvulas Eixo de comando
Alimentação	Boa	Ruim Perda de mistura no escape Presença de lubrificante
Lubrificação	Boa	Ruim Presença de combustível

Primordialmente, este trabalho dará enfoque ao motor de quatro tempos ciclo Otto, os processos que ocorrem nos motores a combustíveis fósseis de quatro tempos são representados pelas figuras:



**Figura 2** – Processos dos 4 tempos dos motores a combustão interna [8].

A figura 2 representa os quatro tempos de funcionamento do motor ciclo Otto, tal qual, a admissão da mistura: 1º tempo, processo que, ocorre a abertura da válvula de admissão e a velocidade de avanço da mistura dos fluidos é praticamente igual a velocidade do pistão. Com isso, a pressão é quase constante e o volume aumenta: processo isobárico (A → B).

Em sequência, a compressão da mistura: 2º tempo sequência, o trabalho do pistão é convertido totalmente em energia interna da mistura dos fluidos que estão com pressão e temperatura elevadas. Neste ponto produz uma compressão adiabática, já que processo é rápido e

praticamente não acontece troca de calor. Então o volume diminui a medida que a pressão e a temperatura aumentam (B → C) [6].

Por fim, ocorre a explosão da mistura: 3º tempo, neste segmento ocorre a explosão e não há variação de volume, pois a reação química é muito rápida (não há conseqüentemente o movimento do pistão). Também advém um enorme aumento da temperatura e pressão (C → D). Em seguida, na explosão (D → E), o pistão desce com extrema rapidez, não ocorrendo assim troca de calor. Em decorrência disso a expansão é considerada adiabática [6]. Por fim, acontece o escape dos gases: 4º tempo.

Por outro lado, um dos elementos mais abundante da natureza, de menor massa e menor densidade, o hidrogênio é um caso atípico. Estima-se que o hidrogênio é o nono elemento mais abundante do planeta, e o primeiro do universo, presente em cerca de 75% da massa de toda matéria [9]. Apresenta-se em sua maior quantidade em compostos químicos como, por exemplo, hidrocarbonetos e água e não apresenta similaridade com características de nenhuma das famílias periódicas, não pertencendo a nenhum grupo ou família da tabela. Sua forma de gás é excepcionalmente rara na atmosfera, uma vez que sua pequena densidade o faz escapar facilmente da atmosfera. Este que, contém apenas um próton e um nêutron em seu núcleo, e somente um elétron orbitando sua volta [10].

Sua estabilização ocorre quando recebe um elétron na camada de valência. Para isso é necessário realizar ligações iônicas ou covalentes, portanto existem duas maneiras para se estabilizar. A primeira é por meio de ligação iônica, interagindo exclusivamente com metais, recebendo um elétron de um elemento da família ou grupo dos metais. E efetuando a ligação covalente, interagindo com ametais ou com si próprio, realizando apenas ligação simples.

O hidrogênio pode ser comercialmente produzido em sua forma molecular (H<sub>2</sub>) a partir de diversas formas, entre elas gaseificação do carvão, decomposição termoquímica da água e foto-eletrolise solar [11].

Entretanto a forma mais interessante de produção e foco de estudo deste projeto é a eletrólise da água.

Suas aplicações abrangem diversas áreas distintas, sendo além da utilização como forma auxiliadora de combustíveis fósseis em motores a combustão interna, também em processos especiais de soldagem, como por exemplo o processo oxídrico que envolve hidrogênio atômico, conjuntamente empregado na indústria de corantes e combustíveis de foguetes [12].

Por conter excelentes propriedades em comparação a outros tipos de combustíveis, por exemplo a gasolina, estima-se que um quilo de hidrogênio é equivalente a cerca de 2,8 kg de gasolina, neste contexto é considerado por muitos o “combustível ideal” [13]. Seu poder calorífico é substancialmente superior como demonstrado na tabela 2.

**Tabela 2** – Poder calorífico dos combustíveis [13].

COMBUSTÍVEL	PODER CALORÍFICO (kJ/kg)
Gasolina	47800
Óleo Diesel	44700
Álcool combustível	27200
Gás natural	49000
Querosene	45000
Hidrogênio	142000

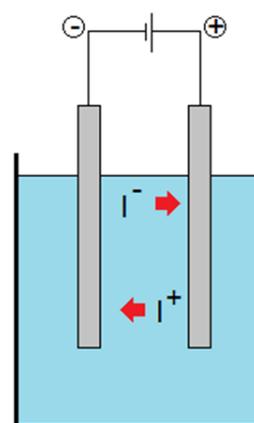
O elemento que possui a maior energia por unidade de peso é o hidrogênio, comparativamente com outros combustíveis, a quantidade de energia liberada durante sua reação é de cerca de 2,5 vezes maior do que qualquer outro combustível a base de hidrocarbonetos, por exemplo a gasolina. Dessa forma, visando satisfazer um consumo energético, a massa de hidrogênio utilizada será cerca de um terço da parte da massa de um hidrocarboneto para mesma quantidade de energia liberada [9].

A eletrólise é o processo de divisão de um elemento químico por meio da eletricidade, de forma a ocorrer a decomposição do composto em íons que em sequência, com a passagem da corrente contínua na solução, obtêm-se os elementos químicos separados. Tal método é reconhecido como um processo de oxirredução, e também um processo químico não-espontâneo, isto é, necessita de energia externa para sua realização [14].

Na perspectiva de geração de hidrogênio de forma mais eficiente, o conceito de eletrólise da água surge como uma opção dinâmica, pois através deste processo é aplicado uma corrente elétrica em eletrodos metálicos, preferencialmente feitos de aço inox, devido sua maior resistência a corrosão, são submersos em uma solução aquosa eletrolítica, esta que tem como encargo o aumento da condutividade elétrica da água, e assim facilitando o processo da separação da molécula de  $H_2O$  em seus elementos fundamentais. O nome atribuído aos equipamentos que geram tal metodologia é “células eletrolíticas” [15].

Também conhecida como “células de hidrogênio”, seu funcionamento é fundamentado através do processo de eletrólise da água, e tem como objetivo a produção do gás chamado por alguns autores de gás HHO, mistura advinda da separação das moléculas de água, e principal forma de obtenção deste gás utilizado como combustível [16].

O processo da eletrólise aquosa pode ser exemplificado através da figura 3, mostrando como ocorre a movimentação dos íons por meio dos eletrodos metálicos submersos na solução eletrolítica, sendo os íons negativos reagindo no polo positivo ocorrendo a oxidação, e os íons positivos reagindo no eletrodo positivo dando origem ao processo de redução.



**Figura 3** – Funcionamento da eletrólise aquosa.

O processo da eletrólise abre alternativas para diversos experimentos, além de criações de métodos e projetos visando obter-se hidrogênio em forma gasosa e

aplicá-lo em diversificados esquemas. Dentre a enorme gama de estruturas advindas desta tecnologia, está o gerador de hidrogênio, dispositivo que, quando bem contruído com geometria das peças alinhadas, separação entre os eletrodos suficiente e reativos que integram a água utilizada de qualidade, consegue uma geração adequada e contínua [17].

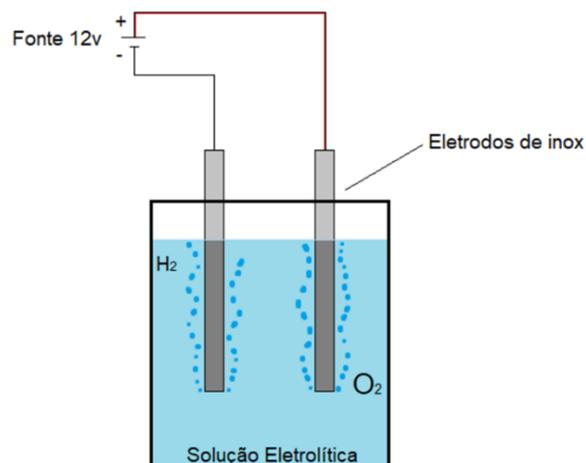


Figura 4 – Esquema do gerador de hidrogênio por eletrólise.

A utilização de uma fonte de energia para a realização do experimento é necessária devido o processo da produção do gás HHO ser não-espontânea. Em decorrência disso, o gerador utilizará energia provida de uma bateria que esteja conectada a um gerador, de forma a não deixar que o processo sofra variações por causa de seu descarregamento. Por exemplo, o alternador veicular, que gera sua própria energia para o automóvel [18].

O uso do hidrogênio é observado há anos como uma alternativa sustentável de combustível para motores de combustão interna, essencialmente em relação aos automóveis. Alguns fatores como, excessivo preço do petróleo, emissão de gases poluentes, haja vista que, as leis ambientais estão mais severas, são alguns dos motivos pelos quais o uso do hidrogênio está tomando proporções interessantes e vantagem para estudá-lo.

Em 2015, a montadora Toyota lançou o primeiro carro da série a receber um motor movido totalmente a hidrogênio, mostrando que as pesquisas em relação ao uso de hidrogênio veicular estão aos poucos tomando lugar de notoriedade no mundo [19]. Apesar de uma tecnologia ainda pouco difundida, é comum nos países europeus,

encontrar veículos com aplicação de células de hidrogênio agindo como auxiliadora, de forma simples e com poucas modificações [20].

Ainda que, motores de combustão interna movidos totalmente a gás hidrogênio, não seja um conceito muito utilizado no mundo atualmente, a utilização deste gás como forma auxiliadora na queima de combustíveis fósseis pode ser facilmente encontrada. A facilidade de instalação de kits geradores de hidrogênio em veículos está crescendo, principalmente pelo atrativo econômico gerado. Além disso, o fato de não precisar de tanque de armazenamento para o gás devido toda sua produção ser diretamente usada na queima do combustível original do veículo; a alimentação ser cedida exatamente pela própria bateria veicular, também a questão da segurança chama atenção, pois, como toda produção de hidrogênio é 100% utilizada, não há riscos causados pelo armazenamento do gás comprimido [21].

Estudos apontam que, a aplicação do gás HHO em motores de combustão interna tornaram-se favoráveis, desde que, utilizando métodos de produção e injeção direta do gás no sistema original de carburação do motor, quando aliado ao combustível original, efetua-se uma apreciável queda no consumo fóssil, contanto que, recorra a mesma rotação nos casos de funcionamento [22].

O hidrogênio é extremamente inflamável no ar, entre 4% e 75% por volume de ar. A energia necessária para inflamá-lo é muito pequena e, em algumas condições, pode ocorrer auto inflamação [23]. Portanto deve operar com excesso de ar, tanto para medida de segurança, como para ocorrer uma combustão completa, melhorando a eficiência e diminuindo os picos de temperatura gerados para explosão. Outro fato é que operando com o excesso ocorre uma drástica redução das emissões de oxido de nitrogênio (NOx), que apesar de impactar de forma mais amena, segundo o órgão brasileiro que dita os padrões de qualidade do ar no que diz respeito a poluentes como o dióxido e monóxido de nitrogênio (CONAMA), por meio das resoluções 003/1990 e 08/1990 afirmam que: apesar de produzir efeitos mais indiretos e de longo prazo, as

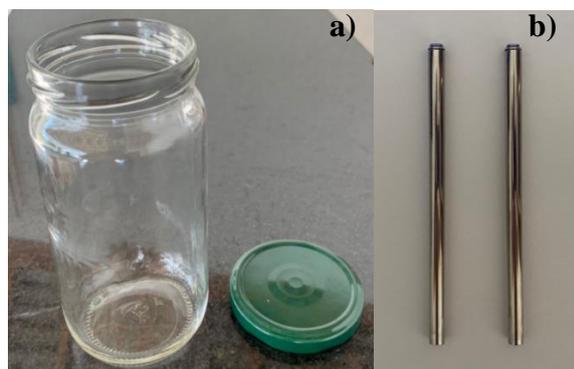
emissões de NOx são nocivas à saúde humana. Conseqüentemente, a mistura deve ser feita de forma eficiente de modo a evitar estes problemas e impedir misturas pobres [24].

## METODOLOGIA

O protótipo foi desenvolvido e montado primordialmente no centro tecnológico da Faculdade Evangélica de Goianésia.

A eletrólise é o processo em que acontece a quebra da molécula de água  $H_2O$ , quando recebe uma corrente elétrica, transformando-a em um composto chamado Oxihidrogênio (HHO). Tal reação química, apesar de não espontânea, é possível devido aos eletrodos existentes na solução eletrolítica que neste caso foi utilizada água salinizada composta por: água +  $NaHCO_3$ , solução por onde os elétrons irão transitar, sendo que em um eletrodo provocara a oxidação (ânodo) e no outro a redução (cátodo) [25].

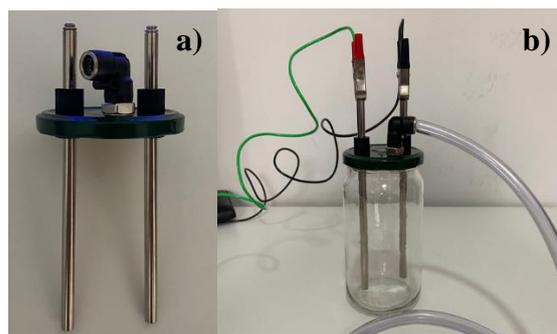
O protótipo foi construído tendo como base um recipiente cilíndrico de vidro com tampa capaz de vedar a saída de ar, fato necessário pois não é interessante haver perda de gases internos, uma vez que, a produção de hidrogênio será realizada dentro do recipiente. Em seguida, fora feitos as modificações na tampa do projeto, sendo que, é nela que são fixo todos os componentes que realizam a eletrólise.



**Figura 5** - Partes do protótipo: (a) Recipiente e tampa do protótipo, (b) Hastes de aço inox AISI 304.

Para dar continuidade ao processo da eletrólise, junto ao conjunto do recipiente foi instalado duas hastes compostas de aço inox AISI 304.

Estas que, ficam submersas na solução eletrolítica, neste caso composta por água ( $H_2O$ ) + bicarbonato de sódio ( $NaHCO_3$ ), que fazem o papel do cátodo e ânodo responsáveis pela oxidação e redução não espontâneas no processo da quebra da molécula da água dando origem aos gases hidrogênio e oxigênio. Além da válvula e mangueira para captura dos gases e condicionamento em outro recipiente através do borbulhador.



**Figura 6** - Montagens dos componentes: (a) Protótipo montado com aparatos para eletrólise, (b) Protótipo montado

Na figura 7 observa-se todo aparato responsável pela geração do gás HHO, as hastes presas por suportes isolantes de borracha, de forma a isolar do composto metal da tampa. Além da curva rosqueada proveniente de um sistema pneumático, tendo como objetivo canalizar o gás produzido para mangueira e posteriormente ao borbulhador.

Em sequência, foi adicionado a solução eletrolítica no recipiente, composta por água destilada +  $NaHCO_3$ , e os eletrodos foram conectados aos fios positivo e negativo que, após será conectado na fonte de energia. Também foi incluído ao protótipo, a mangueira a qual conduzirá o gás para os devidos lugares de realização dos testes.

Finalizado a parte estrutural do gerador de hidrogênio, foi realizado um teste de verificação de produção do gás HHO, de forma a concretizar as que o estudo feito foi aplicado de forma correta ao projeto. Inicialmente, os testes foram realizados com uma bateria de moto como fonte de energia para o protótipo.

A fonte utilizada para realização dos testes foi uma bateria de motocicleta Heliar, de 12 volts – 5

Amperes, de forma a deixar a experiência com os parâmetros reais ao uso em veículos, e para manter os testes com menor índice de variação possível, todo o processo foi monitorado por um multímetro, de forma a acompanhar as variações de tensão e se necessário a repetição do teste.

Ao ligar na fonte, a corrente elétrica passará pelos eletrodos que estão na solução composta por íons, sendo assim, os elétrons são transportados e ocorre a quebra da molécula de água  $H_2O$ , transformando em dois gases, hidrogênio ( $H_2$ ) e oxigênio ( $O$ ), que são observados através de pequenas bolhas que formam em volta dos eletrodos, estas que, sobem até a parte superior do recipiente e são conduzidas através da saída pela mangueira em direção ao borbulhador, este que tem a função do intermédio do transporte do gás oxihidrogênio do gerador até sua inserção na admissão do motor junto a entrada de ar.

A produção do gás HHO é conduzida pela mangueira do gerador até o borbulhador, componente de extrema importância para o projeto, tanto no quesito segurança, sendo que, o acoplamento não seja de ligação direta entre gerador e entrada de ar do motor, o borbulhador serve como um intermediador entre as duas partes. Também atua como um verificador de produção de gás, uma vez que é possível observar a geração do gás passando pela água na forma de bolhas que sobem em direção a superfície do recipiente e então é conduzido pela mangueira até a entrada de ar do veículo.



**Figura 7** - Processos com o protótipo: (a) Teste com o gerador de hidrogênio, (b) Borbulhador.

Através da segunda mangueira acoplada no borbulhador a mistura HHO é conduzida para o carburador do motor de combustão interna. A injeção do gás se deu

por meio da entrada de ar, uma vez que, não passando pelos filtros evita perdas ao ambiente.

Para análise da atuação do gás hidrogênio nos motores de combustão interna, foi realizado testes práticos em uma motocicleta modelo HONDA Fan 160cc ano 2020, onde o protótipo foi instalado na entrada de ar localizada na lateral direita do veículo, acoplando a mangueira de saída do gás HHO diretamente na admissão de ar para o cilindro de combustão interna. Como mostrado na figura 8, o gerador junto ao borbulhador ficaram em uma bancada ao lado do motor de forma que as mangueiras pudessem ser acopladas no veículo e a parte elétrica ligada ao conjunto da bateria.

Nesta fase, para certificar que todo o conjunto mecânico está regulado e também para método de comparação de resultado, foi necessário a realização de testes sem a implementação do conjunto gerador de hidrogênio, além de definir parâmetros para os testes. Inicialmente foi realizado duas baterias de cinco testes sem adição do gás HHO, nestes testes foram usados como critério o tempo de funcionamento do motor em relação a uma massa de combustível constante, os parâmetros definidos na primeira bateria de teste foram, rotação constante a 1500 rpm, marcha em neutro e volume de combustível para cada teste de 0,05 litro.



**Figura 8** – Gerador de hidrogênio e borbulhador acoplado ao veículo teste.

Na segunda bateria de testes, os parâmetros de rotação do motor foram alterados, além da mudança de marcha do sistema, adotou-se rotação constante de 3000

rpm, engate da 3ª marcha e massa de combustível utilizada de 0,1 litro. Para que todo o conjunto do veículo e protótipo funcione de maneira correta, foi colocado a motocicleta em um suporte para que a roda gire livremente enquanto é realizado o teste. Dessa forma, foi possível realizar as medições mesmo com o veículo parado, em modo estacionário, facilitando a dinâmica da bateria de testes.

Tendo em vista que todos os testes foram realizados na cidade de Goianésia-Go, situada a cerca de 641 metros de altitude em relação ao nível do mar (Cidade Brasil, 2023), pode-se considerar uma leve exposição a condição de ar rarefeito e alteração de oxigênio devido a pressão atmosférica. Entretanto, são fatores que não colocam em risco a autenticidade do experimento uma vez que, todos os testes foram no mesmo local. Também foi utilizado toda a massa de combustível fóssil (gasolina) adquiridos no mesmo posto de combustível, afim de reduzir interferências, e todos os testes realizados no mesmo dia, com temperatura ambiente constante.

Sendo assim, a segunda fase de testes iniciou-se com o acoplamento do projeto de geração de hidrogênio no motor. A mangueira por onde o gás HHO é expelido foi acoplada na entrada de ar do motor do veículo de forma que o gás entre no sistema junto com ar, uma vez que, a entrada de ar não foi totalmente obstruída sendo possível a admissão do gás e do ar ambiente para a câmara de combustão do motor. E então, duas novas baterias de testes foram realizadas, levando em consideração todos os parâmetros já pré-estabelecidos na primeira fase dos testes. Com isso, tornou-se possível observar um expressivo aumento no tempo de funcionamento do motor com a mesma quantidade de combustível utilizado, isto é, foi identificado uma queda no consumo estimado do veículo após aplicação do gás HHO no sistema.

Tanto com a rotação baixa, quanto em rotação mais elevada identificou-se uma melhora no motor do veículo após o implemento do gerador de hidrogênio. Além disso, vale destacar que, por se tratar de um sistema aberto, não é possível afirmar que toda a produção do gás estava sendo destinada a combustão, uma certa porcentagem é

dissipada para o ambiente. Ainda sim, obteve-se resultados satisfatórios, e é possível dizer que em um ambiente em perfeitas condições, e sem perdas, a porcentagem do rendimento obtido pode ser ainda maior.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na tabela 3 apresentada a seguir é possível observar a primeira rodada de testes realizados sem adição do gás HHO no sistema, ao qual foi obtido uma média de tempo de funcionamento de 13min e 14seg, e um consumo aproximado de 0,23 litros/hora. Nota-se também, um leve aumento no tempo de funcionamento ao decorrer dos testes, devido ao motor se aquecer e trabalhar na sua temperatura ideal de funcionamento.

**Tabela 3** – Testes realizados sem adição do gás hidrogênio no motor.

RPM	Marcha	VOLUME de Combustível (L)	Tempo de Funcionamento
1500	N	0,05	11:25
1500	N	0,05	10:36
1500	N	0,05	12:21
1500	N	0,05	16:14
1500	N	0,05	15:31
			13:14

Ao término da segunda bateria de testes, foi observado um aumento expressivo no tempo de funcionamento do motor com a mesma quantidade de combustível gasto, constatando assim, a eficácia do protótipo em relação a melhora do desempenho observado. O tempo médio de funcionamento foi de 21min e 26seg, e o consumo aproximado foi de 0,14 litros/hora. Resultados que renderam uma melhora de cerca de 60% em relação aos primeiros testes sem aplicação do gás HHO. É necessário salientar que as realizações destes testes foram em rotação baixa e marcha em Neutro, portanto o consumo nestas condições é baixo.

Em seguida, ao acoplar o gerador de hidrogênio no motor do veículo e realizar novos testes com os mesmos parâmetros de rotação constante, mesma marcha e mesma massa de 0,05 litros de gasolina, obteve-se os resultados apresentados abaixo na tabela 4.

**Tabela 4** – Testes realizados com adição do gás hidrogênio no motor.

RPM	Marcha	Volume de Combustível (L)	Tempo de Funcionamento
1500	N	0,05	17:40
1500	N	0,05	22:23
1500	N	0,05	20:36
1500	N	0,05	25:02
1500	N	0,05	24:13
			21:26

Em seguida, na tabela 5, foi obtidos os resultados dos testes feitos alterando os parâmetros de rotação e marcha. Primeiramente, a rotação subiu para 3000 rpm, e engate da 3ª marcha. Assim como na primeira aferição, foi realizado cinco testes sem a aplicação do gás hidrogênio e com massa de combustível de 0,1 litros, o aumento do volume de combustível foi devido ao maior consumo do motor, ao passo que sua rotação também aumentou. Foram obtidos os seguintes valores.

**Tabela 5** – Testes realizados sem adição do gás hidrogênio no motor.

RPM	Marcha	Volume de Combustível (L)	Tempo de Funcionamento
3000	3	0,1	06:24
3000	3	0,1	05:18
3000	3	0,1	05:03
3000	3	0,1	06:45
3000	3	0,1	04:04
			05:31

Nesta etapa a média de tempo de funcionamento do motor foi de 5min e 31seg, e o consumo médio foi de 1,2 litros/hora. Em seguida, novamente o acoplamento do gerador de hidrogênio é colocado no motor e realizado novos testes, como mostrado na tabela 6.

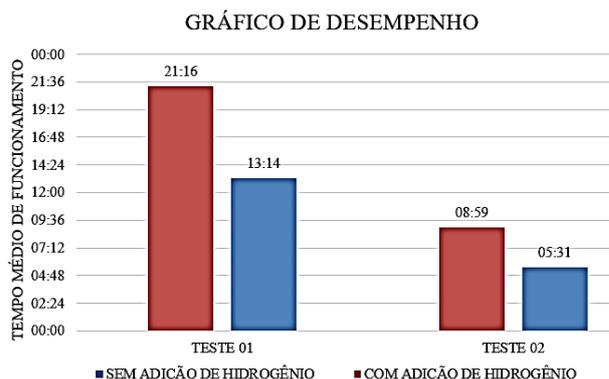
**Tabela 5** – Testes realizados com adição do gás hidrogênio no motor

RPM	Marcha	Volume de Combustível (L)	Tempo de Funcionamento
3000	3	0,1	08:45
3000	3	0,1	07:19
3000	3	0,1	10:02
3000	3	0,1	09:14
3000	3	0,1	09:36
			08:59

Em função do aumento de rotação, houve também um aumento de consumo, entretanto pode-se observar que

ainda sim, uma mudança satisfatória no que se refere ao rendimento aconteceu, uma vez que a média de tempo de funcionamento foi de cerca de 9 minutos, e consumo médio ficou em cerca de 0,66 litros/hora. Rendimento de cerca de 45% a mais com o uso do gás hidrogênio.

A figura 9 representa os gráficos ilustrando a diferença de tempo de funcionamento do motor em relação ao uso do hidrogênio no motor do veículo.

**Figura 9** – Gráfico de comparação do tempo de funcionamento.

Os resultados indicam que, tanto em baixa rotação, e mesmo após o aumento, obteve-se uma melhora no desempenho do motor com a utilização do gás hidrogênio como auxiliador na queima do combustível fóssil, fato que, é economicamente viável a utilização do gerador de HHO, tendo em vista a baixa no consumo.

Em relação as vantagens e desvantagens do uso é visto que, em relação principalmente ao quesito economia e baixa de consumo, é viável a utilização. Ao passo que, o gerador deve estar devidamente regulado, juntamente com o motor, e como expresso na tabela 3, trabalhar nas temperaturas ideais do motor para aumento de sua performance. As desvantagens pairam sobre a questão da manutenção, uma vez que, as hastes de inox gradativamente com o tempo vão se desgastando, sendo necessário a troca. Como também, a troca da solução utilizada ao decorrer do uso.

O projeto se delimita aos resultados colhidos com o veículo em regime estacionário, sendo possível variar quando colocado em condições de uso real, devido ao aumento do esforço do motor em relação ao tipo de pista, relevo e condições de pilotagem.

## CONCLUSÃO

Através deste trabalho foi possível entender a importância da utilização de combustíveis alternativos afim da diminuição do impacto ambiental causado pela queima de combustíveis fósseis. E observar que o Hidrogênio é um elemento que ainda demanda bastante estudo acerca de sua utilização em motores de combustão, mas ainda sim, que seu uso é de grande valia tanto no âmbito econômico, como também sustentável.

Sendo assim, os resultados colhidos através dos testes realizados, demonstram que a eletrólise da água provindos do gerador de hidrogênio construído, apesar de não conseguir ser medido sua produção média de geração de gás, foi monitorado a tensão e amperagem aplicadas ao protótipo, fazendo assim, uma produção constante, e que trouxe benefícios ao veículo de combustão interna.

Ao analisar os dados obtidos é possível concluir que após a aplicação do gás HHO em um motor de combustão interna houve um aumento de rendimento de cerca de 40% em baixa rotação de 1500 rpm, e massa de combustível de 0,05 litros. E cerca de 45% quando houve o aumento destes parâmetros para 3000 rpm e 0,1 litros de combustível. Valores que justificam economicamente sua utilização como auxiliador na queima de combustível fóssil.

Desta forma, para continuação das pesquisas acerca deste projeto, é possível aprofundar os estudos para redimensionamento do protótipo afim de torna-lo menor e ocupar menos espaço no veículo, para então ser instalado, possível análise na redução da oxidação das hastes de inox, ou a troca para outro material, tornando sua manutenção mais duradoura. Além disso, há uma limitação na utilização deste projeto em motores de combustão interna ciclo Otto, sendo possível a busca por soluções para utilização em outros tipos de motores, por exemplo, motores a Diesel.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. GOLDEMBERG J., **Energia e desenvolvimento**. Estud. av. (online). vol.12, n.33, pp. 7-15. ISSN 0103-4014, (1998).
2. Agência Internacional de Energia (**International Energy Agency**) – <www.iea.org>. Acesso em: 07 Jan 2021.
3. PADILHA, J. C. et al. **Produção de hidrogênio por eletrólise da água usando líquidos iônicos como eletrólitos**. Porto Alegre: Instituto de Química, 2006.
4. Azuaga D; **Danos Ambientais Causados por Veículos Leves no Brasil** (Rio de Janeiro) 2000.
5. SMUTZER, C. **Application of Hydrogen Assisted Lean Operation to Natural Gas-Fueled Reciprocating Engines** (HALO). Cambridge, Mass., 2006. Acesso 21 Fev 2021.
6. NASCIMENTO, JOEL H.S.; **Estudos dos processos físicos envolvidos nos motores que utilizam como combustível álcool e gasolina (ciclo otto)**, Universidade Católica de Brasília, 2008.
7. MACHADO, F. G. **ANÁLISE DE MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA A GÁS HIDROGÊNIO** – USP 2014. Acesso em 20 Out 2023.
8. BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. Editora Blucher, 2018. [Minha Biblioteca]. Acesso em: 19 Set 2023.
9. SANTOS, F. M. S. M. dos; SANTOS, A. C. M. dos. **O combustível hidrogênio**. Viseu, PO: Instituto Politécnico de Viseu, 2005.
10. FEITOSA, Edinilza M. A.; BARBOSA, Francisco G.; FORTE, Cristiane M. S. **Química Geral I**. Ed. 3. Fortaleza-Ceará: EdUECE, 2016, p. 136. Acesso 20 Out 2023.
11. SARAVANAN, N; **International Journal of hydrogen energy** - 2008 - <www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0360319908000025> Acesso em: 16 Jan 2021.

12. MEYER, S. A. **Hydrogen gas fuel and management system for an internal combustion engine utilizing hydrogen gas fuel.** WO 92/08046. Grove City, OH, 1992. Acesso 22 Out 2023.
13. NADALETI, Willian César. **APROVEITAMENTO DE BIOGÁS, HIDROGÊNIO E GÁS DE SÍNTESE NO SETOR DE TRANSPORTE PÚBLICO E AGROINDUSTRIAL DE ARROZ:** estudo de potencial energético de resíduos e emissões de poluentes. 2017. 235. Grau de Doutor em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2017. Acesso 22 Out 2023.
14. BIANCHI, J. C. A.; ALBRRECHT, C. H.; MAIA, D. J. **Universo da química: ensino médio: volume único.** 1. Ed.- São Paulo: FTD, 2005.
15. LONGO, M. A. V.; LAZZARIN, N.; MIGUEZ, T. A. **Produção biológica de hidrogênio.** Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Engenharia Química e Engenharia de Alimentos, 2008.
16. YILMAZ, A. C. **Effect of Hydroxy (HHO) gas addition on performance and exhaust emissions in compression ignition engines.** *International Journal of Hydrogen Energy*, Amsterdam. 2010. Acesso em 19 Out 2023.
17. PEREIRA, Larissa Antônia. **Viabilidade na produção de hidrogênio através da reação entre o alumínio e a água em meio alcalino,** 2017. Acesso em 20 Out 2023.
18. ANTUNES, Edir Guilherme. PENTEADO, Felipe Cardoso. GIBIN, Renan. **ESTUDO E EXPERIMENTO SOBRE KIT GERADOR DE HIDROGÊNIO APLICADO NO MOTOR CICLO OTTO.** FATEC, Santo André, p.69, 2017. Disponível em: <<http://fatecsantoandre.edu.br/arquivos/TCC478.pdf>>. Acesso em: 20 Out 2023.
19. TOYOTA – **Um inovador automóvel a hidrogênio.** 2015 <<https://www.toyota.pt/carros/mirai>> Acesso em 21 Out 2023.
20. SIMON, J. M. Guidelines for use of hydrogen fuel in commercial vehicles. FMCSA-RRT-07-02. Washington, DC: U.S. Dept. of Transportation, Federal Motor Carrier Safety Administration, Office of Analysis, Research and Technology, 2007. Acesso 14 Out 2023.
21. SEQUEIRA, C. A. C. **Hydrogen, the ultimate clean fuel.** Ciência e Tecnologia dos Materiais, Lisboa, 2009. Acesso em 19 Out 2023.
22. BARI, S.; ESMAEIL, M. M. **Effect of H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub> addition in increasing the thermal efficiency of a diesel engine.** Fuel, Amsterdam, 2009.
23. RODRIGUES, E. T. E. – **O hidrogênio como combustível.** 2008. Acesso em 25 Out 2023.
24. DAMASCENA, Pedro J. Vieira; e GOÉS, Vítor Zonta; **Viabilidade Técnica da Utilização de Hidrogênio Produzido “IN SITU” em Motores de Combustão Interna** – Universidade Federal do Espírito Santo (2013).
25. FERNANDES, A. L. et al. **Desenvolvimento de uma Célula Eletroquímica de Desprendimento de Hidrogênio (H<sub>2</sub>) em Meio Aquoso para Alimentar um Motor do Tipo Ciclo Otto.** Fundação Ituverava, São Paulo, 2018. Acesso em 15 Out 2023.