



Guilherme Rossi Hupfer

**SISTEMA DE INJEÇÃO DE HIDROGÊNIO GASOSO EM MOTOR DE
COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO**

Horizontina-RS

2024

Guilherme Rossi Hupfer

**SISTEMA DE INJEÇÃO DE HIDROGÊNIO GASOSO EM MOTOR DE
COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO**

Projeto do Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para a o Trabalho Final de Curso na Engenharia Mecânica da Faculdade Horizontina, sob a orientação do Prof. Dr. Augusto Cesar Huppes da Silva

Horizontina-RS

2024

**FAHOR - FACULDADE HORIZONTINA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova o trabalho final de curso

**SISTEMA DE INJEÇÃO DE HIDROGÊNIO GASOSO EM MOTOR DE
COMBUSTÃO INTERNA CICLO OTTO**

**Elaborada por:
Guilherme Rossi Hupfer**

Como requisito parcial para a obtenção do grau de Bacharel em
Engenharia Mecânica

Aprovado em: 13/12/2024
Pela Comissão Examinadora

Prof. Dr. Augusto Cesar Huppés da Silva
Presidente da Comissão Examinadora - Orientador

Prof. Dr. Rafael Luciano Dalcin
FAHOR – Faculdade Horizontina

Prof. Dr. Geovane Webler
FAHOR – Faculdade Horizontina

**Horizontina - RS
2024**

DEDICATÓRIA

À minha família, por sua capacidade de acreditar em mim e investir em mim. Mãe, seu cuidado e dedicação foi que deram em alguns momentos, a esperança para seguir. Pai, sua presença significou segurança e certeza de que não estou sozinho nessa caminhada.

AGRADECIMENTO

A todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação, pelo auxílio, oportunidades de desenvolvimento pessoal e profissional, e pela motivação, o meu muito obrigado.

“A mente que se abre para uma nova ideia
jamais voltará ao seu tamanho original”. (Albert
Einstein)

RESUMO

Este trabalho investiga a viabilidade do uso do hidrogênio como combustível alternativo em motores de combustão interna, tendo como objetivo o estudo e desenvolvimento de um sistema de admissão de hidrogênio através de uma célula de eletrólise, visando o funcionamento de um motor utilizando apenas o gás hidrogênio como combustível. A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado a busca por fontes de energia sustentáveis. O hidrogênio, por sua abundância e sua capacidade de ser produzido de maneira limpa através da eletrólise da água, utilizando energia de fontes renováveis, apresenta-se como uma alternativa promissora. Os testes foram realizados em uma motocicleta Roadster Cagiva, onde foi feita a integração da célula ao sistema de admissão do motor. Inicialmente, a célula foi alimentada por uma bateria, porém o motor apresentou falhas devido ao consumo elevado de energia da célula, que resultou na parada forçada do motor. Ao utilizar uma bateria externa de maior capacidade, o motor conseguiu operar em marcha lenta, consumindo o hidrogênio gerado. As tentativas de operar o motor exclusivamente com hidrogênio foram realizadas, porém a quantidade de gás gerada não foi suficiente para mantê-lo funcionando. A célula utilizada não teve capacidade para gerar hidrogênio suficiente para manter o motor em funcionamento, mesmo que em baixas rotações, onde foi possível observar que a mesma possui pouca área de contato para o processo de eletrólise, e então através de cálculos pode-se observar a necessidade de uma célula com uma área até 75 vezes maior para suprir a necessidade.

Palavras-chave: Hidrogênio. Eletrólise. Motor de combustão interna. Célula de eletrólise. Combustível. Sustentabilidade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz energética mundial 2021	16
Figura 2 - Matriz Energética Brasileira 2023	16
Figura 3 - Ciclo de funcionamento de um motor de ciclo Otto.....	20
Figura 4 - Fluxograma de atividades	28
Figura 5 - Componentes da célula eletrolítica	31
Figura 6 - Cátodo, ânodo e chapas de contato	33
Figura 7 - Célula eletrolítica abastecida	33
Figura 8 - Motocicleta preparada utilizada no experimento.....	34
Figura 9 - Célula durante a operação de eletrólise.....	38
Figura 10 - Célula em operação com a bateria externa	39
Figura 11 - Alteração de coloração devido a reação do processo: (a) célula montada ainda com água e catalizador; (b) célula desmontada;	44

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Comparativo de temperatura de ignição de combustíveis	19
Quadro 2 - Comparação da octanagem de combustíveis.....	19
Quadro 3 - Especificações técnicas do motor utilizado no experimento	29
Quadro 4 - Consumo elétrico da célula.....	39
Quadro 5 - Cálculos de produção de hidrogênio	41

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 TEMA	11
1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA.....	12
1.3 PROBLEMA DE PESQUISA	12
1.5 OBJETIVOS	13
1.5.1 Objetivo geral	13
1.5.2 Objetivos específicos	13
1.6 JUSTIFICATIVA	13
2 REFERENCIAL TEÓRICO	15
2.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA.....	15
2.2 O HIDROGÊNIO COMO FONTE DE ENERGIA	18
2.3 FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR DE CICLO OTTO	20
2.4 FORMAS DE OBTENÇÃO DE HIDROGÊNIO	21
2.4.1 Hidrogênio cinza	22
2.4.2 Hidrogênio azul	22
2.4.3 Hidrogênio turquesa	23
2.4.4 Hidrogênio branco	24
2.4.5 Hidrogênio verde	25
3 METODOLOGIA	28
3.1 DETALHAMENTO DOS MATERIAIS	29
3.1.1 Motor de combustão interna ciclo Otto	29
3.1.2 Célula de eletrólise	30
3.2 PROCEDIMENTOS.....	32
3.2.1 Geração de Hidrogênio	32
3.2.2 Preparação do Motor	34
3.2.3 Realização dos testes	35
3.2.4 Análise dos dados	36
4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	37
4.1 PREPARAÇÃO INICIAL	37
4.2 Cálculos e Análises	37

4.2.1 Análise do Consumo Elétrico.....	38
4.2.2 Cálculo da Quantidade de Hidrogênio Gerada	40
4.2.3 Comparação entre Hidrogênio e Gasolina	41
4.2.4 Discussão geral dos resultados	43
CONCLUSÃO	46
SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS	47
REFERÊNCIAS.....	48

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a busca por alternativas sustentáveis e eficientes para os combustíveis fósseis tem se intensificado, impulsionada pela preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa. Nesse contexto, o hidrogênio tem despertado interesse como uma alternativa promissora, especialmente quando utilizado em motores de combustão (Chiappini, 2023).

O hidrogênio é um elemento abundante na natureza e pode ser produzido a partir de fontes renováveis, como a eletrólise da água, utilizando energia solar ou eólica. Além disso, sua queima não gera emissões de poluentes atmosféricos, produzindo apenas vapor d'água como subproduto (Damascena e De Goés, 2013). Essas características fazem com que o hidrogênio seja considerado um combustível limpo e ecologicamente viável, pois este gás possui um alto poder calorífico, o que significa que pode gerar uma grande quantidade de energia em relação à sua massa, tornando-o uma fonte eficiente de energia para motores de combustão (Nadaleti, 2017).

Neste projeto, busca-se explorar a utilização do hidrogênio em motores de combustão, avaliando sua eficiência energética, impacto ambiental e viabilidade técnica. Serão discutidos os principais desafios e oportunidades associados a um modelo eficiente de sistema de injeção para motores de ciclo Otto, visando o uso do hidrogênio, bem como as possíveis aplicações e benefícios dessa tecnologia.

Utilizando-se de um motor movido originalmente a gasolina, de forma eficiente e segura, busca-se utilizar um sistema de injeção de combustível específico projetado para esta necessidade, para utilizar o gás hidrogênio como combustível, para que ele possa ser uma fonte de energia alternativa para o funcionamento de motores de combustão interna.

Ao final, espera-se contribuir para o avanço do conhecimento sobre o uso do hidrogênio como combustível, bem como as técnicas de utilização, destacando sua importância como uma alternativa sustentável e eficiente para os combustíveis fósseis tradicionais.

1.1 TEMA

Utilização do gás hidrogênio como principal e único combustível em motores de combustão interna ciclo Otto.

1.2 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Estudo de desenvolvimento de um sistema de armazenamento e admissão de hidrogênio para um motor ciclo Otto, a partir da célula de eletrólise geradora de hidrogênio.

1.3 PROBLEMA DE PESQUISA

Tendo em vista que a energia provida pelos combustíveis originados do petróleo não é uma energia renovável, tem-se a necessidade de se encontrar um combustível que possa substituir estas fontes de energia de forma igualmente eficiente e com maior sustentabilidade. Tendo em vista o hidrogênio como uma possível fonte de energia alternativa, os meios para sua produção utilizando energia renovável são promissores e estão sendo desenvolvidos para alcançar uma escala capaz de suprir as necessidades e demandas de hidrogênio.

Uma preocupação geral é a escassez de métodos de produção de hidrogênio limpo, principalmente em larga escala. Essas limitações apresentam uma barreira significativa para a adoção deste elemento como uma fonte energética alternativa e sustentável, o que é essencial para uma transição para a economia de hidrogênio.

Em estudos são vistos sistemas de utilização deste hidrogênio, como fonte de energia elétrica, onde o gás é armazenado em um sistema de alta pressão, e injetado em uma célula de energia, onde ocorre a reação em que gera corrente elétrica na célula, e esta corrente elétrica é utilizada para abastecer as baterias e demais componentes de carros elétricos, porém esta alternativa necessita de altos investimentos em sistemas de pressurização e adaptações de alta pressão.

O que normalmente não é estudado é a forma de utilização de hidrogênio diretamente em um motor de combustão, pois acredita-se que esta forma não traga uma grande eficiência como a utilizada com uma célula de energia. A alternativa visada por este trabalho, abrange o método de produção de hidrogênio sem a utilização de um sistema de compressão e armazenamento de alta pressão, para que

assim, o hidrogênio produzido possa ser utilizado logo após a sua produção em condições normais.

1.5 OBJETIVOS

1.5.1 Objetivo geral

Desenvolver um sistema de geração e abastecimento de hidrogênio para um motor de ciclo Otto, para fazê-lo funcionar através da utilização do gás hidrogênio como único combustível.

1.5.2 Objetivos específicos

- Estudar a formulação, condições e propriedades do hidrogênio;
- Verificar as condições necessárias para o correto funcionamento de um motor ciclo Otto, e entender como o hidrogênio se comporta nestas condições;
- Analisar, através de artigos publicados e protótipos já construídos, o funcionamento destes motores, tendo o hidrogênio como sua fonte de energia;
- Mensurar a eficiência deste sistema, e comparar com um sistema equivalente original.
- Estimar a viabilidade do uso deste gás como combustível;

1.6 JUSTIFICATIVA

O hidrogênio, quando queimado em motores de combustão, produz apenas vapor d'água como subproduto, não emitindo poluentes atmosféricos nocivos, como óxidos de enxofre, partículas de fuligem ou óxidos de nitrogênio. Apesar de ser o elemento químico mais abundante e de menor densidade no universo, o hidrogênio é encontrado principalmente na Terra em compostos químicos, como hidrocarbonetos e água (Damascena e De Goés, 2013).

Ele pode ser produzido a partir de fontes renováveis, como eletrólise da água usando energia solar ou eólica, tornando-se uma opção de combustível mais sustentável em comparação com os combustíveis fósseis. Este gás tem um alto poder calorífico, o que significa que pode gerar uma grande quantidade de energia em

relação à sua massa, tornando-o uma fonte eficiente de energia para motores de combustão.

Pelo exposto acima, torna-se possível a utilização deste gás como um combustível alternativo e eficaz para os veículos com motores a combustão de ciclo Otto, podendo ser utilizado apenas hidrogênio para o correto funcionamento dos motores. Uma forma simples de se utilizar esta tecnologia, pode ocorrer utilizando o método de geração de hidrogênio por eletrólise, onde o gás gerado pode ser diretamente canalizado para a admissão do motor, sem a necessidade de adaptações ou sistemas complexos de armazenamento e admissão de gás em alta pressão.

A utilização de hidrogênio pode contribuir para a diversificação da matriz energética, reduzindo a dependência de combustíveis fósseis e aumentando a segurança energética, além de que pode ser armazenado e transportado facilmente, o que o torna uma opção viável para aplicações móveis, como veículos. Como o hidrogênio não emite dióxido de carbono (CO_2) quando queimado, seu uso pode ajudar a reduzir as emissões de gases de efeito estufa e mitigar o aquecimento global. No entanto, é importante considerar que a produção em larga escala de hidrogênio ainda enfrenta desafios, como a eficiência do processo de produção e a disponibilidade de fontes de energia renovável para sua produção sustentável.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

A matriz energética de um país reflete suas escolhas tecnológicas e políticas ambientais, e no Brasil, destaca-se pela significativa participação de fontes renováveis, contrastando com a predominância dos combustíveis fósseis na matriz global. Embora os combustíveis fósseis tenham sido essenciais para o desenvolvimento econômico, sua utilização gera graves consequências ambientais, como a poluição do ar e o agravamento das mudanças climáticas.

Nesse cenário, o hidrogênio emerge como uma alternativa promissora, pois oferece um potencial energético elevado e pode ser produzido de maneira sustentável a partir de fontes renováveis. Este trabalho analisa a matriz energética brasileira, as diferentes formas de produção de hidrogênio e a relevância do hidróxido de sódio (NaOH) como catalisador na eletrólise.

Além disso, discute os desafios da transição para uma economia de baixo carbono e a necessidade de inovações tecnológicas para viabilizar o hidrogênio como uma solução energética sustentável, contribuindo para a descarbonização da matriz energética e um futuro mais sustentável.

2.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA

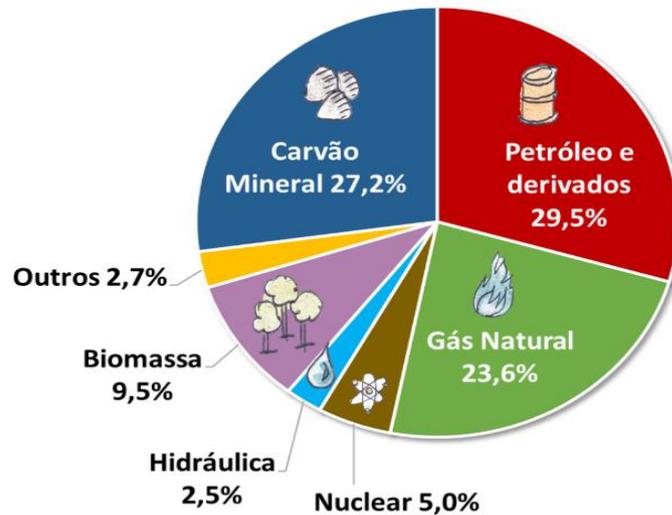
Ao longo do desenvolvimento das nações, o combustível fóssil foi, e ainda é, responsável por movimentar a economia e trazer estabilidade em diversas aplicações, como as locomotivas de carga, trens de passageiros, carros, veículos militares, transportes rodoviários, e principalmente em navios cargueiros que transitam movimentando mercadorias entre todos os continentes.

Após estudos pela comunidade científica, notou-se os perigos que estes combustíveis promovem ao meio ambiente e sua integridade, através de atividades como as contaminações atmosféricas causadas pelos gases emitidos após a combustão destes combustíveis, que afetam diretamente nosso ecossistema, bem como a saúde da população que vive principalmente em grandes centros onde está a maior concentração desses gases provenientes da combustão.

Assim, um dos maiores desafios globais, é o fato da necessidade de garantir e gerar energia suficiente, de forma limpa, considerando as preocupações com a contaminação do meio ambiente, e conseqüentemente o aquecimento global (Silva;

Carmo, 2017). Na Figura 1 pode-se visualizar que o mundo possui uma matriz energética predominantemente composta por fontes de energia não renováveis.

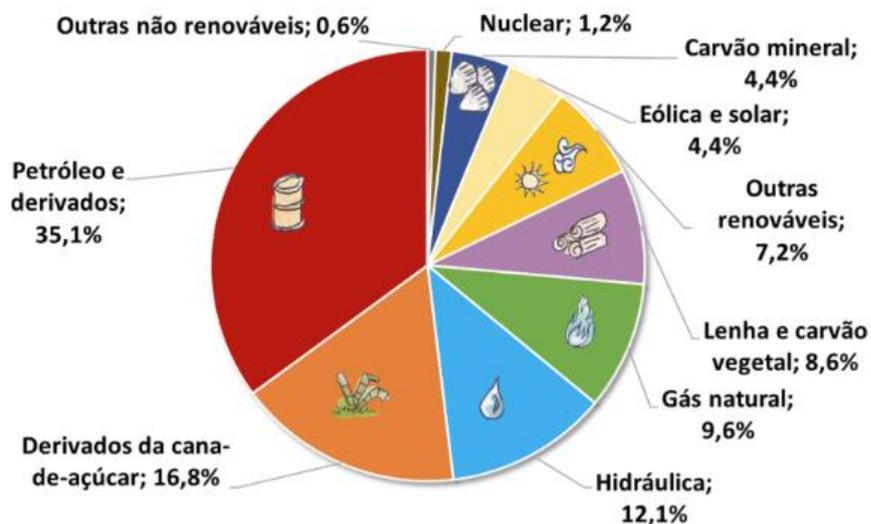
Figura 1 - Matriz energética mundial 2021



Fonte: EPE, 2024.

Fontes renováveis, como solar, eólica e geotérmica, representam apenas 2,7% da matriz energética global, sendo categorizadas como "Outros" no gráfico. Quando somadas à contribuição da energia hidráulica e da biomassa, as fontes renováveis alcançam aproximadamente 15% do total.

Figura 2 - Matriz Energética Brasileira 2023



Fonte: EPE, 2024.

A matriz energética do Brasil, por outro lado, apresenta uma composição bastante distinta em relação à média mundial. Dentro do território brasileiro, são utilizadas proporções maiores de fontes renováveis. Ao considerar a lenha, o carvão vegetal, a energia hidráulica, os derivados da cana-de-açúcar, assim como as energias eólica e solar, as fontes renováveis totalizam 49,1% da matriz energética nacional, o que representa quase a metade do total (Empresa de Pesquisa Energética (EPE), 2024).

Partindo-se deste ponto, a indústria por décadas vem estudando as possíveis alternativas para estes compostos, como a produção de veículos movidos por motores elétricos, e apesar de que esta tecnologia tem evoluído muito, ainda não conseguimos nenhuma outra alternativa para alterar a sua matriz energética, a obtenção da energia elétrica, que para ser obtida também pode necessitar de implantação de hidrelétricas, usinas eólicas, fotovoltaicas, e até mesmo, em períodos e regiões onde o fornecimento de energia não é suficiente através destas fontes, a utilização das termelétricas, que são usinas geradoras de eletricidade através da utilização de combustíveis fósseis.

Há alguns pesquisadores e cientistas que afirmam que um elemento que existe em abundância na lua, chamado Hélio-3 (^3He), pode ser a fonte de energia do futuro, porém está longe de alcançarmos e utilizarmos em tal escala.

O produto alternativo bem-visto em todos estes aspectos, desde os ambientais até os econômicos, é a água. Podemos utilizar a água como fonte de combustível para gerar energia e movimentar veículos, uma possibilidade revolucionária. A ideia de se utilizar a água como um combustível em um carro, origina-se da ideia de se utilizar, na verdade, o hidrogênio como combustível.

Silva *et al.* (2024) comenta que as aplicações do hidrogênio eletrolítico são diversas, abrangendo transporte, processos industriais e geração de energia. Essa versatilidade posiciona o hidrogênio como um ator fundamental na descarbonização de setores difíceis de reduzir, como a indústria pesada e o transporte de longa distância.

Representando o ápice da jornada de “descarbonização” de fontes energéticas, devido a não apresentar nenhum átomo de carbono em sua composição, o H_2 se apresenta como uma alternativa viável, e sua utilização como uma fonte primária de energia poderia pôr um fim na hegemonia dos hidrocarbonetos (Ribeiro; Sartore; Martins, 2010).

A transição para fontes de energia mais limpas enfrenta desafios, especialmente os altos custos iniciais. Por outro lado, ela oferece várias vantagens, como baixos custos de manutenção, preços unificados globalmente devido à ausência de limitações geográficas e benefícios ambientais significativos, pois não produz resíduos poluentes que contribuem para o aquecimento global.

2.2 O HIDROGÊNIO COMO FONTE DE ENERGIA

O primeiro gás a ser produzido pelo homem, foi o hidrogênio (H_2), pelo alquimista Theophrastus Bombastus Von Hohenheim que produziu um gás explosivo totalmente desconhecido, que passou a ser chamado de hidrogênio por Antoine Lavoisier, cientista que descobriu a fórmula da água, em 1783. O universo que conhecemos, é composto por 75% de hidrogênio, e 0,9% da terra é composta por esse elemento (Crizol, 2020), e apesar de ser um elemento muito presente no universo, na Terra não existem fontes de hidrogênio livre, pois ele geralmente é encontrado associado a outros elementos, como o Oxigênio (O) formando água (H_2O) composta por dois átomos de hidrogênio e um de oxigênio (Araújo *et al.*, 2021).

Além de ser o elemento mais abundante do universo, ele também é ecológico, pois a combustão deste elemento não gera poluentes, gera apenas água ao final do ciclo, isso faz com que o hidrogênio seja uma alternativa vantajosa para os setores de transporte e indústria, superando o carvão, o petróleo e o gás natural. Quando comprimido, o H_2 apresenta uma elevada densidade energética, tornando-o ideal para o transporte de longa distância por terra ou mar. Pode ser utilizado tanto na queima direta quanto na conversão em eletricidade por meio de células de combustível.

Exemplos de aplicações incluem carros de passageiros equipados com células de combustível movidas a hidrogênio, ônibus urbanos e outras formas de transporte público com motores de combustão de hidrogênio, bem como caminhões, bondes, locomotivas, navios e aeronaves movidas a hidrogênio. Essas aplicações demonstram o amplo potencial de aproveitamento dessa fonte de energia renovável e limpa (Lara; Richter, 2023).

Um quilograma (kg) deste elemento, pode gerar até 200 vezes mais energia, comparado a uma bateria de íons de lítio de 1kg, além disso, esta mesma massa de hidrogênio contém a energia equivalente a 3,5 litros de petróleo, 2,1 kg de gás natural ou 2,8 kg de gasolina e caso for utilizado em uma situação de combustão como a

gasolina em motores ciclo Otto, devido ao seu maior poder energético, pode queimar até 7 vezes mais rápido que a gasolina, o que possibilita uma maior eficiência (Nadaleti, 2017).

A autoignição é o processo pelo qual uma mistura combustível entra em combustão sem a necessidade de uma fonte externa de ignição. É essencialmente o aquecimento do combustível até que ele comece a queimar por si só. Cada combustível tem sua própria temperatura de autoignição, sendo a do hidrogênio relativamente alta, em torno de 585°C. Isso significa que é difícil iniciar a combustão de uma mistura de ar e hidrogênio apenas com calor, sem uma fonte de ignição externa (Wollmann, 2013). O Quadro 1 apresenta a diferença entre as temperaturas de autoignição de alguns combustíveis.

Quadro 1 - Comparativo de temperatura de ignição de combustíveis

Combustível	Temperatura de autoignição (°C)
Hidrogênio	585
Metano	540
Propano	490
Gasolina	230 a 480
Metanol	385

Fonte: Wollmann, 2013.

A qualidade do combustível em termos de octanagem é medida em relação a uma escala padrão, sendo 100 o valor de referência para a resistência à detonação. O hidrogênio possui uma alta octanagem e é resistente à auto detonação quando queimado em misturas fracas (Wollmann, 2013). O Quadro 2 traz os dados referentes a octanagem do hidrogênio em comparação a outros combustíveis.

Quadro 2 - Comparação da octanagem de combustíveis

Combustível	Octanagem
Hidrogênio	130+ (queima branda)
Metano	125
Propano	105
Octano	100
Gasolina	87
Metanol	30

Fonte: Wollmann, 2013.

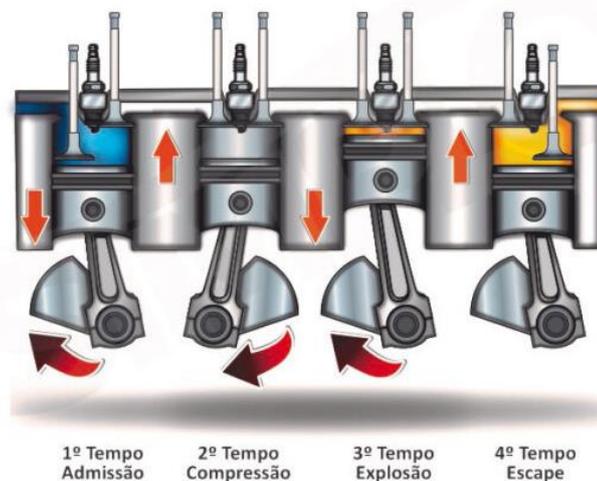
A octanagem de um combustível refere-se à sua capacidade de resistir à detonação por compressão nos motores de combustão interna. A detonação secundária, ou auto detonação, ocorre quando o calor eleva a temperatura em um ponto específico da câmara de combustão além do ponto de autoignição do combustível, após a ignição.

O Hidrogênio pode desempenhar um papel significativo em áreas onde a eletrificação direta não é viável em um futuro próximo, como no transporte aéreo de longa distância, na movimentação de cargas pesadas e no transporte marítimo. Nesse contexto, a tecnologia "power-to-gas" é considerada a opção ideal em termos de eficiência energética e sustentabilidade, especialmente quando o excedente de eletricidade gerada a partir de fontes renováveis, como energia eólica ou solar, é utilizado em sua produção (Lara; Richter, 2023).

2.3 FUNCIONAMENTO DE UM MOTOR DE CICLO OTTO

O motor de combustão interna do ciclo Otto é um tipo comum de motor usado em muitos veículos. É um ciclo termodinâmico no qual um gás passa por transformações termodinâmicas, gerando trabalho. Nos motores veiculares que utilizam esse ciclo, o fluido ativo é a mistura de ar e combustível, e o processo ocorre em quatro estágios termodinâmicos: Admissão, Compressão, Combustão e Escape (Brunetti, 2012).

Figura 3 - Ciclo de funcionamento de um motor de ciclo Otto



Fonte: Simplo, 2020.

Este motor opera com base no princípio de converter combustível em energia mecânica por meio de uma série de explosões controladas (combustão) dentro dos cilindros do motor. Os autores Guedes *et al* (2021) informam que esse processo envolve quatro cursos principais: entrada, compressão, potência e exaustão. A Figura 3 mostra um esquema de funcionamento de um motor de ciclo Otto, em cada uma de suas etapas.

1º tempo: durante o curso de admissão, o pistão do motor desce pelo cilindro, criando um vácuo que atrai uma mistura de ar e combustível (gasolina). Essa mistura enche a câmara de combustão na parte superior do cilindro.

2º tempo: quando o pistão atinge a parte inferior do cilindro, ele se move para cima, comprimindo a mistura ar-combustível. Essa compressão aumenta a temperatura e a pressão da mistura, tornando-a mais volátil e pronta para ignição.

3º tempo: ao final do curso de compressão, uma vela de ignição acende a mistura de ar comprimido e combustível. A explosão resultante força o pistão para baixo do cilindro, gerando energia. Esse é o curso que produz a saída do motor.

4º tempo: após o curso de força, o pistão sobe novamente no cilindro, expulsando os gases gastos do processo de combustão através das válvulas de escape. Isso limpa o cilindro para o próximo ciclo.

O processo então se repete, com o motor percorrendo continuamente esses quatro tempos, desde que o combustível seja fornecido e o motor esteja funcionando.

A eficiência de um motor do ciclo Otto pode ser influenciada por vários fatores, incluindo a taxa de compressão, o tipo de combustível e o design do motor. Taxas de compressão mais altas geralmente levam a uma melhor eficiência, pois permitem uma combustão mais completa do combustível, porém também podem propiciar temperaturas de trabalho mais altas durante cada ciclo.

2.4 FORMAS DE OBTENÇÃO DE HIDROGÊNIO

O uso global do gás hidrogênio (H_2) pode ser considerado fundamental para a redução das emissões de carbono e o cumprimento das metas estabelecidas no Acordo de Paris, que busca limitar o aumento da temperatura global a menos de 2 graus Celsius. Atualmente, o gás natural desempenha um papel central na produção de hidrogênio, contribuindo com cerca de 75% da produção mundial, no entanto, nos últimos anos vários países têm elaborado políticas e estratégias para impulsionar uma

nova indústria de hidrogênio a partir de fontes renováveis e com tecnologias de captura de carbono (Chiappini, 2023).

O hidrogênio é naturalmente um gás incolor, mas é classificado com diferentes cores dependendo de sua origem. Quando utilizado como vetor de energia, são atribuídas diferentes designações como hidrogênio cinza, azul, marrom/preto, turquesa, verde, entre outros, com base na fonte de energia utilizada em sua produção. No entanto, somente o hidrogênio livre de CO_2 , produzido a partir de energias renováveis, é considerado genuinamente sustentável (Osman *et al.*, 2021), nesse contexto, diferentes métodos de produção de hidrogênio foram estudados e categorizados por cores e termos específicos.

2.4.1 Hidrogênio cinza

Obtido através de gás natural ou metano, pela reforma de vapor, este processo de produção de H_2 é o mais utilizado mundialmente. De modo geral, a conversão de gás natural em hidrogênio ocorre em um processo chamado de reforma de vapor, ou “Steam Methane Reforming” (SMR). A reforma de vapor é responsável por liberar grandes quantidades de dióxido de carbono na atmosfera, intensificando o aquecimento global e conseqüentemente as mudanças climáticas (EPBR, 2021).

Este processo de reforma de vapor, já é bastante conhecido e estudado, e apesar da grande variabilidade ainda se caracteriza como uma das principais linhas tecnológicas de curto prazo para a obtenção de hidrogênio, tendo menores custos comparada à outras opções, até que opções que tragam alternativas de baixo ou zero carbono possam se tornar competitivas economicamente.

2.4.2 Hidrogênio azul

Produzido pela reforma de combustíveis fósseis, como o gás natural e o carvão mineral, seguida pela captura e armazenamento do carbono emitido no processo, o hidrogênio azul é conhecido como um gás descarbonizado, ou de baixo carbono, e é considerado uma fonte de energia limpa (EPBR, 2021).

Apesar de não ser considerado sustentável, o hidrogênio azul pode desempenhar um papel na redução das emissões de CO_2 na atmosfera, especialmente durante um período de transição. Esse tipo de hidrogênio é gerado a

partir de hidrocarbonetos, principalmente gás natural, em um processo que gera CO_2 . No entanto, o CO_2 é capturado e armazenado no subsolo, conhecido como captura e armazenamento de carbono.

O hidrogênio azul é considerado neutro em relação ao CO_2 , pois embora o CO_2 seja produzido durante sua fabricação, ele não é liberado na atmosfera. Além disso, essa tecnologia é viável no contexto atual, uma vez que a produção de hidrogênio verde (livre de CO_2) ainda é custosa e requer investimentos significativos para converter processos industriais em plantas de hidrogênio.

Em 2021, havia apenas duas instalações de hidrogênio azul em operação no mundo, utilizando gás natural para produzir hidrogênio em escala comercial. Uma delas é da empresa Shell em Alberta, Canadá, e a outra é da empresa Air Products, líder em infraestrutura de abastecimento e desenvolvedora líder em serviços e equipamentos de energia de hidrogênio no Texas, EUA (Lara; Richter, 2023).

2.4.3 Hidrogênio turquesa

Produzido pela quebra da molécula de metano através do processo de pirólise, tendo como produto colateral o carbono sólido, que pode ser comercializado como subproduto. Ainda em estágio inicial de desenvolvimento, este tipo de produção possui potencial para se tornar atrativo economicamente (EPBR, 2021).

A palavra "pirólise" tem origem grega e significa "decomposição pelo calor", referindo-se à degradação de um material por energia térmica. Por outro lado, a "pirólise analítica" é uma técnica usada para caracterizar materiais específicos. Ela ocorre na ausência de oxigênio, com reações de degradação química induzidas por energia térmica. Esse processo resulta em pequenas espécies moleculares que estão relacionadas à composição da amostra original (Silvério; Barbosa; Piló-veloso, 2008).

Nos estudos de pirólise analítica, o processo ocorre em condições de vácuo ou em uma atmosfera de gás inerte, como hélio ou nitrogênio. As reações pirolíticas primárias são essenciais para a análise e determinação estrutural dos materiais. A pirólise do gás natural é um processo endotérmico, o que significa que requer energia térmica para converter o metano em hidrogênio e carbono sólido. Existem várias maneiras de fornecer calor para esse processo, mas é fundamental garantir que a energia usada seja proveniente exclusivamente de fontes limpas, como energia eólica

ou solar. Isso significa que o hidrogênio só pode ser considerado "turquesa" se for produzido a partir de fontes de energia que não emitam CO_2 (EPE, 2022).

A pirólise do gás natural é uma alternativa relativamente limpa para a produção de hidrogênio, já que o processo não gera CO_2 diretamente. Além disso, o carbono sólido produzido pode ser usado de várias maneiras, como aditivo para aço, carga em pneus de automóveis, grafite, corante e condicionador de solo (EPE, 2022).

Apesar de não haver emissão de CO_2 durante o processo de produção de hidrogênio, podem ocorrer emissões em outras etapas do ciclo de vida do produto, como durante a produção do gás natural e durante o ciclo de vida do carbono sólido formado na reação. O negro de fumo, principal produto de carbono formado, é principalmente usado na indústria de borracha para fabricar pneus. O descarte inadequado de pneus usados pode ser uma fonte de emissão de CO_2 em etapas posteriores (EPE, 2022).

2.4.4 Hidrogênio branco

O hidrogênio geológico, também conhecido como hidrogênio natural, é produzido por processos naturais e encontrado em ambientes geológicos. Esse tipo de hidrogênio é considerado uma das fontes de energia descarbonizada mais promissoras. No entanto, há desafios em relação à sua viabilidade como combustível alternativo aos combustíveis fósseis (Moreira, 2023).

O hidrogênio branco é uma fonte de energia renovável gerada continuamente no subsolo. Ao contrário dos combustíveis fósseis, o hidrogênio não contém carbono, o que contribui para a redução das emissões de gases de efeito estufa. Além disso, o hidrogênio é essencial para algumas reações biogeoquímicas, influenciando a distribuição, abundância e diversidade da vida subterrânea. Sua presença em locais como fontes hidrotermais sustenta organismos por meio do metabolismo microbiano (Moreira, 2023).

Outro ponto positivo do hidrogênio branco é a sua disponibilidade em diversos ambientes geológicos, incluindo a superfície e subsuperfície do fundo do mar, falhas geológicas e margens de corpos hídricos. Adicionalmente, o hidrogênio possui um maior poder calorífico por unidade de massa do que outros combustíveis convencionais, o que o torna uma fonte de energia com um grande potencial para suprir as maiores demandas energéticas futuras (Moreira, 2023).

Quando passa pelo processo de combustão ou é convertido em células de combustível, o hidrogênio libera apenas água e energia, tornando-se assim uma fonte de energia de baixo carbono. Da mesma forma que o hidrogênio verde (H_2V), o hidrogênio branco não exige mecanismos alimentados por combustíveis fósseis; no entanto, o hidrogênio branco é produzido naturalmente e não requer o processo intensivo de energia usado na obtenção do hidrogênio verde para a decomposição da água (Moreira, 2023).

O hidrogênio branco emerge como uma promissora fonte de energia limpa para impulsionar a transição energética. Ao ser utilizado em células de combustível, esse elemento tem o potencial de reduzir a pegada de carbono em setores desafiadores de eletrificação, como aviação, navegação, produção de aço e outros processos industriais que demandam intenso aquecimento.

Embora a pesquisa sobre o hidrogênio branco seja extensa, ainda existem muitas incertezas sobre seu potencial. Apesar dos obstáculos mencionados anteriormente, foram descobertas reservas de hidrogênio branco que podem conter grandes quantidades deste gás. Assim, além de ser uma fonte de energia renovável, o hidrogênio branco pode contribuir significativamente para a luta contra as mudanças climáticas decorrentes do aquecimento global (Moreira, 2023).

Por outro lado, persistem incertezas e desafios na compreensão da geração e acúmulo do hidrogênio branco no subsolo. Questões relacionadas aos mecanismos de formação e transporte, especialmente em rochas com elevados teores de ferro, juntamente com dados limitados e uma exploração ainda incipiente, dificultam sua exploração em larga escala e exigem pesquisas adicionais.

2.4.5 Hidrogênio verde

O hidrogênio verde é produzido a partir de fontes de energia renovável, sem gerar emissões de CO_2 . Especialistas e a comunidade científica concordam que o hidrogênio verde, produzido de forma ambientalmente neutra, pode desempenhar um papel crucial na redução das emissões de CO_2 em diversos setores industriais.

Para estas ocasiões, tem-se um processo em que se utilizam basicamente a eletricidade gerada pelas fontes, e a água. A molécula de água é separada em oxigênio e hidrogênio por meio de eletricidade, em um processo conhecido como "eletrólise da água". Esse processo envolve o uso de eletricidade para dividir a água

(H_2O) em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O_2). A quantidade de hidrogênio produzida depende da eficiência do processo de eletrólise, devendo ser considerada a utilização de catalizadores no processo, e da quantidade de energia elétrica fornecida (Karthikeyan e Periyasamy 2021).

A utilização de catalizadores é essencial para aumentar as taxas de reações químicas na eletrólise. Eles tem a capacidade de aumentarem a condutividade elétrica, e neste caso, diminuem a energia de ativação necessária, o que leva a uma produção de hidrogênio mais eficiente. A escolha do catalisador influencia significativamente a eficiência geral da célula de eletrólise. Diferentes catalisadores produzem níveis variados de produção de hidrogênio, tornando crucial selecionar o correto para um desempenho ideal (Oancea e Bostan, 2024).

Neste contexto, onde essa produção já estava sendo estudada, Kumar (2015) já mencionava que os catalisadores aceleram a taxa de geração de hidrogênio, tornando os processos mais eficientes. Isso é particularmente importante no contexto do desenvolvimento de métodos limpos de produção de hidrogênio em grande escala.

Esse método de produção permite a produção de hidrogênio usando fontes de energia renováveis, como energia solar e eólica. Esse processo reduz significativamente as emissões de carbono em comparação com os métodos tradicionais de produção de hidrogênio, que dependem de combustíveis fósseis (Silva *et al.* 2024). A mudança para o hidrogênio verde é essencial para descarbonizar o setor de energia e alcançar as metas climáticas.

Consequentemente, o hidrogênio verde está emergindo como uma das principais alternativas para armazenar energia proveniente de fontes renováveis, possibilitando o transporte de energia gerada a partir dessas fontes por longas distâncias. Isso permite a transferência de energia de regiões com recursos energéticos abundantes para áreas distantes que necessitam de energia, mesmo a milhares de quilômetros de distância (Lara; Richter, 2023).

De acordo com Silva *et al.* (2024), um desafio significativo da eletrólise é seu alto consumo de energia, que pode impactar a eficiência geral e a viabilidade econômica da produção de hidrogênio. Otimizar o uso de energia é fundamental para melhorar a sustentabilidade desse processo. Pranay e Upadhyay (2022) informam que o investimento inicial e os custos operacionais associados aos sistemas de eletrólise podem ser substanciais. Isso inclui os custos dos eletrolisadores e a eletricidade necessária para o processo, o que pode impedir a adoção generalizada, e devido a

isso, apenas 4% do hidrogênio industrial global é gerado por meio da eletrólise da água.

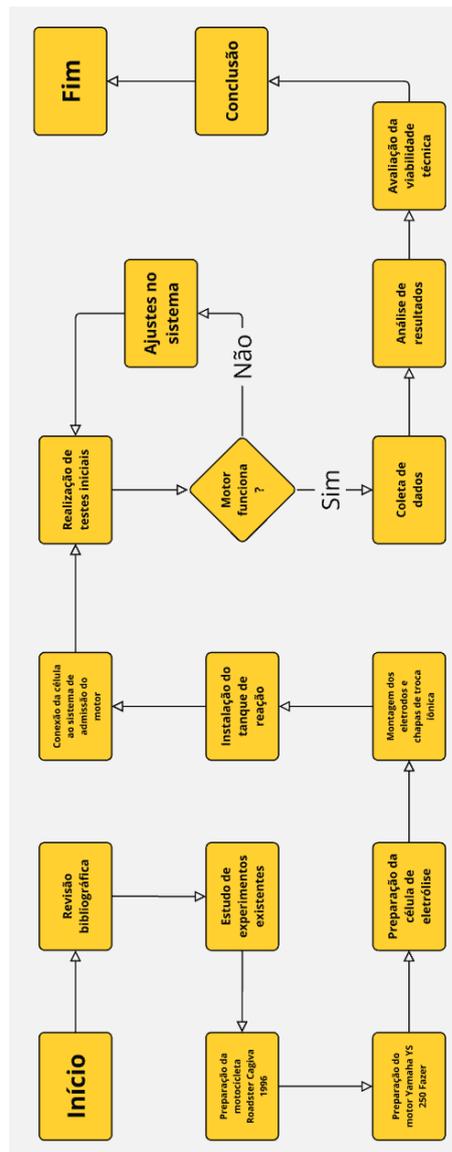
Existem ainda vários obstáculos tecnológicos, incluindo a necessidade de materiais e designs avançados para melhorar a eficiência e a vida útil dos eletrolisadores. Enfrentar esses desafios é vital para o futuro da produção de hidrogênio (Silva *et al.* 2024).

A pesquisa e o desenvolvimento devem se concentrar em aprimorar o design e os materiais usados nos eletrolisadores para melhorar sua eficiência e reduzir o consumo de energia. Isso inclui explorar novos catalisadores e tecnologias de membrana. O acoplamento direto de sistemas de eletrólise com fontes de energia renováveis pode maximizar o uso de energia excedente, melhorando assim a eficiência geral da produção de hidrogênio (Silva *et al.* 2024).

3 METODOLOGIA

Este projeto baseia-se em uma pesquisa exploratória quantitativa, onde buscou-se informações aferidas e de qualidade, para estudar e compreender os conceitos do projeto. Revisando bibliografias e estudando experimentos e tentativas já existentes de execução de um protótipo similar ao que se pretende construir, podemos ter melhor conhecimento sobre o funcionamento desta tecnologia, bem como os seus benefícios. Para melhor entendimento, é possível observar na Figura 4, o fluxograma de atividades a serem desenvolvidas ao longo do trabalho e dos testes a serem realizados posteriormente.

Figura 4 - Fluxograma de atividades



Fonte: Autor, 2024.

Durante o processo, será avaliado a capacidade de se manter em funcionamento, um motor de combustão interna ciclo Otto, utilizando o gás hidrogênio como o seu único combustível, e verificar a viabilidade técnica de geração de hidrogênio por meio da eletrólise para esta utilização.

3.1 DETALHAMENTO DOS MATERIAIS

3.1.1 Motor de combustão interna ciclo Otto

Para a realização dos testes de abastecimento de hidrogênio, será utilizada uma motocicleta Roadster Cagiva 1996. Nesta motocicleta, havia instalado um motor de motocicleta, modelo Yamaha YS 250 Fazer, fabricado pela montadora no ano de 2008. O motor de motocicleta Yamaha modelo YS250 FAZER de quatro tempos, possui comando de válvulas simples (da língua inglesa *Single Overhead Camshaft* - SOHC), refrigerado a ar, duas válvulas, um cilindro, 249,45cc, combustível gasolina, pistão diâmetro 74mm, curso do virabrequim de 58mm, taxa de compressão 9,8:1, potência máxima de 20,7cv a 8.000rpm, torque máximo de 2,1 kgf.m a 6.500rpm, sistema de alimentação por injeção eletrônica indireta, embreagem multi-discos úmidos em cárter do motor, partida elétrica, sistema elétrico 12V, e bateria 12V 6Ah (Yamaha, 2015). Algumas especificações podem ser visualizadas no Quadro 3.

Quadro 3 - Especificações técnicas do motor utilizado no experimento

Especificação	Detalhes
Modelo	Yamaha YS 250 Fazer 2008
Motor	Monocilíndrico, 4 tempos, SOHC, 2 válvulas
Cilindrada	249 cm ³
Refrigeração	Ar
Diâmetro x Curso	74,0 mm x 58,0 mm
Taxa de Compressão	9,8:1
Potência Máxima	21 cv a 8.000 rpm
Torque Máximo	2,1 kgf.m a 6.500 rpm
Alimentação	Injeção eletrônica
Transmissão	5 marchas
Capacidade do Tanque	19,2 L (3,5 L de reserva)

Consumo de Combustível (média)	25-30 km/L em condições ideais (variação com estilo de condução)
Consumo em Estrada (estimado)	25 km/L (testes em velocidades constantes, aproximadamente 60-80 km/h)
Consumo Urbano (estimado)	20-25 km/L dependendo do tráfego e rotações mais altas
Velocidade Ideal para Consumo	60-80 km/h, segundo padrões comuns para maior economia

Fonte: Yamaha, 2010.

3.1.2 Célula de eletrólise

Além do motor e dos sistemas elétricos da motocicleta, como bateria e fiação, outros itens serão utilizados para a finalização da construção do protótipo completo, tais como:

- Eletrodos: Utilização de eletrodos de aço inox, sendo eles utilizados no formato de barras roscadas no padrão M6 com 200mm de comprimento cada.
- Chapas de troca iônica: Utilização de chapas metálicas de aço inoxidável, devido a sua alta condutividade elétrica e alta resistência a corrosão, devido aos efeitos causados pela troca iônica durante a eletrólise.
- Tanques de reação: Utilização de tanques de alta pressão para armazenar a água e o gás hidrogênio a ser utilizado no motor. Para esta etapa será utilizado um recipiente de vidro com suporte a pressão de até 3 bar.

Nesta etapa, consolidaremos o método específico de eletrólise da água a ser utilizado no projeto, considerando a melhor viabilidade, saúde dos componentes e quantidade gerada de H_2 .

A célula de eletrólise utilizada neste projeto foi previamente construída por alunos da instituição de ensino do Centro Tecnológico Frederico Jorge Logemann (CFJL) para experiências químicas práticas disciplinares, com o objetivo de adquirir conhecimento sobre as curiosidades que envolvem o hidrogênio, sobre o funcionamento de uma célula de eletrólise, e para a mesma ser utilizada em algum projeto futuro, onde nesse caso, será utilizada.

A célula é composta por um frasco de vidro capaz de suportar pressões de até 3 bar, com uma tampa de nylon usinado que garante a vedação adequada. As barras

roscadas no padrão M6, feitas de aço inox, foram empregadas como cátodo e ânodo, enquanto oito chapas circulares de aço inox de 5 centímetros de diâmetro foram utilizadas para aumentar a área de contato com a água, essencial para a eficiência do processo eletrolítico. Na Figura 5, são apresentados os componentes e materiais utilizados para a montagem da célula de eletrólise mencionada.

Figura 5 - Componentes da célula eletrolítica



Fonte: Autor, 2024.

Será realizada a adição de hidróxido de sódio na mistura, em uma concentração 10% em peso. Sendo este componente muito comum, pois este elemento atua como um eletrólito, aumentando a condutividade da solução e, conseqüentemente, a eficiência da eletrólise. O NaOH é amplamente utilizado em processos eletrolíticos devido à sua capacidade de dissociação em íons, que facilita a movimentação de cargas elétricas.

A escolha de uma solução forte de hidróxido de sódio está ligada à sua capacidade de manter baixa a pressão de saturação da fase condensada durante a eletrólise. Isso é crucial para manter uma operação eficiente em altas temperaturas, embora o papel não quantifique a concentração ideal necessária para essa finalidade (Fletcher, 2001).

Aumentar a condutância específica do fluido de trabalho é importante para aumentar a taxa de produção em uma determinada célula. Concentrações mais altas de hidróxido de sódio normalmente levam ao aumento da condutividade, o que é benéfico para o processo de eletrólise (Fletcher, 2001).

Após estes passos, a célula pode-se conectar os cabos elétricos entre os polos positivo e negativo da bateria da própria motocicleta, ao cátodo e ao ânodo da célula de eletrólise, não necessariamente nesta mesma ordem, para que assim a eletricidade da bateria possa iniciar o processo de eletrólise da célula, e assim produzir hidrogênio.

3.2 PROCEDIMENTOS

3.2.1 Geração de Hidrogênio

Após os testes e consolidação do método de eletrólise escolhida, pode-se iniciar a construção dos conjuntos que formarão o protótipo, iniciando pela célula de geração de hidrogênio a partir da molécula de água, contendo hidróxido de sódio (NaOH) como catalisador, onde estará posicionado o cátodo e o ânodo, formando a célula eletrolítica, responsável por realizar a eletrólise e separar as moléculas de H_2 e O .

Considerando o funcionamento do sistema e as condições dos componentes, se faz necessária a montagem de toda a célula de eletrólise, e posteriores testes de eletrólise e geração de hidrogênio, com o agente catalizador. Assim verificando seu correto funcionamento, para não apresentar avarias durante o processo de teste. É possível observar a disposição do cátodo, ânodo e das chapas metálicas abaixo na Figura 6, utilizadas para aumentar a área de contato com a água.

A área de contato total (A) das chapas com a água pode ser calculada pela Equação 1.

$$A = n \times \pi \times r^2 \quad (1)$$

Onde:

(n) = número de chapas (8)

(r) = raio da chapa (2,5 cm = 0,025 m)

Substituindo os valores na Equação 2.

$$A = 8 \times \pi \times (0,025)^2 \approx 0,0157m^2 = 157cm^2 \quad (2)$$

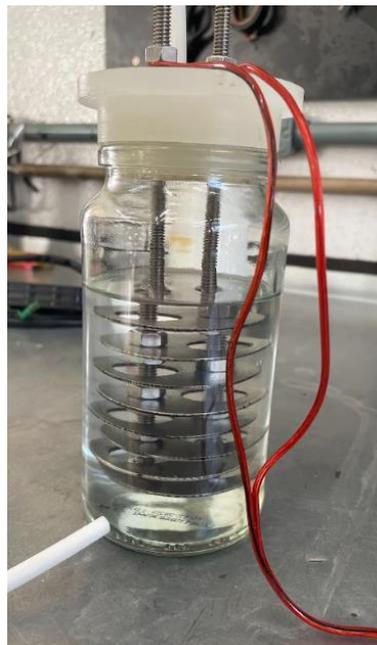
Figura 6 - Cátodo, ânodo e chapas de contato



Fonte: Autor, 2024.

A célula de hidrogênio foi então abastecida com água e hidróxido de sódio (NaOH) como catalisador, facilitando o processo de eletrólise, em uma proporção de 300ml de água, e 10% de hidróxido de sódio, como mostrado na Figura 7.

Figura 7 - Célula eletrolítica abastecida



Fonte: Autor, 2024.

Esta etapa é responsável pela concepção e construção física do protótipo, transformando os conceitos teóricos em um produto tangível. Assim, com a célula pronta, pode-se alimentar a mesma utilizando energia para visualizar a correta reação de eletrólise ocorrendo na área interna, dando início aos primeiros testes de geração de hidrogênio.

3.2.2 Preparação do Motor

A etapa de testes preliminares tem como objetivo testar o conjunto de forma total, para garantir que o esquema esteja se comportando na maneira esperada, evitando riscos de projeto e auxiliando para o melhor entendimento e aperfeiçoamento do mesmo.

Para iniciar os testes, foram realizadas as devidas preparações na motocicleta Roadster Cagiva. O banco foi removido, seguido pela retirada da tampa e do filtro de admissão de ar do motor. Na Figura 8, é possível observar o modelo da motocicleta mencionada, e já preparada para os testes, com os itens necessários já removidos.

Figura 8 - Motocicleta preparada utilizada no experimento



Fonte: Autor, 2024.

Dentro da etapa de testes, deve-se realizar algumas verificações como:

- Verificação da estanqueidade dos tanques de armazenamento de hidrogênio, e de todo o sistema de distribuição até a chegada na câmara de combustão do motor.
- Teste de funcionamento da célula eletrolítica para verificar a produção de hidrogênio e oxigênio.
- Teste de funcionamento do motor e verificação da adaptação ao veículo de teste.

Após estas etapas, verificando que não haja nenhuma atividade irregular de ambas as partes, e que tudo esteja funcionando corretamente como deveria, pode-se dar início aos testes de adição de hidrogênio no sistema de admissão do motor.

3.2.3 Realização dos testes

Durante a realização dos testes, a célula de eletrólise precisa estar em correto funcionamento, e inicialmente, o motor deve estar em funcionamento utilizando seu combustível natural, para possibilitar a adição gradativa de hidrogênio em sua admissão. Este processo ocorre ao inserir a saída de hidrogênio da célula, diretamente na admissão do motor, fazendo com que todo o hidrogênio ali gerado, possa ser capturado pelo motor e utilizado em sua combustão.

Este teste é realizado para admitir que o motor não irá sofrer nenhum dano ou apresentar avarias devido a admissão de hidrogênio na câmara de combustão juntamente com a gasolina.

Neste caso, por possuir uma octanagem maior que a gasolina, o hidrogênio proporciona uma queima de combustível mais completa na câmara de combustão, o que pode resultar na redução de combustível não queimado, e conseqüentemente, redução no consumo de combustível.

Após este teste, pode-se ultrapassar para a próxima etapa, que será o fornecimento apenas de hidrogênio para o funcionamento do motor.

Para isso, o processo consiste em desligar a bomba de combustível da motocicleta, para que a mesma não atue nas próximas atividades. Com a bomba de combustível desligada, restam ainda alguns ml de gasolina nas tubulações até a admissão do motor. Este combustível restante nas mangueiras, pode ser o suficiente para realizar a transição entre gasolina e hidrogênio, sendo suficiente apenas para fazer o motor entrar em ignição logo após a partida, e assim consumindo toda a gasolina disponível e assumindo o hidrogênio como combustível.

Para isso, logo antes da partida, a célula de hidrogênio já deve estar em atividade, e gerando o gás diretamente na admissão do motor para ser consumido conforme necessário.

3.2.4 Análise dos dados

Após todos os testes realizados, pode-se realizar os cálculos e comparações de gastos de combustível, entre o hidrogênio e a gasolina, levando em consideração todas as situações encontradas durante o experimento, para calcular a energia liberada por ambos e assim possibilitar mensurar a viabilidade da implementação deste sistema.

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

Após o planejamento das atividades que seriam necessárias, para a realização do experimento, realiza-se a atividade experimental prática, onde neste capítulo serão detalhadas todas as etapas. Desde o processo de preparação, ao processo de execução, todos os dados coletados serão utilizados para calcular a produção de hidrogênio real que ocorria neste momento, em diferentes situações, e então com os resultados constatar o poder de produção da célula, juntamente com sua eficiência e capacidade de fornecer hidrogênio suficiente durante o experimento.

4.1 PREPARAÇÃO INICIAL

A etapa de testes preliminares é fundamental para avaliar o desempenho global do sistema, garantindo seu funcionamento conforme o planejado, mitigando riscos potenciais e aprimorando a compreensão e refinamento do projeto. Durante esta etapa foram realizados diversos testes funcionais para garantir a eficácia dos testes posteriores.

Primeiramente, foram testados todos os funcionamentos no motor e da motocicleta originalmente como estava, onde apresentaram funcionamento correto de todas as partes e nenhuma avaria ou vazamentos aparentes. Após o correto funcionamento da motocicleta, a mesma foi preparada para os testes, retirando sua carenagem lateral, o banco, e a tampa do filtro de admissão, livrando a área e seus componentes internos.

Após isso, a célula de eletrólise foi montada e abastecida com água e hidróxido de sódio, componente catalizador utilizado para a reação, e então testada. A célula apresentou funcionamento normal, onde não apresentava nenhum tipo de problema relacionado a estanqueidade da célula.

4.2 CÁLCULOS E ANÁLISES

Após ligar o motor da motocicleta, a mangueira da célula de eletrólise foi posicionada na admissão do motor. O cátodo e o ânodo foram conectados aos polos positivo e negativo da bateria de 12V e 6 Amperes. No entanto, o motor apagou rapidamente, pois a célula de eletrólise consumiu toda a corrente da bateria,

resultando em uma resistência excessiva no estator da motocicleta, que resultou na parada forçada do motor. A Figura 9 mostra a formação das bolhas de gás hidrogênio com o processo da eletrólise.

Figura 9 - Célula durante a operação de eletrólise



Fonte: Autor, 2024.

4.2.1 Análise do Consumo Elétrico

A célula de eletrólise consome uma quantidade significativa de energia devido à resistência interna dos eletrodos e à necessidade de superar a energia de ativação para a dissociação da água.

Posteriormente, perante o ocorrido, e visualizando a incapacidade de o motor continuar em funcionamento normal durante a utilização da sua própria bateria como fonte de energia para a célula eletrolítica, foi utilizando uma bateria de 12V e 12 Amperes externa e desconectada da motocicleta, para alimentar a célula de hidrogênio. O teste foi repetido então com esta nova bateria avulsa, e o motor funcionou em marcha lenta sem problemas, consumindo o gás hidrogênio gerado pela célula, enquanto ainda recebia gasolina pela sua admissão. A célula foi mantida conectada a esta bateria externa para os demais testes, onde foi possível observar

que a reação de eletrólise aumenta consideravelmente, modificando o aspecto visual da água, gerando muitas bolhas, como constatado na Figura 10.

Figura 10 - Célula em operação com a bateria externa



Fonte: Autor, 2024.

O consumo elétrico da célula de eletrólise pode ser calculado pela Equação 3,

$$P = V \times I \quad (3)$$

Onde:

- P = potência (em watts)
- V = tensão (12V)
- I = corrente (6A)

Portanto:

Após os cálculos, obteve-se os resultados presentes no Quadro 4.

Quadro 4 - Consumo elétrico da célula

$V(v)$	$I(A)$	Equação	$P(W)$
12	6	$P = V \times I$	72
12	12		144

Fonte: Autor, 2024.

4.2.2 Cálculo da Quantidade de Hidrogênio Gerada

Utilizando a Lei de Faraday, a quantidade de hidrogênio gerada pode ser calculada como mostra a Equação 4.

$$V = \frac{Q}{nF} \times 22,4 \quad (4)$$

Onde:

- V = Volume de hidrogênio (em litros)
- Q = Carga elétrica total (em coulombs)
- n = Número de moles de hidrogênio produzido (para o hidrogênio, $n = 2$, pois um mol de gás hidrogênio é produzido a partir de dois moles de elétrons)
- F = Constante de Faraday (aproximadamente 96485 C/mol)

O valor de 22,4 L/mol é a quantidade de gás que um mol de qualquer gás ideal ocupa nas condições de temperatura e pressão padrão (STP), que são 0 °C e 1 atm.

Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro (1776-1856), foi um químico italiano, e o primeiro cientista a ter a ideia de que uma amostra de um elemento, com massa em gramas numericamente igual à sua massa atômica, apresentaria sempre o mesmo número de átomos. Cada mol de hidrogênio, nesse caso, tem a massa de 2g, portanto, 22,4L de Hidrogênio = 2g, pois o gás hidrogênio produzido se encontra na forma H_2 .

A Equação 5 mostra o cálculo de Carga Total (Q).

$$Q = I \times t \quad (5)$$

Onde:

- I = Corrente (em amperes)
- t = Tempo (em segundos) durante o qual a corrente é aplicada

Após esses testes, foram realizadas tentativas de funcionamento do motor utilizando exclusivamente hidrogênio como combustível. A bomba de combustível foi desligada, permitindo que o motor fosse iniciado com a gasolina ainda presente apenas na mangueira de admissão após a bomba. Quando o motor deu partida, a

célula de eletrólise estava ativa, porém o gás gerado por ela não foi suficiente para manter o motor em funcionamento.

Após 5 segundos desligado, realizou-se uma nova tentativa de partida do motor, desta vez, durante os poucos segundos de espera, a célula continuava em funcionamento e gerando hidrogênio para a admissão do motor, que quando deu partida, funcionou normalmente por alguns ciclos, porém após consumir toda a quantidade de hidrogênio armazenada em frente a admissão do motor, o mesmo se desligou novamente devido a ausência de hidrogênio suficiente para o manter em funcionamento em baixa rotação.

Considerando vários tempos de operação, a de 1h (3600s) e também outros períodos de operação mencionados, para facilitar os cálculos, e utilizando a Lei de Faraday, podemos calcular a produção de hidrogênio por segundo nestas condições, os resultados encontrados são evidenciados no Quadro 5.

Quadro 5 - Cálculos de produção de hidrogênio

Cálculos de Carca Total (Q)				
$t(s)$	$I(A)$	Equação		$Q(C)$
3600	6	$Q = I \times t$		21600
1	6			6
3600	12			43200
1	12			12
5	12			60
Cálculo de produção de hidrogênio (L)				
Q	n	F	Equação	$V(L)$
6	2	96485	$V = \frac{Q}{nF} \times 22,4$	0,00069
12	2	96485		0,00139
60	2	96485		0,00696
21600	2	96485		2,507
43200	2	96485		5,014

Fonte: Autor, 2024.

4.2.3 Comparação entre Hidrogênio e Gasolina

Para manter um motor de 250 cilindradas em baixa rotação, o consumo de combustível pelo tempo de operação pode ser calculado utilizando os dados fornecidos pela montadora, para obter um consumo aproximado de combustível por hora, e por segundo. Assim, temos que o consumo médio da motocicleta, assumindo a maior velocidade de 80km/h disponibilizada como ideal pela montadora, 25km/L,

porém, o consumo médio deste motor operando em marcha lenta, quando em bom estado e regulado corretamente, está entre 0,5 e 0,7 L/h.

Convertendo isso em energia, considerando que 1 L de gasolina gera cerca de 32,24 MJ/L. Sabendo que 1 L de gasolina é equivalente a 0,750kg, podemos assumir que 0,5L tem massa equivalente a 0,375kg, assim, na Equação 6 temos:

$$E_{gasolina} = 0,375 \text{ kg} = \frac{32,24}{2} \approx 16,12 \text{ MJ} \quad (6)$$

Para que o motor funcione apenas com hidrogênio, precisamos calcular a quantidade mínima de hidrogênio que deve ser gerada para ser equivalente à energia fornecida pela gasolina. Sabendo que a energia liberada pela combustão de 1 kg de hidrogênio é aproximadamente 120 MJ/kg, podemos calcular a quantidade de hidrogênio necessária para gerar a mesma energia que 0,5 L de gasolina (16,12MJ):

Volume de gás por kg de hidrogênio calculado através da Equação 7:

$$V = \frac{1000g}{2g/mol} \times 22,4L/mol = 22400L \quad (7)$$

A quantidade de hidrogênio necessária, em diferentes aspectos como em termos de energia, massa e volume, são obtidos e podem ser observados a partir da Equação 8, Equação 9 e Equação 10 respectivamente:

$$Energia \approx 16,12 \text{ MJ} \quad (8)$$

$$Massa = \frac{16,12 \text{ MJ}}{120 \text{ MJ/kg}} = 0,134 \text{ kg/h} \quad (9)$$

$$Volume = 22400L \times 0,134 \text{ kg} = 3001,6L \quad (10)$$

Para determinar a quantidade de chapas de inox que seriam necessárias para gerar essa quantidade de hidrogênio, precisamos considerar a eficiência ideal da célula de eletrólise. Se a célula for 100% eficiente, a quantidade de hidrogênio gerada por chapa pode ser calculada com base na área de contato e na corrente aplicada.

Assumindo que cada chapa de 5 cm de diâmetro gera uma quantidade específica de hidrogênio, podemos usar a fórmula da Lei de Faraday para calcular a

produção de hidrogênio por chapa. Se considerarmos que a célula opera com uma corrente de 12 A e que cada chapa gera uma quantidade de hidrogênio proporcional à área de contato, podemos estimar a produção total.

Assumindo que a célula de eletrólise tem capacidade para gerar 5,014L de hidrogênio em 1h (3600s), como mencionado no Quadro 5, para determinar quantas chapas seriam necessárias para gerar 0,134 kg/h de hidrogênio, precisamos converter a quantidade de litros para encontrar a massa desse volume. Sabendo que 1 mol de hidrogênio (2 g) ocupa 22,4 L, na Equação 11 temos:

$$\text{Massa de hidrogênio gerada} = \frac{5,004 \text{ L/h}}{22,4 \text{ L/mol}} \times 2 \text{ g/mol} \approx 0,223 \text{ g/h} \quad (11)$$

Assim, para gerar 0,134 kg/h, através do cálculo da Equação 12, podemos obter o número necessário de chapas de aço inox que viabilizariam a produção necessária de hidrogênio para suprir a necessidade básica de manter o motor ligado em baixas rotações como acontece utilizando gasolina:

$$\text{Número de chapas} = \frac{134 \text{ g/h}}{0,223 \text{ g/h}} = 600,896 \text{ chapas} = 601 \text{ chapas} \quad (12)$$

4.2.4 Discussão geral dos resultados

A célula de eletrólise utilizada, construída a partir de um frasco de vidro com capacidade para suportar pressões de até 3 bar, cátodo, ânodo e 8 chapas de aço inox, mostrou-se funcional, porém a produção de hidrogênio gerada não foi suficiente para atender à demanda do motor, especialmente quando operando apenas com este combustível. Através dos testes, foi possível observar que a célula consumiu 6A da bateria, quantidade significativa de energia que limitou o desempenho do motor e até mesmo forçou a sua parada, impedindo seu funcionamento e o seguimento dos demais testes nestas condições.

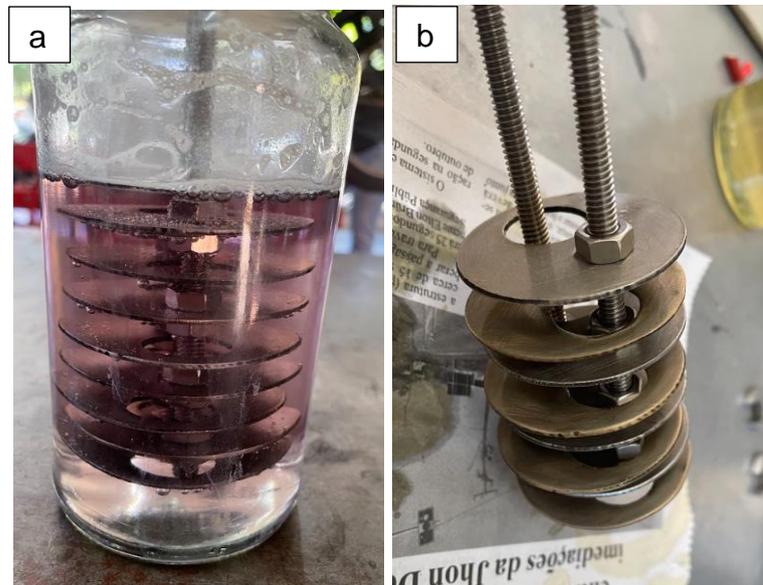
Após a parada do motor, pode-se concluir que a célula não seria capaz de funcionar ligada diretamente à bateria da motocicleta, onde então foi necessário o uso de uma fonte de energia externa para a célula. Este fato limita a pesquisa pois os testes após esta etapa foram realizados sem considerar um consumo energético da célula para o motor.

Segundo Street (2024), podemos basear nossos estudos seguindo a teoria de Michael Faraday, mencionando que o padrão a ser utilizado para a construção de uma célula de eletrólise, seria considerando a corrente limite de 0,084 Amperes por centímetro quadrado de área de placas de metal em contato com a água, para que seja possível evitar o sobreaquecimento. Levando em consideração estes dados, podemos calcular a corrente admissível que seria suportada pela célula sem gerar sobreaquecimento, na Equação 13.

$$\text{Corrente Admissível} = 157\text{cm}^2 \times 0,084 = 13,188 \text{ Amperes} \quad (13)$$

Visto que a célula, em termos de cálculos, estaria dimensionada para utilizar até 13,18A, porém, durante os testes utilizando uma bateria de 12A a célula de eletrólise utilizada no experimento também aqueceu, elevando a temperatura da água e ainda com a reação, alterando a coloração das chapas metálicas. Este fenômeno pode ser atribuído à oxidação e à formação de óxidos metálicos na superfície das chapas, resultantes da reação eletroquímica e do aumento da temperatura, que pode afetar a eficiência do processo, e pode ser evidenciado na Figura 11 (a,b).

Figura 11 - Alteração de coloração devido a reação do processo: (a) célula montada ainda com água e catalizador; (b) célula desmontada;



Fonte: Autor, 2024.

Após os cálculos, o número de 601 chapas, seria o número mínimo de chapas necessárias para gerar a quantidade de hidrogênio equivalente a quantidade de energia fornecida pela gasolina para manter o motor em funcionamento, mesmo

utilizando a bateria de 12V e 12 A externa, o que mostra que este método de utilização da célula de eletrólise não é eficiente, pois consome muita energia e teria necessidade de uma célula de um tamanho consideravelmente maior para suprir a necessidade mais básica do motor.

Em suma, os testes demonstraram que, embora a célula tenha potencial para gerar hidrogênio, a quantidade produzida não foi suficiente para sustentar o funcionamento do motor apenas com o gás, evidenciando a necessidade de otimização do sistema e de um melhor entendimento das demandas energéticas do motor.

CONCLUSÃO

As atividades desenvolvidas ao longo deste trabalho possibilitaram uma análise abrangente sobre a utilização de hidrogênio como combustível alternativo em um motor de combustão interna.

Os impactos observados durante os testes incluem:

- **Desempenho do Motor:** O motor funcionou adequadamente quando alimentado por uma mistura de hidrogênio e gasolina, mas falhou ao tentar operar exclusivamente com hidrogênio. Isso indica que a configuração atual da célula não é a ideal para operar nestas condições, impossibilitando a mesma de fornecer H_2 suficiente para manter o motor em atividade.
- **Consumo de Energia:** A célula de eletrólise consumiu uma quantidade considerável de energia, o que foi um fator limitante. A bateria de 12V e 6 Amperes não conseguiu fornecer energia suficiente para sustentar o motor em operação com a célula conectada, resultando em uma parada forçada, sendo necessário a utilização de uma bateria externa secundária no padrão de fornecimento de 12V e 12^a para permitir o funcionamento da célula.
- **A eficiência da célula não foi suficiente para gerar o hidrogênio necessário para manter o motor em movimento, onde, segundo os cálculos, seria necessária uma célula com no mínimo 601 placas metálicas de mesmo tamanho, operando nas mesmas condições, para tornar possível o funcionamento do motor apenas com hidrogênio como combustível.**

De todo modo, os testes realizados com a célula de eletrólise integrada ao motor da motocicleta forneceram valiosos aprendizados sobre as possibilidades e limitações do uso do hidrogênio como combustível alternativo. Os resultados não apenas destacam a necessidade de melhorias na geração de hidrogênio, mas também abrem caminhos para futuras investigações que podem contribuir para a transição para uma matriz energética mais sustentável no setor de transportes.

A continuidade da pesquisa nesse campo é essencial para desenvolver tecnologias que integrem eficientemente o hidrogênio como uma alternativa viável e limpa aos combustíveis fósseis.

SUGESTÃO PARA TRABALHOS FUTUROS

Com base nas experiências adquiridas e nos desafios encontrados, sugerimos algumas abordagens para futuras pesquisas:

- **Otimização da Célula de Eletrólise:** Investigar materiais e designs que melhorem a eficiência da eletrólise, aumentando a produção de hidrogênio enquanto minimizam o consumo energético.
- **Integração de Sistemas de Armazenamento:** Desenvolvimento de um sistema de armazenamento de hidrogênio que permita acumular gás suficiente para o funcionamento contínuo do motor, evitando a dependência de produção em tempo real.
- **Testes em Diferentes Configurações de Motor:** Realizar testes em motores que são especificamente projetados ou adaptados para operar com hidrogênio, a fim de avaliar melhor a viabilidade do combustível.
- **Análise de Combustíveis Alternativos:** Expandir a pesquisa para incluir outros combustíveis alternativos e avaliar sua eficácia em motores de combustão interna, visando uma abordagem mais ampla em busca de soluções sustentáveis.
- **Avaliação de Impactos Ambientais:** Realizar estudos sobre os impactos ambientais da utilização de hidrogênio em comparação com combustíveis fósseis, considerando as emissões e a eficiência energética.

REFERÊNCIAS

AMOROSO DA SILVA, Inara. **Hidrogênio: combustível do futuro**. Ensaio e Ciência: Ciências Biológicas, Agrárias e da Saúde, v. 20, n. 2, p. 122-126, 2016. Disponível em: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=26046651010>. Acesso em: 7 nov. 2024.

Análise da utilização Hidrogênio como Combustível em Veículos Leves no Brasil.pdf, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.cefet-rj.br/attachments/article/2943/An%C3%A1lise%20da%20utiliza%C3%A7%C3%A3o%20Hidrog%C3%AAnio%20como%20Combust%C3%ADvel%20em%20Ve%C3%ADculos%20Leves%20no%20Brasil.pdf>>. Acesso em: 29 mar. 2024

ARAÚJO, M. F. B. *et al.* **HIDROGÊNIO: COMBUSTÍVEL DO FUTURO?** Disponível em: <<https://periodicos.set.edu.br/cadernoexatas/article/download/10564/4719>>. Acesso em: 19 mar. 2024.

BRUNETTI, Franco. **Motores de combustão interna**. [S.l.]: Editora Blucher, 2018. ISBN 9788521212942. Disponível em: <<http://fahor.com.br/totvs/?biblioteca&isbn=9788521212942>>. Acesso em: 02 nov. 2024.

CHIAPPINI, G. **Hidrogênio verde, azul, cinza: entenda o que cada cor significa e as perspectivas de desenvolvimento**. agência epbr, 12 out. 2023. Disponível em: <<https://epbr.com.br/hidrogenio-verde-azul-cinza-entenda-o-que-cada-cor-significa-e-as-perspectivas-de-desenvolvimento/>>. Acesso em: 19 mar. 2024

CRIZOL, A. A. Z. **GERADOR DE HIDROGÊNIO: construção, vantagens e aplicações no motor à combustão**. 26 nov. 2020. Disponível em: <<http://repositorio.unis.edu.br/bitstream/prefix/1496/1/TCC%20-%20Andr%c3%a9%20Adrid%20Zanatelle%20Crizol-%20Revis%c3%a3o%20Final%20%281%29.pdf>>. Acesso em: 19 mar. 2024.

DAMASCENA, Pedro José Vieira; DE GÓES, Vítor Zonta. **VIABILIDADE TÉCNICA DA UTILIZAÇÃO DE HIDROGÊNIO PRODUZIDO “IN SITU” EM MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA**. [s.l.: s.n.]. Disponível em: <https://mecanica.ufes.br/sites/engenhariamecanica.ufes.br/files/field/anexo/2012-2_vtor_zonta_de_goese_pedro_jose_vieira_damascena.pdf>. Acesso em: 19 mar. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Matriz energética e elétrica**. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Acesso em: 14 nov,2024.

ENERGÉTICA, E. - E D. P. **HIDROGÊNIO TURQUESA: PRODUÇÃO A PARTIR DA PIRÓLISE DO GÁS NATURAL. HIDROGÊNIO TURQUESA, BRASÍLIA**, v. 1, n 2022, p. 1-63, jan/2022. Disponível em.: <https://www.epe.gov.br/pt>. Acesso em: 29 mar. 2024.
Estêvão - O Hidrogênio como combustível.pdf, [s.d.]. Disponível em: <<https://repositorio-aberto.up.pt/bitstream/10216/58102/1/000129289.pdf>>. Acesso em: 21 mar. 2024.

FLETCHER, E. A. **Some considerations on the electrolysis of water from sodium hydroxide solutions**. *Journal of Solar Energy Engineering*, v. 123, n. 2, p. 143-146, maio 2001. DOI: 10.1115/1.1351173.

GUEDES, Brenda Lyra; MARTINS DE ARAÚJO, Ludmila; MARQUES, Adriano de Souza. **Análise da eficiência de um grupo gerador elétrico com motor de ignição dual (gasolina/hidrogênio)**. Proceedings of the XI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM 2022, 2022. Disponível em: <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:251776975>. Acesso em: 21 mar. 2024.

KARTHIKEYAN, S.; PERIYASAMY, M. **Impact on the power and performance of an internal combustion engine using hydrogen**. *Materials Today: Proceedings*, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2021.02.356.

KUMAR, S. **Sodium hydroxide for clean hydrogen production**. Clean hydrogen production methods. Cham: Springer, 2015. (SpringerBriefs in Energy). Disponível em: https://doi.org/10.1007/978-3-319-14087-2_2. Acesso em: 03 nov. 2024.

LARA, D. M. DE; RICHTER, M. F. **Hidrogênio verde: a fonte de energia do futuro**. *Novos Cadernos NAEA*, v. 26, n. 1, 27 abr. 2023. Disponível em: <<https://periodicos.ufpa.br/index.php/ncn/article/download/12746/10175>>. Acesso em: 2 abr. 2024.

MOREIRA, T. **Entenda o que é hidrogênio branco e seu potencial - eCycle**. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/hidrogenio-branco/>>. Acesso em: 30 mar. 2024.

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.

OANCEA, C. -D.; BOSTAN, D. **Some considerations regarding obtaining hydrogen by electrolysis**. 9th International Conference on Energy Efficiency and Agricultural Engineering (EE&AE), 2024, Ruse, Bulgaria. *Anais...* Ruse: 2024. p. 1-4. DOI: 10.1109/EEAE60309.2024.10600565.

OSMAN, A. I. Catalytic hydrogen production from methane partial oxidation: Mechanism and kinetic study. **Chemical Engineering & Technology**, [s. l.], v. 43, n. 4, p. 641-648, 2020. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-021-01322-8>. Acesso em: 02 abr. 2024.

OSMAN, A. I. *et al.* Hydrogen production, storage, utilisation and environmental impacts: a review. **Environmental Chemistry Letters**, [s. l.], vol. 20, p. 1-36, 2021. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s10311-021-01322-8>. Acesso em: 02 abr. 2024.

PRANAY, Shah; UPADHYAY, Harsh. **Green hydrogen production: the energy of the future**. Bombay Technologist, 2022. DOI: 10.36664/bt/2022/v69i1/172495.

SILVA, J. A.; PEREIRA, M. B.; COSTA, L. R. **Avanços recentes e futuros na eletrólise da água para geração de hidrogênio verde: análise crítica e perspectivas**. *Journal of Renewable Energy Research*, v. 14, n. 2, p. 123-145, 2024.

SILVA, Rayssa Guimarães; DO CARMO, Marlon José. **ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA: UMA PROPOSTA PARA MELHORIA DA GESTÃO ENERGÉTICA**. *InterSciencePlace*, v. 12, n. 2, 2017.

SILVÉRIO, F. O.; BARBOSA, L. C. A.; PILÓ-VELOSO, D. **A pirólise como técnica analítica**. Disponível em: <<https://www.scielo.br/j/qn/a/nQNvHt9YST7ksw7YMzrbkVp/?lang=pt&format=pdf>>. Acesso em: 30 mar. 2024.

STREET, Albert. **Máximo hidrogênio HHO: produção por eletrólise**. Disponível em: <https://www.hho-1.com/maximo-hidrogenio-hho-producao-electrolise/?lang=pt-br&srsltid=AfmBOop7ebxpq7Tnq9zHkPjGvy3HISoAaZ9OmP6dqnrmtmEg08ZMeXGc>. Acesso em: 13 nov, 2024.

WOLLMANN, Fábio Leandro. **Estudo da utilização de gás hidrogênio em veículos automotores**. 2013. Número de folhas: 74. Engenharia mecânica, veículos automotores. Universidade Regional do Noroeste de Estado do Rio Grande do Sul, Panambi, 2013.

YAMAHA Motor da Amazônia Ltda: FAZER YS250 SUPLEMENTO MANUAL DE SERVIÇO. Manaus, 2010.

YAMAHA Motor da Amazônia Ltda, FICHA TÉCNICA YAMAHA YS250. 2015. Disponível em: <<http://www.yamaha-motor.com.br/motocicletas/fazer/250-blueflex>>. Acesso em: 30 out. 2024.