



**ANÁLISE COMPARATIVA DA COMBUSTÃO DO ETANOL E  
COM ADIAÇÃO DE HIDROGÊNIO VERDE, PARA O  
MONITORAMENTO DA EMISSÃO DE CO<sub>2</sub>**

**COMPARATIVE ANALYSIS OF ETHANOL COMBUSTION WITH  
GREEN HYDROGEN ADDITION FOR MONITORING CO<sub>2</sub>  
EMISSIONS**

**ANÁLISIS COMPARATIVO DE LA COMBUSTIÓN DE ETANOL  
CON ADICIÓN DE HIDRÓGENO VERDE PARA CONTROLAR  
LAS EMISIONES DE CO<sub>2</sub>**

Jorge Luiz Januario<sup>1</sup>  
Aldo Ramos Santos<sup>2</sup>  
Patrícia Aparecida dos Santos Januario<sup>3</sup>  
Fernando Codelo Nascimento<sup>4</sup>

DOI: 10.54751/revistafoco.v17n11-146

Received: Oct 10<sup>th</sup>, 2024

Accepted: Nov 4<sup>th</sup>, 2024



**RESUMO**

Nos últimos anos, vem sendo discutido de que forma a sociedade precisa mudar os comportamentos, inclusive no consumo de combustíveis que contribui para a diminuição da poluição do meio ambiente, estando incluso nessas escolhas encontrar alternativas mais limpas para substituição de combustíveis fósseis nos motores de combustão interna tanto veículos leves, caminhões, aeronaves e motores de alto desempenho afim de atender as normas ABNT NBR ISO 14064-1 e 2, e à política de carbono zero, além de observar que essa meta também é uma das 17 diretrizes da ONU para 2030, na luta para redução dos gases de efeito estufa regulados pelo protocolo de Quioto. Nesse contexto, a pesquisa tem como objetivo geral: comparar a emissão de gases de efeito estufa na combustão do diesel em relação ao etanol puro e com a adição de hidrogênio produzido pela eletrolise. Visando alcançar o objetivo geral do trabalho, os objetivos específicos focam em demonstrar o monitoramento da emissão de CO<sub>2</sub> emitidos na combustão. O desenho metodológico da pesquisa representa um estudo de caso. Quanto a abordagem do problema e resolução deste, será empregada a análise quantitativa. Os dados foram retirados do monitoramento da combustão do motor estacionário VM210 e consumo de combustível e análise da emissão de CO<sub>2</sub> na queima

<sup>1</sup>Especialista em Engenharia Termodinâmica pelo Centro Universitário Cidade Verde. Universidade Federal de São Paulo. Rua Pedro de Toledo, 781, Fundos. E-mail: [j.januario@unifesp.br](mailto:j.januario@unifesp.br)

<sup>2</sup>Doutor em Engenharia Mecânica pela Universidade Federal de Itajubá. Universidade Santa Cecília. Rua Oswaldo Cruz, 277, Boqueirão, Santos - SP. E-mail: [rsantos@unisanta.br](mailto:rsantos@unisanta.br)

<sup>3</sup>Especialista em Psicopedagogia. Universidade da Cidade de São Paulo. Av. Guapira 140, São Paulo - SP, CEP: 02251-000. E-mail: [januariopatrícia407@gmail.com](mailto:januariopatrícia407@gmail.com)

<sup>4</sup>Pós-Doutor em Ciências. Instituto de Pesquisa Energética e Nucleares (IPEN). Av. Lineu Prestes, 2242, Cidade Universitária, São Paulo – SP, CEP: 05508-000. E-mail: [fcodelo@gmail.com](mailto:fcodelo@gmail.com)

de C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH e a emissão de CO<sub>2</sub> após a injeção de H<sub>2</sub> no coletor de admissão obtido através da eletrolise da H<sub>2</sub>O viabilizando um entendimento sobre os recursos utilizados para o alcance do objeto de estudo.

**Palavras-chave:** Hidrogênio verde; combustíveis; emissão de poluentes; etanol.

### **ABSTRACT**

In recent years, it has been discussed how society needs to change its behavior, including in the consumption of fuels that contribute to reducing environmental pollution, and these choices include finding cleaner alternatives to replace fossil fuels in internal combustion engines for light vehicles, trucks and high-performance engines in order to meet ABNT NBR ISO 14064-1 and 2 standards, and the zero carbon policy, as well as noting that this goal is also one of the 17 UN guidelines for 2030, in the fight to reduce greenhouse gases regulated by the Kyoto protocol. In this context, the general objective of this research is to compare the emission of greenhouse gases in diesel combustion in relation to pure ethanol and with the addition of hydrogen produced by electrolysis. In order to achieve the general objective of the work, the specific objectives focus on demonstrating the monitoring of CO<sub>2</sub> emissions from combustion. The methodological design of the research is a case study. Quantitative and qualitative analysis will be used to approach the problem and solve it. The data was taken from monitoring the combustion of the VM210 stationary engine and fuel consumption and analyzing CO<sub>2</sub> emissions when burning C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH and CO<sub>2</sub> emissions after injecting H<sub>2</sub> into the intake manifold obtained through the electrolysis of H<sub>2</sub>O, enabling an understanding of the resources used to achieve the object of the study.

**Keywords:** Green hydrogen; fuels; pollutant emissions; ethanol.

### **RESUMEN**

En los últimos años, se ha discutido cómo la sociedad necesita cambiar su comportamiento, incluso en el consumo de combustibles que contribuyan a reducir la contaminación del medio ambiente, y estas opciones incluyen la búsqueda de alternativas más limpias para sustituir los combustibles fósiles en los motores de combustión interna para vehículos ligeros, camiones y motores de alto rendimiento con el fin de cumplir con las normas ABNT NBR ISO 14064-1 y 2, y la política de carbono cero, así como señalar que este objetivo es también una de las 17 directrices de la ONU para 2030, en la lucha para reducir los gases de efecto invernadero regulados por el protocolo de Kyoto. En este contexto, el objetivo general de esta investigación es comparar la emisión de gases de efecto invernadero en la combustión de diesel en relación con el etanol puro y con la adición de hidrógeno producido por electrólisis. Para alcanzar el objetivo general del trabajo, los objetivos específicos se centran en demostrar la monitorización de las emisiones de CO<sub>2</sub> procedentes de la combustión. El diseño metodológico de la investigación es un estudio de caso. Se utilizará el análisis cuantitativo y cualitativo para abordar el problema y resolverlo. Los datos fueron tomados de la monitorización de la combustión del motor estacionario VM210 y del consumo de combustible y el análisis de las emisiones de CO<sub>2</sub> al quemar C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH y las emisiones de CO<sub>2</sub> después de inyectar H<sub>2</sub> en el colector de admisión obtenido a través de la electrólisis de H<sub>2</sub>O, lo que permite una comprensión de los recursos utilizados para lograr el objeto del estudio.

**Palabras clave:** Hidrógeno verde; combustibles; emisiones contaminantes; etanol.

## 1. Introdução

As atividades humanas, principalmente as que geram emissões de gases de efeito estufa, inequivocamente causaram o aquecimento global, com a temperatura da superfície global atingindo um valor 1,1°C mais alto entre 2011-2020 do que no período de 1850-1900. A emissão global de gases de efeito estufa continuaram a aumentar, com contribuições históricas e contínuas desiguais decorrentes do uso insustentável de energia, do uso da terra e da mudança no uso da terra, dos estilos de vida e dos padrões de consumo e produção entre regiões, entre países e dentro deles, e entre indivíduos.

Praticamente todo o setor de transporte demanda energia gerada em processos de combustão. A quantidade de gases nocivos que são lançados na atmosfera causando danos severos, e afetando as condições climáticas, poluição excessiva desde o século XX, além de causar o efeito estufa, evidenciando a necessidade de preocupação da humanidade nos tempos modernos, devido ao aumento do aquecimento global. (Turns, 2013).

Visando reverter à situação se faz necessário encontrar alternativas de combustíveis renováveis que causam menos danos na sociedade. Nesse sentido existem vantagens para as empresas na gestão eficiente das suas Emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), com foco na melhoria da gestão operacional e na eficiência energética. (ABNT, 2007).

O Brasil desempenha papel de destaque internacional no que se refere a discussões e negociações acerca das mudanças climáticas. Foi construído no país ao longo do tempo todo um arcabouço legal, cujo objetivo é fomentar a utilização de fontes renováveis, com destaque aos biocombustíveis. Mais um passo importante para este fim foi dado em dezembro de 2017, com o estabelecimento da Política Nacional de Biocombustíveis. O perfil de emissões de gases de efeito estufa (GEE) no Brasil apresenta características diferentes da média mundial. Enquanto na maioria dos países o setor energético é o principal emissor, no Brasil o conjunto de agricultura, florestas e uso do solo “Agriculture, Forestry, and Other Land Use” (AFOLU) responde pela maior parcela das emissões brutas de GEE. Dados recentes indicam que, em 2020, as mudanças

no uso do solo representaram 38% das emissões, em grande medida devido ao desmatamento; a agropecuária respondeu por 28,5%; e o setor energético por 23,2% (MCTI, 2022). A participação de cada segmento ressalta que um dos grandes desafios do país no combate às mudanças climáticas é zerar o desmatamento, compromisso assumido na Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC, na sigla em inglês) para o Acordo de Paris (BRASIL, 2023c).

A expectativa é de que, mais de uma dezena de usinas de segunda geração entrassem em operação até 2025. A utilização de combustíveis alternativos para emitir menos CO<sub>2</sub> na queima, como o etanol e o hidrogênio verde, a fim de minimizar os impactos no ecossistema (Lorenzi, 2018). Motores de combustão interna por compressão e combustão interna por ignição, será o objeto de estudo. Nesse projeto foi criado um eletrolisador para a obtenção do H<sub>2</sub>, o combustível obtido através da célula eletroquímica geradora de hidrogênio, onde a eletricidade provoca a dissociação da água em moléculas de hidrogênio e moléculas de oxigênio. A corrente elétrica passa entre dois eletrodos separados por um eletrólito no caso o NaOH dissolvido em água destilada, que age como um condutor ou meio de transporte de íons, produzindo hidrogênio no eletrodo negativo (ânodo) e oxigênio no eletrodo positivo (catódo), o hidrogênio produzido e injetado no coletor de admissão do cabeçote aumentando assim a eficiência do motor e diminuindo o CO<sub>2</sub>, que é o produto da combustão do motor liberado no coletor de escape. Como o H<sub>2</sub>O + CO<sub>2</sub>, é o produto da combustão sendo o dobro do volume gerado de hidrogênio em relação ao oxigênio.

## 2. Referencial Teórico

A demanda por hidrogênio (H<sub>2</sub>) cresceu mais de 300% nos últimos 50 anos e atualmente ultrapassa a marca dos 70 milhões de toneladas com uma demanda majoritariamente oriunda do refino e da produção da amônia. Estudos recentes mostram que no Brasil, aproximadamente, 95% de demanda por H<sub>2</sub> é atendida por uma única empresa autoprodutora, com aplicações em atividades de refino de derivados de petróleo assim como produção de fertilizantes. No movimento mundial pela descarbonização, o H<sub>2</sub> oriundo de fontes de baixa emissão é uma opção valiosa e, portanto, vem sendo foco de muitas ações e

mobilizações em vários países, onde cresce o escopo de suas aplicações para uma maior diversidade de setores seja na utilização como energético na geração de calor, eletricidade ou como insumo industrial. A disponibilidade de recursos renováveis e/ou de baixa emissão para a geração de energia no Brasil, é evidentemente observado como um aspecto extremamente positivo quando associado ao contexto do “H<sub>2</sub>”. Dentro deste escopo existe um conceito adicional de “H<sub>2</sub> verde” que se limita a utilização de fontes renováveis, tais como eólica e solar, para fins do H<sub>2</sub> por meio do processo de eletrólise (H<sub>2</sub>Brasil).

Um estudo da IRENA (2019) também aponta a expectativa de que o hidrogênio produzido a partir de fontes renováveis possa se tornar competitivo, em relação ao hidrogênio de origem fóssil, antes de 2025, para os melhores casos. Em relação aos valores médios mundiais, a competitividade seria alcançada entre 2030 e 2040.

A emissão de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) tem sido considerado um dos assuntos mais importantes nos debates contemporâneos, especialmente em razão das mudanças climáticas, pois é um dos principais gases de efeito estufa responsáveis pelo aquecimento global. Na concepção de Vieira (2023) as atividades humanas, a exemplo da queima de combustíveis fósseis, desmatamento e processos industriais, cooperam significativamente para a liberação de CO<sub>2</sub> na atmosfera. Os impactos desse fenômeno são diversos, já que afetam ecossistemas, climas e comunidades em todo o mundo.

Nacionalmente, diferentes países apresentam diferentes níveis de emissões de CO<sub>2</sub>, sobretudo porque, depende de seus padrões de consumo, desenvolvimento industrial e políticas ambientais. Países altamente industrializados, como é o caso dos Estados Unidos e a China, frequentemente lideram as estatísticas de emissões, em virtude de sua intensa utilização de energia proveniente de fontes não renováveis (Brand; Wissen, 2021). É importante acrescentar que nações em desenvolvimento também podem ter altas emissões devido ao rápido crescimento industrial e aumento da demanda por energia.

No contexto internacional, acordos e tratados foram estabelecidos para abordar as emissões globais de CO<sub>2</sub> e atenuar os impactos das mudanças

climáticas. O Acordo de Paris, por exemplo, busca limitar a expansão da temperatura global a menos de 2 graus Celsius acima dos níveis pré-industriais, com esforços para limitar esse aumento a 1,5 grau Celsius. O pacto incentiva os países a reduzirem suas emissões, promoverem energias renováveis e adotarem práticas sustentáveis (Brand; Wissen, 2021; Peixer, 2019).

Os impactos das emissões de CO<sub>2</sub> são variados e vai desde o aumento das temperaturas médias globais, eventos climáticos extremos, acidificação dos oceanos, até o derretimento de geleiras e aumento do nível do mar. Além do mais, afeta a saúde humana, ocasionando problemas respiratórios devido à poluição do ar e afetando a segurança alimentar por causa das mudanças nos padrões climáticos.

Nesse sentido, para enfrentar a emissão de CO<sub>2</sub>, se faz necessário adotar abordagens abrangentes conforme fluxograma indicado na Figura 4, incluindo: a) transição para fontes de energia renovável, b) eficiência energética, c) reflorestação e práticas agrícolas sustentáveis (Leite; Alves; Picchi, 2020).

## 2.1 Objetivo

O objetivo do presente estudo foi demonstrar o monitoramento da emissão de CO<sub>2</sub> emitida na combustão, considerando a queima completa, e evidenciar que nos tempos atuais o etanol é a melhor opção por ser menos poluente e ter a melhor relação custo benefício e avaliação do desempenho de um motor estacionário modificado ou seja para trabalhar com 100% de etanol através e analisando a emissão de CO<sub>2</sub> na combustão do etanol em comparação com a emissão de CO<sub>2</sub>, após a adição de hidrogênio. Para tanto, foram utilizados os combustíveis: Hidrogênio Verde obtido por eletrólise e etanol hidratado comercial.

## 3. Materiais e Métodos

### 3.1 Célula de Combustível

Princípio Básico:

A célula de combustível funciona com base em uma reação eletroquímica entre um combustível (hidrogênio) e o oxigênio do ar, produzindo eletricidade, água e calor como subprodutos. A reação central é:



Esta reação ocorre em um ambiente controlado, dividido em dois eletrodos: o ânodo e o cátodo.

Componentes Principais:

Ânodo: No ânodo, o combustível ( $\text{H}_2$ ) é oxidado, ou seja, perde elétrons. Esses elétrons fluem por um circuito externo, gerando eletricidade.

Cátodo: No cátodo, o oxigênio ( $\text{O}_2$ ) do ar ganha os elétrons que foram liberados no ânodo, combinando-se com íons de hidrogênio (prótons) para formar água ( $\text{H}_2\text{O}$ ).

Eletrólito: Entre o ânodo e o cátodo, existe um eletrólito, que permite a passagem de íons de hidrogênio (prótons) do ânodo para o cátodo, mas bloqueia a passagem dos elétrons, forçando-os a seguir pelo circuito externo.

### 3.2 Eficiência e Emissões

As células de combustível são altamente eficientes, com eficiências típicas de 40-60%, podendo atingir 80% quando o calor gerado é recuperado e utilizado.

Em termos de emissões, as células de combustível de hidrogênio emitem apenas vapor de água como subproduto, o que as torna uma opção limpa e sustentável.

### 3.3 Reforma de Combustível

Combustíveis como metano ou metanol podem ser convertidos em hidrogênio através de processos como a reforma a vapor, onde o combustível reage com vapor para produzir hidrogênio e dióxido de carbono.

Para se realizar a análise, utilizou-se modelagem estequiométrica das reações, um motor VM210, do tipo quatro tempos a etanol:

Figura:1 Motor estacionário Vulcan VM 210 7 HP



Fonte: Vulcan maquinas e equipamentos, 2024.

Célula de hidrogênio com cálculos que envolvem o processo de eletrólise, cálculos de eficiência, consumo de energia, e produção de hidrogênio.

Célula de hidrogênio com cálculos que envolvem o processo de eletrólise, cálculos de eficiência, consumo de energia, e produção de hidrogênio.

A presente seção faz menção ao trajeto metodológico da pesquisa e procedimentos utilizados para chegar ao resultado proposto. Quanto à abordagem do problema e resolução deste, será empregada a análise quanti-qualitativa. Para tanto, os dados foram retirados do monitoramento do consumo do motor estacionário viabilizando um entendimento sobre os recursos utilizados para o alcance do objeto de estudo.

Tratando-se de motores estacionário, foram analisados 2 tipos de combustíveis

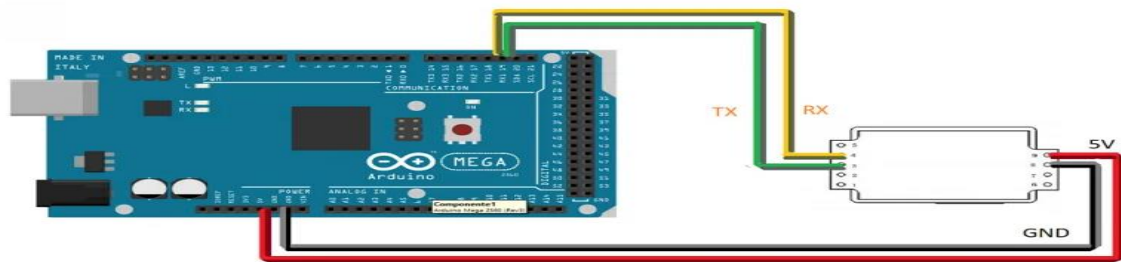
C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O e H<sub>2</sub> analisando o consumo e a emissão de CO<sub>2</sub> em cada um.

A contribuição e uso de tais procedimentos através da utilização dos dados coletados *in loco* para identificar as melhorias no processo de operacionalização, assim a proposta de uso de um combustível, que contribuirá para uma menor poluição do meio ambiente. Para uma análise comparativa ambiental, pode-se estimar a massa de CO<sub>2</sub> que é emitido pelo motor estacionário. Para no cálculo, foi considerada a situação em que os motores são colocados em funcionamento com a queima de 252 L e efetuada a leitura no escapamento do motor.

### 3.4 Sistema de Monitoramento

Monitoramento do CO<sub>2</sub> utilizando sensor MH-Z19 NDIR uma placa do Arduino Uno.

Figura 2 – Sistema de monitoramento de CO<sub>2</sub>



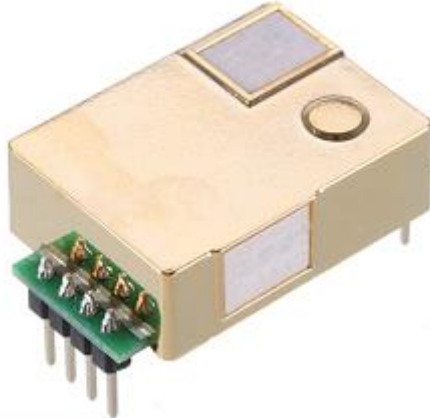
Fonte: Electroniclinic, 2022.

O Arduino é uma placa eletrônica com software e hardware aberto utilizada para a prototipação de projetos, com baixo custo. O Arduino possui pinos de entrada e saída, os de entrada recebem informações (dados) de sensores e os de saída para os atuadores. Entre a entrada e a saída da plataforma há o micro controlador que faz o controle dos dados de entrada e saída. O microcontrolador é programado na linguagem de programação arduino pela IDE de mesmo nome. IDE é o software responsável pela escrita do programa e transferência do mesmo para seu microcontrolador.

### 3.5 Sensor de CO<sub>2</sub> MH-Z19 NDIR

O sensor apresenta as leituras correspondentes no módulo de exibição OLED. O termo "NDIR" significa Infravermelho Não Dispersivo que usa comprimentos de onda de luz específicos para calcular a quantidade dentro do ar.

Este sensor utiliza o princípio NDIR (Non Dispersive Infra Red) para medir a concentração de CO<sub>2</sub> no ar com notável precisão. O sensor é basicamente um tubo aberto que coleta ar na área, com um diodo infravermelho em uma extremidade e um receptor de luz na outra.

Figura.3 - Sensor de CO<sub>2</sub> MH-Z19 NDIR

Fonte: Zhengzhou Winsen Electronics Technology Co., Ltd, 2021.

Como o CO<sub>2</sub> absorve a luz infravermelha, a quantidade de luz recebida pelo detector é inversamente proporcional à concentração de CO<sub>2</sub> no ar e não depende muito da presença de outros gases ou umidade relativa (ao contrário de outros tipos de sensores) e também tem um sistema interno para compensar as variações de temperatura.

A razão pela qual o CO<sub>2</sub> é um gás de efeito estufa tão poderoso é porque ele permite que a luz visível passe pela atmosfera até o solo, onde se aquece e emite parte desse calor como radiação infravermelha, que o CO<sub>2</sub> atmosférico bloqueia e impede que se disperse inofensivamente na atmosfera.

Esse conceito de eficiência é particularmente relevante para células a combustível que utilizam hidrogênio e oxigênio para gerar eletricidade. A eficiência real de uma célula a combustível pode ser menor devido a perdas adicionais, como resistência interna, transporte de massa e outros fatores não considerados na eficiência termodinâmica ideal.

### 3.6 Resultados e Discussões

Cálculos de Energia e Produção de Hidrogênio:

Quantidade de Hidrogênio Produzida:

A equação balanceada demonstra que 2 mols de água produzem 2 mols de hidrogênio e 1 mol de oxigênio. Um mol de qualquer gás, a temperatura e pressão normais (TPN, 0°C e 1 atm), ocupa 22,4 litros.

Massa molar da água (H<sub>2</sub>O): 18 g/mol

Densidade da água: 1 g/mL (1 L = 1000 g)

Então, para cada 18 g (ou 18 mL) de água, obteve-se 2 mols de H<sub>2</sub>, que é equivalente a 44,8 litros de H<sub>2</sub> a TPN.

Cálculo:

Quantidade de hidrogênio gerada por 1 litro de água (1000 g):

### 3.7 Mols de H<sub>2</sub>O

$$\text{Mols de H}_2\text{O} = \frac{1000\text{g}}{18\text{g/mol}} = 55,56 \text{ mols} \quad (2)$$

Mols de H<sub>2</sub> produzidos:

Mols de H<sub>2</sub> = 55,56 mols

Cálculos de Energia:

A energia de Gibbs mínima teórica para quebrar as ligações químicas e decompor a água é aproximadamente 237 kJ/mol de H<sub>2</sub>O.

Energia Necessária:

Considerando 2 mols de elétrons necessários para produzir 1 mol de H<sub>2</sub>, a energia por mol de H<sub>2</sub> será:

Energia (E) = 237 kJ/mol de H<sub>2</sub>O = 118,5 kJ/mol de H<sub>2</sub>

Cálculo de Corrente Elétrica:

Para converter essa energia em termos de corrente elétrica, precisamos usar a relação entre energia e carga elétrica. A energia fornecida pela fonte é dada por:

$$E = V \times Q \quad (3)$$

onde:

E é a energia (em joules),

V é a voltagem (em volts),

Q é a carga elétrica (em coulombs).

Sabendo que 1 Faraday (1 mol de elétrons) corresponde a 96485 coulombs:

A energia elétrica necessária para produzir 1 mol de H<sub>2</sub> com uma voltagem V será:

$$Q = \frac{E}{V} = \frac{118,5 \times 10^3 \text{ J/mol}}{V \text{ volts}} \quad (4)$$

$$V = \frac{118,5 \times 10^3 \text{ J/mol}}{96485} = 1,22 \text{ V} \quad (5)$$

A corrente ( I ) requerida para gerar 1 mol de H<sub>2</sub> em 1 segundo seria:

$$I = \frac{Q}{t} = \frac{59250 \text{ C}}{t \text{ s}} \quad (6)$$

Se deseja gerar 1 mol de H<sub>2</sub> em 1 hora (3600 segundos):

$$I = \frac{59250}{3600} = 16,46 \text{ A} \quad (7)$$

#### 4. Resultados e Discussões

O presente estudo tem como objetivos demonstrar a quantidade de emissão de CO<sub>2</sub>, sendo menor após a injeção do hidrogênio na câmara de admissão do motor ciclo Otto queimando etanol, segue os cálculos para obtenção do rendimento, liberadas dos dois combustíveis, conforme as reações estequiométricas.

Massa total de etanol queimado por hora:

Volume do etanol = 252 l

Densidade do etanol C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O, 0,790g/cm<sup>3</sup> (ANP 2019), conversão para g/l:

$$d_{\text{C}_2\text{H}_6\text{O}} \text{ (g/l)} = 1000 \times 0,790 \text{ g/cm}^3$$

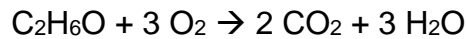
$$d_{\text{C}_2\text{H}_6\text{O}} = 790 \text{ g/l} \quad (8)$$

$$m_{C_2H_6O} = 790 \text{ g/l} \times 252 \text{ l/h}$$

$$m_{C_2H_6O} = 199,080 \text{ kg/h}$$

(9)

Reação na combustão do Etanol:



C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	O <sub>2</sub>	→	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
1	3		2	3

mols de etanol C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>O:

C <sub>2</sub> H <sub>6</sub> O	O <sub>2</sub>	→	CO <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> O
4.327,8	12.985,4		8.655,6	12.985,4

Reação Estequiométrica do Etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH)

A reação de combustão completa do etanol pode ser representada como:



Para cada mol de etanol queimado, são produzidos 2 mols de CO<sub>2</sub>.

Densidade e Massa do Etanol

A densidade do etanol é aproximadamente 0,790 g/mL, ou 790 g/L.

$$\text{Massa de Etanol} = 252 \times 790 \text{ g} = 199.080 \text{ g} = 199,080 \text{ kg} \quad (11)$$

Mols de Etanol

Para encontrar o número de mols de etanol no volume preestabelecido, dividimos a massa pelo peso molecular do etanol (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OH), que é 46 g/mol:

$$\text{Mols de Etanol} = \frac{199080 \text{ g}}{46 \text{ g/mol}} \approx 4327,8 \text{ mol} \quad (12)$$

Massa de CO<sub>2</sub> emitida (Sem Hidrogênio)

Sem a injeção de hidrogênio, a quantidade de CO<sub>2</sub> emitida seria:

$$\text{Massa de CO}_2 = 4327,8 \text{ mol} \times 44\text{g/mol} \times 2 = 380846\text{g} = 380,8\text{kg} \quad (13)$$

Efeito da Injeção de Hidrogênio Gasoso

Para a injeção de hidrogênio gasoso (H<sub>2</sub>), vamos calcular o número de mols de H<sub>2</sub> injetado:

$$\text{Mols de H}_2 = \frac{4,18 \text{ litros}}{22,4 \text{ litros/mol}} \approx 0,186 \text{ mol} \quad (14)$$

O hidrogênio substitui parcialmente o etanol na geração de energia, resultando em menos etanol queimado e, portanto, menos CO<sub>2</sub> emitido.

Redução na Emissão de CO<sub>2</sub>

Assumindo que o hidrogênio substitui uma pequena fração da energia fornecida pelo etanol:

$$\text{Energia substituída pelo hidrogênio: } 0,186 \text{ mol} \times 118,5 \text{ kJ/mol} \approx 22,041\text{kJ} \quad (15)$$

A energia do etanol está em kJ/kg, mas o valor usado é referente ao poder calorífico do etanol (que geralmente é cerca de 29,7 MJ/kg).

$$\text{Energia fornecida pelo etanol original: } 199,08\text{kg} \times 29,7\text{MJ/kg} = 5912676\text{kJ} \quad (16)$$

A fração de energia fornecida pelo hidrogênio seria:

$$\text{Fração de energia substituída} = \frac{22,041 \text{ kJ}}{5912676 \text{ KJ}} \approx 0,0037\% \quad (17)$$

A redução na emissão de CO<sub>2</sub> seria de aproximadamente 0,0037% da emissão original:

$$\text{Massa de CO}_2 \text{ reduzida} = 380,34 \text{ kg} \times (1 - 0,0037) \approx 378,93\text{kg} \quad (18)$$

## 5. Conclusão

Com a injeção de 4,18 litros de hidrogênio gasoso, a massa de CO<sub>2</sub> emitida após a queima de 252 litros de etanol seria aproximadamente 378,93kg, representando uma leve redução de cerca de 0,0037% nas emissões de CO<sub>2</sub>.

Na análise o etanol se demonstrou, como melhor alternativa. Faz-se necessário maior estudo a respeito do tema, e métodos de cálculos para outros combustíveis como, por exemplo, o hidrogênio verde, que já é uma das fontes de energia com maior eficiência energética e muito demanda por países europeus, nos tempos atuais.

## REFERÊNCIAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14064-1:2007**. Gases de efeito estufa: Especificação e orientação a organizações para quantificação e elaboração de relatórios de emissões e remoções de gases de efeito estufa. Rio de Janeiro: ABNT, 2007.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT: NBR ISO 14064-2 de 10/2022**. Gases de efeito estufa - Parte 2: Especificação e orientação a projetos para quantificação, monitoramento e elaboração de relatórios das reduções de emissões ou da melhoria das remoções de gases de efeito estufa. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ALBUQUERQUE, Delosmar da Silva. **Estudo da obtenção inédita de etanol anidro da algaroba para inovadora aplicação na produção de biodiesel**. Dissertação (Mestrado em Energias Renováveis) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa/PB, 2022.

ARAÚJO, Arney Rayol Moura; OLIVEIRA, Elane Conceição. Análise do consumo de combustíveis do setor de transporte rodoviário no Brasil. **Revista Estudo & Debate**, v. 27, n. 3, 2020.

BOEIRA, Felipe de Souza. **Estudo e análise de falhas em pás carregadeiras baseado na manutenção centrada em confiabilidade**. Monografia (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre/RS, 2022.

BRAND, Ulrich; WISSEN, Markus. **Modo de vida imperial**: sobre a exploração de seres humanos e da natureza no capitalismo global. Editora Elefante, 2021.

JANUARIO, J. L.; SANTOS, A. R.; SANTOS JANUARIO, P. A. Emissão de CO<sub>2</sub> na Combustão do Óleo diesel em Comparação com o Etanol, em Motores de Grupo Moto Gerador. **Anais do Encontro Nacional de Pós-graduação**, v. 7, n. 1, p.

467-471, 2023.

HOLLANDA, J. B. **Etanol Pode Substituir Diesel**. 2017. Disponível em: <http://etanoleficiente.org.br/sites/default/files/arquivos/artigos/etanol-pode-substituir-diesel/etanol-pode-substituir-diesel-84.pdf> Acesso em: 16 out. 2023.

LORENZI, B. **Etanol de segunda geração no Brasil: política e translações**. São Carlos (SP), UFSCar. 2018.

LEITE, Alexandre César Cunha; ALVES, Elia Elisa Cia; PICCHI, Livia. A cooperação multilateral climática e a promoção da agenda da transição energética no Brasil. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**, v. 54, p. 379-403, jul./dez. 2020.

PARDINI, Danielle Nonato. **Potencial de redução da emissão de CO<sub>2</sub> pela adoção do bioetanol**: estudo de caso em uma empresa do segmento de transporte de valores. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Ambiental) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Sorocaba/SP, 2023.

PEIXER, Janaína Freiberg Benkendorf. **A contribuição nacionalmente determinada do Brasil para cumprimento do Acordo de Paris: metas e perspectivas futuras**. Tese (Doutorado em Direito) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis/SC, 2019.

SANTOS, Antonio Marcos Pantoja. **Políticas públicas de educação ambiental nos municípios da Região Integrada de Desenvolvimento do Distrito Federal e Entorno**: O caso de Santo Antônio do Descoberto–GO. Dissertação (Mestrado em Estado, Governo e Políticas Pública) – Faculdade Latino-Americana de Ciências Sociais e Fundação Perseu Abramo, Brasília/DF, 2023.

SILVA, C.M.; ARBILLA. G. **Emissões atmosféricas e mudanças climáticas**. Rio de Janeiro: 2022. *E-book*. Disponível em: <HTTPS://plataforma.bvirtual.com.br>. Acesso em: 18 ago. 2023.

URNS, S. R. **Introdução à Combustão**: Conceitos e Aplicações. New York: AMGH Editora, 2013.

VIEIRA, Marco Aurélio. **CO<sub>2</sub>**: análise contemporânea no impacto do crescimento econômico e energia sobre a emissão de dióxido de carbono. Tese (Doutorado em Administração) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria/RS, 2023

VASCONCELOS, L. B. **Análise da Viabilidade Técnica-Econômica para a Instalação de Grupo Gerador a Etanol no Horário de Ponta no Campus Itumbiara do IFG**. 2017. Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado e Engenharia Elétrica) - INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE GOIÁS, Itumbiara, 2017.