

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ITHALO GIOVANNI BENASSI
PEDRO HENRIQUE BARION

A INFLUÊNCIA DO HIDROGÊNIO EM MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA COM
GASOLINA: UM ESTUDO COMPREENSIVO

CURITIBA

2024

ITHALO GIOVANNI BENASSI
PEDRO HENRIQUE BARION

A INFLUÊNCIA DO HIDROGÊNIO EM MOTORES A COMBUSTÃO INTERNA COM
GASOLINA: UM ESTUDO COMPREENSIVO

Artigo apresentado como requisito parcial à
conclusão da pós-graduação de Engenharia
Automotiva, Setor de Engenharia Mecânica,
Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Stephan Hennings Och

CURITIBA
2024

A Influência do Hidrogênio em Motores a Combustão Interna com Gasolina: Um Estudo Compreensivo

Ithalo Giovanni Benassi

Pedro Henrique Barion

RESUMO

Este artigo analisa a influência do hidrogênio em motores de combustão interna, utilizando o motor Branco B4T-5.5H como base experimental. O estudo foi realizado por meio de simulações no software GT-SUITE, onde diferentes frações de hidrogênio foram introduzidas na mistura de combustível para avaliar o impacto sobre o consumo, desempenho e emissões do motor. A relação ar-combustível combinada foi ajustada considerando as proporções estequiométricas da gasolina (14,7:1) e do hidrogênio (34,3:1). As simulações cobriram misturas com 10% a 50% de hidrogênio, todas com uma relação lambda de 0,9. Os resultados deste estudo fornecem uma visão detalhada sobre o potencial do hidrogênio como combustível alternativo em motores de combustão interna, contribuindo para o desenvolvimento de tecnologias mais eficientes e menos poluentes no setor automotivo.

Palavras-chave: Combustão. Hidrogênio. Performance. Tecnologia. Eficiência.

ABSTRACT

This article analyzes the influence of hydrogen on internal combustion engines, using the Branco B4T-5.5H engine as the experimental basis. The study was conducted through simulations in the GT-SUITE software, where different fractions of hydrogen were introduced into the fuel mixture to evaluate the impact on fuel consumption, performance, and emissions. The combined air-fuel ratio was adjusted considering the stoichiometric ratios of gasoline (14.7:1) and hydrogen (34.3:1). The simulations covered mixtures with 10% to 50% hydrogen, all with a lambda ratio of 0,9. The results of this study provide a detailed view of the potential of hydrogen as an alternative fuel in internal combustion engines, contributing to the development of more efficient and less polluting technologies in the automotive sector.

Keywords: Combustion. Hydrogen. Performance. Technology. Efficiency.

1 INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com a sustentabilidade e a necessidade de redução das emissões de gases de efeito estufa têm impulsionado a busca por alternativas aos combustíveis fósseis tradicionais. Nesse contexto, o hidrogênio emerge como uma opção promissora, especialmente em aplicações automotivas. O hidrogênio, um elemento abundante e não poluente, possui características que o tornam particularmente atraente como combustível em motores de combustão interna. Sua alta energia por unidade de massa e a ausência de emissões de carbono durante a combustão o destacam como uma solução viável para o futuro da mobilidade sustentável.

Este trabalho se propõe a investigar a influência do hidrogênio em motores de combustão interna, utilizando como base experimental o motor monocilíndrico Branco B4T-5.5H. Por meio de simulações realizadas no software GT-SUITE, diferentes frações de hidrogênio foram introduzidas na mistura de combustível para avaliar o impacto em parâmetros críticos como consumo de combustível, desempenho e emissões de gases poluentes. O estudo se concentrou em misturas de hidrogênio variando de 10% a 50%, todas operando com uma relação lambda de 0,9, o que representa uma mistura rica, ou seja, com excesso de combustível em relação ao ar disponível para a combustão.

A análise foi fundamentada na adequação da relação ar-combustível (A/F) para misturas de hidrogênio e gasolina, considerando as propriedades específicas de cada combustível. A gasolina, com uma relação ar-combustível estequiométrica de 14,7:1, e o hidrogênio, com 34,3:1, demandam ajustes precisos para garantir uma combustão eficiente e segura. A fórmula adotada para calcular a relação ar-combustível combinada real levou em conta essas variáveis, possibilitando a simulação de diferentes cenários e a obtenção de dados relevantes para o estudo.

Os resultados obtidos não apenas validam o potencial do hidrogênio como combustível alternativo em motores de combustão interna, mas também fornecem *insights* valiosos sobre os desafios e as oportunidades associadas à sua implementação em larga escala. A utilização de hidrogênio pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de tecnologias automotivas mais eficientes e menos poluentes, alinhando-se às metas globais de redução de emissões e sustentabilidade ambiental.

Assim, este estudo se coloca como uma contribuição relevante para o avanço do conhecimento na área de combustíveis alternativos, demonstrando como a integração do hidrogênio em motores convencionais pode ser uma estratégia viável e benéfica para o futuro da mobilidade.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

2.1.1 Conceito de um motor a combustão interna

Um motor a combustão interna é uma máquina térmica que converte a energia química do combustível em energia mecânica através de um processo de combustão que ocorre dentro do próprio motor (PUGLIESI,1976). Este tipo de motor é amplamente utilizado em automóveis, motocicletas, aviões, barcos e várias outras aplicações.

2.1.2 Princípios de funcionamento de um motor a combustão interna

O motor de combustão interna de ciclo Otto de quatro tempos é um dos tipos mais comuns de motores a combustão interna. Este ciclo foi desenvolvido por Nikolaus Otto e é amplamente utilizado em automóveis e outras aplicações. Segundo Brunetti (2012), o ciclo Otto de quatro tempos envolve quatro fases principais: admissão, compressão, combustão (ou explosão) e escape.

- Primeiro tempo - Admissão

Durante o tempo de admissão, a válvula de admissão abre enquanto o pistão se move para baixo no cilindro. Isso cria um vácuo que permite que a mistura de ar e combustível seja aspirada para dentro do cilindro. A válvula de escape permanece fechada durante esta fase.

- Segundo tempo - Compressão

Após o pistão atingir o ponto morto inferior (PMI), a válvula de admissão se fecha. O pistão então começa a se mover para cima, comprimindo a mistura de ar e combustível no cilindro.

A compressão aumenta a pressão e a temperatura da mistura, preparando-a para a combustão. Durante esta fase, ambas as válvulas (admissão e escape) estão fechadas.

- Terceiro tempo - Combustão (Explosão)

Quando o pistão atinge o ponto morto superior (PMS), a vela de ignição emite uma faísca que inflama a mistura comprimida de ar e combustível. A combustão rápida da mistura cria uma explosão que gera uma grande quantidade de energia, forçando o pistão a se mover rapidamente para baixo. Esta fase é a responsável pela maior parte da energia mecânica gerada pelo motor.

- Quarto tempo - Escape

Após a combustão, o pistão se move novamente para cima, desta vez empurrando os gases de escape resultantes da combustão para fora do cilindro. A válvula de escape abre durante esta fase, permitindo que os gases sejam expulsos para fora do motor. A válvula de admissão permanece fechada.

Essas quatro fases (admissão, compressão, combustão e escape) completam um ciclo de operação do motor. Cada ciclo requer duas voltas completas do virabrequim (720 graus), com o pistão se movendo para cima e para baixo duas vezes (SOUZA, 2016).

A eficiência e a potência do motor dependem de vários fatores, incluindo a taxa de compressão, a eficiência da combustão e a qualidade da mistura ar-combustível.

2.1.3 Componentes fundamentais em um motor de combustão interna

Para entender melhor os principais componentes de um motor a combustão interna de ciclo Otto de quatro tempos, é essencial explorar suas funções, construção e como eles interagem para permitir o funcionamento eficiente do motor. Os principais componentes são,

- Pistão

Função: O pistão é a parte móvel dentro do cilindro que realiza os quatro tempos do ciclo Otto: admissão, compressão, combustão e escape.

Construção:

- Material: Geralmente feito de ligas de alumínio devido à sua leveza e boa condução de calor.
- Partes: Consiste na cabeça (topo do pistão), saia (parte lateral que entra em contato com o cilindro) e anéis de pistão (responsáveis por vedação e controle de óleo).

- Anéis de Pistão

- Tipicamente, há três anéis: dois anéis de compressão e um anel de controle de óleo. Os anéis de compressão vedam a câmara de combustão, enquanto o anel de controle de óleo regula a quantidade de óleo lubrificante no cilindro.

- Cilindro

Função: O cilindro é a câmara onde ocorre a combustão. Ele guia o movimento do pistão.

Construção:

- Material: Feito de ferro fundido ou alumínio com um revestimento de superfície resistente ao desgaste, como Nicasil ou outros compostos cerâmicos.
- Resfriamento: Geralmente envolvido por camisas de água (em motores refrigerados a água) para manter a temperatura operacional adequada.

- Válvulas de Admissão e Escape

Função: As válvulas controlam a entrada da mistura ar-combustível e a saída dos gases de escape.

Construção:

- Material: Feitas de ligas de aço resistentes ao calor. As válvulas de escape são frequentemente feitas de materiais ainda mais resistentes devido às altas temperaturas dos gases de escape.
- Mecanismo de Acionamento: Acionadas por árvores de cames através de tuchos, balancins ou roletes. A abertura e fechamento são sincronizados com o movimento do pistão e a rotação do virabrequim.

- Vela de Ignição

Função: A vela de ignição cria uma faísca elétrica que inflama a mistura de ar e combustível comprimida no cilindro.

Construção:

- Material: Corpo cerâmico para isolamento elétrico e um eletrodo central de níquel ou irídio.

- Gap: O espaço entre o eletrodo central e o eletrodo lateral deve ser preciso para garantir uma faísca eficaz.

- Virabrequim

Função: O virabrequim converte o movimento linear dos pistões em movimento rotativo.

Construção:

- Material: Feito de aço forjado ou ferro fundido nodular para alta resistência e durabilidade.
- Partes: Possui mancais principais (que suportam o virabrequim no bloco do motor) e mancais de biela (onde as bielas se conectam ao virabrequim).

- Bielas

Função: As bielas conectam os pistões ao virabrequim, transmitindo a força gerada pela combustão para o virabrequim.

Construção:

- Material: Geralmente feitas de aço forjado para máxima resistência.
- Partes: Consistem na ponta grande (conectada ao virabrequim), a haste e a ponta pequena (conectada ao pistão através do pino do pistão).

- Cabeçote

Função: O cabeçote fecha a parte superior dos cilindros e abriga as válvulas, a vela de ignição e, em motores modernos, os injetores de combustível.

Construção:

- Material: Tipicamente feito de alumínio ou ferro fundido.
- Câmaras de Combustão: Desenhadas para otimizar a combustão e a eficiência do motor.

- Cáster

Função: O cáster aloja o virabrequim e serve como reservatório de óleo lubrificante.

Construção:

- Material: Geralmente de alumínio ou aço estampado.

- Partes: Inclui o cárter superior (integrado ao bloco do motor) e o cárter inferior (panela de óleo).

- Árvores de Cames

Função: As árvores de cames controlam a abertura e fechamento das válvulas de admissão e escape.

Construção:

- Material: Aço ou ferro fundido, com lobos de cames tratados termicamente para maior durabilidade.
- Posição: Localizadas no cabeçote (motores OHC ou DOHC) ou no bloco do motor (motores OHV).

- Sistema de Injeção de Combustível

Função: Fornece a mistura correta de ar e combustível aos cilindros.

Construção:

- Tipos: Injeção indireta (mistura de combustível antes de entrar no cilindro) ou injeção direta (combustível injetado diretamente no cilindro).
- Componentes: Bomba de combustível, injetores, regulador de pressão e sensores.

- Sistema de Arrefecimento

Função: Mantém a temperatura do motor dentro de uma faixa operacional segura.

Construção:

- Componentes: Radiador, bomba de água, termostato, ventoinha e líquido de arrefecimento.
- Fluxo: O líquido de arrefecimento circula através do bloco do motor e do cabeçote, absorvendo calor e dissipando-o através do radiador.

Esses componentes trabalham juntos de maneira sincronizada para garantir que o motor funcione de forma eficiente e confiável, convertendo a energia química do combustível em energia mecânica que pode ser utilizada para movimentar veículos e máquinas.

2.2 COMBUSTÍVEIS

Os combustíveis possuem duas classificações básicas, que são os renováveis, geralmente de fontes vegetais e os não renováveis, que são os combustíveis fósseis e de origem nuclear. Segundo Bizzo (2003), a maioria dos combustíveis fósseis são substâncias compostas por hidrocarbonetos e a típica composição é formada por carbono, oxigênio e hidrogênio. Os combustíveis também podem ser classificados quanto a sua forma física, ou seja, sólidos, líquidos e gasosos. Nos motores a combustão de veículos os combustíveis são, em sua maioria, utilizados na forma líquida e possuem algumas propriedades como:

Temperatura de ignição: temperatura no qual a chama provoca uma combustão continuada sobre a superfície do combustível;

Temperatura de autoignição: temperatura mínima da mistura ar/combustível para que a combustão se inicie e mantenha;

Octanagem: Também conhecido como índice de octano, é uma medida da capacidade do combustível de resistir a detonação espontânea;

Período de indução: É a medida do tempo decorrido para que o combustível se degrade significativamente sob condições controladas de pressão e temperatura;

Cetenagem: Também chamado de número de cetano, se refere a qualidade da ignição do combustível.

No Brasil, os combustíveis líquidos mais utilizados em veículos leves de passeio são a gasolina e o etanol hidratado.

2.2.1 Gasolina

A gasolina é obtida através do refino de petróleo e é uma mistura de hidrocarbonetos contendo de 4 até 12 átomos de carbono, é obtida através dos processos de destilação direta, craqueamento, reforma, alquilação e isomerização, além disso, apresenta ponto de ebulição entre 30°C e 225°C. São classificadas de acordo com a octanagem em “comum” e “premium”, sendo que esta última possui um maior índice de octano.

A gasolina que sai das refinarias é conhecida como Gasolina A e de acordo com a legislação brasileira, essa gasolina deve ser misturada com uma certa quantidade de etanol anidro, originando assim a Gasolina C, que é a vendida nos postos do país. Desde 2015, a quantidade de etanol anidro misturado é de 27% para gasolina comum e 25% para gasolina premium.

2.2.2 Hidrogênio

O hidrogênio é incolor, inodoro e o elemento químico mais abundante do universo. É um composto com grande capacidade de armazenar energia, de baixo peso molecular e com uma grande quantidade de energia por unidade de massa (SAE, 2024). Sua classificação é conforme a forma de obtenção e é dividido em verde, azul e cinza. No caso do hidrogênio verde, não há emissão de carbono na atmosfera, pois a sua obtenção é por meio da separação da molécula da água (H_2O) em hidrogênio (H_2) e oxigênio (O), já o hidrogênio cinza é um subproduto de refinarias de petróleo e é produzido através da reforma a vapor de combustíveis fósseis, segundo a SAE Brasil, cada tonelada de hidrogênio produz 10 toneladas de CO_2 . Por fim, o processo de obtenção do hidrogênio azul é idêntico ao do hidrogênio cinza, porém, o CO_2 produzido não é lançado na atmosfera e sim armazenado de forma subterrânea para produzir combustíveis sintéticos, por exemplo.

Com isso, o hidrogênio verde possui um potencial enorme para utilização na indústria automotiva, pois é renovável, inesgotável e não poluente, contribuindo com a redução dos GEE. Como a maior parte da matriz energética do Brasil é de fontes renováveis, o país grande potencial de se tornar referência na produção de hidrogênio verde. A única desvantagem é que o custo de produção ainda é muito elevado, porém, com os avanços regulatórios e científicos, a tendência é que os preços se tornem mais acessíveis e competitivos, quando comparados com outros tipos de energia.

2.3 NOX

Os óxidos de nitrogênio, conhecidos coletivamente como NO_x , são gases poluentes que incluem principalmente o óxido nítrico (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO_2). Esses compostos são gerados durante o processo de combustão em motores de combustão interna, especialmente em altas temperaturas. O NO_x é formado quando o nitrogênio (N_2) presente no ar atmosférico reage com o oxigênio (O_2) durante a queima do combustível.

A formação de NO_x ocorre de forma mais intensa em condições de alta temperatura e pressão, típicas de motores que operam com misturas pobres (excesso de ar) ou em cargas elevadas. Quando a temperatura da câmara de combustão ultrapassa aproximadamente $2.000^{\circ}C$, o nitrogênio e o oxigênio, normalmente inertes, começam a reagir, formando NO e NO_2 .

Essas condições são comuns em motores que buscam maximizar a eficiência térmica, mas acabam resultando em uma maior emissão de NO_x .

2.4 CO₂

O dióxido de carbono (CO₂) é amplamente reconhecido como um dos principais gases de efeito estufa, desempenhando um papel crucial no processo de aquecimento global e nas mudanças climáticas.

Este gás é produzido naturalmente pela respiração de organismos vivos e pela decomposição de matéria orgânica, no entanto, a maior parte das emissões de CO₂ provém de atividades humanas, particularmente da queima de combustíveis fósseis em veículos com motores de combustão interna (RAÍZEN, 2024). Nesses motores, a gasolina é composta predominantemente por hidrocarbonetos, que, ao serem queimados, liberam CO₂ e água como subprodutos. Este processo contribui significativamente para o aumento das concentrações de CO₂ na atmosfera, exacerbando o efeito estufa e promovendo o aquecimento da superfície terrestre (EPE, 2024; CETESB, 2024).

Além disso, a crescente frota de veículos em todo o mundo tem intensificado este problema, o que tem levado a um debate global sobre a necessidade de desenvolver alternativas de combustíveis mais limpos e tecnologias de veículos menos poluentes (SCALON, 2024).

3 METODOLOGIA

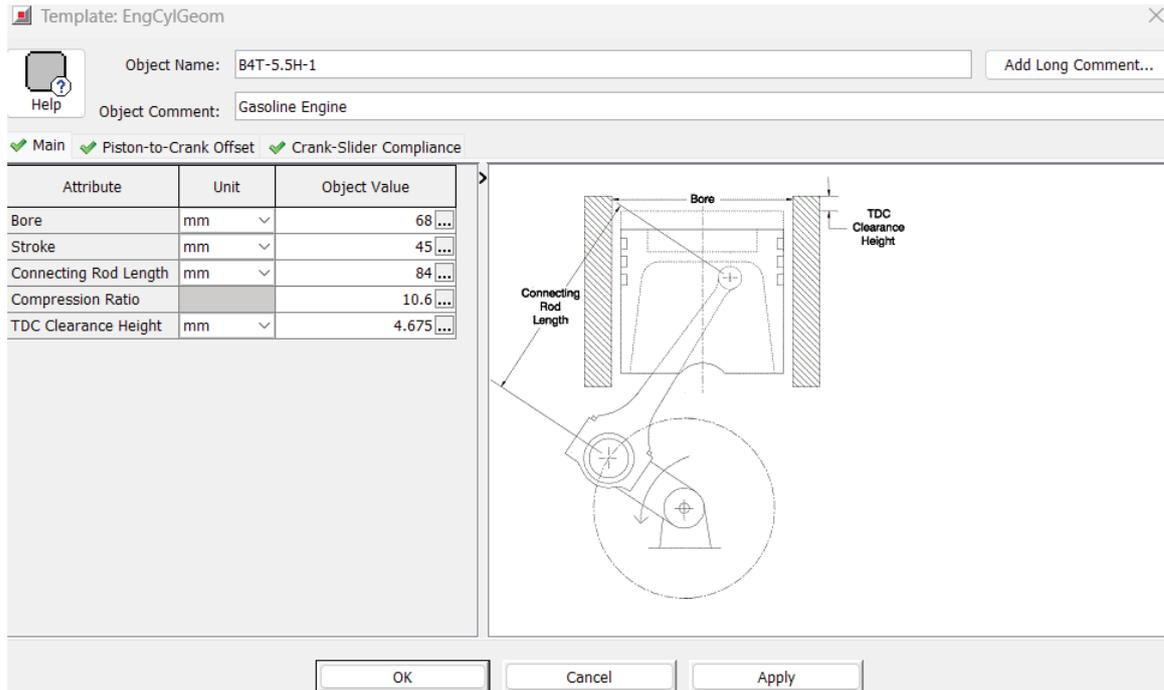
Para estudar a influência do hidrogênio nos motores de combustão interna foi utilizado o *software* GT-SUITE. Com o intuito de simplificar a simulação, foi utilizado um motor monocilíndrico, nesse caso, o motor escolhido foi o Branco B4T-5.5H, na Tabela 1 é possível observar algumas características.

Tabela 1 - Características motor B4t-5.5H

Descrição	
Tipo	Monocilíndrico
Diâmetro [mm]	68
Curso [mm]	45
Razão de Compressão	10,6:1

FONTE: O autor (2024).

Com essas informações, foi criado um modelo do motor no *software*, conforme observado na Figura 1.

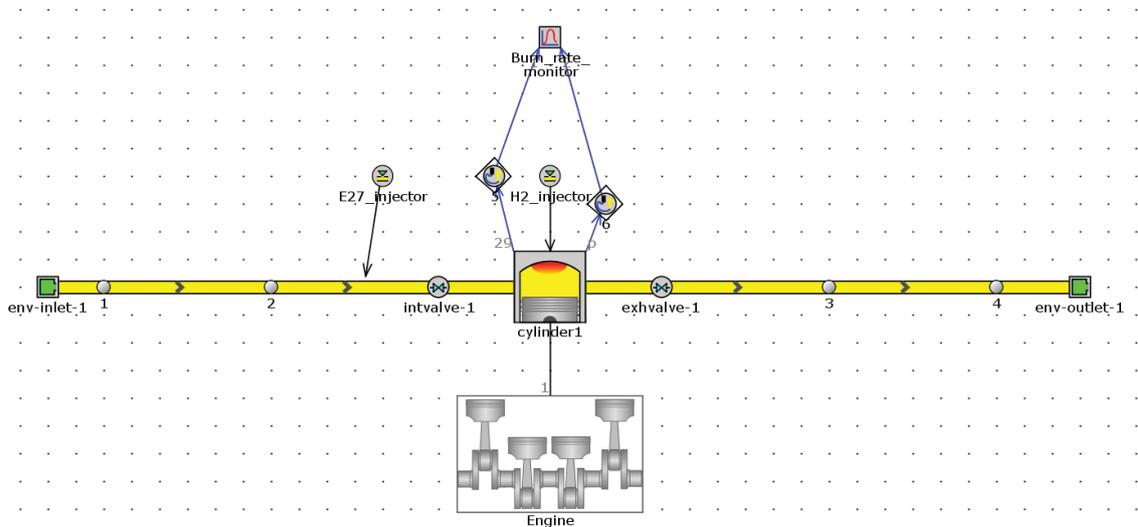
Figura 1 - *Input* do motor no software

FONTE: O autor (2024).

Com o motor configurado, o sistema foi montado utilizando uma válvula de admissão, uma válvula de exaustão, um cilindro e dois injetores, sendo um para a gasolina E27 e outro para o hidrogênio, além disso, foi colocado um sensor para avaliação dos gases queimados.

O sistema completo pode ser observado na Figura 2.

Figura 2 - Sistema completo



FONTE: O autor (2024).

Para calcular a quantidade de combustível admitido em cada porcentagem de hidrogênio, foi adotada a premissa que a simulação seria feita na rotação (N) de 3600 rpm, eficiência volumétrica (η_v) de 85% e ρ_{ar} igual a 1,2754 kg/m³.

Primeiramente, o volume do motor foi calculado pela seguinte equação,

$$V_{motor} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L \cdot n}{4}$$

Onde,

D é o diâmetro do cilindro;

L é o curso do pistão;

n é o número de cilindros.

Logo,

$$V_{motor} = \frac{\pi \cdot 0,068^2 \cdot 0,045 \cdot 1}{4} = 0,0001634 \text{ m}^3$$

Com isso, foi possível calcular a quantidade de ar no motor pela seguinte equação,

$$\dot{m}_{air} = \frac{V_d \cdot N \cdot \eta_v \cdot \rho_{air}}{2}$$

Logo,

$$\dot{m}_{air} = \frac{0,0001634 \cdot 60 \cdot 0,85 \cdot 1,2754}{2} = 0,005315 \text{ kg/s}$$

Com a quantidade de ar admitida no motor conhecida, é possível determinar a quantidade de combustível admitida, porém, para esse cálculo é necessário conhecer a relação ar-combustível.

Como trata-se de dois combustíveis, a relação ar-combustível (A/F) precisa ser ajustada para considerar as propriedades de ambos. Para isso, foi adotado como base a relação ar-combustível estequiométrica da gasolina como 14,7:1 e do hidrogênio como 34,3:1.

A fórmula utilizada para calcular a relação ar-combustível combinada real (A/F_{comb_real}) foi a seguinte,

$$A/F_{comb_real} = \left(\frac{1}{\frac{x}{A/F_{hidrogênio}} + \frac{1-x}{A/F_{gasolina}}} \right) \cdot \lambda$$

Onde,

x é a fração de hidrogênio na mistura;

$A/F_{\text{hidrogênio}}$ é a relação ar-combustível estequiométrica o hidrogênio;

A/F_{gasolina} é a relação ar-combustível estequiométrica a gasolina;

λ é a relação entre o $A/F_{\text{comb_real}}$ e o $A/F_{\text{comb_estequiométrico}}$.

As relações ar-combustível foram calculadas para 0%, 10%, 20%, 30%, 40% e 50%, além disso, todas com λ 0,9, ou seja, mistura rica.

Os valores de $A/F_{\text{comb_real}}$ para cada mistura estão indicados na Tabela 2.

Tabela 2 - $A/F_{\text{comb_real}}$ calculados

% de H ₂	$A/F_{\text{com_real}}$
0	13,23
10	14,04
20	14,95
30	15,98
40	17,17
50	18,52

FONTE: O autor (2024).

Finalmente, com a quantidade de ar admitida conhecida e a relação entre ar-combustível para cada porcentagem de hidrogênio também conhecida, foi possível calcular o valor de combustível admitido pela seguinte expressão,

$$\dot{m}_{\text{fuel}} = \frac{\dot{m}_{\text{ar}}}{A/F_{\text{comb_real}}}$$

A quantidade de combustível admitido para cada porcentagem de H₂ pode ser observada na Tabela 3.

Tabela 3 - Quantidade de combustível injetada no motor

% de H ₂	\dot{m}_{E27} [kg/s]	\dot{m}_{H2} [kg/s]
0	0,012760	0,000000
10	0,009990	0,001110
20	0,009427	0,002357
30	0,006339	0,002717
40	0,004164	0,002776
50	0,002431	0,002431

FONTE: O autor (2024).

Com essas informações, foram criados alguns parâmetros com o objetivo de simular diversos cenários, no total, foram utilizados 6 cenários, variando a quantidade de hidrogênio em cada mistura.

4 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS

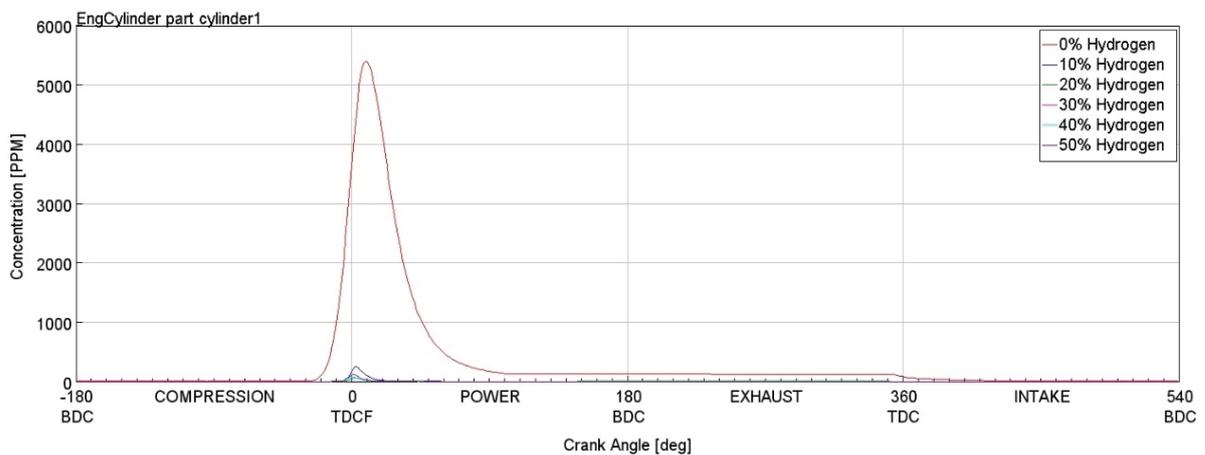
Nesta seção, apresentamos e discutimos os resultados obtidos a partir das simulações realizadas no *software* GT-SUITE. Como mencionado anteriormente, diferentes frações de hidrogênio foram introduzidas na mistura de combustível, variando de 10% a 50%.

Os resultados apresentados abrangem três aspectos principais: consumo de combustível, desempenho do motor, e emissões de gases poluentes. Cada um desses aspectos foi analisado considerando as características específicas das misturas de gasolina e hidrogênio, destacando o impacto de cada fração de hidrogênio na eficiência global do motor.

A seguir, detalhamos as observações para cada um dos cenários simulados, comparando os efeitos das diferentes proporções de hidrogênio na mistura de combustível. Esses resultados fornecem uma visão abrangente das oportunidades e desafios na integração do hidrogênio como combustível alternativo em motores de combustão interna.

Na Figura 3, observamos uma significativa diferença na concentração de NOx à medida que adicionamos hidrogênio à mistura de combustível.

Figura 3 - Redução na Concentração de NOx com a Adição de Hidrogênio



FONTE: O autor (2024).

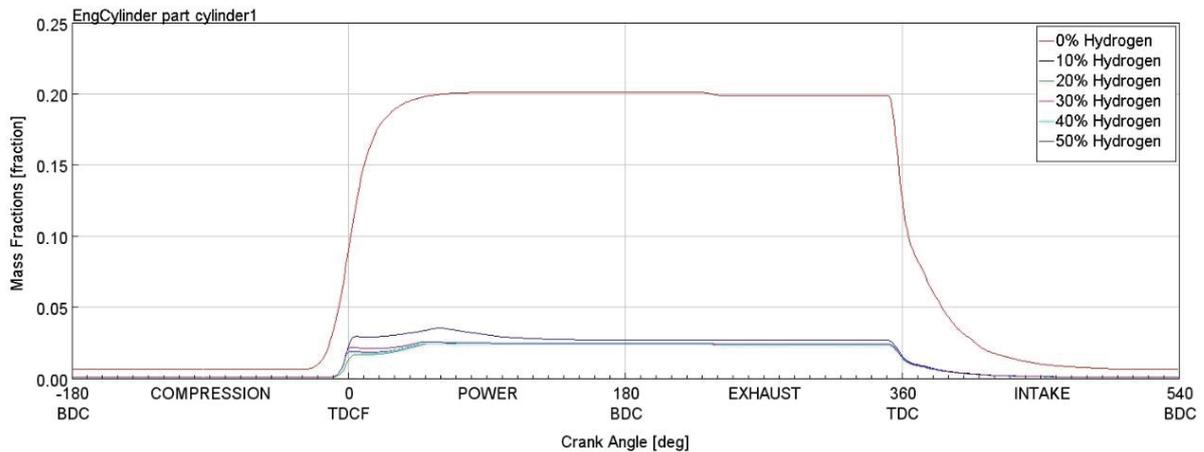
Ao incorporar hidrogênio na mistura, a combustão se torna mais eficiente, o que permite uma queima mais limpa e com temperaturas de combustão ligeiramente menores, reduzindo a formação de NOx. Este comportamento evidencia um dos grandes benefícios da utilização de hidrogênio como combustível ou como aditivo em misturas de combustíveis fósseis.

A redução das emissões de NOx não apenas contribui para a diminuição da poluição do ar e seus impactos negativos na saúde pública, como também atende a normas ambientais cada vez mais rigorosas. Este resultado reflete o potencial do hidrogênio em desempenhar um papel crucial na transição para um transporte mais limpo e sustentável.

Além da concentração de NOx, também analisamos as variações nas massas de CO₂ e H₂O resultantes da adição de hidrogênio à mistura de combustível.

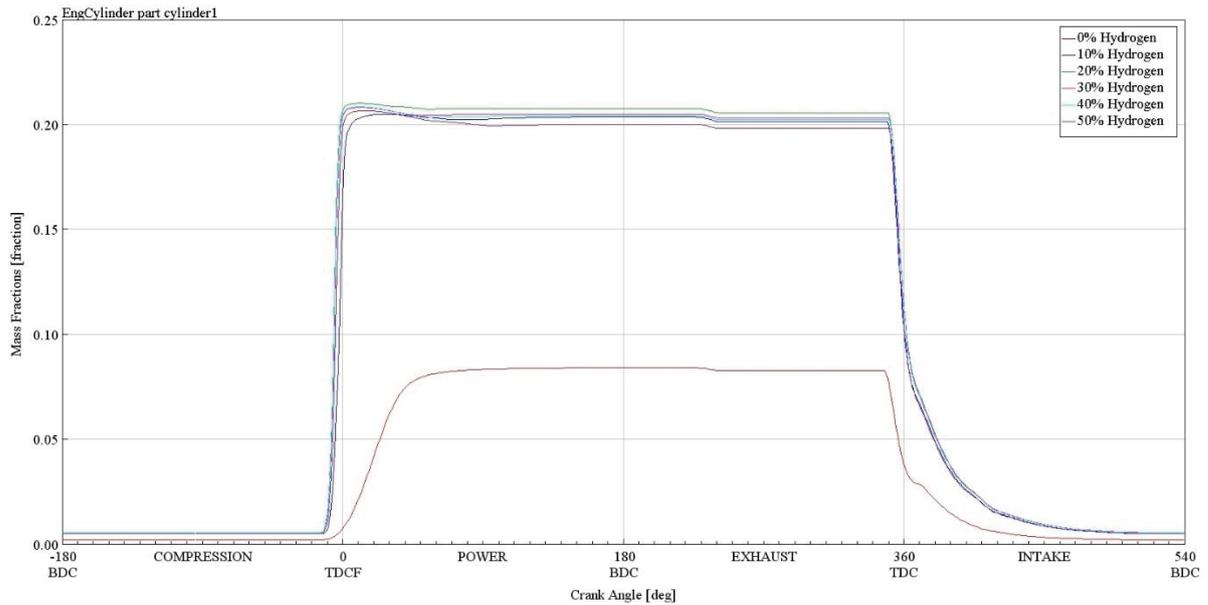
Na Figura 4, a adição de hidrogênio resulta em uma redução na massa de CO₂. Essa diminuição é diretamente relacionada à menor quantidade de carbono na mistura, o que reduz a emissão deste gás de efeito estufa. Este efeito é altamente desejável, uma vez que o CO₂ é um dos principais responsáveis pelo aquecimento global.

Figura 4 - Impacto da Adição de Hidrogênio na Emissão de CO₂



FONTE: O autor (2024).

Observa-se também o aumento na massa de H₂O na Figura 5, o que era esperado devido à maior presença de hidrogênio na mistura. A maior formação de vapor d'água é uma consequência direta da combustão do hidrogênio, e não traz impactos ambientais negativos, pois a água é um produto benigno em comparação com outros gases de combustão.

Figura 5 - Impacto da Adição de Hidrogênio na Emissão de H₂O

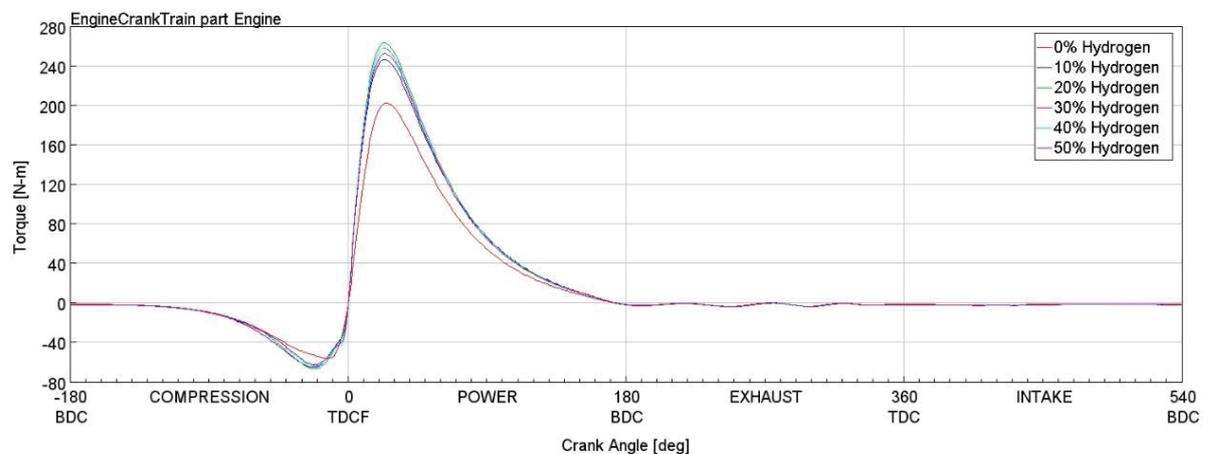
FONTE: O autor (2024).

Esses resultados destacam como a adição de hidrogênio pode não apenas reduzir a emissão de poluentes, mas também influenciar positivamente o perfil de gases emitidos, contribuindo para um ambiente mais limpo e saudável.

Além de observarmos os benefícios ambientais da adição de hidrogênio, também avaliamos o impacto dessa modificação no desempenho do motor, especificamente em relação ao torque gerado.

Conforme observado na Figura 6, os resultados mostram uma correlação direta entre a presença de hidrogênio na mistura de combustível e o aumento do torque do motor.

Figura 6 - Impacto da Adição de Hidrogênio no Torque do Motor



FONTE: O autor (2024).

Na condição em que não há hidrogênio na mistura, o motor apresentou o menor torque, isso ocorre porque a eficiência da combustão, e consequentemente a energia gerada, é limitada pela composição tradicional do combustível.

A combustão convencional, com menos hidrogênio, não permite que o motor atinja seu potencial máximo em termos de força gerada.

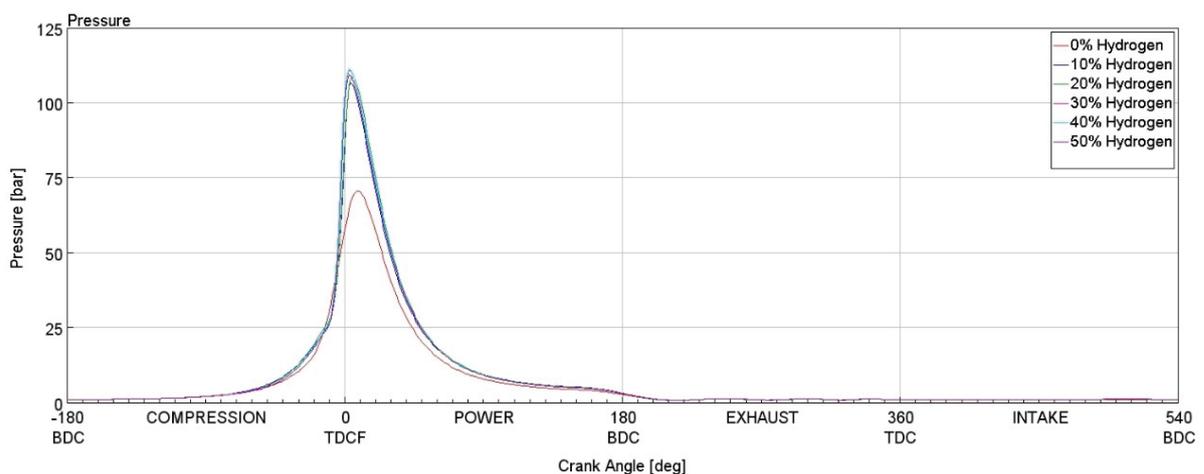
Com a introdução do hidrogênio na mistura, houve um aumento significativo no torque do motor. Isso pode ser atribuído à melhor combustão e à maior energia liberada quando o hidrogênio é queimado. O hidrogênio, por ser altamente inflamável e ter uma combustão mais rápida e completa, melhora a eficiência do processo, resultando em um motor mais potente e responsivo.

Esses resultados demonstram que a adição de hidrogênio não só beneficia as emissões de poluentes, mas também aprimora o desempenho do motor, proporcionando um torque superior que pode ser especialmente vantajoso em aplicações que exigem alta potência e eficiência energética.

Assim como no caso do torque, a adição de hidrogênio na mistura de combustível também exerce uma influência significativa na pressão dentro dos cilindros do motor.

Na Figura 7, as medições indicam que a condição sem hidrogênio na mistura resulta nas menores pressões de cilindro durante a combustão.

Figura 7 - Impacto da Adição de Hidrogênio na Pressão do Cilindro



FONTE: O autor (2024).

A pressão dentro do cilindro está diretamente relacionada à eficiência da combustão. Sem a presença de hidrogênio, a combustão tende a ser menos completa, resultando em uma menor liberação de energia e, consequentemente, uma pressão

mais baixa. Isso ocorre porque a mistura de ar e combustível convencional não atinge a combustão mais rápida e eficiente que o hidrogênio permite.

Quando o hidrogênio é adicionado à mistura, há um aumento notável na pressão dentro dos cilindros. O hidrogênio melhora a qualidade da combustão, tornando-a mais rápida e liberando uma maior quantidade de energia em um curto período. Essa combustão mais intensa gera pressões mais elevadas nos cilindros, o que, por sua vez, contribui para o aumento do torque e da potência do motor.

Esses resultados ressaltam que a incorporação de hidrogênio não apenas melhora o desempenho ambiental do motor, mas também otimiza as condições de combustão interna, resultando em pressões de cilindro mais altas e, portanto, em uma operação mais eficiente e potente.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com este trabalho, no qual se realizou a simulação da injeção de diferentes porcentagens de hidrogênio em um motor de combustão interna alimentado com gasolina E27, foi possível observar e compreender as influências que essa mistura resulta.

Para tanto, foram calculados alguns parâmetros, como por exemplo, as quantidades de E27 e H₂ que são necessárias para cada porcentagem de H₂ e foi utilizado um *software* de simulação robusto, confiável e amplamente difundido na indústria automobilística. Os resultados foram comparados com um motor alimentado somente com E27 e se mostraram promissores, indicando que o hidrogênio auxilia nas emissões de CO₂, na redução do Nox e no aumento de desempenho do motor.

Para trabalhos futuros, recomenda-se a melhoria do sistema apresentado no *software*, aumentando a quantidade de cilindros para se aproximar de um motor utilizado nos veículos.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS – ANP. **Produção e fornecimento de biocombustíveis: etanol**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/etanol#:~:text=O%20etanol%20%C3%A9%20uma%20subst%C3%A2ncia,contraponto%20a%20outros%20combust%C3%ADveis%20f%C3%B3sseis>. Acesso em: 03 ago. 2024.

BASTOS NETO, M. **Modelagem matemática de sistemas de separação envolvendo a absorção física de CO₂ utilizando líquidos iônicos**. 2006. 139 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/4432/4432_5.PDF. Acesso em: 01 ago. 2024.

BIZZO, Waldir A. **Combustíveis**, 2003. Disponível em: <https://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP2.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2024.
BRUNETTI, Franco. **MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA, VOLUME 1**. São Paulo, BLUCHER, 2012. p. 344.

CETESB - COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO. **Combustíveis**. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/combustiveis/>. Acesso em: 28 jul. 2024.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE. **O que são combustíveis?** Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/o-que-sao-combustiveis#:~:text=Combust%C3%ADveis%20s%C3%A3o%20subst%C3%A2ncias%20que%20queimamos,para%20acionar%20motores%20de%20ve%C3%ADculos>. Acesso em: 03 ago. 2024.

NEOENERGIA. **Conheça o hidrogênio verde, o combustível do futuro**. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/w/conheca-o-hidrogenio-verde-o-combustivel-do-futuro>. Acesso em: 03 ago. 2024.

PUGLIESI, Márcio. **Manual completo do automóvel**. São Paulo, HEMUM, 1976. P.269.

RAÍZEN. **Etanol: o combustível do futuro**. Disponível em: <https://www.raizen.com.br/blog/etanol>. Acesso em: 04 ago. 2024.

SAE BRASIL. **Hidrogênio como combustível**. Disponível em: <https://saebrasil.org.br/noticias/hidrogenio-como-combustivel/>. Acesso em: 03 ago. 2024.

SCALON, V. L. Energia renovável e eficiência energética. Disponível em: <https://www.fem.unicamp.br/~em672/GERVAP2.pdf>. Acesso em: 12 ago. 2024.
SOUSA, Andre. **Entenda o Funcionamento dos Motores 2 Tempos**, 2016. Disponível em: <https://maniamoto.com/entenda-os-motores-2-tempos/>. Acesso em 25 jul. de 2024.