

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

MOISÉS DA SILVA PEREIRA

TIRZA SEIXAS RODRIGUES

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

CURITIBA

2024

MOISÉS DA SILVA PEREIRA
TIRZA SEIXAS RODRIGUES

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

Artigo apresentado como requisito parcial à
conclusão do curso de 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 Etanol: Um Estudo Compreensivo

Moisés da Silva Pereira

Tirza Seixas Rodrigues

RESUMO

O presente artigo tem por objetivo a análise dos efeitos da introdução de hidrogênio na mistura ar + etanol em motores de combustão interna, tendo por motivação a busca por reduzir a dependência de combustíveis fósseis. A metodologia foi aplicada através do software GT-SUITE, no qual foi replicado um motor Branco B4T-5.5H para serem testadas proporções de 10 a 50% de hidrogênio, de modo a ser possível analisar os impactos causados no desempenho do motor e a viabilidade da utilização do hidrogênio para redução de emissões e consumo do combustível. Para as simulações foi considerada a relação estequiométrica do etanol (9:1) e do hidrogênio (34,3:1), e o lambda de 0,9. Os resultados obtidos demonstram o potencial de utilização do hidrogênio quando contrabalanceado com outras tecnologias que reduzem a produção de NOx, pois apesar de reduzir significativamente as emissões de CO, CO₂ e HC, as altas temperaturas tornam a produção de óxidos de nitrogênio muito mais propensa. Portanto, é possível observar a utilização de hidrogênio como combustível como um passo importante no avanço da tecnologia em busca da sustentabilidade.

Palavras-chave: *Hidrogênio. Etanol. Emissões. Combustão Interna. Simulação.*

ABSTRACT

The purpose of this article is to analyze the effects of introducing hydrogen into the air + ethanol mixture in internal combustion engines, motivated by the pursuit of reducing dependence on fossil fuels. The methodology applied used the GT-SUITE software, in which a Branco B4T-5.5H engine was replicated to test hydrogen

proportions ranging from 10 to 50%, to analyze the impacts on engine performance and the feasibility of using hydrogen to reduce emissions and fuel consumption. The stoichiometric ratios of ethanol (9:1) and hydrogen (34.3:1) were considered for the simulations, along with a lambda value of 0.9. The results obtained demonstrate the potential of using hydrogen when balanced with other technologies that reduce NOx production, as although it significantly reduces CO, CO₂, and HC emissions, high temperatures make the production of nitrogen oxides much more likely. Therefore, it is possible to see the use of hydrogen as a fuel as an important step in advancing technology towards sustainability.

Keywords: *Hydrogen. Ethanol. Emissions. Internal Combustion. Simulation.*

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
2 REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA	5
2.1.1 Conceito de um motor a combustão interna.....	5
2.1.2 Princípios de funcionamento de um motor a combustão interna ciclo Otto	6
2.2 COMBUSTÍVEIS	7
2.2.1 Etanol	7
2.2.2 Hidrogênio	8
2.3 GT-POWER.....	10
3 METODOLOGIA	10
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	14
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	18
REFERÊNCIAS	19

1 INTRODUÇÃO

No contexto atual as soluções sustentáveis impulsionadas pelas mudanças climáticas e a necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa têm se intensificado no meio automotivo, resultando na busca pela substituição dos combustíveis fósseis. Devido os efeitos de crises do petróleo em meados dos anos 80, o Brasil se destaca no pioneirismo no uso do etanol como combustível em motores automotivos, que contribui de forma significativa na diminuição das emissões de CO₂.

Este trabalho tem como objetivo estudar os efeitos da adição de hidrogênio em motores de combustão interna a etanol, sua alta eficiência de combustão e a emissão de vapor d'água como subproduto. A adição de hidrogênio ao etanol pode melhorar a qualidade da combustão, devido as qualidades únicas do hidrogênio, como sua alta velocidade de chama e capacidade de queimar em misturas pobres, e por conseguinte reduzir o consumo e emissão de gases poluentes.

As simulações foram feitas utilizando o software GT-power, simulando um motor monocilíndrico ciclo Otto, com diferentes proporções e hidrogênio sendo adicionadas ao etanol. Foram analisados parâmetros como pressão e temperatura no cilindro, e emissões de CO₂, NO_x, e hidrocarbonetos não queimados, comparando os resultados obtidos com a operação do motor utilizando apenas etanol, para verificar o potencial de utilização do composto na redução de utilização do etanol.

2 REVISÃO DE LITERATURA

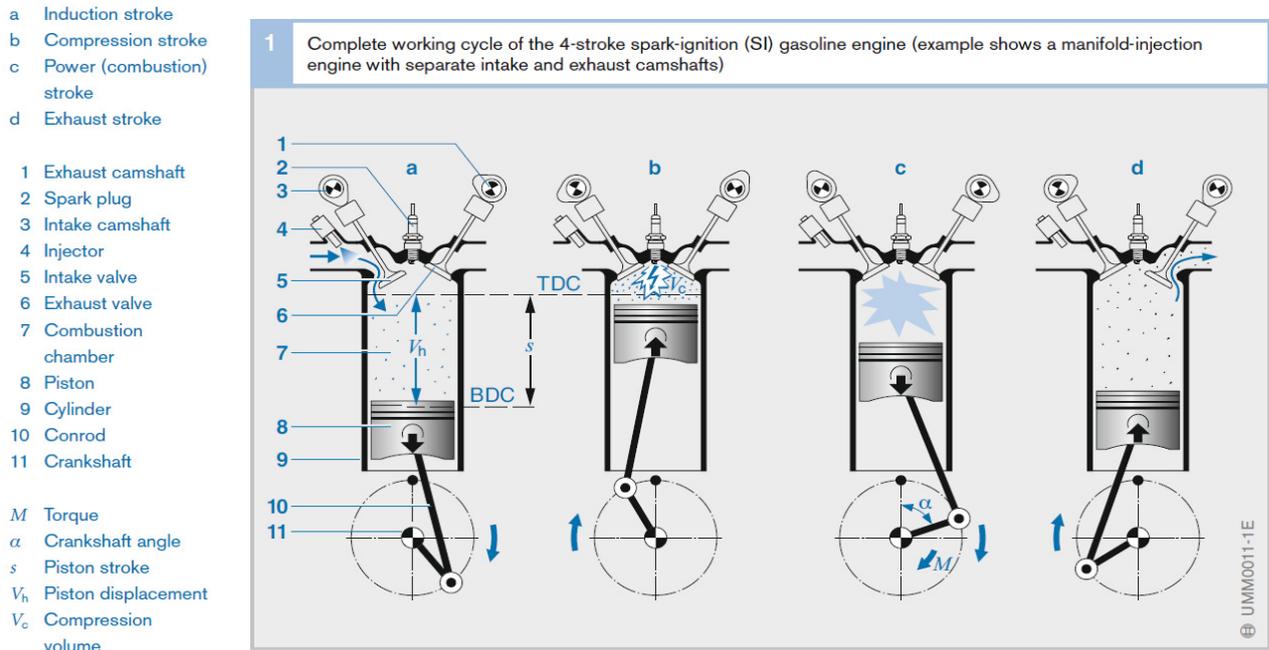
2.1 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

2.1.1 Conceito de um motor a combustão interna

Atualmente a maioria dos motores de combustão interna usados como plantas de potência de veículos são do tipo de quatro tempos. O princípio de quatro tempos emprega válvulas de troca de gases (5 e 6) para controlar o ciclo de exaustão e recarga. Essas válvulas abrem e fecham as passagens de admissão e exaustão do cilindro, e no processo controlam o suprimento da mistura de ar/combustível fresca e a expulsão dos gases de escape queimados.

2.1.2 Princípios de funcionamento de um motor a combustão interna ciclo Otto

Figura 1. Operação motor ciclo Otto 4 tempos



Primeiro tempo – Admissão (a)

Referido ao Ponto Morto Superior (PMS), o pistão está se movendo para baixo e aumenta o volume da câmara de combustão (7) para que o ar fresco (injeção direta de etanol) ou a mistura fresca de ar/combustível (injeção no coletor) seja aspirada para dentro da câmara de combustão, passando pela válvula de admissão aberta (5). A câmara de combustão atinge o volume máximo ($V_h + V_c$) no Ponto Morto Inferior (PMI).

Segundo tempo – compressão (b)

As válvulas de troca de gases estão fechadas e o pistão está se movendo para cima no cilindro. Ao fazer isso, ele reduz o volume da câmara de combustão e comprime a mistura de ar/combustível. Nos motores com injeção no coletor, a mistura de ar/combustível já entrou na câmara de combustão no final do curso de admissão. Em um motor de injeção direta, por outro lado, dependendo do modo de operação, o combustível é injetado apenas no final do curso de compressão. No Ponto Morto Superior (PMS), o volume da câmara de combustão está no mínimo (volume de compressão V_c).

Terceiro tempo – ignição (c)

Antes de o pistão atingir o Ponto Morto Superior (PMS), a vela de ignição (2) inicia a combustão da mistura de ar/combustível em um determinado ponto de ignição (ângulo de ignição). Esta forma de ignição é conhecida como ignição fornecida externamente. O pistão já passou do ponto PMS antes que a mistura tenha entrado em combustão completa. As válvulas de troca de gases permanecem fechadas e o calor da combustão aumenta a pressão no cilindro a tal ponto que o pistão é forçado para baixo.

Quarto tempo – escape (d)

A válvula de escape (6) abre pouco antes do Ponto Morto Inferior (PMI). Os gases quentes (de escape) estão sob alta pressão e saem do cilindro através da válvula de escape. O gás de escape restante é expulso pelo pistão em movimento ascendente. Um novo ciclo de operação começa novamente com o curso de admissão após cada duas revoluções do virabrequim.

2.2 COMBUSTÍVEIS

Goldenberg (2015) determina como combustível qualquer substância que reage com o oxigênio (ou outro comburente) de forma a produzir calor, chamas, e gases, constituindo uma reação exotérmica. Pode-se classificar os combustíveis em derivados de fontes fósseis (carvão, petróleo e gás natural) e de fontes renováveis (energia eólica, solar térmica, eletricidade solar com células fotovoltaicas e energia de biomassa).

2.2.1 Etanol

Também chamado de álcool etílico, é um biocombustível produzido a partir da fermentação de açúcares. O etanol pode ser classificado em duas categorias: hidratado e anidro, sendo diferenciados pela concentração de água em sua composição. No etanol hidratado a concentração de água pode chegar a 5% e no etanol anidro, pode chegar a 0,5%. Nos veículos em território brasileiro, o etanol utilizado é o anidro. Quando comparado a gasolina, o etanol é um produto mais sustentável e é uma peça-chave para a transição energética de baixo carbono.

A EMBRAPA realizou um estudo comparativo em 2009, que determinou com base nos dados de emissão total de gases estufa, a produção de CO₂ pela

caminhonete (S10 cabine simples) com motores de potência semelhante, emitiria um total de 6,92 kg de CO₂eq, 5,1 vezes menos do que se rodasse com gasolina pura, o que representa uma mitigação de 80% na emissão de gases de efeito estufa.

Tabela 1 - Produção de CO₂ por uma caminhonete S10

Modelo	Motor	Combustível	Rendimento Km/L	Potência Máxima	GEEs emitido kg CO ₂	Emissão evitada (%)
S10 cabine simples	2.8 turbo	Diesel	13,5	140 CV	29,69	--
S10 cabine simples	2.4 flexpower	Gasolina pura	10,4	141 CV	35,10	0
S10 cabine simples	2.4 flexpower	Gasolina brasileira (23% etanol)	9,5	141 CV	28,62	18
S10 cabine simples	2.4 flexpower	Etanol (cana-de-açúcar)	7,2	147 CV	6,92	80

Fonte: (EMBRAPA, 2009).

Além disso, em condições reais onde acrescenta-se até 23% de etanol à gasolina nacional, veículo emitiria aproximadamente 28,6 kg de CO₂ equivalente. Isto significa que a gasolina no padrão brasileiro emite aproximadamente 18% menos gases de efeito estufa do que a gasolina comercializada em outras partes do mundo onde não há adição de álcool. No mesmo percurso, o veículo a álcool emitiu aproximadamente 77% menos CO₂ do que o veículo de mesma potência rodando com óleo diesel, e 76% menos que o veículo com gasolina brasileira (com 23% de etanol).

2.2.2 Hidrogênio

Em face aos desafios de sustentabilidade de produção de energia o hidrogênio é descrito como “potencial combustível do futuro”, por se tratar de um combustível que pode reduzir as emissões de poluentes, pois em sua reação química não se tem a emissão de determinados gases que se apresentam quando o MCI opera com combustíveis fósseis (Mollenhauer e Scheiner, 2010).

Segundo os autores Gillingham (2007) e Fubing et al. (2007), em motores de combustão interna, o hidrogênio possui excelentes propriedades para substituição de outros combustíveis:

- Alta velocidade de chama em proporções estequiométricas: Após a combustão, o MCI apresenta uma velocidade de chama maior do que a de combustíveis fósseis, diesel/gasolina, aproximando-se do ciclo ideal. Este processo ocorre porque uma menor proporção ar-combustível resulta em uma menor velocidade de chama, visto que essas variáveis são diretamente proporcionais.

- Alta temperatura de auto-ignição: o hidrogênio possui uma alta temperatura de autoignição em relação aos combustíveis fósseis, portanto resiste a elevadas taxas de compressão antes que realize a combustão, aumentando a pressão do fluido e resultando em uma maior eficiência termodinâmica ao motor.

A utilização de hidrogênio como complemento ao etanol em motores de combustão interna pode afetar a queima de O₂ (oxigênio), CO₂ (dióxido de carbono) e H₂O (água) de algumas maneiras:

Queima de O₂

Combustão mais eficiente: O hidrogênio tem uma velocidade de chama muito alta e uma ampla faixa de inflamabilidade, o que pode resultar em uma combustão mais rápida e completa do etanol. Isso pode levar a um consumo mais eficiente de oxigênio, reduzindo a quantidade de oxigênio não utilizado nos gases de escape.

Redução de CO (monóxido de carbono): Com uma combustão mais completa, a quantidade de monóxido de carbono, um subproduto da combustão incompleta, tende a diminuir, resultando em uma queima mais limpa do oxigênio disponível.

Produção de CO₂

Redução de emissões de CO₂: Embora a combustão de hidrogênio produza água (H₂O) como subproduto, a mistura de etanol e hidrogênio pode potencialmente reduzir as emissões de CO₂ por unidade de energia produzida. Isso ocorre porque o hidrogênio não contém carbono e, portanto, não contribui diretamente para a produção de CO₂.

Melhor eficiência: A melhora na eficiência térmica com o uso de hidrogênio pode resultar em uma menor quantidade de combustível necessária para gerar a mesma quantidade de energia, o que também contribui para a redução de emissões de CO₂. Produção de H₂O

Aumento da produção de água: A combustão do hidrogênio resulta na formação de água (H₂O). Portanto, a adição de hidrogênio à mistura de etanol aumenta a quantidade de vapor de água nos gases de escape.

Impacto na umidade dos gases de escape: Com mais água sendo produzida, a umidade relativa dos gases de escape aumenta, o que pode ter implicações para a condensação e o tratamento dos gases de escape.

2.3 GT-POWER

Diversas ferramentas de simulação foram desenvolvidas ao longo dos anos para análise de componentes e melhoria do funcionamento de motores de combustão interna. O *software* comercial GT-POWER, da plataforma GT-SUITE, desenvolvido pelo grupo Gamma Technologies possibilita a modelagem e análise 1-D de motores de combustão interna, e permite estudar e otimizar parâmetros e condições operacionais do motor de forma detalhada, auxiliando na redução de tempo e custo no desenvolvimento de motores e sistemas.

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 de suas características:

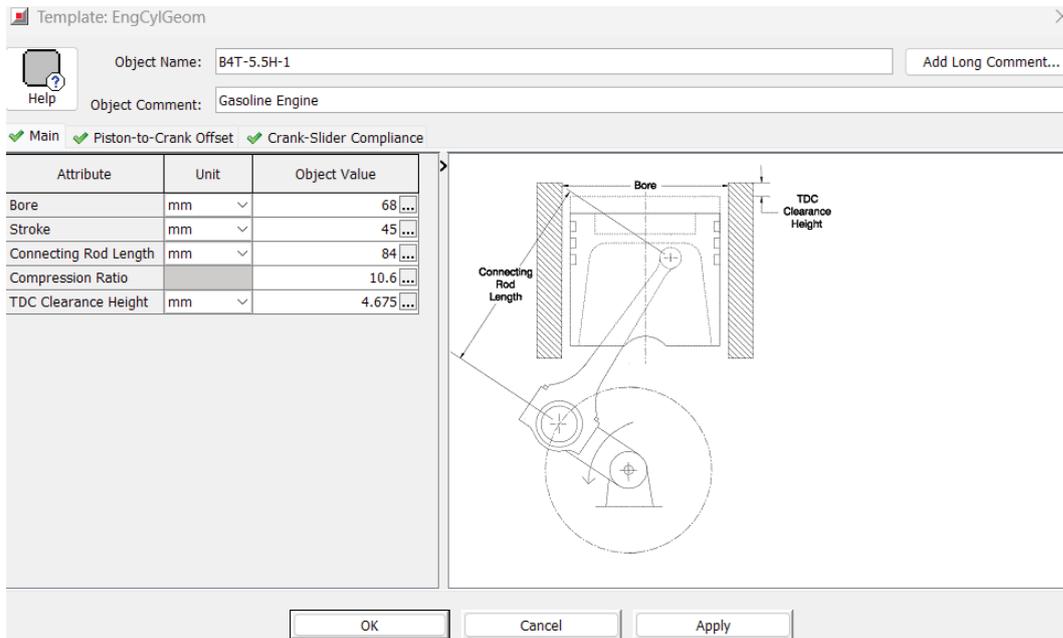
Tabela 2 - Características motor B4t-5.5H

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

FONTE: O autor (2024).

Com base nas informações acima, foi criado um modelo do motor no *software*, conforme observado na Figura 2.

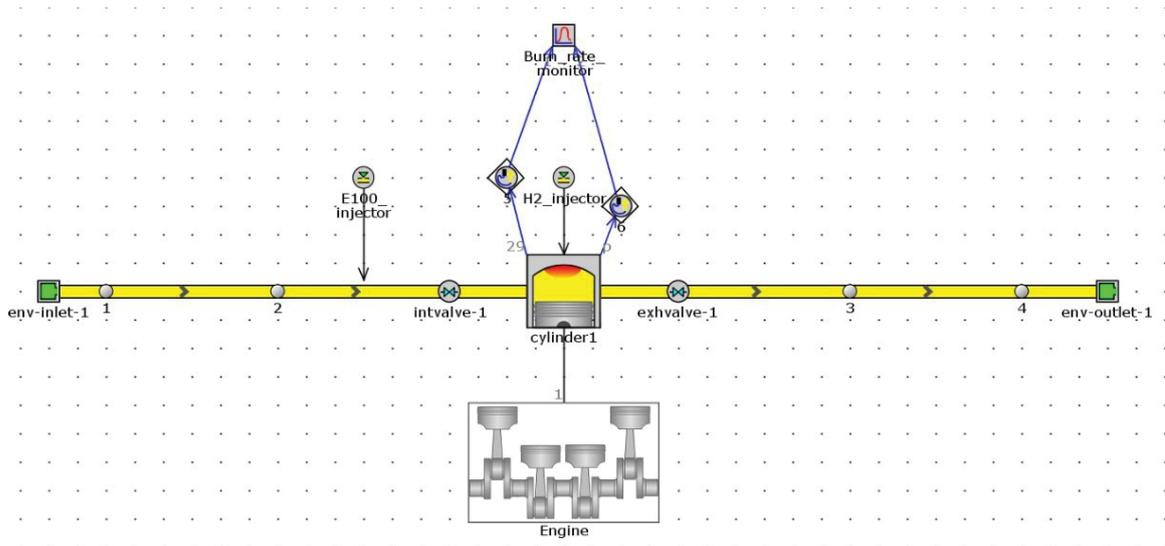
Figura 2 - Input do motor no software



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 etanol E100 e outro para o hidrogênio, além disso, foi colocado um sensor para avaliação dos gases queimados. O sistema completo pode ser observado na Figura 3.

Figura 3 - Sistema completo



FONTE: O autor (2024).

Para calcular a quantidade de combustível admitido em cada porcentagem de hidrogênio, foi adotada a premissa de 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,

$$V_{motor} = \frac{\pi \cdot D^2 \cdot L \cdot n}{4} \quad (1)$$

Onde,

D é o diâmetro do cilindro;

L é o curso do pistão;

n é o número de cilindros.

Logo,

$$V_{motor} = \frac{\pi \cdot 0,0682^2 \cdot 0,045 \cdot 1}{4} \quad (2)$$

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

$$\dot{m}_{air} = \frac{Vd \cdot N \cdot \eta_v \cdot \rho_{air}}{2} \quad (3)$$

Logo,

$$\dot{m}_{air} = \frac{0,0001634 \cdot 60 \cdot 0,85 \cdot 1,27542}{2} \quad (4)$$

Tendo a quantidade de ar admitida no motor, pode-se determinar a quantidade de combustível admitida, entretanto, para obter esse valor é necessário primeiramente 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 do etanol como 9:1 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,

$$A/F_{combreal} = \left(\frac{1}{\frac{x}{A/F_{hidrogênio}} + \frac{1-x}{A/F_{etanol}}} \right) \cdot \lambda \quad (5)$$

Onde,

x é a fração de hidrogênio na mistura;

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

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

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

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

Os valores de A/F_{comb_real} para cada mistura estão indicados na Tabela 3.

Tabela 3 - A/F_{comb_real} calculados

% de H ₂	A/F_{com_real}
0	8,1
10	8,75
20	9,5
30	10,40
40	11,49
50	12,83

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,

$$m_{fuel} = m_{ar} A/F_{comb_real} \quad (6)$$

A quantidade de combustível admitido para cada porcentagem de H₂ pode ser observada na Tabela 4.

Tabela 4 - Quantidade de combustível injetada no motor

% de H ₂	\dot{m}_{Etanol} [kg/s]	\dot{m}_{H_2} [kg/s]
0	0,018222	0,000000
10	0,016400	0,003357
20	0,013437	0,003357
30	0,010732	0,004599
40	0,008326	0,005551
50	0,006214	0,006214

Fonte: O autor (2024).

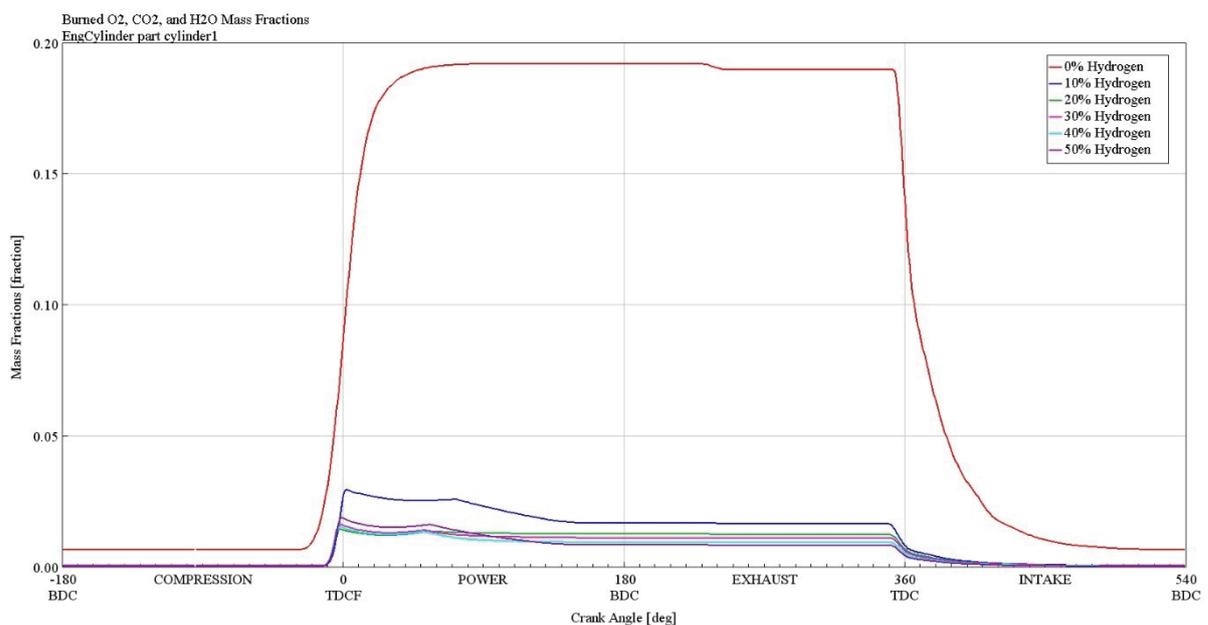
Com essas informações, foram criados alguns parâmetros com o objetivo de simular diversos cenários, no total, foram utilizados 6 cenários, variando a quantidade de hidrogênio em cada mistura.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Conforme a metodologia apresentada, simulando o motor Branco B4T-5.5H e analisando output, obteve-se conclusões acerca do consumo de etanol, desempenho do motor e emissão de gases poluentes, os quais serão apresentados a seguir.

A adição de hidrogênio em motores a etanol pode influenciar significativamente a eficiência térmica do motor, que é uma medida de quão bem a energia contida no combustível é convertida em trabalho útil. A eficiência térmica depende de fatores tais quais a qualidade da combustão. Segundo Heywood, a velocidade de chama do hidrogênio é muito maior que a de outros combustíveis, significativamente maior do que a do etanol. Isso permite que a combustão ocorra de forma mais rápida e completa, perdas de energia associadas a elementos não queimados que seriam liberados como hidrocarbonetos (HC) são reduzidas, assim mais trabalho é gerado pela massa de combustível injetado, aumentando a eficiência térmica.

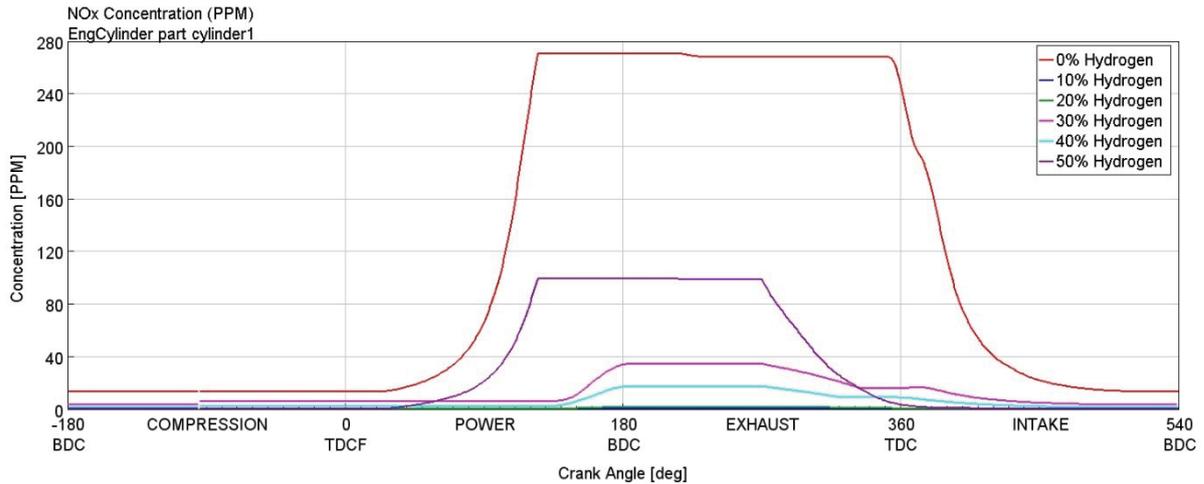
Gráfico 1 - Concentração de O₂, CO₂ e H₂O.



FONTE: O autor (2024).

Analisando o gráfico 1 percebemos uma diminuição significativa nas emissões de hidrocarbonetos. Embora a combustão de hidrogênio reduza as emissões de CO, CO₂ e HC, ela pode aumentar as emissões de NO_x devido à alta temperatura de combustão. A formação de NO_x está diretamente relacionada à temperatura de combustão.

Gráfico 2 - Concentração de NO_x.



FONTE: O autor (2024).

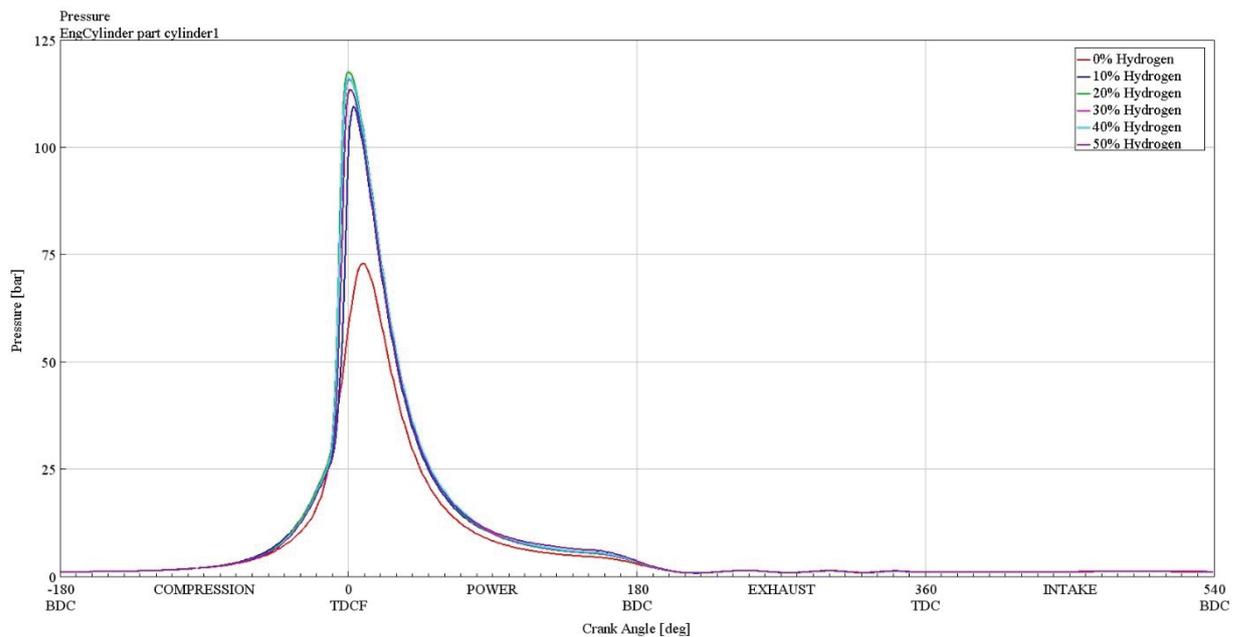
O gráfico 2 mostra um aumento progressivo nas emissões de NO_x à medida que a porcentagem de hidrogênio na mistura com etanol aumenta de 10% para 50%. Esse aumento pode ser atribuído à elevação da temperatura de combustão, que é uma característica intrínseca da queima do hidrogênio devido à sua alta velocidade de chama e maior liberação de energia.

Com 10% de hidrogênio, as emissões de NO_x já começam a subir ligeiramente, indicando que mesmo pequenas adições de hidrogênio podem impactar significativamente a formação de NO_x. À medida que a concentração de hidrogênio aumenta para 20%, 30%, 40% e finalmente 50%, observa-se um incremento mais acentuado nas emissões de NO_x. Este comportamento confirma a relação direta entre a temperatura de combustão e a formação de NO_x, destacando a necessidade de estratégias de mitigação, como a recirculação de gases de escape (EGR) ou a injeção de água, para controlar as emissões de NO_x em motores que utilizam misturas de hidrogênio e etanol.

Conforme Verhelst, S., & Wallner, T, as qualidades que fazem do hidrogênio um combustível desejado podem torná-lo responsável por eventos de combustão anormais. Devido à baixa energia requerida para ignição do hidrogênio, a ocorrência de pré-ignição se torna maior quando a mistura está próxima de nível estequiométrico. Condições de operação do motor onde a rotação e carga maiores estão propensas à ocorrência de pré-ignição devido a temperaturas mais altas de gases e componentes. A pré-ignição descreve um evento onde a combustão ocorre dentro do cilindro durante o tempo de compressão antes da centelha com as válvulas de admissão e exaustão fechadas. O “backfire” ocorre com as válvulas abertas, a combustão e o aumento de pressão retornam ao coletor de admissão, podendo gerar danos ao sistema.

A baixa energia de ignição requerida para inflamar o hidrogênio e sua alta velocidade de chama podem aumentar a suscetibilidade ao knock, especialmente em motores com alta taxa de compressão. O etanol tem maior índice de octanagem que a gasolina, assim na mistura hidrogênio-etanol, o etanol reduzirá a tendência de knock, estabilizando a combustão ao permitir uma queima mais controlada.

Gráfico 3 - Pressão no Cilindro

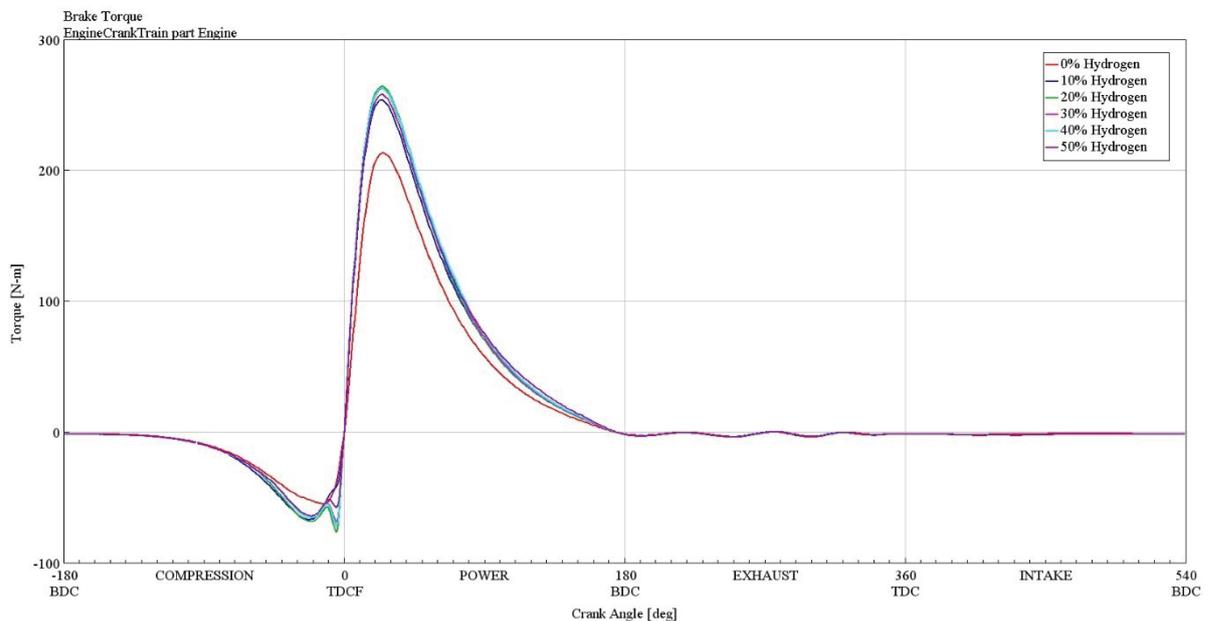


FONTE: O autor (2024).

Devido o hidrogênio possuir uma alta velocidade de chama e uma taxa de liberação de calor mais rápida em comparação com outros combustíveis. Quando misturado ao etanol, o hidrogênio acelera o processo de combustão, resultando em uma liberação mais rápida e intensa de energia. Isso eleva a pressão dentro do cilindro durante a combustão, já que o calor gerado é rapidamente transferido para os gases dentro do cilindro, aumentando sua pressão. Observa-se no Gráfico 3 que a adição de hidrogênio apresenta inconsistências na variação de pressão dentro do cilindro, sendo necessário um estudo mais aprofundado da causa dessas variações, pois podem ser provenientes do próprio software.

A quantidade de hidrogênio adicionada à mistura é crucial. Proporções mais elevadas de hidrogênio podem aumentar a eficiência da combustão, mas também elevam o risco de knock, especialmente se o motor não for ajustado adequadamente para lidar com as propriedades de ignição do hidrogênio.

Gráfico 4 – Torque do Motor



FONTE: O autor (2024).

No gráfico 4 acima observa-se que a adição de hidrogênio gera maior capacidade de torque no motor. A adição de hidrogênio pode se tornar uma estratégia interessante no uso de etanol em mistura pobre, $AFR > 1$, onde a capacidade de queima do hidrogênio contribui para aumentar eficiência da combustão.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo foi possível comprovar de maneira experimental através do software GT-POWER os efeitos da utilização do hidrogênio na mistura ar + etanol em um motor de combustão interna Branco B4T-5.5H. A simulação foi realizada comparando-se a adição de proporções de 10 a 50% de hidrogênio ao combustível, considerando a relação estequiométrica do etanol (9:1) e do hidrogênio (34,3:1), e o lambda de 0,9.

Foi observado uma diminuição significativa nas emissões CO, CO₂ e HC, além do aumento das emissões de NO_x devido à alta temperatura de combustão, que é atribuído à alta velocidade de chama e maior liberação de energia do hidrogênio. Portanto, a atuação de tecnologias que reduzam a emissão dos óxidos de nitrogênio, tais como a válvula EGR, são imprescindíveis para a potencial utilização do hidrogênio como combustível.

Além disso, a adição do hidrogênio na mistura aumentou consideravelmente a pressão dentro do cilindro, devido a alta velocidade de chama, e resultando em uma liberação mais rápida e intensa de energia. Este processo aumenta a eficiência da combustão, resultando em um menor consumo de combustível.

Portanto, o estudo evidencia que a adição de hidrogênio na mistura demonstra grande potencial no aumento da eficiência do motor, além da desejada redução de emissão de gases que contribuem para o efeito estufa no motor analisado. Recomenda-se que em trabalhos futuros o sistema utilizado seja refinado para obter resultados mais consistentes, além da modelagem de um motor com maior quantidade de cilindros para aproximação de valores reais.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. RESOLUÇÃO ANP Nº 50, DE 23.12.2013 - DOU 24.12.2013. Disponível em: <http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2013/dezembro&item=ranp-50-2013>.

J. B. Heywood, **Internal Combustion Engine Fundamentals**, McGraw-Hill, 1988.

Verhelst, S.;Wallner, T. **Hydrogen-fueled internal combustion engines**. Prog. Energy Combust. Sci. 2009, 35, 490–527.

Soares, L. H., **Mitigação gases de efeito estufa pelo uso do etanol de cana de açúcar produzido no Brasil**. Embrapa, 2009.

Prass, G. S., **Análise termodinâmica da injeção de hidrogênio em motores de combustão interna operando com etanol**. UFSC, 2014

Martins, F. B., **Análise de consumo de coletor de admissão de geometria variável por cadeia cinemática no GT-Power**. UFPE, 2019.

Lira Junior, P. H., **Simulacao via GT-Power do armazenamento de energia mecânica em motores de combustão interna sob condições de ciclos de teste padrão EPA**. UFPE. 2019