

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Marcos Vinicius Penna Pivetta

**INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DA RAZÃO AR-COMBUSTÍVEL NA
PERFORMANCE DE UM MOTOR DE IGNIÇÃO POR CENTELHA
OPERANDO EM CARGA PARCIAL COM HIDROGÊNIO**

Santa Maria, RS
2023

Marcos Vinicius Penna Pivetta

**INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DA RAZÃO AR-COMBUSTÍVEL NA
PERFORMANCE DE UM MOTOR DE IGNIÇÃO POR CENTELHA OPERANDO
EM CARGA PARCIAL COM HIDROGÊNIO**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS). Como requisito parcial para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica.**

Orientador: Prof. Dr. Thompson Diórdinis Metzka Lanza Nova

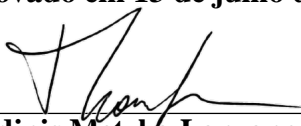
Santa Maria, RS
2023

Marcos Vinicius Penna Pivetta

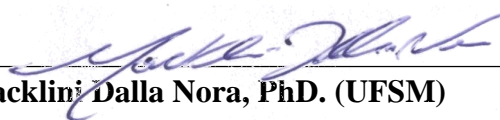
**INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DA RAZÃO AR-COMBUSTÍVEL NA
PERFORMANCE DE UM MOTOR DE IGNIÇÃO POR CENTELHA OPERANDO
EM CARGA PARCIAL COM HIDROGÊNIO**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS). Como requisito parcial para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Aprovado em 13 de julho de 2023:



Thompson Diórdinis Metzka Lanzasova, PhD. (UFSM)
(Presidente/Orientador)



Macklini Dalla Nora, PhD. (UFSM)



Cristian Douglas Rosa da Silva, Eng. (UFSM)

Santa Maria, RS
2023

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho:

- Aos meus pais
- À minha família
- À minha noiva
- Aos meus amigos
- Aos colegas de graduação

E todos aqueles que de alguma forma me apoiaram

AGRADECIMENTOS

Esse trabalho realizado, só foi possível graças a idealização de um sonho, um desejo de menino que pode tornar a realidade de um homem e que foi concluído, graças ao apoio fundamental que tive.

Sou grato a Deus, por propiciar um estado de espírito e fé.

Sou grato aos meus pais, Paulo e Beatriz, por terem me dado todo o apoio necessário para realizar um sonho, a meus irmãos Mariela e Júnior por me incentivarem numa nova caminhada.

Sou grato a minha noiva Tassiane Brondani que sempre me apoiou nessa etapa de graduação, mesmo estando longe por um tempo.

Sou grato a minha família, que sempre fizeram de tudo para me ver bem e me apoiar.

Sou grato aos meus amigos e amigas que por me apoiarem em uma nova caminhada.

Sou grato pela minha madrinha que mesmo nos momentos difíceis de sua vida me apoiou, e me ajudou a conquistar este sonho, no fim me iluminando estando em outro plano espiritual.

Sou grato aos meus colegas e amigos de Cachoeira do Sul, em especial a família Cassarotto, pelo tempo que estive de passagem pela graduação.

Sou grato aos novos colegas de graduação no campus de Santa Maria.

Sou grato aos meus amigos e colegas de laboratório, que compartilharam o conhecimento e que em momentos difíceis me deram todo apoio de continuar fazendo o melhor.

Sou grato aos professores de graduação por me proporcionar todo o conhecimento.

Sou grato ao Técnico Roberto e ao Engenheiro Joelson por todo conhecimento e auxílio prático nos projetos.

Sou grato aos mestrandos do laboratório por compartilhar a sabedoria.

Sou grato aos professores do laboratório pelos ensinamentos paralelos.

Sou grato ao meu orientador Thompson, que com muita paciência e dedicação me ensinou mais uma vivência de uma graduação e me incentivou a seguir em frente.

Sou grato ao Grupo de Pesquisa em Motores, Combustíveis e Emissões, GPMOT, por ter me oportunizado a aprender tanto nesses anos de convivência.

Por fim sou grato por todas as pessoas que passaram pela minha vida, as quais me incentivaram e me deram toda a esperança e aprendizado.

RESUMO

INVESTIGAÇÃO DOS EFEITOS DA RAZÃO AR-COMBUSTÍVEL NA PERFORMANCE DE UM MOTOR DE IGNIÇÃO POR CENTELHA OPERANDO EM CARGA PARCIAL COM HIDROGÊNIO

AUTOR: Marcos Vinicius Penna Pivetta

ORIENTADOR: Prof. Dr. Thompson Diórdinis Metzka Lazzanov

Os combustíveis alternativos impulsionam pesquisas em motores de combustão interna para redução de emissões de carbono e impacto ambiental causado pelo setor da mobilidade. Com este intuito, este trabalho investiga condições limites de operação pobre de um motor de combustão interna monocilíndrico de pesquisas de ignição por centelha modelo Ricardo Protheus utilizando hidrogênio como combustível. Os testes foram realizados em bancada dinamométrica do Laboratório de Motores da Universidade Federal de Santa Maria, com rotação de 1800 rpm em condição de carga de 2,5 bar de pressão média efetiva indicada. Investigou-se a influência da razão ar-combustível na operação do motor começando em condição de borboleta totalmente aberta com injeção de combustível suficiente para manutenção da carga de operação. Testou-se quatro diferentes razões ar-combustível variando a pressão de admissão através do fechamento da válvula borboleta para o alcance de razões ar-combustíveis mais ricas. Sendo as razões estabelecidas em 1, 2, 3, 4 que para cada razão foi encontrado os valores pressão corresponde 55, 70, 85 e 100,5 kPa. Para cada uma das razões foi realizada varredura de avanço de ignição para buscar o avanço de ignição de máxima eficiência indicada. Foi possível operar o motor em condição de alta diluição por ar, com razão de excesso de ar (λ) máxima de 4, até o limite próximo ao estequiométrico. O enriquecimento da mistura gerou redução da duração de combustão. Porém, o controle de carga através de estrangulamento impactou diretamente a eficiência de operação.

Palavras-chave: hidrogênio, ignição por centelha, razão ar/combustível de excesso de ar, motor de combustão interna

ABSTRACT

INVESTIGATION OF THE EFFECTS OF THE AIR-FUEL RATIO ON THE PERFORMANCE OF A SPARK IGNITION ENGINE OPERATING AT PARTIAL LOAD WITH HYDROGEN

AUTHOR: Marcos Vinicius Penna Pivetta

ADVISOR: Prof. Dr. Thompson Diórdinis Metzka Lanzasova

Alternative fuels drive research in internal combustion engines to reduce carbon emissions and environmental impact caused by the mobility sector. With this aim, this study investigates the lean operation limits of a single-cylinder internal combustion engine for spark ignition research, using hydrogen as the fuel. The tests were conducted on a dynamometer bench at the Engine Laboratory of the Federal University of Santa Maria, with an engine speed of 1800 rpm under a condition of 2.5 bar indicated mean effective pressure. The influence of the air-fuel ratio on engine operation was investigated, starting from a fully open throttle condition with sufficient fuel injection to maintain the operating load. Four different air-fuel ratios were tested by varying the intake pressure through throttle valve closure to achieve richer air-fuel ratios. The established ratios were 1, 2, 3, and 4, corresponding to intake pressure values of 55, 70, 85, and 100.5 kPa. For each ratio, an ignition timing sweep was performed to find the maximum indicated efficiency ignition advance. It was possible to operate the engine under high air dilution conditions, with a maximum air-fuel ratio (λ) of 4, approaching the stoichiometric limit. The enrichment of the mixture resulted in a reduction in combustion duration. However, load control through throttling directly impacted the operating efficiency.

Keywords: hydrogen, spark ignition, air-fuel ratio, excess air ratio, internal combustion engine

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Diagrama pressão-volume do ciclo Otto ideal e da operação real de um motor de ignição por centelha.....	17
Figura 2: Motor Ricardo Proteus.	27
Figura 3: Interface de usuário da ECU FT 450.....	27
Figura 4: Plenum e coletor de admissão para injeção de gás.....	28
Figura 5: Sensores.....	29
Figura 6: Análise de Dados Daqmot.....	30
Figura 7: Análise de Dados LabView	30
Figura 8: Pressão de admissão em relação ao lambda	36
Figura 9: Crank angle CA50 em relação ao avanço de ignição.....	37
Figura 10: Eficiência Indicada em relação CA50	38
Figura 11: PMEP em relação à razão ar/combustível.....	39
Figura 12: CoVimep em relação à razão ar/combustível.....	40
Figura 13: CA 0-10 e CA 10-90 em relação à razão ar/combustível.....	41
Figura 14: Taxa de liberação de calor em relação aos ângulos do virabrequim	41
Figura 15: Pmax e AIPmax em relação à razão ar/combustível	42
Figura 16: Gráficos Log P x Log V a 1800 RPM com carga 2,5 bar IMEP.....	43
Figura 17: NOx e temperatura de exaustão em relação à razão ar/combustível.....	44
Figura 18: Eficiência Indicada em relação à razão ar/combustível	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Especificações do motor Ricardo Protheus	22
Tabela 2. Propriedades do hidrogênio.	28

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

<i>CA50</i>	Posição angular do virabrequim que ocorre 50% da fração de massa queimada, do inglês “Crank angle position where 50% of mass fraction burned”
<i>CAD</i>	grau do ângulo do virabrequim do inglês “cranck angle degrees”
<i>CO</i>	Monóxido de carbono
<i>CO₂</i>	Dióxido de carbono
<i>ECU</i>	Unidade de Controle do Motor, do inglês “Engine Control Unit”
<i>GPMOT</i>	Grupo de Pesquisa em Motores, Combustíveis e Emissões
<i>IMEP</i>	Pressão média efetiva indicada, do inglês “Indicated Mean Effective Pressure”
<i>ISFC</i>	Consumo específico de eixo, do inglês “Brake Specific FuelConsumption”
<i>LHV</i>	Poder calorífico inferior, do inglês “Low heat value”
<i>PMS</i>	Ponto morto superior
<i>MAP</i>	Sensor de pressão do coletor, do inglês “manifold air pressure”
<i>MBT</i>	Máximo toque de eixo, do inglês “Maximum Brake Torque”
<i>MCI</i>	Motor de combustão interna
<i>N</i>	Átomo de nitrogênio
<i>NO</i>	Monóxido de nitrogênio
<i>NO_x</i>	Óxidos de nitrogênio
<i>N₂</i>	Molécula de nitrogênio
<i>O</i>	Átomo de oxigênio
<i>O₂</i>	Oxigênio
<i>OH</i>	Hidróxido
<i>p</i>	Pressão no cilindro
<i>PCI</i>	Poder calorífico inferior
<i>PFI</i>	Injeção no pórtilo de admissão, do inglês “Port Fuel Injection”
<i>PMI</i>	Ponto morto inferior
<i>RC</i>	Razão de compressão
<i>SI</i>	Ignição por centelha
<i>TDC</i>	Ponto morto superior, do inglês “Top Dead Center”
<i>V</i>	Volume
<i>V_d</i>	Volume deslocado
<i>WOT</i>	Acelerador totalmente aberto, do inglês “Wide Open Throttle”

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	13
1.1. OBJETIVOS	14
1.1.1. Objetivo Geral.....	14
1.1.2. Objetivos Específicos.....	14
1.2. JUSTIFICATIVA.....	15
2. REFERENCIAL TEÓRICO	16
2.1. MOTORES DE IGNIÇÃO POR CENTELHA – CICLO OTTO.....	16
2.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.2.1 Hidrogênio como alternativa de combustível para mobilidade.....	18
2.2.2 Utilização de hidrogênio como combustível em motores de ignição por centelha.....	19
3. MATERIAIS E MÉTODOS	26
3.1. MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO.....	26
3.2. APARATO EXPERIMENTAL	26
3.2.1. Motor Experimental	26
3.2.2. Gerenciamento do Motor	27
3.2.3. Parâmetros de Controle do Motor	28
3.2.4. Instrumentação e Aquisição de dados para teste de motor em bancada dinamométrica	28
3.2.5. <i>Pegging</i>	31
3.2.6. Sistema de medição de combustível	31
3.2.7. Sistema de análise de gases de Exaustão	31
3.2.8. Combustível de Testes	32
3.2.9. Metodologia de ensaio	32
3.2.10. Análise de Operação	33
3.2.10.1 Potência Indicada	33

3.2.10.2 Pressão média efetiva indicada	33
3.2.10.3 PMEP - Pressão média efetiva de bombeamento.....	34
3.2.10.4 Consumo específico de combustível indicado ISFC.....	34
3.2.10.5 Parâmetros de performance do motor	34
3.2.10.5.1 Duração do ângulo combustão (CA 0-10 e CA 10-90).....	34
3.2.10.5.2 Variabilidade Cíclica na combustão (CoV_{imep})	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	36
4.1. VARREDURA DE AVANÇO DE IGNIÇÃO	36
4.2. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE ADMISSÃO	39
5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS.....	46
5.1. CONCLUSÃO	46
5.2. TRABALHOS FUTUROS.....	47
REFERÊNCIAS	48

1. INTRODUÇÃO

A procura por novas fontes de energia em prol da redução da emissão de gases de efeito estufa e poluentes provenientes de motores de combustão interna promove novas pesquisas para a conservação do meio ambiente. Com esse propósito, o incentivo às pesquisas vem aumentando, tendo como uma das linhas mais promissoras a investigação do emprego de combustíveis alternativos, tal como o hidrogênio.

As emissões do setor de transportes são uma das que mais causam impactos na qualidade do ar. Nos motores de combustão interna, o processo da combustão produz gases queimados de alta pressão e temperatura. Como menciona Santos (2020), esses gases gerados são compostos por poluentes como hidrocarbonetos não queimados (HC) ou parcialmente queimados, óxidos de nitrogênio (NO e NO₂), monóxido de carbono (CO), óxidos de enxofre (SO₂ e SO₃) e partículas em diversas formas. De Sá (2017), comenta que as regulamentações ambientais para reduzir poluentes como HC, e NO_x têm forçado a indústria automotiva a encontrar maneiras de reduzir as emissões gasosas de seus motores de combustão interna. A eficiência energética de veículos de transporte tem sido um tema de alta relevância no cenário mundial e é impulsionada pela consequente redução de gases de efeito estufa, neste caso o CO₂.

Em um cenário global, um dos responsáveis pela mudança climática são as emissões do setor de transporte, em que cerca de 14% das emissões anuais (incluindo gases não dióxido de carbono) e cerca de um quarto das emissões de dióxido de carbono provenientes da queima de combustíveis fósseis (WANG, 2019). A regulamentação de poluentes está cada vez mais rigorosa, a necessidade de reduzir significativamente as emissões de gases de efeito estufa e a concorrência com motores alternativos iniciaram uma discussão sobre o futuro dos motores de combustão interna (CHIODI, 2011).

O hidrogênio como combustível pode ser uma forma de energia mais limpa do que os hidrocarbonetos de origem fóssil e evitando a emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. Segundo Antunes; Mikaelson; Roskilly (2007), o hidrogênio possui algumas propriedades que o tornam atrativo para uso como combustível em motores de combustão interna, como um processo de combustão rápida, próximo ao processo termodinâmico ideal a volume constante. Isso pode levar a uma melhor eficiência operacional sem gases de efeito estufa ou poluentes, uma vez que os produtos da combustão H₂ e ar são apenas calor e água.

Mohamaddi *et al.* (2007) consideram o hidrogênio como um futuro combustível para sistemas de energia devido à operação livre de CO₂ e hidrocarbonetos. Para que isso aconteça, a produção de hidrogênio deve ser considerada limpa, ou seja, através da utilização de fontes de energia renováveis sem impacto nas emissões de carbono. Entretanto, devido às características únicas do hidrogênio para reduzir as emissões de gases de efeito estufa e poluentes sem comprometer a eficiência de operação dos motores, é necessária a realização de ensaios dinamométricos para entender o comportamento dos motores e suas emissões com o uso do hidrogênio. Por essa razão, este trabalho propõe a investigação de parâmetros de desempenho, combustão e emissões de óxidos de nitrogênio de um motor monocilíndrico de pesquisa de ignição por centelha com injeção de hidrogênio na porta de admissão, operando em condições de baixa carga (2,5 bar IMEP a 1800 rpm, devido a máxima pressão de admissão possível de 1 atm.) com diferentes razões ar-combustível.

1.1. OBJETIVOS

1.1.1. Objetivo Geral

Investigar os efeitos da razão ar-combustível nos parâmetros de performance, combustão e emissões de óxidos de nitrogênio de um motor de ignição por centelha, monocilíndrico de pesquisa utilizando hidrogênio como combustível.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Ajustes da configuração experimental para ensaio de motor de combustão interna alimentado com hidrogênio;
- Mapeamento da razão ar-combustível limite na operação com hidrogênio;
- Realização de ensaio de motor em bancada dinamométrica e análise de resultados.

1.2. JUSTIFICATIVA

Em um contexto mundial a utilização de energias alternativas que proporcionem baixas emissões veiculares tem sido cada vez mais discutida, a fim de reduzir o impacto ao meio ambiente e gerar desenvolvimento sustentável. Temas como eficiência energética, energias limpas e baixas emissões surgem como prioritários para alcançar as metas propostas pelo Tratado de Paris (2015). Nesse acordo é proposta a redução drástica das emissões de gases de efeito estufa visando manter o aquecimento global abaixo de 2 °C.

No ramo de motores de combustão interna, a busca pela redução de emissões possibilita estudos e pesquisas de iniciação científica visando uma nova alternativa energética, como menciona GARLET (2022). Com os custos elevados dos combustíveis fósseis e a necessidade de reduzir a emissão de gases de efeito estufa e poluentes, as fontes de energias renováveis se tornam um objeto atraente para diminuir as emissões. Um dos objetos de estudo são os motores de combustão interna, movidos a hidrogênio para analisar as emissões, a eficiência e a sustentabilidade considerando o hidrogênio como combustível para aplicações de transporte. Carvalho (2011) cita que atualmente a busca por motores de combustão interna mais eficientes é uma necessidade não apenas do ponto de vista econômico e tecnológico, mas também do ponto de vista da sustentabilidade do meio ambiente. O uso do hidrogênio como alternativa energética visa um melhor aproveitamento do combustível associado a um melhor desempenho e menor consumo resultando em maior eficiência e menores quantidades de emissões de gases nocivos ao meio ambiente. Sendo assim, este trabalho investiga a condição limite de um motor para oferecer suporte a projetos como o ROTA 2030.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. MOTORES DE IGNIÇÃO POR CENTELHA – CICLO OTTO

O motor de combustão interna é uma máquina térmica que tem como função converter energia proveniente de uma reação química em energia térmica, e posteriormente, em energia mecânica. O processo de conversão ocorre através de ciclos termodinâmicos. Conceitualmente, um ciclo é uma série de processos que ocorrem de forma cíclica, ou seja, que se renovam constantemente. Nos processos de um ciclo termodinâmico de uma máquina térmica, os elementos fundamentais que o caracterizam são: a substância de trabalho, e a fonte de calor, e o processo de combustão onde o fluido de trabalho é convertido em energia mecânica. (TILLMANN, 2013).

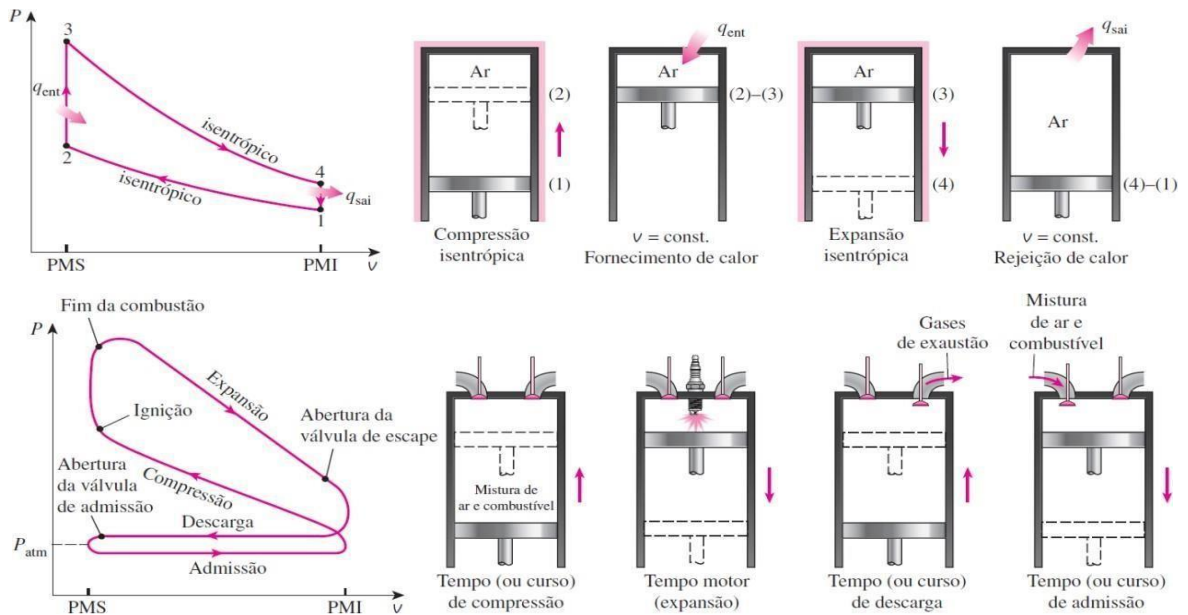
No motor de combustão interna, o calor liberado durante a mistura "combustível + ar" expande os gases gerados durante a combustão. Parte desse calor é então usado para realizar trabalho no pistão, cujo movimento é transferido para um eixo, o virabrequim, que converte as forças dos pistões utilizados, entre outras funções, para movimentar as rodas do carro.

O motor de combustão interna de ignição por centelha (SI, do inglês *spark ignition*), idealmente teorizado através do ciclo Otto, opera admitindo a mistura ar-combustível no cilindro durante a fase de admissão. O combustível é injetado intermitentemente na porta de admissão ou no coletor de admissão por um injetor de combustível controlado eletronicamente (Heywood, 2018). O ciclo de operação de quatro tempos ocorre quando o pistão percorre o cilindro do PMS (ponto morto superior) ao PMI (ponto morto inferior) quatro vezes, ou seja, duas voltas do eixo.

Conforme o ciclo Otto (Figura 1), o ciclo de potência é descrito pelos processos termodinâmicos ideais de compressão isoentrópica (1-2), adição a volume constante (2-3), expansão isoentrópica (3-4) e rejeição de calor a volume constante (4-1). A adição de calor a volume constante teoriza a combustão iniciada pela centelha de uma vela de ignição. Os produtos da combustão são expandidos e o calor é rejeitado. Conforme Da Silva (2016), de forma geral, o motor que opera segundo o ciclo Otto que depende de três parâmetros básicos para gerar torque: a massa de ar, a massa de combustível aprisionada no cilindro durante a combustão e o momento da centelha.

A figura 1 apresenta o diagrama pressão-volume do ciclo Otto ideal e de um ciclo de potência real de um motor de ignição por centelha de quatro tempos.

Figura 1: Diagrama pressão-volume do ciclo Otto ideal e da operação real de um motor de ignição por centelha



Fonte: Adaptado de Çengel, (2013).

O motor de ignição por centelha possui variações quanto à operação em ciclo de quatro ou dois tempos. Em destaque, o ciclo de quatro tempos pode ser descrito pelas fases de admissão, compressão, expansão e exaustão, exemplificadas abaixo:

Admissão: a válvula de admissão se desloca, abrindo um espaço para permitir a entrada de uma mistura de ar e combustível na câmara de combustão, enquanto a válvula de escape permanece fechada. O pistão se move de forma a aumentar o volume da câmara de combustão através do deslocamento do êmbolo desde o Ponto Morto Superior (PMS) até o Ponto Morto Inferior (PMI) do cilindro.

Compressão: com as válvulas de admissão e escape fechadas, o pistão se move de forma a comprimir a mistura, deslocando o êmbolo desde o PMI até o PMS, aumentando a pressão dentro do cilindro.

Expansão: ainda com as válvulas de admissão e escape fechadas, a vela de ignição produz uma centelha elétrica que fornece a energia de ativação para a reação química de oxidação. Essa reação converte a energia química da mistura comprimida, em mecânica, impulsionando o êmbolo do PMS para o PMI.

Exaustão: com a válvula de admissão fechada, o pistão retorna ao PMI com a força da combustão, e em seguida a válvula de escape se abre, permitindo que os gases da combustão sejam expelidos. Logo após, a válvula de admissão se abre novamente, reiniciando o processo do ciclo.

2.2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.2.1 Hidrogênio como alternativa de combustível para mobilidade

Buscando novas alternativas como fonte de energia, o hidrogênio torna-se uma opção de combustível. É o elemento mais simples e mais abundante, sendo considerado leve e tendo o seu núcleo constituído unicamente por um próton. O hidrogênio molecular (H_2) existe como dois átomos ligados que compartilham entre si os seus dois únicos elétrons através de uma ligação covalente.

Quanto às propriedades, o hidrogênio possui um poder calorífico de 119,96 MJ/kg, que é 2,75 vezes maior do que o de combustíveis (gasolina) de hidrocarbonetos (KAPDAN; KARGI, 2006). Encontra-se frequentemente na forma gasosa, compreendendo o gás H_2 , o qual é incolor e inodoro, com densidade (0 °C e 0,1013 MPa): 0,0899 kg/N m³, ponto de ebulição: 252,8 °C (na pressão de 0,1013 MPa). É inflamável em concentrações de 4% a 75% de H_2 por volume e 1 g de hidrogênio ocupa o espaço de aproximadamente 11 L sob pressão atmosférica.

O hidrogênio pode ser obtido por alguns métodos sendo necessária a realização de processos físicos ou químicos para separá-lo e permitir seu uso como fonte de energia na forma molecular (H_2). Entre os processos podemos citar alguns dos mais comuns, os quais identificam a forma de obtenção do hidrogênio: verde, cinza, azul e turquesa.

- Hidrogênio verde, que é produzido com eletricidade a partir de fontes de energia renováveis, como turbinas eólicas, e solares para melhorar a eletrólise da água que é a opção mais adequada porque é livre de emissões.

- Hidrogênio cinza, que é produzido pela reforma a vapor do gás metano fóssil com emissões de dióxido de carbono para a atmosfera.

- Hidrogênio azul, cuja produção é baseada em combustíveis fósseis com captura, uso e armazenamento de carbono (CCS, da expressão em inglês “*carbon capture and storage*”). Também é chamado de gás livre de carbono ou de baixo carbono com captura de carbono CCS.

- Hidrogênio turquesa, produzido a partir de gás fóssil com o emprego da tecnologia de pirólise de metano, que gera também carbono sólido o qual é posteriormente utilizado em outras aplicações ou armazenado em reservatórios subterrâneos.

2.2.2 Utilização de hidrogênio como combustível em motores de ignição por centelha

O hidrogênio é considerado o combustível do futuro por ser uma fonte de energia renovável, quase inesgotável e não poluente, que trará benefícios para toda a humanidade e ao meio ambiente (SOUZA, 2022). A utilização de hidrogênio para produção de energia pode ocorrer através da utilização em motores de combustão interna ou em células de combustível. As células de combustível alimentadas a hidrogênio estão a ser consideradas como um candidato promissor para o futuro, pois ainda se encontram numa fase de maturidade tecnológica menor do que os motores de combustão interna. Esse conceito será válido se o hidrogênio for obtido de fonte renovável. A célula de hidrogênio ou célula combustível é um conversor de energia capaz de transformar a energia química de um composto em energia elétrica, sem liberar dióxido de carbono, atuando assim de forma limpa.

A aplicação de hidrogênio em motores de combustão apresenta maior potencial para aplicação direta em veículos (SININAGLIA, 2018). Para isso, alguns processos precisam ser considerados, como a produção, o armazenamento, a distribuição e o uso do hidrogênio nos veículos. Dentro desses requisitos, o desenvolvimento de todas essas etapas é importante para tornar o hidrogênio um recurso energético competitivo na mobilidade, em que a competição com carros tradicionais, híbridos ou elétricos se torna acirrada. Isso faz com que medidas de estratégia e pesquisas de negócios se tornem fundamentais para saber o quão essencial será o uso do hidrogênio. No trabalho de Sinigaglia (2018), apresentou-se uma proposta de modelagem para mensurar e avaliar o nível de competitividade dos cenários que utilizam o hidrogênio como recurso energético para a mobilidade e a mesma foi validada por alguns especialistas que trabalham na área, em que se elenca a base teórica e o caráter competitivo alcançado. Isso permite afirmar que a competitividade da situação em que se utiliza o hidrogênio como combustível de mobilidade se encontra no estado de transição entre "Não altamente competitivo" e "Competitivo". O uso do hidrogênio como combustível de mobilidade ainda requer muitos desenvolvimentos para ser "totalmente competitivo" com os combustíveis convencionais, pois progressos significativos em tecnologia, infraestrutura e políticas ainda são essenciais.

Os incentivos para o uso de hidrogênio são a ausência de emissões nocivas, a sustentabilidade e a segurança energética ao considerá-lo como combustível para aplicações no setor de transportes. No entanto, o hidrogênio, com a sua baixa densidade e baixa energia de ignição, apresenta alguns novos desafios ao motor.

O projeto P2000 (H2ICE), realizado por Tang *et al.* (2002), investigou-se sistematicamente as características únicas de combustão relacionadas ao hidrogênio. Isso inclui pré-ignição, formação e controle de emissões de NOx, eficiência volumétrica de injeção de combustível gasoso, densidade de potência relacionada, eficiência térmica e controle de combustão. Utilizando um motor Ford Zetec 2.0 L existente, com diâmetro/curso de 84,8/88 mm, a injeção de combustível de porta (PFI) foi atualizada e otimizada para uso exclusivo de combustível de hidrogênio.

Os principais problemas encontrados na combustão de ignição por faísca (SI) H2ICE é o backfire e/ou pré-ignição, que ocorre quando a relação combustível/ar pobre se aproxima de níveis estequiométricos, limitando o torque do motor. O backfire ocorre quando há uma combustão descontrolada no sistema de admissão, resultando em uma explosão que ocorre no sentido contrário ao fluxo normal. Já a pré-ignição é caracterizada por uma ignição não controlada que ocorre devido a depósitos de carbono ou áreas quentes dentro do motor. No entanto, os resultados obtidos mostram que o hidrogênio como combustível possui propriedades únicas, como emissões muito baixas de dióxido de carbono, limites de inflamabilidade muito amplos com taxas de queima rápidas, além da economia dos motores de combustão interna. O backfire não pode ser deliberadamente produzido no dinamômetro do motor variando a sobreposição da válvula, o tempo de injeção ou a taxa de fluxo de injeção. A pré-ignição tem um impacto negativo no torque, pois uma parte significativa da energia do combustível é perdida no sistema de admissão. Isso ocorre devido a alterações no tempo de ignição, resultando em picos de pressão mais altos ocorrendo atrasados, antes do ponto de torque máximo (MBT). Como o hidrogênio possui uma ampla gama de inflamabilidade, o motor H2ICE pode ser controlado de maneira semelhante aos motores a gasolina da série atual, onde a relação combustível-ar é constante (mas no motor a H2 não precisa ser).

O Laboratório de Pesquisa Científica da Ford continuou investigando o sistema H2ICE. Conforme Natkin *et al.* (2003) um novo experimento usando um motor Zetec de 2,0 litros (razão de compressão de 14,5:1 e 12,5:1) e um Duratec HE-4 de 2,3 litros (razão de compressão de 12,2:1), sobrealimentado, foi construído e testado em dinamômetro com pressões de ar do coletor de até 200 kPa. O nível de aumento de pressão alcançado com o compressor usado nesse estudo foi proporcional à rotação do motor, resultando em alta potência. O objetivo desse estudo foi melhorar o desempenho de um H2ICE em relação ao obtido com o projeto 2.0 L Zetec P2000, analisando dados e emissões MBT (*Maximum Best Torque*) com um motor sobrealimentado, avaliando as reduções nas emissões de NOx. Os resultados desse estudo demonstraram que o desempenho de um motor à gasolina com deslocamento semelhante pode ser igualado ou superado por um motor H2ICE. A operação com esse motor sobrealimentado, com um intercooler ar-ar, resultou em um déficit de torque de 28 % em comparação com a gasolina.

Natkin ainda relata outro estudo sobre o controle de emissões de NO_x em relação ao torque, pois a queima pobre também causa uma redução considerável no torque. As condições de operação foram feitas realizando a troca da razão de compressão do motor, eficiência térmica e densidade de potência, com EGR e pós-tratamento para um motor Zetec 2.0L naturalmente aspirado. Como resultado do uso da recirculação dos gases de escape e um conversor catalítico de três vias, demonstram as experiências realizadas um meio eficaz de reduzir as emissões de NO_x de um motor movido a hidrogênio para menos de 1 ppm, onde a estratégia de EGR naturalmente aspirada é capaz de produzir mais torque do que uma condição de excesso de ar. Se as baixas emissões de NO_x (< 5 ppm) forem um requisito, usando o EGR pode-se produzir 23% a 29% mais torque do que a estratégia de queima enxuta.

O motor de combustão interna a hidrogênio pode oferecer a oportunidade de obter desempenho e características de conforto semelhantes às de um motor à gasolina convencional. Em outro projeto de pesquisa desenvolvido por Berckmüller *et al.* (2003), um motor monocilíndrico, quatro tempos com uma razão de compressão de 11:1, projetado com formação de mistura externa e interna e um sistema de diferentes cargas, onde foi utilizado uma sobrealimentação de 0,85 bar a fim de melhorar a densidade de potência e o alcance do veículo, investigando novas formas de projeto e cargas de motores a hidrogênio. As limitações encontradas para as operações são a pré-ignição, e o *backfire* no coletor de admissão durante o período de abertura da válvula de admissão, quando a carga fresca se inflama precocemente pela mistura com os resíduos quentes. Contudo, o motor de combustão interna movido a hidrogênio permite densidade de potência e potência no mesmo nível dos atuais motores à gasolina, possibilitando assim, praticamente nenhuma emissão de poluentes.

Para o BMW *Group efficient*, o desenvolvimento de um *powertrain* (trem de força) pode ser considerado como solução entre consumo, peso e desempenho de condução, tendo sistemas de emissões quase zero. Um conceito apresentado por Kiesgin (2006) em seu trabalho mostra um modelo H2ICE adequado que pode satisfazer o uso de hidrogênio em um motor BMW conceito H₂ de 12 cilindros e que pode ser operado com H₂, já que as propriedades químicas e físicas do H₂ oferecem grande potencial. O pesquisador pontou ainda que esse modelo também pode ser usado com gasolina, tendo um conceito de combustível duplo, onde o H2ICE oferece a vantagem de usar hidrogênio sem uma infraestrutura desse totalmente desenvolvida, em que o motorista tem a opção de dirigir um carro à gasolina caso não consiga chegar a um posto de abastecimento de hidrogênio. Embora certas características desafiem o desenvolvimento de limites de ignição estendidos e sistemas de combustão de alta velocidade de chama, o baixo nível de energia de ignição de misturas estequiométricas de H₂-ar aumenta o risco de combustão irregular.

No entanto, a operação estequiométrica pode atingir dois objetivos principais: primeiro, obter desempenho e densidade de torque semelhante aos motores a gasolina e diesel e, em segundo lugar, essas características podem ser alcançadas com quase zero emissões. Portanto, os conceitos de motores H₂ que requerem um modo de operação $\lambda = 1$, utilizando catalisadores três vias TWC, podem atingir potência e a densidade de torque alcançadas pelo motor de combustão interna H₂ estando no mesmo nível dos motores a gasolina e diesel, e ainda beneficiando economicamente e nas emissões de dióxido de carbono.

Seguindo o conceito de estudo referente à razão ar-combustível, o trabalho de Chen; Rayne (2014) estudou o efeito dos parâmetros operacionais do motor, relação ar-combustível (λ), tempo de ignição e taxa de compressão na tendência e força de detonação e aditivo H₂, que garante a duração da ignição de até 70% da fração de massa queimada (MFB0-70%) variável explicativa para descrever a tendência e força de detonação. Em relação à porcentagem de ciclos de detonação ou tempo de ignição na detonação, a tendência de detonação diminui com o aumento de λ e o aumento de H₂. No entanto, se a duração do MFB for considerada, para a mesma duração do MFB, a tendência à detonação aumenta com o aumento de λ e diminui com a densidade de potência integrada do pico de adição de H₂. Ao utilizar a pressão pico a pico como um índice de detonação, descobriu-se que a intensidade da detonação aumenta à medida que a duração do MFB0-70 diminui. Além disso, a intensidade depende apenas da duração de MFB0-70% em comparação com ela mesma. Quanto menor a duração relativa de MFB0-70%, maior a intensidade da detonação e vice-versa.

Lanzanova *et al.* (2022) demonstram em seu estudo como o H₂ como combustível influencia na caracterização dos parâmetros de combustão, em que o propósito foi investigar as características de combustão do H₂ atribuindo algumas condições de operação em um motor de ignição por centelha com PFI (*port fuel injection*). Variando a razão de excesso de ar (λ) entre 1,4 e 5,5, seis condições de carga (IMEP) foram analisadas, sendo elas: 2,3; 3,1; 3,8; 4,4 bar e plena carga. As variáveis de combustão e desempenho analisadas foram o IMEP, COVIMEP, taxa de liberação de calor (HRR) e eficiência indicada. Os testes foram conduzidos visando atingir o avanço para o melhor torque máximo (MBT). Os resultados obtidos indicam que ao aumentar a carga do motor e diminuir a λ , há uma redução na duração da combustão. Os resultados demonstraram a estabilidade da operação, mesmo em altos valores de λ , como 4.3. Além disso, observou-se uma eficiência indicada de até 36% ao variar a proporção de ar em excesso de 2.0 a 2.4, o que representa um aumento significativo em comparação à operação do mesmo motor com cargas mais baixas, utilizando etanol ou gasolina brasileira em condições estequiométricas. Dessa forma, a utilização de H₂ revelou potencial para alcançar alta eficiência do motor, ao mesmo tempo em que reduz as emissões veiculares de carbono.

Lee *et al.* (2019) divulgou em seu estudo sobre a combustão e emissão de óxido de nitrogênio (NOx), o efeito da variação do tempo de avanço de ignição e da razão de excesso de ar (λ) em um motor de ignição por centelha alimentado a hidrogênio em condições de carga parcial. O motor foi operado a uma rotação de 2.000 rpm e torque de 60 Nm. A razão de excesso de ar foi variada de estequiométrica ($\lambda=1$) para uma condição de mistura pobre ($\lambda=2,2$) por estrangulamento.

O avanço de ignição foi controlado para determinar o ponto de avanço de ignição ideal (MBT) em relação ao λ . Os resultados mostraram que a eficiência térmica máxima, com o tempo de ignição no ponto de avanço de ignição ideal e em uma mistura mais pobre ($\lambda=2,2$), foi de 34,17%, e a emissão de NOx foi de apenas 14 ppm. Além disso, o estudo investigou os efeitos do λ e do tempo de avanço de ignição na combustão, eficiência térmica e emissões de NOx em carga parcial.

Foi observado que, devido à baixa velocidade de queima laminar e maior energia de ignição, o tempo de ignição do ponto de avanço de ignição ideal foi avançado para uma mistura mais pobre. Isso resultou em um aumento do ângulo de desenvolvimento da chama e da duração da combustão, além de uma redução da taxa de liberação de calor (HRR). O CoV (*Coefficient of Variation*) do IMEP (*Indicated Mean Effective Pressure*) foi inferior a 1,53%, exceto para a condição de mistura mais pobre com ignição retardada.

O BTE (*Brake Thermal Efficiency*) aumentou para misturas mais pobres devido à redução das perdas por bombeamento, resultante da redução do estrangulamento. A temperatura de combustão reduzida e a transferência de calor reduzida resultaram em perdas por exaustão mais baixas, com uma taxa de calor específico mais alta. As emissões de NOx foram reduzidas com a redução da temperatura de combustão e o aumento do λ . Os resultados mostraram uma alta eficiência térmica (34,17%) com emissões de NOx suficientemente baixas (BSNOx 0,07 g/kWh), obtidas por meio da combustão de hidrogênio em uma mistura pobre ($\lambda=2,2$) e com avanço de ignição antecipado em 25 CAD BTDC.

Onorati (2022) publicou um artigo com o objetivo de explorar a viabilidade das tecnologias de propulsão baseadas em fontes renováveis para a mobilidade. Embora o uso de *powertrains* elétricos alimentados por fontes renováveis esteja recebendo grande atenção, essa tecnologia pode não ser uma solução abrangente em termos de sustentabilidade e viabilidade. Nesse contexto, as pesquisas sobre motores de combustão interna (MCI) alimentados por hidrogênio (H₂) e hidrocarbonetos não fósseis surgem como uma possibilidade viável, considerando as energias renováveis geradas por usinas eólicas e fotovoltaicas.

O hidrogênio é uma fonte promissora de energia renovável, disponível em excesso durante os períodos de pico de produção, podendo ser usado para alimentar células de combustível (FCs). Com cerca de 25% da geração mundial de energia proveniente de motores de combustão interna que utilizam combustíveis fósseis e aproximadamente 17% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE) relacionadas ao setor energético atual, o hidrogênio apresenta diversas aplicações e um grande potencial em todos os setores de energia. No entanto, o uso de tecnologias de células de combustível de hidrogênio em motores MCI ainda enfrenta desafios, como o custo elevado da tecnologia FC, a necessidade de hidrogênio e um compressor de alta especificação para fornecer ar comprimido.

No setor de transportes, o hidrogênio aplicado em motores MCI como uma alternativa de emissão zero de CO₂ tem o potencial de abordar alguns dos principais desafios de redução de emissões, especialmente quando há poucas opções de transportadores de energia de quase zero emissão, como eletricidade e biocombustíveis avançados. Os H2ICEs podem ser analisados quanto à combustão e controle do motor, como injeção direta, ciclo de Miller, ajuste do λ , ignição em pré-câmara e emissões de poluentes, como o NO_x, em que o hidrogênio como agente redutor pode representar uma inovação. Os MCI são conhecidos por sua confiabilidade, durabilidade, disponibilidade de peças e suprimentos, facilidade de fabricação, reciclagem e acessibilidade. Portanto, o uso de H2ICEs pode ser atraente, uma vez que aproveita uma tecnologia existente bem estabelecida, contribuindo para uma transição rápida para uma mobilidade livre de carbono.

Na conclusão de seu artigo, Onorati (2002) relata que a transição para uma economia sustentável, com um sistema de energia acessível e seguro, requer uma transformação radical do sistema de mobilidade, incluindo as estradas e o setor de transportes. Devido às mudanças climáticas em todo o mundo, os MCI ainda desempenham um papel significativo e confiável, e a utilização de combustíveis renováveis, como o hidrogênio, pode substituir os combustíveis fósseis. Combustíveis como o hidrogênio e outros líquidos ricos em hidrogênio têm o potencial de proporcionar emissões zero de CO₂ e impacto ambiental mínimo, desempenhando um papel relevante. Para finalizar, o autor considera que os principais desafios estão relacionados à disponibilidade e produção de hidrogênio, bem como ao seu armazenamento seguro até o ponto de uso. Essas considerações envolvem aspectos econômicos, pois a redução potencial das emissões precisa ser ponderada em relação aos custos para a sociedade, considerando que o hidrogênio representa uma fonte promissora de energia renovável quando disponível.

Os MCI alimentados por hidrogênio se tornam uma alternativa viável para alcançar emissões zero de CO₂, podendo ser abastecidos até mesmo com hidrogênio não purificado, o que resultaria em custos de produção mais baixos. Considerando os possíveis desenvolvimentos da próxima geração de H2ICEs, espera-se que essa tecnologia de propulsão se torne competitiva e altamente eficiente, tornando-a atraente e conveniente em diversos campos de aplicação.

No estudo de Stepien (2021) foi realizada uma análise crítica dos desafios e oportunidades futuras relacionadas ao uso de hidrogênio em motores de combustão interna (MCI). O autor coletou experiências e opiniões de vários centros de pesquisa internacionais sobre as possibilidades técnicas de utilização do hidrogênio como combustível para MCI. Foram discutidas as vantagens e desvantagens do uso de hidrogênio, levando em consideração suas propriedades físicas, químicas e funcionais para os MCIs. O autor revisou conceitos de combustão de hidrogênio e apresentou resultados com base em pesquisas e experimentos descritos em diversos trabalhos científicos, com ênfase na discussão dos desafios e oportunidades associados à injeção direta de hidrogênio.

Esse estudo abordou ainda, estratégias diferentes de injeção e ignição de combustível, como pré-ignição, detonação, que são considerados riscos para a combustão inadequada do hidrogênio. A otimização do λ , as emissões de NO_x, a eficiência e o desempenho do motor são aspectos importantes que requerem atenção e foco. Além disso, a limpeza dos gases de escape para cumprir as regulamentações futuras de emissões para motores de combustão interna movidos a hidrogênio é uma questão que precisa ser abordada. O artigo menciona as modificações necessárias para adaptar os motores existentes para funcionar com hidrogênio e destaca os desafios não resolvidos relacionados à confiabilidade dos sistemas de injeção de combustível. A melhoria do desempenho e a redução significativa das emissões são objetivos a serem alcançados. No entanto, existem desvantagens no uso de hidrogênio, como altas emissões de NO_x, baixa potência e questões de durabilidade e confiabilidade para motores a hidrogênio.

Stepien (2021) concluiu seu estudo considerando o hidrogênio como combustível para motores de combustão interna e que podem contribuir significativamente para soluções alternativas e ecológicas de transporte rodoviário, incluindo as metas de neutralidade de CO₂ tanto em motores de ignição por centelha como os de ignição por compressão (diesel) da UE em 2050, sem mudanças significativas nos sistemas existentes.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. MÉTODO DE DESENVOLVIMENTO

O presente trabalho consiste em investigar de forma experimental dos efeitos da razão ar-combustível em motor monocilíndrico, em bancada dinamométrica alimentado a hidrogênio fazendo a verificação do ensaio em tempo real em softwares específicos com aquisição de dados, que posteriormente serão analisados e apresentados a fim de compreender a operação.

3.2. APARATO EXPERIMENTAL

3.2.1. Motor Experimental

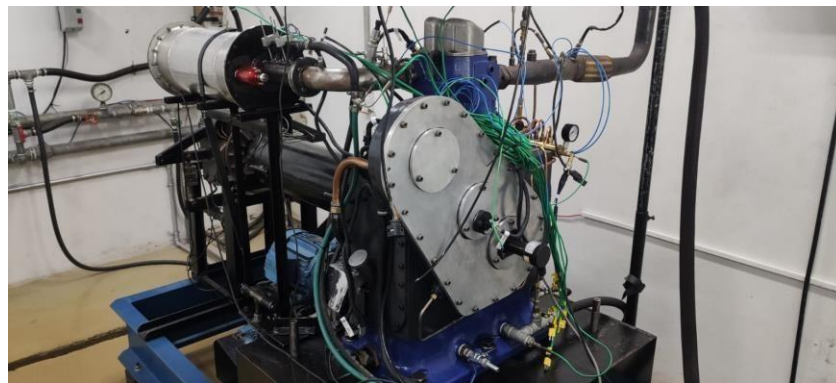
Para realizar os testes utilizou-se um motor monocilíndrico de pesquisa Ricardo Protheus quatro tempos, convertido de operação de ignição por compressão para ignição por centelha. As especificações do motor Ricardo Protheus são apresentadas na Tabela 1. A Figura 2 apresenta o motor monocilindro utilizado convertido SI (*Spark ignition*).

Tabela 1. Especificações do motor Ricardo Protheus

Admissão de ar	Naturalmente aspirado
Alimentação de combustível	Injeção na porta de admissão (PFI)
Diâmetro do Pistão	108 mm
Curso	128 mm
Deslocamento Volumétrico	1172.6 cm ³
Razão de Compressão	10.4:1
Diâmetro da Válvula de admissão	35 mm
Diâmetro da Válvula de exaustão	40 mm
Número de Válvulas por cilindro	2

Fonte: Autor (2022)

Figura 2: Motor Ricardo Proteus.

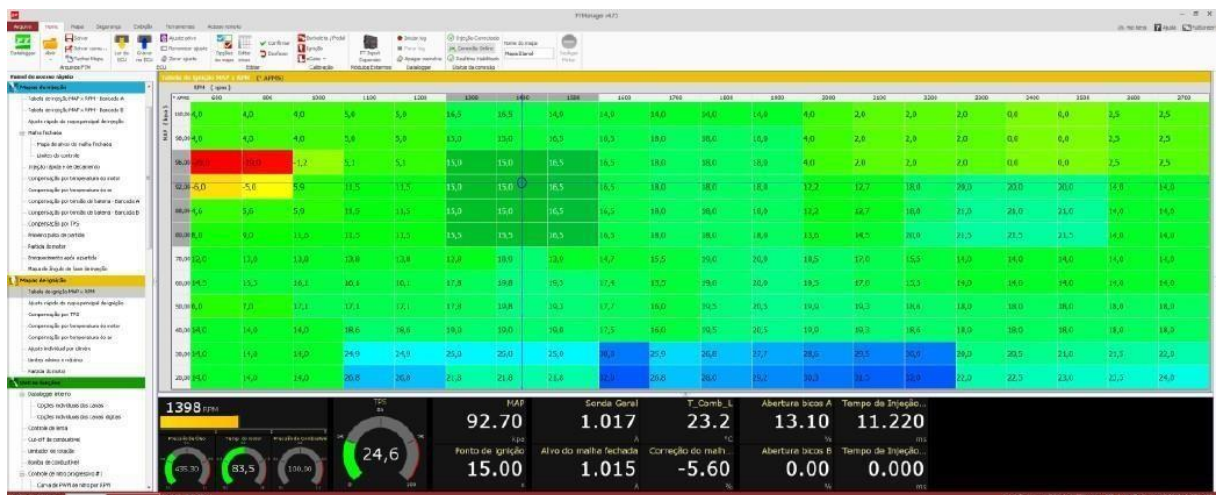


Fonte: Autor (2023)

3.2.2. Gerenciamento do Motor

Uma ECU (módulo de controle eletrônico, do inglês *electronic control unit*) programável da marca FUEL TECH modelo FT 450 foi utilizada para gerenciamento. Com ela foi possível realizar o controle de duração, momento de injeção de combustível na porta de admissão e avanço de ignição. O programa FTManager, Figura 3, foi utilizado para controle dos parâmetros em tempo real, enquanto a tela *touch screen* do equipamento foi utilizada apenas para monitoramento de parâmetros como tempo de abertura de injetor, ponto de injeção de combustível e avanço de ignição, posição de borboleta, rotação do motor, entre outros.

Figura 3: Interface de usuário da ECU FT 450



Fonte: Autor (2023)

3.2.3. Parâmetros de Controle do Motor

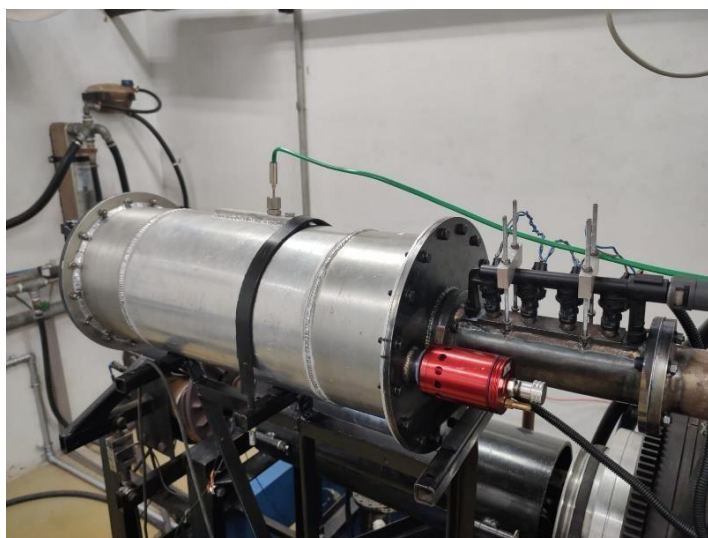
O ponto de ignição do motor é o momento em que ocorre a descarga elétrica da vela de ignição na câmara de combustão e se inicia a queima da mistura ar-combustível. Avanço de ignição é denominado o ajuste do ponto de ignição. Ocorre geralmente dentro do tempo de compressão e é medido pelo ângulo de giro do virabrequim em relação ao PMS (ponto morto superior). O ajuste do ângulo de ignição busca garantir que o ponto de maior pressão no interior da câmara de combustão ocorra após o pistão passar pelo PMS, alcançando a melhor conversão da pressão gerada em trabalho útil (GIACOSA, 1989).

Uma válvula borboleta com movimento controlado eletronicamente por um módulo FuelTech ETC foi utilizada para regular a carga do motor através da restrição de entrada de ar na admissão. O controle do motor foi realizado pela pressão de admissão em função da velocidade de rotação do motor.

3.2.4. Instrumentação e Aquisição de dados para teste de motor em bancada dinamométrica

O plenum foi instrumentado com um sensor de temperatura termopar tipo K. coletor de admissão com quatro bicos de injetor Bosch (modelo 0 280 158818) para injeção de gás hidrogênio foi inserida no duto de admissão posterior ao plenum, Figura 4.

Figura 4: Plenum e coletor de admissão para injeção de gás



Fonte: Autor (2023)

Para o sistema de ignição foi utilizada uma vela modelo WR7C+ SP27 da Bosch e uma bobina de ignição modelo Bi0039mm da Magneti Marelli. No que diz respeito aos sensores, foram empregados sensores de temperatura termopar tipo K nos coletores de admissão e escape, bem como transdutores de pressão de baixa frequência MPX5700AP para medir a pressão de admissão, visando viabilizar o modo de gerenciamento eletrônico escolhido. Além disso, foi utilizado um sensor de excesso de oxigênio modelo Bosch LSU 4.2 de banda larga, juntamente com um condicionador FuelTech WB-O2 nano 4.2.

A Figura 5 mostra dois sensores de excesso de oxigênio, sendo um deles utilizado para o gerenciamento do motor, fornecendo o valor de excesso de ar com base em uma calibração utilizando hidrocarbonetos (disponível comercialmente). O segundo sensor será descrito posteriormente, sendo utilizado para avaliar o excesso de oxigênio e calcular a razão real de excesso de ar durante a operação com H₂.

Figura 5: Sensores

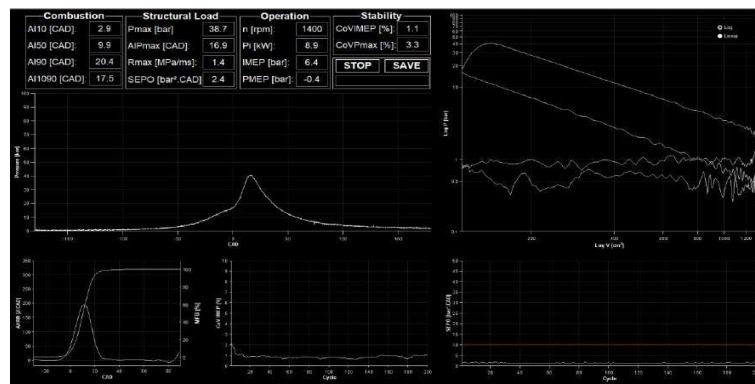


Fonte: Autor (2023)

Foram utilizados dois subsistemas para a coleta de dados: um sistema de coleta de dados indicados e um sistema de coleta de dados de baixa frequência. O sistema de coleta de dados indicados foi responsável por filtrar, amostrar, transformar e amplificar o sinal de pressão no cilindro. Isso foi realizado utilizando um sensor de pressão piezoelétrico AVL GH1D, que foi sincronizado com a posição angular do virabrequim. As pressões instantâneas de admissão e exaustão foram amostradas por meio de dois transdutores LP12DA, que possuíam um condicionador de sinal integrado. Foi empregado um sistema de arrefecimento da água para o transdutor de pressão de exaustão. Para obter a posição absoluta do virabrequim e do PMS (ponto morto superior), foi conectado um *encoder* incremental *Dynapar B58N* ao virabrequim.

O sinal resultante das variações de pressão captadas pelo transdutor piezoelétrico foi condicionado pelo amplificador AVL FLEXIFEM Piezo 2P2E. A amostragem do sinal com base no ângulo do virabrequim foi realizada por meio de uma placa de aquisição *National Instruments* NI USB 6351. O processamento e a visualização em tempo real dos dados indicados foram efetuados com o auxílio do software DAQMOT (DOS SANTOS *et al.*, 2019), desenvolvido no Laboratório de Motores da Universidade Federal de Santa Maria, conforme mostrado na Figura 6.

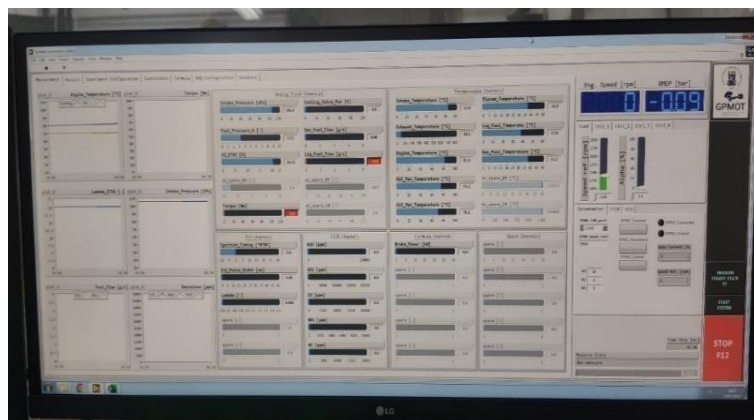
Figura 6: Análise de Dados Daqmot



Fonte: Autor (2023)

Foi empregado um sistema de aquisição de dados de baixa frequência para a coleta de informações provenientes de sensores de resposta mais lenta, tais como termopares, sensores de pressão piezoresistivos (para medição da pressão do óleo) e sensores de excesso de ar. Esse sistema foi controlado pelo programa LabView, conforme apresentado na Figura 7, e estabelecia comunicação e recebia dados de um quadro de aquisição de dados NI USB SCXI-1001, uma ECU programável FT 450 e um analisador de gás AVL SESAM i60 FTIR.

Figura 7: Análise de Dados LabView



Fonte: Autor (2023)

Utilizou diferentes módulos da *National Instruments* (NI) para capturar informações dos sensores utilizados. Foram empregados dois módulos NI SCXI-1303 para termopares, um módulo NI SCXI-1300 para sensores de pressão, um módulo NI SCXI-1325 para sensores em geral, e um módulo de comunicação NI SCXI- 1600. Esses módulos permitiram a coleta e recebimento de dados dos sensores com uma frequência de 1 kHz durante um período de 20 segundos.

3.2.5. Pegging

A fim de converter as flutuações do sensor de pressão piezoelétrico em valores de pressão absoluta, foi necessário realizar uma referência à pressão. Esse processo, conhecido como "*pegging* de pressão de cilindro" na terminologia técnica, utilizou a variação de pressão do PMI de admissão. Dessa forma, o sinal bruto de pressão pôde ser processado e ajustado para a escala de pressão absoluta.

3.2.6. Sistema de medição de combustível

Para a medição precisa do fluxo de massa de combustível líquido e gasoso, utilizou-se um medidor *Endress+Hauser Promass A*. Esse medidor opera com base no princípio de medição do efeito Coriolis, garantindo um erro máximo de $\pm 0,1\%$ para combustíveis líquidos e $\pm 0,35\%$ para gases. O funcionamento do medidor é realizado por meio de pulsos de vibração contínuos induzidos e direcionados ao tubo de medição. Conforme o líquido passa pelo tubo, ocorre uma deflexão maior no tubo oscilante, resultando em uma mudança de fase (torção). Essa mudança de fase é medida entre a entrada e a saída do tubo de medição. Além disso, o dispositivo realiza correções na medição de fluxo com base na densidade do líquido, considerando a temperatura e a pressão. Devido à sua alta velocidade de resposta, esse medidor é adequado para a medição de vazões transitórias com precisão.

3.2.7. Sistema de análise de gases de Exaustão

Foi utilizado um analisador de gases AVL modelo SESAM i60 FTIR (espectroscopia no infravermelho por transformada de Fourier) para analisar as emissões de óxidos de nitrogênio. Esse analisador é capaz de medir a concentração de mais de 30 espécies de gases relevantes para estudos em motores de combustão. Os dados fornecidos pelo analisador são considerados em base úmida e o erro máximo associado às medições é de 2% do valor medido, conforme indicado pelo fabricante (GOLKE, 2021). Essa precisão garante a confiabilidade das medições realizadas durante a análise das emissões de óxidos de nitrogênio.

3.2.8. Combustível de Testes

Como combustível foi utilizado hidrogênio 5.0 com 99,999% de pureza, na Tabela 2 mostra-se as suas propriedades físico-químicas.

Tabela 2. Propriedades do hidrogênio. Adaptado de Teoh *et al.* (2022).

Propriedades	Valor	Unidades
Temperatura de auto ignição	858	K
Densidade do gás a 1 atm	0,082	Kg/m ³
LHV (<i>Lower Heating Value</i>)	120	MJ/Kg
Energia para ignição no ar	0,02	mJ
Peso molecular	2,016	g/mol
Relação massa ar/combustível	34,48	-
Energia de combustão por mistura de estequiométrica	3,37	mJ/Kg

3.2.9. Metodologia de ensaio

O teste foi conduzido no laboratório de motores da UFSM, onde o motor foi operado a uma rotação de 1800 rpm em um banco de testes dinamométrico. As temperaturas do óleo e do sistema de resfriamento foram monitoradas e mantidas controladas em torno de $90\text{ °C} \pm 5\text{ °C}$. O teste foi realizado estabelecendo uma carga de 2,5 bar de IMEP, devido a condição de admissão de ar e foram feitas alterações no fechamento da válvula borboleta de admissão em quatro pontos diferentes, obtendo valores de pressão de admissão em 55, 70, 85 e 100,5 kPa. Os testes foram iniciados a partir de uma operação em WOT (*Wide open throttle*) com a máxima razão de excesso de ar (λ) possível para uma pressão atmosférica de admissão. Após a conclusão da bateria de testes para cada pressão de admissão, a válvula borboleta foi fechada gradualmente para alcançar o próximo nível de pressão de admissão desejado, enquanto a quantidade de H₂ injetado e o avanço de ignição eram ajustados para atingir a carga desejada.

Para cada nível de pressão de admissão testado, foi atribuído um valor específico para a razão de excesso de ar (λ 1, 2, 3, 4). Com o objetivo de garantir uma operação com a fase de combustão ideal para cada razão de excesso de ar, também foi realizado uma varredura do avanço de ignição através de atrasos e avanços do ponto de ignição em 2 CAD (*Crank Angle Degree*) a partir do avanço de ignição inicial, que proporcionava um CA50 em 8 CAD ATDC.

3.2.10. Análise de Operação

A seguir será apresentada a metodologia de cálculo de parâmetros de operação do motor.

3.2.10.1 Potência Indicada

A cada ciclo de operação do motor, o trabalho é gerado dentro de cada cilindro à medida que a pressão do gás empurra o pistão para baixo durante o curso de expansão. Os dados de pressão do gás no cilindro ao longo do ciclo de operação podem ser utilizados para calcular essa transferência de trabalho do gás para o pistão. O trabalho indicado por ciclo, representado por $W_{c,i}$ (por cilindro), é determinado integrando a curva de pressão ao longo do tempo para obter a área contida no diagrama, conforme descrito na equação 1 (Heywood, 2018).

$$W_{c,i} = \oint p dV \quad (1)$$

A potência indicada por cilindro P_i está relacionada ao trabalho indicado por ciclo, onde n_r é o número de revoluções do virabrequim para cada ciclo de de potência e N é a frequência de rotação (Heywood, 2018).

$$P_i = \frac{W_{c,i}N}{n_r} \quad (2)$$

3.2.10.2 Pressão média efetiva indicada

A pressão média efetiva indicada (IMEP, do inglês *Indicated Mean Effective Pressure*) é a medida mais apropriada para comparar a carga indicada em motores, uma vez que a comparação de carga baseada no torque depende do tamanho e do volume deslocado de cada motor. Isso dificulta a comparação de carga entre motores de diferentes tamanhos. A IMEP pode ser calculada usando a Equação 3, conforme Heywood (2018), que fornece uma estimativa da pressão média efetiva experimentada dentro do cilindro do motor ao longo de um ciclo de operação.

$$IMEP = \frac{W_{c,i}}{V_d} \quad (3)$$

V_d : volume deslocado

3.2.10.3 PMEP - Pressão média efetiva de bombeamento

A pressão média efetiva de bombeamento (PMEP, do inglês *Pumping Mean Effective Pressure*) refere-se ao trabalho realizado pelo pistão do motor para realizar os processos de troca de gases em relação ao volume deslocado pelo pistão. A PMEP representa a carga do motor perdida durante esse processo e pode ser calculada utilizando a Equação 4 (HEYWOOD, 2018). Ela fornece uma medida da pressão média efetiva experimentada pelo motor devido aos efeitos de bombeamento durante um ciclo de operação.

$$PMEP = \frac{1}{V_d} \oint_{\text{exaustão}}^{\text{admissão}} p dV \quad (4)$$

3.2.10.4 Consumo específico de combustível indicado ISFC

O consumo específico de combustível indicado (ISFC, do inglês *Indicated Specific Fuel Consumption*) de um motor é definido como a relação entre a vazão de combustível (\dot{m}_f) consumida pelo motor e a potência gerada. O ISFC é calculado utilizando o valor da potência indicada e pode ser determinado usando a Equação 5. Essa equação fornece uma medida da eficiência do motor em termos do consumo de combustível necessário para gerar uma determinada potência indicada.

$$sfc (g/kWh) = \frac{\dot{m}_f (g/s)}{P_i (kW)} \quad (5)$$

3.2.10.5 Parâmetros de performance do motor

A seguir será apresentada a metodologia de cálculo de parâmetros de operação do motor. Alguns desses foram monitorados durante os testes, enquanto outros necessitaram pós-processamento de dados para posterior análise dos resultados.

3.2.10.5.1 Duração do ângulo combustão (CA 0-10 e CA 10-90)

A duração do ângulo de desenvolvimento de chama (FDA, do inglês *Flame Development Angle*) é o intervalo de ângulo de virabrequim que ocorre entre o ponto de ignição e o momento em que 10% da massa total presente no cilindro é queimada. Essa medida representa o tempo necessário para o início do processo de combustão e o desenvolvimento inicial da chama.

Por sua vez, a duração do ângulo de queima CA10-90 refere-se ao intervalo de ângulo de virabrequim necessário para queimar de 10% até 90% da massa presente no cilindro. Esse intervalo compreende desde o final da fase inicial de desenvolvimento do núcleo da chama (correspondente a 10% da massa) até o término da propagação completa da chama (correspondente a 90% da massa).

Esses intervalos de duração, tanto o FDA quanto o ângulo de queima CA10-90, são importantes parâmetros para avaliar a eficiência da combustão em um motor, bem como para entender a dinâmica da queima de combustível no interior do cilindro.

3.2.10.5.2 Variabilidade Cíclica na combustão (CoV_{imep})

A estabilidade de operação do motor foi monitorada por meio do coeficiente de variação do IMEP (pressão média efetiva indicada) em um intervalo de 100 ciclos. A variabilidade cíclica é uma característica intrínseca do processo de combustão no motor e altos valores desse coeficiente podem afetar negativamente o desempenho, reduzindo a eficiência de operação e aumentando a emissão de gases.

Existem diversos fatores que podem contribuir para essa variabilidade como o avanço de ignição, que influencia a fase de combustão, a diluição da mistura de ar e combustível (tanto por ar em excesso quanto por gases queimados remanescentes), a não uniformidade da mistura durante a queima e a variabilidade nos processos de trocas de gases, bem como o design dos sistemas de admissão e exaustão.

Uma maneira comum de representar a variabilidade ciclo-a-ciclo é por meio do desvio padrão da pressão média efetiva indicada em um conjunto de 100 ciclos. Esse desvio pode ser calculado utilizando a Equação 6, conforme descrito por Heywood (2018). Essa análise permite avaliar a consistência e estabilidade da operação do motor, identificando possíveis áreas de melhoria para otimizar o desempenho e reduzir as variações indesejadas.

$$CoV_{imep} = \frac{\sigma_{IMEP}}{IMEP_{m\u00e9dio}} \cdot 100 \quad (6)$$

σ_{imep} : desvio padrão do IMEP

$IMEP_{m\u00e9dio}$: média de IMEP dos ciclos analisados

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

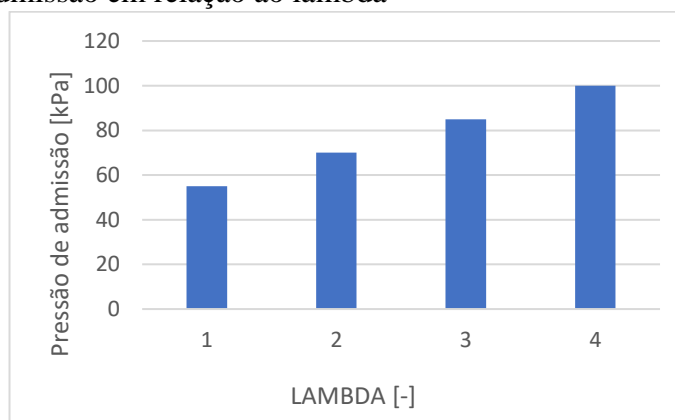
Nesta seção serão apresentados os resultados obtidos no teste do motor, que através de gráficos estarão exemplificados os dados coletados. Na primeira subseção será demonstrado em relação ao avanço de ignição. Na segunda subseção será referida a razão ar-combustível (Lambda).

4.1. VARREDURA DE AVANÇO DE IGNIÇÃO

Os dados da varredura de avanços de ignição foram obtidos analisando os parâmetros de pressão de admissão, lambda, CA50, CoVimep (coeficiente de variação do IMEP) e eficiência indicada. Esses parâmetros foram medidos em diferentes pontos de ignição, variando em incrementos de 2 graus tanto adiantados quanto atrasados em relação a 8 CAD ATDC. Os valores de cada parâmetro foram registrados para quatro diferentes valores de Lambda (1, 2, 3, 4), representando diferentes proporções de ar-combustível na mistura. Além disso, os valores de pressão de admissão apresentados 55, 70, 85 e 100,5 kPa são resultados das condições estabelecidas pela razão de ar/combustível.

A Figura 8 apresenta a relação entre a pressão de admissão e o valor de Lambda, valores de pressão que foram obtidos com as condições de operação estabelecidas. Os dados coletados são referentes a 8 graus de ângulo de virabrequim após o ponto morto superior (CAD). Observa-se que quanto maior a pressão de admissão, mais pobre é a mistura, o que ocorre devido à quantidade de ar admitida para manter a carga constante em 2,5 bar de IMEP. Esses dados fornecem informações importantes sobre o comportamento da mistura ar-combustível em relação aos pontos de ignição, permitindo uma análise detalhada dos efeitos das diferentes condições de pressão de admissão e Lambda nos parâmetros de desempenho e eficiência do motor.

Figura 8: Pressão de admissão em relação ao lambda

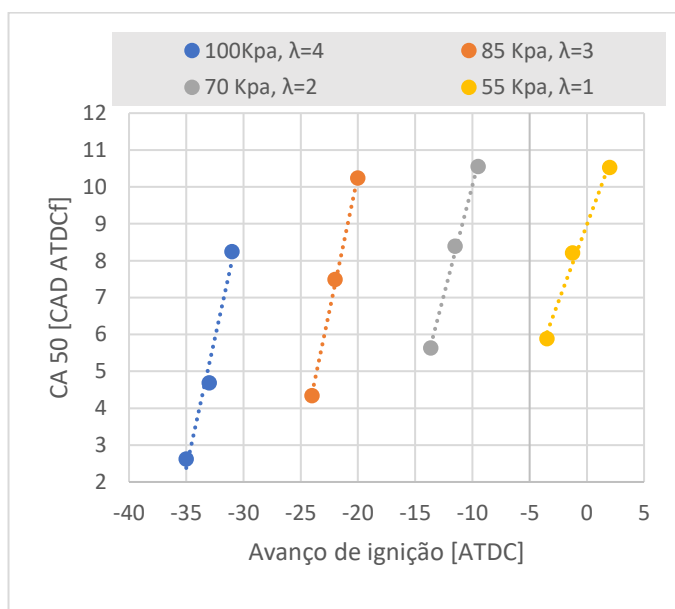


Fonte: Autor (2023)

Na Figura 9, estão representados os dados obtidos para o CA50. Podemos observar que à medida que a pressão de admissão aumenta, é necessário adiantar o ponto de ignição para que a combustão ocorra de forma correta. O aumento do avanço de ignição resulta em um avanço do CA50, indicando que a maior parte da carga de combustível ocorre ainda durante o curso de compressão.

Esses resultados destacam a influência da pressão de admissão e do avanço de ignição na posição do CA50 e na variabilidade cíclica do motor.

Figura 9: Crank angle CA50 em relação ao avanço de ignição

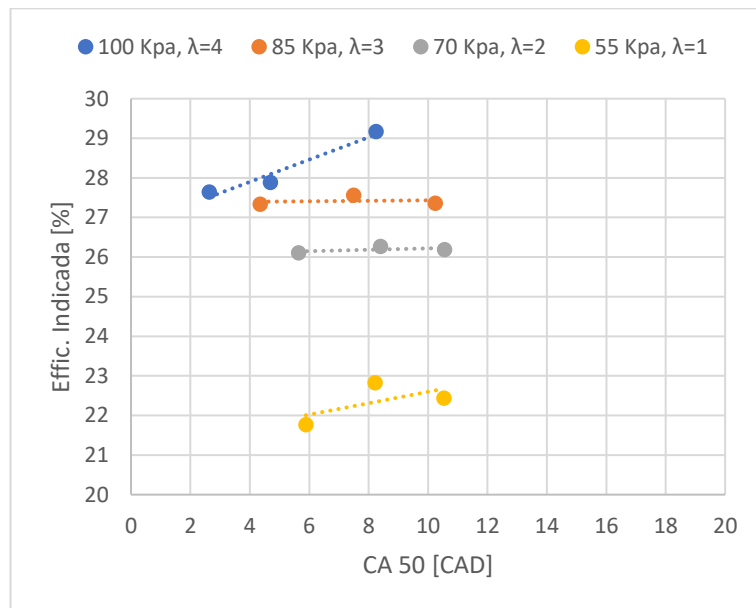


Fonte: Autor (2023)

A Figura 10 apresenta a eficiência indicada em relação ao CA50, fornecendo uma representação gráfica da eficiência do motor em diferentes pontos de pressão de admissão. O CA50 é utilizado como critério para determinar o desempenho ideal do motor, sendo estabelecido em 8 CAD (*crank angle degree*) após o ponto morto superior.

Esses resultados indicam que a pressão de admissão de 100,5 kPa é a mais adequada para alcançar a melhor eficiência indicada, considerando a posição do CA50. Esse parâmetro é relevante para a próxima seção do estudo, pois é utilizado como referência para a análise e otimização do desempenho do motor.

Figura 10: Eficiência Indicada em relação CA50



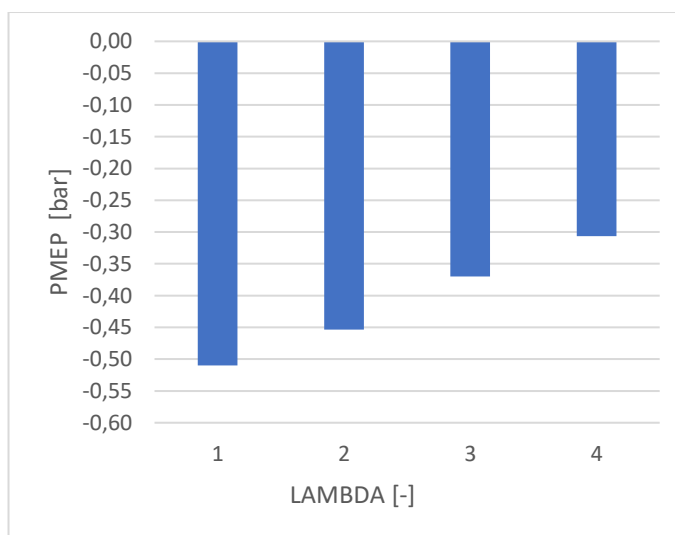
Fonte: Autor (2023)

4.2. ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA PRESSÃO DE ADMISSÃO

Para analisar a influência da pressão de admissão na razão ar/combustível (λ) é recomendado utilizar o ponto de 50% de massa queimada (CA50) em 8 CAD após o ponto morto superior (HEYWOOD, 2018). Os dados apresentados destacam os parâmetros em relação ao MBT (*Maximum best torque*), que representa o menor avanço de ignição para máximo torque. Nesse caso, a operação foi realizada fechando a borboleta de admissão para reduzir o λ e manter uma carga constante de 2,5 bar IMEP.

A Figura 11 mostra as perdas por bombeamento (PMEP) em que foram menores à medida que a borboleta de admissão era aberta, pois a pressão de admissão era maior, resultando em menores perdas. Quanto maior a pressão, menor é a perda, o que melhora a eficiência do motor. Nesse sentido, foi observado anteriormente que o λ 4 proporcionou a melhor eficiência do motor, maximizando o aproveitamento da energia liberada durante a combustão.

Figura 11: PMEP em relação à razão ar/combustível

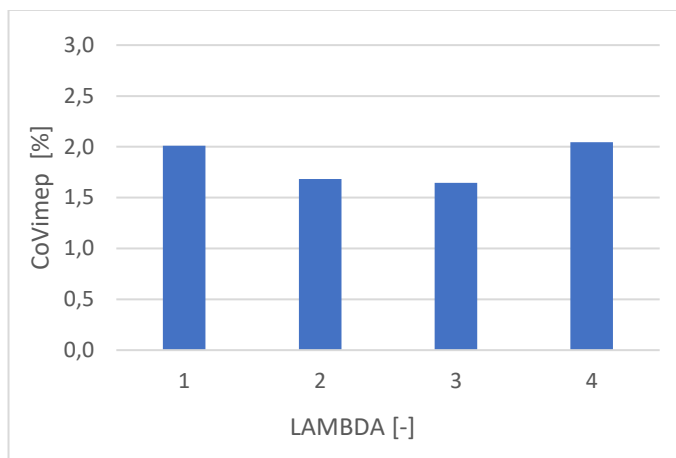


Fonte: Autor (2023)

A Figura 12 apresenta o gráfico CoV_{imep} , demonstrando estabilidade de operação sem nenhum comportamento significativo e com semelhança para todos os pontos avaliados. Para os valores de λ 1 e 4, a combustão ocorre por meio da propagação de uma frente de chama, o que causa mudanças significativas. O avanço do tempo de ignição para λ 1 e o atraso para λ 4 no ponto de ignição aumentam a variabilidade cíclica. A pressão dentro do cilindro varia para cada ângulo do virabrequim, principalmente devido às mudanças de volume e às trocas de calor e massa decorrentes da combustão.

Para valores de lambda 1, o avanço do tempo de ignição aumenta o CoVimep até um ponto em que a combustão ocorre mais cedo no ciclo, devido à fase inicial do desenvolvimento da chama. No caso do lambda 4, está associado a uma maior eficiência de combustível e menor emissão de poluentes. No entanto, essas variações ocorrem à medida que se busca uma combustão mais pobre para reduzir o consumo de combustível, e essas variações tendem a aumentar.

Figura 12: CoVimep em relação à razão ar/combustível

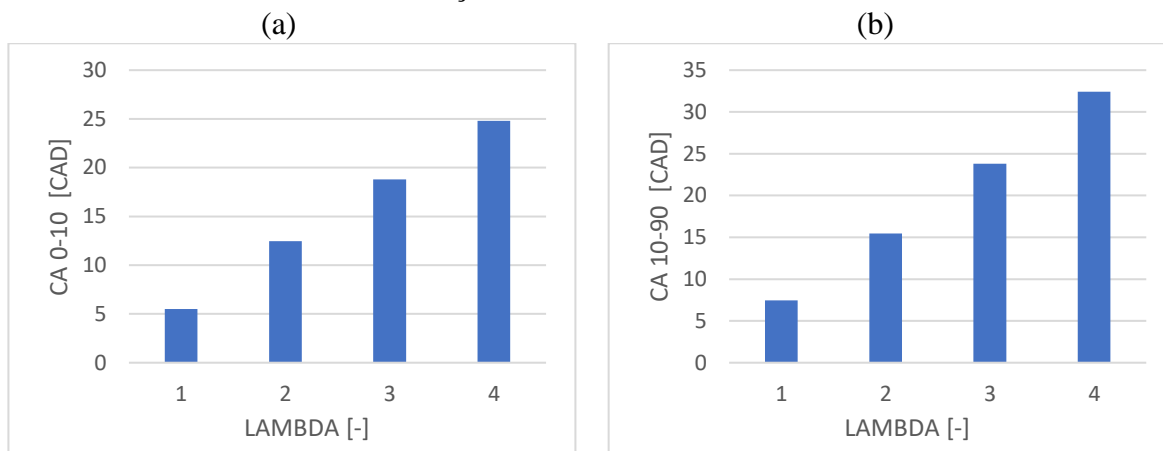


Fonte: Autor (2023)

Na Figura 13, as durações dos ângulos de desenvolvimento da chama (CA0-10) (a) e da fase principal de propagação da chama (CA10-90) (b) seguem a mesma tendência em ambas situações. O hidrogênio é conhecido por possuir alta taxa de queima e velocidade de propagação da chama. À medida que a operação se torna mais pobre, ocorre um aumento na duração do período de desenvolvimento da chama (CA0-10) e na duração da fase principal da combustão (CA10-90).

Isso ocorre porque a velocidade de propagação da chama é reduzida quando a mistura ar-combustível é empobrecida. Além disso, considerando que há uma maior quantidade relativa de ar em relação à quantidade de combustível, a energia liberada pelo combustível resulta em temperaturas de combustão mais baixas conforme a mistura se torna mais pobre. Esse fator também contribui para a redução da velocidade de propagação da chama, o que, por sua vez, leva ao aumento nas durações da combustão. Destaca-se a operação em lambda 1,0, onde a fase principal de combustão ocorre em um intervalo de aproximadamente 5 CAD, tão rápida quanto quando se alcança modo de combustão por HCCI (combustão por compressão de carga homogênea). Nesse sentido, apesar de não se observar detonação (knock) devido à baixa carga, a operação ocorreu nível de combustão normal.

Figura 13: CA 0-10 e CA 10-90 em relação à razão ar/combustível

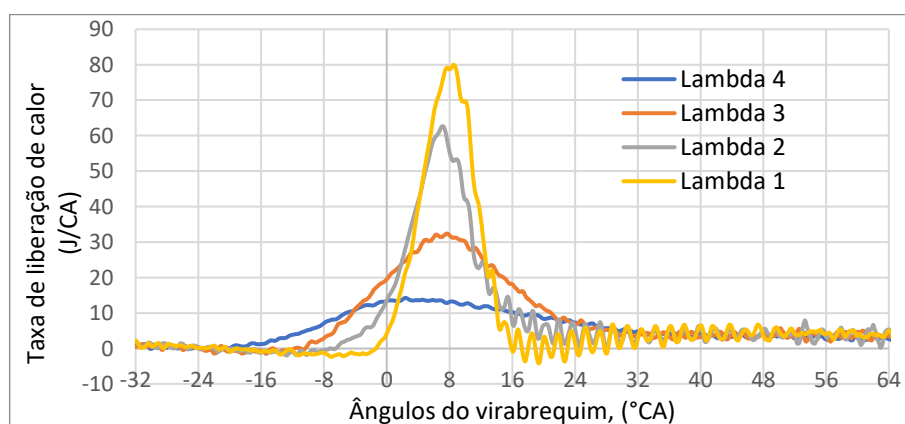


Fonte: Autor (2023)

A Figura 14 apresenta a taxa de liberação de calor durante a combustão. Os resultados mostram que o início da combustão foi afetado pelas mudanças nas condições de mistura e tempo de ignição, enquanto o ângulo do virabrequim mostra que a maior parte do calor é liberada na fase de combustão próxima ao TDC.

Quando a mistura é mais rica, ocorre uma liberação de calor maior, concentrada bem próximo ao TDC, com um pico próximo de 80 J/CA para uma pressão de admissão de 55 kPa. Em misturas mais pobres a 100 kPa, a taxa de liberação de calor é mais baixa, resultando em um aumento na duração da combustão. À medida que a mistura se tornava mais pobre, o início da combustão foi adiantado em relação ao tempo de ignição e o período de duração se estende desde o momento do ponto de ignição até a fase posterior, destacando os períodos de CA0-10 e CA10-90. Fato que se relaciona à velocidade de propagação da chama, pois uma mistura mais pobre resulta em uma velocidade de queima reduzida, levando a uma diminuição no pico da taxa de liberação de calor (HRR).

Figura 14: Taxa de liberação de calor em relação aos ângulos do virabrequim



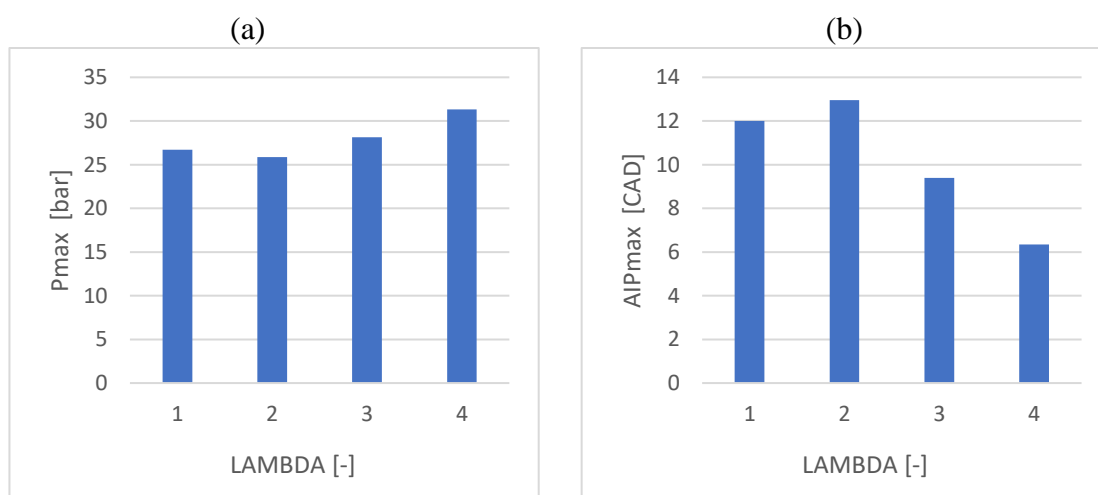
Fonte: Autor (2023)

Na Figura 15 são apresentados os valores de pressão máxima (a) atingidos para cada razão de excesso de ar testada, juntamente com o ângulo (b) em que isso ocorre.

Pode-se observar que à medida que a operação se torna mais rica, o pico de pressão tende a ocorrer mais distante do Ponto Morto Superior (TDC). Assim, avanços de ignição menores são necessários devido à menor duração da combustão. Observa-se também que o maior valor de pressão é encontrado na operação mais pobre, pois o início da fase de compressão ocorre em uma pressão mais elevada e grande parte da combustão ocorre ainda durante o curso de compressão, conforme indicado na Figura 15. Quanto mais rápida é a combustão, menor é a fração de carga queimada durante o ciclo de compressão, o que ocasionalmente faz com que o pico de pressão ocorra mais tarde.

Pode-se relatar ainda que devido à provável ocorrência de combustão anormal para com uma razão lambda de 1,0, a pressão máxima foi maior e ocorreu antecipadamente em relação à operação com uma razão lambda de 2 evidenciando um ângulo de pressão menor.

Figura 15: Pmax e AIPmax em relação à razão ar/combustível

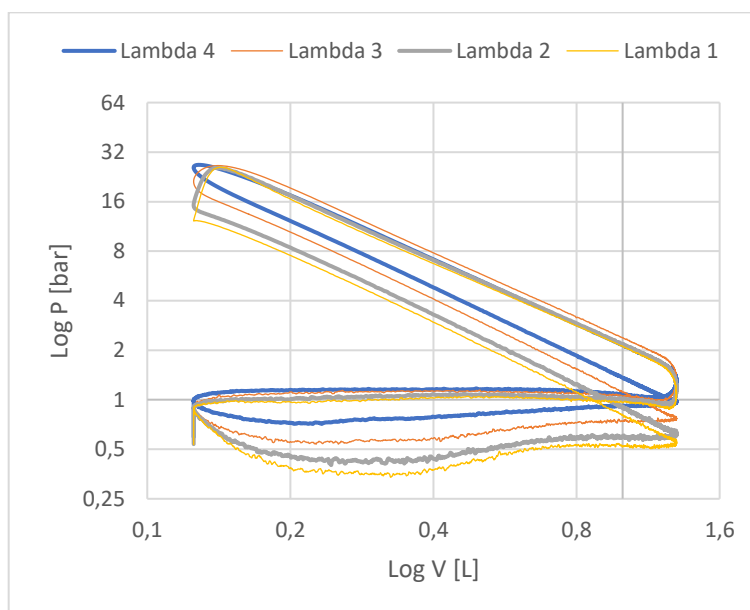


Fonte: Autor (2023)

Apresentado na Figura 16 está o diagrama Log P x Log V e o ciclo de combustão para os valores de pressão de admissão de 55, 70, 85 e 100,5 kPa e seus respectivos valores de lambda 1, 2, 3,4 mantendo uma carga de 2,5 bar a 1800 RPM.

Na Figura 16 pode-se perceber que conforme a pressão de admissão diminui, as perdas por bombeamento aumentam. Para um lambda estequiométrico o com fechamento da borboleta houve maior trabalho e perda devido à restrição de ar, sendo necessário mais combustível e mais energia para manter a carga constante. Nota-se também que o adiantamento do começo da combustão, resultou na diminuição da taxa de aumento da pressão e podendo ser visto um leve decréscimo.

Figura 16: Gráficos Log P x Log V a 1800 RPM com carga 2,5 bar IMEP



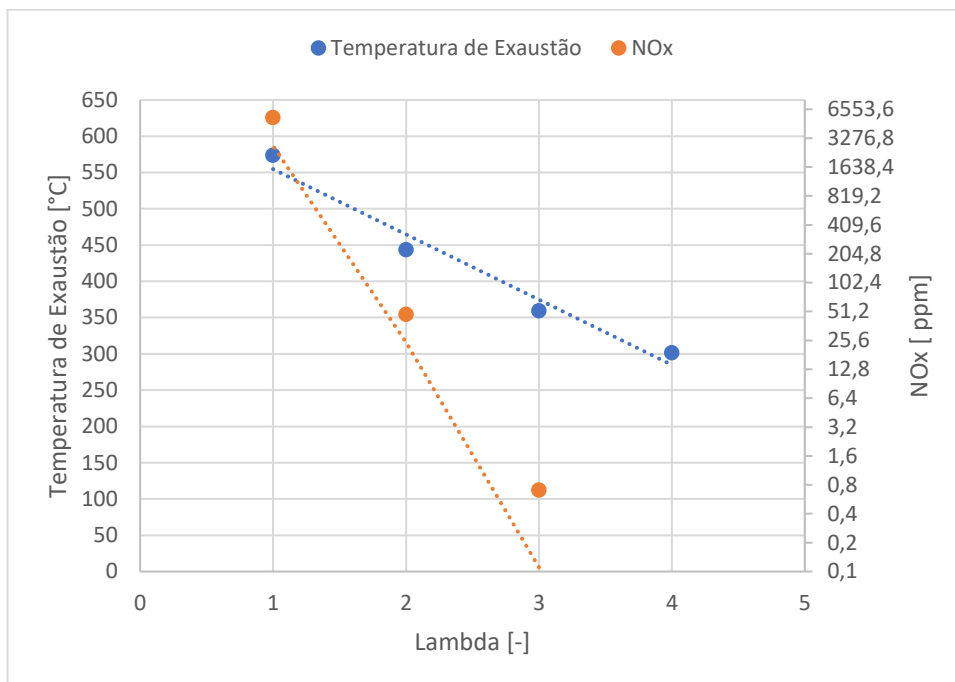
Fonte: Autor (2023)

Quanto aos parâmetros de NO_x (óxidos de nitrogênio) apresentados na Figura 17, pode-se notar que para a razão ar combustível igual 1 o valor se aproximou de 5400 ppm. Conforme o lambda aumenta, as emissões de NO_x diminuem em função da mistura se tornar mais pobre e gerar menores temperaturas de combustão, fazendo com que a temperatura de formação de NO_x não seja atingida. Natkin *et al.* (2003) menciona que as emissões de NO_x de um motor de combustão interna alimentado por hidrogênio são naturalmente baixas quando operado em condições de mistura muito pobre, o que significa que há um excesso de ar utilizado para diluir a carga de combustível.

A temperatura dos gases de exaustão também decresce conforme o lambda aumenta, devido a menor quantidade de combustível no cilindro, tendo menor energia dentro do volume de controle. Quando o hidrogênio é queimado em uma condição estequiométrica, a quantidade de ar é suficiente para uma reação completa com o hidrogênio. Nessa condição, a temperatura dos gases de exaustão tende a ser maior em comparação com a operação em condição pobre, devido à menor eficiência da operação estequiométrica. Consequentemente, parte da energia que seria aproveitada é liberada como energia térmica sensível adicional no sistema de escape, elevando a temperatura. Fator que ocorre devido à rápida taxa de combustão e à liberação de energia durante a combustão completa. Conforme a mistura se torna mais pobre, indicando um excesso de ar em relação ao combustível, a temperatura dos gases de exaustão tende a diminuir podendo ser relacionado ao fato de que o excesso de ar atua reduzindo a temperatura de combustão e, conseqüentemente, a temperatura dos gases de exaustão.

Para razão de ar mais pobre (lambda 4) de acordo com os dados obtidos foi próximo a zero, em virtude da configuração em escala logarítmica, o ponto para lambda 4 não aparece no gráfico.

Figura 17: NOx e temperatura de exaustão em relação à razão ar/combustível

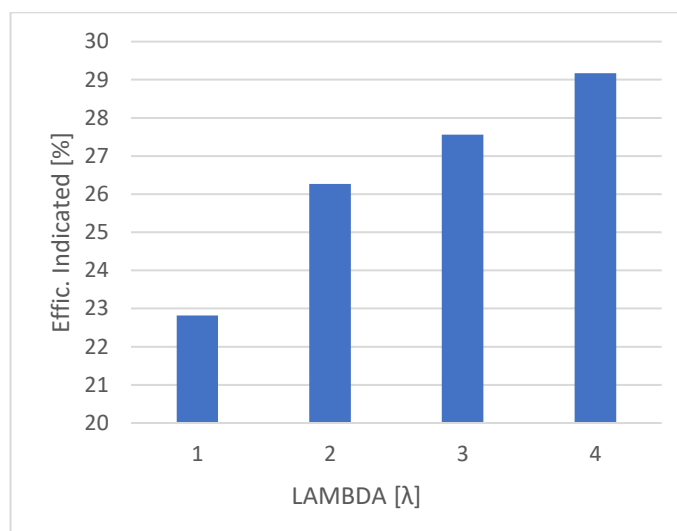


Fonte: Autor (2023)

A Figura 18 mostra a relação da eficiência indicada em que para cada relação de excesso de ar, foi ajustada de acordo com o ponto de ignição, mostrando que para maiores razões de excesso de ar, a operação é mais eficiente para uma razão de ar mais pobre. Isso ocorre devido ao consumo de hidrogênio ser maior para um valor de lambda menor, como resultado do aumento das perdas por bombeamento que precisam ser superadas ao operar o motor com uma pressão de admissão mais baixa. Operar com um valor de lambda menor resulta em temperaturas mais altas dentro do cilindro, pois ao fechar a borboleta para reduzir o valor de lambda, mantendo a mesma carga, ocorre um aumento no consumo de combustível e as perdas por transferência de calor para compensar as maiores perdas por bombeamento.

Isso está alinhado com a eficiência indicada e demonstra a influência das perdas por bombeamento no aumento do consumo de combustível. À medida que a mistura se tornava mais pobre, a combustão ocorria de forma prolongada, com uma taxa de liberação de calor menor, aumentando a eficiência no cilindro. A redução na eficiência indicada em lambda 1 está relacionada a mistura, principalmente devido aos tempos de combustão, em que houve uma taxa de liberação maior com uma fração de combustão reduzida.

Figura 188: Eficiência Indicada em relação à razão ar/combustível



Fonte: Autor (2023)

5. CONCLUSÃO E TRABALHOS FUTUROS

5.1. CONCLUSÃO

Nesse trabalho de conclusão de curso foi realizada uma investigação da operação de um motor monocilíndrico de ignição por centelha utilizando hidrogênio como combustível. O objetivo principal foi avaliar o desempenho do motor realizando ensaios dinamométricos, operando o motor a 1800 rpm com uma carga fixa de 2,5 bar de IMEP. O uso do hidrogênio teve como propósito analisar o fenômeno da combustão, investigando a razão ar/combustível, visando a redução do impacto ambiental de motores de combustão interna através do uso de uma nova fonte energética em substituição aos combustíveis fósseis.

Os ensaios foram realizados para analisar os efeitos da razão de excesso de ar (λ) no desempenho do motor, restringindo a pressão de admissão através da borboleta e sendo necessário alterar o avanço de ignição para analisar parâmetros como a queima, a eficiência, o consumo e a temperatura.

O propósito desse trabalho foi realizar uma análise experimental do uso do hidrogênio como uma proposta de nova fonte energética, priorizando a redução de emissões. As principais conclusões obtidas foram as seguintes:

1. Ao utilizar hidrogênio como combustível, observou-se que a operação com uma razão λ mais pobre ($\lambda=4$) apresenta melhores resultados, fator que gera um aumento da duração do desenvolvimento da chama, temperaturas mais baixas e, conseqüentemente, emissões próximas a zero. Além disso, essa condição resulta em menor consumo de combustível e melhor eficiência, principalmente devido à redução das perdas por bombeamento.
2. Foi observado que é necessário aumentar a pressão de admissão para alcançar um desempenho adequado com uma razão λ mais pobre. Ainda, o uso de hidrogênio como combustível possibilita a redução de emissões, como demonstrado nos testes realizados, apresentando menores emissões de óxidos de nitrogênio.
3. A duração da combustão é diretamente influenciada pela mistura de combustível, sendo necessário ajustar o instante de ignição. Verificou-se que, quando a razão λ é mais pobre, é necessário maior atraso no ponto de ignição.

Essas conclusões indicam que o uso do hidrogênio como combustível pode ser uma alternativa promissora para reduzir o impacto ambiental dos motores de combustão interna, proporcionando menor consumo e menor impacto quanto a emissões. No entanto, são necessárias mais pesquisas e otimizações para explorar todo o potencial dessa nova fonte energética.

5.2. TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos nessa pesquisa demonstraram o potencial promissor do uso de hidrogênio como combustível para a redução de emissões em motores de combustão interna. Com base nesses resultados, sugerem-se algumas linhas de pesquisa para trabalhos futuros:

1. Explorar a sobrealimentação: realizar novos ensaios utilizando turbos ou superchargers para avaliar o desempenho do motor com hidrogênio sob pressões de admissão mais elevadas. Isso permitiria investigar a melhoria da eficiência, potência e torque, além de analisar o impacto nas emissões de poluentes.

2. Avaliar diferentes configurações de motores: expandir a pesquisa para incluir diferentes tipos de motores, como motores de ciclo Diesel ou motores de combustão interna de maior ou menor volume deslocado. Isso permitiria avaliar o desempenho do hidrogênio como combustível em uma variedade de aplicações e cenários.

Contudo, os resultados obtidos nesse Trabalho de Conclusão de Curso destacam o uso do hidrogênio como uma fonte promissora para a redução de emissões em motores de combustão interna, gerando assim oportunidades para trabalhos futuros, podendo explorar a sobrealimentação, mistura estequiométrica e outras configurações de motores. Esses estudos têm o potencial de contribuir significativamente para o avanço da pesquisa em direção a uma mobilidade mais sustentável e com zero emissões.

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA DIAS, Bruno Martin de. **Unidade microcontroladora para gerenciamento eletrônico de um motor de combustão interna ciclo Otto**. 2015. 269 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2015.
- ANTUNES, J. M. G; MIKALSEN, R.; ROSKILLY, A. P. An investigation of hydrogen- fuelled HCCI engine performance and operation. **Internal Journal of Hydrogen Energy**, [S.l.], v. 33, n. 20, p. 5823-5828, out. 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2008.07.121>. Acesso em 17 maio 2022.
- BERCKMÜLLER, M., *et al.* Potentials of a Charged SI-Hydrogen Engine. **SAE Technical Paper**, Pennsylvania, out. 2003. Disponível em <https://doi.org/10.4271/2003-01-3210>. Acesso em 10 maio 2022.
- BRUNETTI, Franco. **Motores de Combustão Interna**. 1. ed. São Paulo: Blucher, 2012
- CARVALHO, Marcio Augusto Sampaio de. **Avaliação de um motor de combustão interna ciclo otto utilizando diferentes tipos de combustíveis**. 2011.168 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial) - Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA, 2011.
- CHEN, Y.; RAINE, R. Engine Knock in an SI Engine with Hydrogen Supplementation under Stoichiometric and Lean Conditions. **SAE Int. J. Engines**, v. 7, p. 595-605, jul. 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2014-01-1220>. Acesso em 6 jun 2022.
- CHIODI, Marco. **An Innovative D-CFD Approach towards Virtual Development of InternalCombustion Engines**. Mörlenbach: Vieweg+Teubner, 2011. *E-book* (245 p.) ISBN 978-3-8348-8131-1.
- COSTANTIN, Luis Claudio Paleari. **Dimensionamento de turbocompressores para aplicação em motores de combustão interna**. 2017. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2017.
- ÇENGEL, Yunus A.; BOLES, Michael A. **Termodinâmica**. 7. ed. São Paulo: AMGH, 2013.
- DA SILVA, Cynthia Tamires. **Introdução ao gerenciamento eletrônico dos motores de combustão internaciclo Otto**. **Portal Embarcados**, 2016. Disponível em: <https://embarcados.com.br/motores-de-combustao-interna-ciclo-otto/> Acesso em ago. 2022.
- DE SÁ, S. R.; DE LIMA, J. A. Análise do Avanço de Ignição em MBT e sua Influência na Eficiência Energética Automotiva. **Revista Principia**, João Pessoa, n.56, p. 144-153, 2021. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id4406>. Acesso em 10 out 2022.
- DOS SANTOS, I. R. et al. **DAQMOT**. Brasília, BrasilINPI Register Number BR512019003004-4, 2019.

ESTÊVÃO, Tânia Esmeralda Rodrigues. **O hidrogênio como combustível**. 2008. 113 p. Dissertação (Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica) - Universidade do Porto, Porto, PT, 2008.

GARLET, R. **Análise de desempenho de um motor ciclo otto a biometano em comparação com gasolina e etanol**. PPGEP-UFSM. 83 p. 2022

GIACOSA, D. **Motores Endotermicos**. 3 ed. Dossat S.A,1989.

GOLKE, D. **dissertação_Golke_versão revisão banca_final4**. [s.l: s.n.].

HEYWOOD, John B. **Internal Combustion Engines Fundamentals**. 2. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018.

HIERETH, H.; PRENNINGER, P. **Charging the Internal Combustion Engine**. 1 ed. New York: Springer Wien, 2007.

KAPDAN, I. K.; KARGI, F. Bio-hydrogen production from waste materials. **Enzyme and Microbial Technology**, v. 38, n. 5, p. 569–582, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.enzmictec.2005.09.015>. Acesso em 10 nov. 2022.

KIESGEN, G.; BERGER, E.; ROTTENGRUBER, H. Hydrogen internal combustion engines for vehicle generations of the future. **AutoTechnology**, v. 6, p. 40–43, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/BF03246951>. Acesso em 10 nov. 2022.

LANZANOVA, T. D. M., *et al.* Characterization of combustion parameters in a spark-ignition engine using H₂ as fuel. **In: 19th Brazilian Congress of Thermal Sciences and Engineering, 2022, Bento Gonçalves, RS, Brazil**. Disponível em <https://www.sistema.abcm.org.br/articleFiles/download/36925>. Acesso em 10 fev 2023.

LEE, J., *et al.* Effect of different excess air ratio values and spark advance timing on combustion and emission characteristics of hydrogen-fueled spark ignition engine. **International Journal of Hydrogen Energy**, [S.l.], v.44, n. 45, p. 25021-25030, 2019. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2019.07.181>. Acesso em 10 out 2022.

MOHAMMADI, A., *et al.* Performance and combustion characteristics of a direct injection SI hydrogen engine. **Internal Journal of Hydrogen Energy**, [S.l.], v. 32, n. 2, p. 296-304, 2007. Disponível em <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2006.06.005>. Acesso em 10 out 2022.

NATKIN, R., *et al.* **Hydrogen IC Engine Boosting Performance and NO_x Study**. SAE Technical Paper, [S.l.], 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2003-01-0631> Acesso em 15 jan 2023.

ONORATI, A. The role of hydrogen for future internal combustion engines. **International Journal of Engine Research**, [S.l.], v. 23, n. 4, p. 529-540, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1177/14680874221081947>. Acesso em 10 mar 2023.

SINIGAGLIA, T. **Análise da competitividade da utilização do hidrogênio como combustível na modalidade.** PPGEP-UFSM. 124 p. 2018

SOUZA, Líria Alves de. Combustível Hidrogênio. **Brasil Escola.** Disponível em: <https://brasilecola.uol.com.br/quimica/combustivel-hidrogenio.htm>. Acesso em 09 de janeiro de 2023.

STEPIEN, Zbigniew. A Comprehensive Overview of Hydrogen-Fueled Internal Combustion Engines: Achievements and Future Challenges. **Energies**, [S.l.], v. 14, n.20, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/en14206504>. Acesso em 10 fev. 2023.

TANG, X., *et al.* Ford P2000 Hydrogen Engine Dynamometer Development. **In:** SAE World Congress Detroit, University California at Riverside, 2002. Disponível em: <https://doi.org/10.4271/2002-01-0242> Acesso em 10 fev. 2023.

TILLMANN, Carlos Antonio da Costa. **Motores de Combustão Interna e seus Sistemas.** Rede e-TEC Brasil, 2013. *E-book* (165 p). ISBN 978-85-63573-28-5.

TEOH, Y. H. *et al.* A review on production and implementation of hydrogen as a green fuel in internal combustion engines. **Fuel**, [S.l.], v. 333, n. 2, nov. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2022.126525>. Acesso em 10 dez. 2022.

WANG, S.; GE, M. **Tudo o que você precisa saber sobre a fonte de emissões globais que mais cresce: o transporte.** WRI – *World Resource Institute*, 2019. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/everything-you-need-know-about-fastest-growing-source-global-emissions-transport>. Acesso em 11 jul. 2023