

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE  
PRODUÇÃO

Roberto Antonio Garlet

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MOTOR CICLO OTTO A  
BIOMETANO EM COMPARAÇÃO COM GASOLINA E ETANOL**

Santa Maria, RS  
2022

Garlet, Roberto Antonio  
Análise de desempenho de um motor ciclo Otto a  
biometano em comparação com gasolina e etanol. / Roberto  
Antonio Garlet.- 2022.  
83 p.; 30 cm

Orientador: Mário Eduardo dos Santos Martins  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em  
Engenharia de Produção, RS, 2022

1. Biogás 2. Biometano 3. Motores 4. Razão de  
compressão 5. Emissões I. dos Santos Martins, Mário  
Eduardo II. Título.

Sistema de geração automática de ficha catalográfica da UFSM. Dados fornecidos pelo autor(a). Sob supervisão da Direção da Divisão de Processos Técnicos da Biblioteca Central. Bibliotecária responsável Paula Schoenfeldt Patta CRB 10/1728.

Declaro, ROBERTO ANTONIO GARLET, para os devidos fins e sob as penas da lei, que a pesquisa constante neste trabalho de conclusão de curso (Dissertação) foi por mim elaborada e que as informações necessárias objeto de consulta em literatura e outras fontes estão devidamente referenciadas. Declaro, ainda, que este trabalho ou parte dele não foi apresentado anteriormente para obtenção de qualquer outro grau acadêmico, estando ciente de que a inveracidade da presente declaração poderá resultar na anulação da titulação pela Universidade, entre outras consequências legais.

**Roberto Antonio Garlet**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MOTOR CICLO OTTO A  
BIOMETANO EM COMPARAÇÃO COM GASOLINA E ETANOL**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de produção da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção**.

Orientador: Prof. Mário Eduardo dos Santos Martins, PhD

Santa Maria, RS  
2022

**Roberto Antonio Garlet**

**ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MOTOR CICLO OTTO A BIOMETANO EM  
COMPARAÇÃO COM GASOLINA E ETANOL**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de produção da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), como requisito parcial para a obtenção do título de **Mestre em Engenharia de Produção**.

**Aprovado em 03 de outubro de 2022**

---

**Mário Eduardo dos Santos Martins, PhD. (UFSM)**  
**(Presidente/Orientador)**

---

**Josimar Souza Rosa, Dr. (FEEVALE)**

---

**Thompson Diordinis Metzka Lanzasova, PhD. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2022

## **AGRADECIMENTOS**

A conclusão deste trabalho só foi possível através auxílio e dedicação de várias pessoas. Gostaria de manifestar aqui o meu agradecimento a todos que de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento e conclusão deste trabalho, e em especial agradeço:

- Ao meu orientador, Professor PhD Mario Eduardo Santos Martins, pelo incentivo, empenho e confiança em mim depositada;

- Ao Professor PhD Thompson Diordinis Metzka Lanzasova e ao Professor Dr. Josimar Souza Rosa por terem aceitado contribuir com este trabalho;

- À Universidade Federal de Santa Maria – UFSM, por disponibilizar os recursos e a estrutura física necessária;

- Agradeço pelo apoio e auxílio de todos os colegas do Laboratório de Motores da UFSM e Grupo de pesquisa em Motores Combustíveis e Emissões – GPMOT;

- À minha família, esposa Tatiane Siqueira, meu filho Henrique Siqueira Garlet, meus pais Lourdes e Florentino Garlet por todo apoio, companheirismo e compressão durante esta jornada.

## DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho:

- Aos meus pais;
- A minha esposa Tatiane e o meu Filho Henrique;
- Aos meus amigos;
- A todos aqueles que depositaram confiança e amor em mim.

## RESUMO

### ANÁLISE DE DESEMPENHO DE UM MOTOR CICLO OTTO A BIOMETANO EM COMPARAÇÃO COM GASOLINA E ETANOL

AUTOR: Roberto Antonio Garlet

ORIENTADOR: Mário Eduardo dos Santos Martins

O aumento da utilização de combustíveis fósseis e a crescente demanda energética nas últimas décadas geraram um grande problema de emissões de gases de efeito estufa e causadores de mudanças climáticas. Portanto, são necessários esforços para reduzir as emissões de carbono de diversos setores, dentre os quais o setor dos transportes, um dos grandes emissores. Além do etanol, combustíveis gasosos como biogás e biometano estão ganhando espaço devido ao grande potencial de serem obtidos por meio do processamento de biomassa e, portanto, serem renováveis. Com o objetivo de comparar o desempenho de operação do biometano, do etanol e da gasolina em um motor monocilindro de pesquisas de ignição por centelha com injeção de combustível na porta de admissão em diferentes condições de carga: 3 bar, 6 bar e 9 bar de IMEP, em duas diferentes razões de compressão: 11,6:1 e 14,3:1 e velocidade de motor de 1800 rpm em bancada dinamométrica. Devido a maior facilidade de aquisição e às propriedades semelhantes, foi utilizado gás natural veicular, simulando a operação com biometano nos ensaios. Os resultados mostraram que o GNV apresentou o menor consumo específico de combustível indicado para todas as cargas, superando a gasolina e o etanol. A fase de combustão também pôde ser ajustada, com GNV, para a condição ideal, com metade da massa de combustível queimada em cerca de  $8^\circ$  após ponto morto superior. Na razão de compressão de 11,6:1 e carga de 9 bar de IMEP o combustível gasoso apresentou eficiência indicada torno de 34%, a gasolina de 33% e o etanol de 36%, enquanto em razão de compressão 14,3:1 na mesma carga a eficiência com GNV aumentou para em torno de 35%, enquanto a gasolina permaneceu em torno de 33% e o etanol aumentou para em torno de 37%. O combustível gasoso em razão de compressão 11,6:1 em carga de 9 bar de IMEP apresentou os menores valores emissões de NOx que foram em torno de 13 g/kWh, enquanto com etanol estas emissões foram de 15 g/kWh e com gasolina de 19 g/kWh.

Palavras-chave: Biogás. Biometano. Motores. Razão de compressão. Emissões.

## ABSTRACT

### PERFORMANCE ANALYSIS OF AN OTTO CYCLE ENGINE WITH BIOMETHANE IN COMPARISON WITH GASOLINE AND ETHANOL

AUTHOR: Roberto Antonio Garlet  
ADVISOR: Mário Eduardo dos Santos Martins

The increasing use of fossil fuels and the growing demand for energy in recent decades have led to a major problem of greenhouse gas emissions and the causes of climate change. Therefore, efforts must be made to reduce carbon emissions from various sectors, including the transportation sector, which is one of the largest contributors to emissions. In addition to ethanol, gaseous fuels such as biogas and biomethane are also on the rise, as they can be produced by processing biomass and are therefore renewable. Experiments were performed to compare the performance of biomethane, ethanol and gasoline in a single cylinder research engine with spark ignition and fuel injection at the intake port under different load conditions: 3 bar, 6 bar and 9 bar IMEP, at two different compression ratios: 11.6:1 and 14.3:1 and engine speed of 1800 rpm on a dynamometer. Due to similar properties and better availability, CNG was used to simulate biomethane operation. The results show that CNG has the lowest specific fuel consumption at all load conditions, outperforming gasoline and ethanol. The combustion phase can also be adjusted to the ideal condition with CNG, burning half of the fuel mass at about  $8^\circ$  after top dead center. At a compression ratio of 11.6:1 and a load of 9 bar IMEP, the efficiency of the gaseous fuel was about 34%, that of gasoline was 33%, and that of ethanol was 36%, while at a compression ratio of 14.3:1 with the same load, the efficiency with CNG increased to about 35%, while gasoline remained at about 33% and ethanol increased to about 37%. The gaseous fuel with a compression ratio of 11.6:1 at a load of 9 bar IMEP had the lowest NO<sub>x</sub> emission levels, which were about 13 g/kWh, while these emissions were 15 g/kWh for ethanol and 19 g/kWh for gasoline.

Keywords: Biogas. Biomethane. Engines. Compression ratio. Emissions.



## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira 2020. ....	24
Figura 2 - Ciclos de um motor quatro tempos ignição por centelha. ....	28
Figura 3 - Descrição da bancada experimental. ....	38
Figura 4 - Bloco intermediário do motor Ricardo Protheus e espaçador para variação da razão de compressão. ....	37
Figura 5 - Interface de usuário da ECU FT 450. ....	39
Figura 6 - Sistema injeção de combustível gasoso. ....	39
Figura 7 - Interface da interface de usuário do software do sistema de indicação. ....	41
Figura 8 - Interface de usuário do software de controle e aquisição de dados da célula de testes. ....	42
Figura 9 - Fração de massa queimada em relação de graus de ângulo de virabrequim. ....	48
Figura 10 - Gráfico log P x log V nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1 para cargas de 9 bar de IMEP operando com GNV, gasolina e etanol. ....	52
Figura 11 - Gráfico log P x log V nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1 para cargas de 6 bar de IMEP operando com GNV, gasolina e etanol. ....	53
Figura 12 - Gráfico log P x log V nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1 para cargas de 3 bar de IMEP operando com GNV, gasolina e etanol. ....	53
Figura 13 - Ponto de ignição dos três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga. ....	54
Figura 14 – Pressão máxima no cilindro dos três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga. ....	55
Figura 15 - Ângulo de 50% de massa queimada (CA50) dos três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga. ....	56
Figura 16 – Ângulo de pressão máxima dos três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga. ....	57
Figura 17 - Atraso de ignição dos três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga. ....	58
Figura 18 – CA1090 para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga. ....	58
Figura 19 - Temperatura de exaustão para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga. ....	59

Figura 20 - $CoV_{IMEP}$ para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.....	60
Figura 21 - Eficiência volumétrica para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.....	61
Figura 22- Eficiência de conversão de combustível indicada para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga. ....	62
Figura 23 - Eficiência de combustão para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.....	63
Figura 24 - Consumo específico de combustível indicado (ISFC) para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga. ....	64
Figura 25 – Consumo para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.....	65
Figura 26 - Emissões de monóxido de carbono indicado (ISCO) para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga. ....	66
Figura 27 - Total de emissões de hidrocarbonetos indicados (ISTHC) para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga. ....	68
Figura 28 - Emissões de metano (ISCH <sub>4</sub> ) para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.....	69
Figura 29 – Emissões de etanol indicado (ISETOH) para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga. ....	70
Figura 30 - Emissões de acetaldeído indicado (ISMECHO) para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga. ....	71
Figura 31 - Emissões de formaldeído indicado (ISHCHO) para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga. ....	72
Figura 32 - Emissões de óxidos de nitrogênio indicado (NO <sub>x</sub> ) para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga. ....	73
Figura 33- Comparação de consumo em Reais para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da potência indicada. Preços médios para o Brasil.....	74

Figura 34 - Comparação de consumo em Reais para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da potência indicada. Preços médios para o estado do Rio Grande do Sul. ....	75
Figura 35 - Comparação de consumo em Reais por Quilowatt-hora de operação, para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função de carga. Preços médios para o Brasil.....	76
Figura 36- Comparação de consumo em Reais por Quilowatt-hora de operação, para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função de carga. Preços médios para o estado do Rio Grande do Sul.....	77

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Limites do Proconve por etapas, em g/km, para veículos comerciais leves de até 1700 kg.....	32
Tabela 2- Limites do Proconve por etapas, em mg/kWh, para veículos comerciais pesados.....	32
Tabela 3 - Especificação motor de teste.....	36
Tabela 4 - Características do GNV, gasolina comum tipo C e etanol hidratado combustível (EHC). ....	44

## LISTA DE EQUAÇÕES

Equação 1- Cálculo de IMEP.....	45
Equação 2- Cálculo de PMEP. ....	46
Equação 3 - Eficiência volumétrica .....	46
Equação 4 – Consumo específico de combustível (sfc).....	46
Equação 5 - Cálculo da taxa de liberação de calor. ....	47
Equação 6 - Cálculo de $CoV_{IMEP}$ . ....	49
Equação 7 - Conversão de emissões de ppm para g/kWh. ....	49
Equação 8 - Cálculo de eficiência de combustão.....	50
Equação 9 – Cálculo da eficiência indicada. ....	50

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABiogás	Associação Brasileira do Biogás
ANEEL	ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
BMEP	Pressão Efetiva Média de Eixo ( <i>Brake Mean Effective Pressure</i> )
BSFC	Consumo Específico de Eixo ( <i>Brake Specific Fuel Consumption</i> )
CBIO	Créditos de Descarbonização
CI	Ignição por Compressão ( <i>compression ignition</i> )
CH <sub>4</sub>	Metano
CI	Ignição por Compressão ( <i>Compression Ignition</i> )
CIBiogás	Centro Internacional de Energias Renováveis
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CO	Monóxido de Carbono
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
CO <sub>2</sub> eq	Equivalência em dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DPMS	Depois do Ponto Morto Superior
ECU	Central eletrônica de controle do motor ( <i>Electronic Control Unit</i> )
ETEs	Estações de Tratamento de Esgoto
FMEP	Pressão média efetiva de atrito ( <i>Friction mean effective pressure</i> )
GNV	Gás natural veicular
H <sub>2</sub> S	Sulfeto de Hidrogênio
HC	Hidrocarbonetos
HCCI	Ignição por compressão de mistura homogênea ( <i>Homogeneous Charge Compression Ignition</i> )
IBAMA	Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais
IMEP	Pressão Média Efetiva Indicada ( <i>Indicated Mean Effective Pressure</i> )
ISCO	Monóxido de Carbono Indicado ( <i>Indicated specific CO emissions</i> )
IsC	Serviço de Conformidade ( <i>In service Conformity</i> )
ISFC	Consumo Específico de combustível Indicado ( <i>indicated specific fuel consumption</i> )
ISCO	Emissões de monóxido de carbono indicado ( <i>Indicated carbon monoxide emissions</i> )
ISHCHO	Emissões de Formaldeído Indicado ( <i>Indicated Formaldehyde Emissions</i> )

ISMECHO	Emissões de Acetaldeído Indicado ( <i>Indicated Acetaldehyde Emissions</i> )
ISNOX	Emissões de Óxido de Nitrogênio Indicado ( <i>Indicated specific NOX emissions</i> )
ISTHC	Total de Emissões Hidrocarbonetos Indicados ( <i>Indicated specific TCH emissions</i> )
ISETOH	Emissões de Etanol Indicado ( <i>Indicated ethanol emissions</i> )
LCVM	Licença para Uso da Configuração de Veículo ou Motor
LHV	Poder Calorífico Inferior ( <i>Lower Heating Value</i> )
MBT	Máximo torque ( <i>Maximum Brake Torque</i> )
MME	Ministério de Minas e Energia
MMex	Massa Molecular dos compostos da exaustão
MMHC	Massa Molecular dos Hidrocarbonetos Totais
MFB	Fração mássica queimada ( <i>Mass Fraction Burned</i> )
MP	Material Particulado
NH <sub>3</sub>	Amônia
Nm <sup>3</sup>	Normal Metro Cúbico
NMHC	Hidrocarbonetos não-metano
NOX	Óxido de Nitrogênio
ONU	Organização das Nações Unidas
PBT	Peso Total Bruto
PCCI	Ignição por Compressão de Carga Pré-misturada ( <i>premixed-charge compression ignition</i> )
PDC	Período de desenvolvimento de chama
PMEP	Pressão média efetiva de bombeamento ( <i>Pumping mean effective pressure</i> )
PMI	Ponto Morto Inferior
PMS	Ponto Morto Superior
Proconve	Programa de controle de emissões veiculares
PRONAR	Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar
RCCI	Ignição por Compressão de Reatividade Controlada ( <i>Reactivity Controlled Compression Ignition</i> )
RenovaBio	Política Nacional de Biocombustíveis
Rota 2030	Programa de desenvolvimento da cadeia automotiva
SI	Ignição por Centelha ( <i>Spark Ignition</i> )
SIMP	Sistema de Informações de Movimentações de Produtos
TLCA	Taxa de Calor Aparente

WOT

Válvula borboleta completamente aberta (*Wide open throttle*)



## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
1.1	OBJETIVOS .....	20
1.1.1	<b>Objetivo</b> .....	<b>20</b>
1.1.2	<b>Objetivos Específicos</b> .....	<b>20</b>
1.3	JUSTIFICATIVA .....	21
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>24</b>
2.1	MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA E O POTENCIAL DO BIOGÁS .....	24
2.1.1	<b>Biogás</b> .....	<b>25</b>
2.2	SETOR DE TRANSPORTE .....	27
2.3	MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA.....	27
2.3.1	<b>Modos de combustão</b> .....	<b>29</b>
2.3.2	<b>Ignição por compressão (CI)</b> .....	<b>29</b>
2.3.3	<b>Ignição por centelha (SI)</b> .....	<b>29</b>
2.4	EMISSÕES .....	29
2.5	LEGISLAÇÃO DE EMISSÕES VEICULARES.....	31
2.5.1	<b>Proconve</b> .....	<b>31</b>
2.5.2	<b>RENOVABIO</b> .....	<b>33</b>
2.5.3	<b>ROTA 2030</b> .....	<b>34</b>
2.5.4	<b>Uso de biogás em motores de combustão interna</b> .....	<b>34</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>36</b>
3.1	MOTOR DE TESTE E BANCADA EXPERIMENTAL .....	36
3.2	GERENCIAMENTO DO MOTOR .....	38
3.3	SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS .....	40
3.3.1	<b>Pegging do sensor de pressão</b> .....	<b>42</b>
3.4	SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL .....	43
3.5	SISTEMA DE ANÁLISE DE GASES DE EXAUSTÃO.....	43
3.6	COMBUSTÍVEIS DE TESTES.....	43
3.7	METODOLOGIA DE ENSAIOS DE MOTOR EM BANCADA DINAMOMÉTRICA .....	44
3.8	ANÁLISE DE OPERAÇÃO .....	45
3.8.1	<b>Pressão média efetiva indicada (<i>Indicated mean effective pressure</i>) (IMEP)</b> .....	<b>45</b>

3.8.2	Pressão média efetiva de bombeamento ( <i>Pumping mean effective pressure</i> ) (PMEP).....	45
3.8.3	Eficiência volumétrica ( <i>Volumetric efficiency</i> ).....	46
3.8.4	Consumo específico de combustível ( <i>Specific Fuel Consumption</i> ) .....	46
3.9	PARÂMETROS DE PERFORMANCE E COMBUSTÃO.....	47
3.9.1	Avanço de ignição .....	47
3.9.2	Taxa de liberação de calor .....	47
3.9.3	Fração de massa queimada ( <i>Mass Fraction Burned</i> ) (MFB).....	47
3.9.4	Duração de CA 0-10 e CA 10-90.....	48
3.9.5	Variabilidade cíclica na combustão (CoV <sub>IMEP</sub> ).....	48
3.9.6	Emissões específicas.....	49
3.9.7	Eficiência de combustão.....	50
3.9.8	Eficiência indicada ( <i>indicated efficiency</i> ).....	50
4	RESULTADOS .....	51
4.1	PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO MOTOR.....	51
4.2	PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA.....	61
4.3	EMISSÕES.....	66
4.4	COMPARATIVO FINANCEIRO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS .....	73
5	CONCLUSÕES .....	78
	REFERÊNCIAS.....	80

## 1 INTRODUÇÃO

A crescente demanda energética e a utilização de combustíveis fósseis em todas as áreas nas últimas décadas geraram um grande problema de emissões de gases causadores do efeito estufa e mudanças climáticas. Com a aprovação do novo marco legal do saneamento básico pelo Senado e sua sanção pelo Presidente da República em 2020, o potencial de produção de biometano oriundo do biogás gerado nas estações de tratamento de esgoto (ETEs) foi elevado para 2,9 milhões de m<sup>3</sup>/dia. Esse volume corresponde a 10% da meta da associação brasileira do biogás (Abiogás), que estima ser possível entregar 30 milhões de m<sup>3</sup>/dia desse combustível em 2030 (AGÊNCIA BRASIL, 2020).

O uso mais nobre do biogás produzido pelas estações de tratamento de esgoto distribuídas pelo Brasil seria para substituir o diesel, uma vez que parte do diesel é importada e a produção de biometano seria local. Além de contribuir na problemática ambiental, sendo o biogás 100% renovável, este contribui também para redução de poluentes, material particulado, e conseqüentemente da incidência de problemas respiratórios na população, além de aumentar a segurança energética do país (CHIAPPINI, 2020).

O biogás é um combustível derivado da biomassa, e é produto da digestão anaeróbica, tendo na sua composição básica o metano (CH<sub>4</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e sulfeto de hidrogênio (H<sub>2</sub>S). A digestão anaeróbica ocorre quando as bactérias atacam as estruturas de matéria orgânica sem a presença de oxigênio, e produzem compostos como o metano, dióxido de carbono e água, formando assim o biogás (ACHINAS; ACHINAS; EUVERINK, 2017). O processo é realizado em um equipamento denominado como biodigestor. Por oferecer um baixo custo de preparação e grande oferta de matéria-prima para produção, o biogás tem recebido bastante atenção de pesquisadores mundialmente.

Em geral, os combustíveis gasosos são amplamente utilizados em motores de combustão interna devido à sua capacidade de propiciar operação com alta homogeneidade de mistura ar-combustível, aos seus amplos limites de flamabilidade e às altas temperaturas necessárias para alcançar autoignição (MUSTAFI, N. N.; RAINE, R. R.; BANSAL, 2006). Isso permite que os motores operem com altas razões de compressão, propiciando operação com ainda mais elevada diluição por ar. Por

outro lado, o biogás contém cerca de 65% de metano ( $\text{CH}_4$ ) e o restante é principalmente dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (BHARATHIRAJA et al., 2018).

A presença de dióxido de carbono no biogás pode contribuir para a redução das emissões de óxidos de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ), mas uma alta proporção desse diluente pode afetar negativamente a qualidade de combustão do metano e pode levar a uma diminuição da temperatura e da velocidade de propagação da chama do biogás, levando à instabilidade da combustão. Além disso, devido à alta resistência à autoignição e à baixa velocidade da propagação de chama, tais propriedades dificultam seu uso em motores de ignição por compressão dedicados (SWAMI NATHAN; MALLIKARJUNA; RAMESH, 2010) (PARK et al., 2011). Por isso torna-se mais viável a sua utilização em motores de ignição por centelha, como aquele empregado na execução desta pesquisa.

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo

Comparar o desempenho de operação do biometano, do etanol e da gasolina em um motor monocilindro de pesquisas de ignição por centelha com injeção de combustível na porta de admissão.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

- Explorar os limites de operação em regimes de alta carga, em operação naturalmente aspirada.
- Testar a influência de diferentes razões de compressão a fim de caracterizar a relação entre máximo avanço de ignição possível em função da eficiência de operação para cada razão de compressão proposta.
- Caracterizar parâmetros de combustão para diferentes regimes de operação.
- Realizar comparativo financeiro entre os combustíveis utilizados neste trabalho.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

O aumento da demanda de energia e a segurança de seu fornecimento tornaram-se uma preocupação nas últimas décadas devido ao forte crescimento industrial. O alto custo dos combustíveis fósseis e a necessidade de reduzir a emissão de gases de efeito estufa e de gases poluentes tornaram as fontes de energias renováveis um objeto atraente. Nesse contexto, a biomassa se torna interessante e é potencialmente a segunda maior fonte de energia renovável do Brasil, possuindo muitas características semelhantes às dos combustíveis fósseis (ANEEL, 2020). A energia pode ser obtida pela queima direta ou pela conversão em biocombustíveis, como o biogás, que é composto principalmente de dióxido de carbono e metano.

O biogás pode ser usado como combustível alternativo em motores de combustão interna, fonte de energia considerada uma das mais importantes do mundo. Desta forma, torna-se relevante o desenvolvimento de novos combustíveis e melhoria da qualidade daqueles já utilizados, bem como melhoria das máquinas conversoras, desde plantas para produção até os motores de combustão interna (YILMAZ; GUMUS, 2017).

Além disso, a importância da queima do metano em um motor de combustão interna para geração de energia elétrica ao invés de emití-lo diretamente na atmosfera também se dá por: utilização do potencial energético renovável não aproveitado contribuindo para aumentar a segurança energética do país enquanto reduz a necessidade de importação de combustíveis fósseis e fornece uma nova fonte para produção de energia elétrica e redução de emissões de gases nocivos à saúde humana e ao meio ambiente, uma vez que a emissão do metano é potencialmente 28 vezes mais nociva do que a mesma massa de emissão de CO<sub>2</sub> (produto direto da combustão completa do metano) (YILMAZ; GUMUS, 2017) (SINIGAGLIA et al., 2022).

Estima-se que a população mundial atingirá a marca de 8,5 bilhões de pessoas no ano de 2030. O Brasil contabiliza hoje cerca de 208 milhões de habitantes e estima-se que chegue a 228 milhões de habitantes até 2030. Assim, a produção de efluentes para tratamento aumentará consideravelmente (ONU, 2016).

Estima-se ainda que 80% das emissões de gases de efeito estufa e prejudiciais à saúde humana gerados por veículos automotores é proveniente de veículos a diesel. A substituição total de óleo diesel por biometano reduziria a poluição das grandes cidades gerada por material particulado e óxidos de nitrogênio provenientes de

motores diesel. O Brasil tem uma produção anual de biogás superior a 2,3 bilhões de metros cúbicos, porém este valor pode ser considerado pequeno frente ao potencial total de produção, especialmente levando-se em conta os mais de 3000 lixões em mais de 1600 cidades que despejam metano diretamente na atmosfera, sem nenhum tipo de captação e gerando um impacto 28 vezes maior que a própria emissão de CO<sub>2</sub> (CIBIOGAS, 2021).

A produção de energia por biomassa representa apenas 8,7% da capacidade total, dos quais apenas 3,3% vêm dos dejetos animais. Considerando a alta concentração da população brasileira nos grandes centros urbanos e a expressiva produção agrícola e agroindustrial, a produção de biomassa a partir dessa fonte tem um grande potencial a ser explorado (ANEEL, 2020). Ao contrário da produção de álcool a partir da cana-de-açúcar, que se concentra em algumas poucas regiões do Brasil e cuja distribuição exige logística onerosa, o biogás pode ser produzido em qualquer sítio brasileiro e utilizado localmente. Sua produção em larga escala modificaria a matriz energética brasileira, reduzindo significativamente a importação de derivados de petróleo e disponibilizaria energia renovável e sustentável em abundância para geração também de energia elétrica.

De forma geral, para a indústria de motores e veículos de carga, é importante que os motores sejam analisados e homologados com os combustíveis e condições operacionais nacionais (temperatura, umidade, relevo) e não somente das matrizes onde foram desenvolvidos. O Proconve P8 (DOU; DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2018a) introduzirá significativas exigências quanto a longevidade dos funcionamentos eficientes dos sistemas de pós-tratamento e de injeção desses veículos pesados com a introdução do IsC – *In service Conformity*. Os custos de tecnologias de mitigação de NOx e material particulado (MP) são menores num motor movido a gás do que num motor equivalente a diesel (ZHAO, 2009).

No cenário acima descrito é imprescindível que seja desenvolvida uma solução tecnológica nacional para utilização eficiente do combustível biogás, com grande potencial de produção até o momento quase inexplorada. Isso contribuiria para aumentar a segurança da matriz energética nacional e para reduzir os custos de transportes de carga, aumentando a competitividade de montadoras que oferecem tal solução (SURROOP, D.; BUNDHOO, Z. M. A.; RAGHOO, 2019). Adicionalmente, o emprego dessa solução em grandes centros urbanos está alinhado com os objetivos dos programas nacionais de controle de emissões com finalidade de reduzir a

concentração de gases geradores de ozônio local e material particulado, responsáveis por diversas doenças pulmonares e cardíacas (ZHANG; WEI; FANG, 2019). Em consequência, também atende os critérios de aumento de eficiência energética propostos pelo programa Rota 2030.

Devido à aprovação do marco legal do saneamento básico no Brasil em 2020, foi estabelecido o prazo para o fim lixões a céu aberto, para que sejam transformados em aterros sanitários até 2024. Também foram estabelecidas metas para promover a universalização do acesso à água potável, com isso gerando um aumento no tratamento e na coleta de esgoto (AGÊNCIA BRASIL, 2020). A implementação dessas metas é um incentivo indireto para uso de resíduos urbanos como insumo na produção de biogás. Como consequência do aumento de tratamento de esgoto e aterros controlados implementados, haverá mais chances de aumentar a transformação de resíduos urbanos em biogás (CORSINI, 2003).

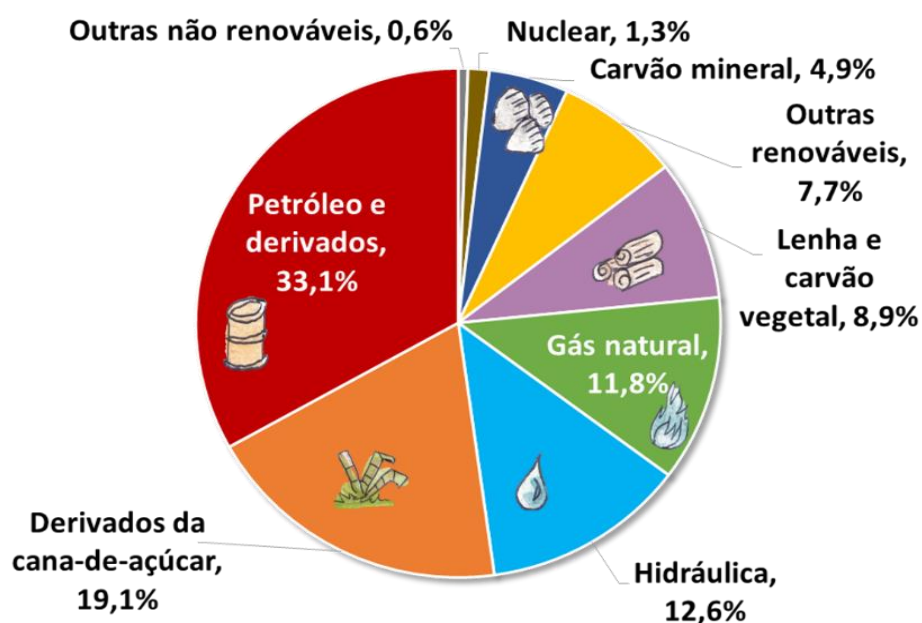
## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados os conceitos teóricos relacionados com o tema da pesquisa, que são relevantes para sua justificativa e embasamento. A construção do capítulo e as conceituações são baseadas na literatura da área, compiladas após pesquisa bibliográfica realizada pelo autor.

### 2.1 MATRIZ ENERGÉTICA BRASILEIRA E O POTENCIAL DO BIOGÁS

A matriz energética brasileira apresenta diferenças quando comparada com a matriz energética mundial. Apesar de o país possuir maior diversidade de fontes renováveis do que a média mundial, ainda possui mais da metade da matriz baseada em fontes não renováveis. Em 2020, 48,3% da matriz energética brasileira era composta por fontes renováveis. Maior detalhamento é mostrado na Figura 1 (EPE; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA, 2020).

Figura 1 - Matriz Energética Brasileira 2020.



Fonte: Matriz Energética Brasileira 2020 (BEN, 2021).

É possível notar um destaque para o setor de derivados da cana-de-açúcar, que representou, em 2020, 19,1% da matriz energética nacional, sendo assim a maior



fonte renovável do país. Nota-se também a participação relevante do gás natural, com 11,8%, combustível que potencialmente pode ser substituído pelo biogás ou pelo biometano.

Segundo o Centro Internacional de Energias Renováveis (CIBiogás) em 2021 o Brasil teve uma produção de 2,3 bilhões de Nm<sup>3</sup> de biogás. Para 2022 é esperada uma produção de pelo menos 2,8 bilhões de Nm<sup>3</sup>. Deste total, 23% têm potencial para ser purificado e transformado em biometano (CIBIOGAS, 2021).

Segundo dados da Associação Brasileira do Biogás (ABiogás), o potencial teórico de produção de biogás no Brasil é de 84,6 bilhões de metros cúbicos por ano, o que seria suficiente para suprir 40% da demanda interna de energia elétrica e 70% do consumo de diesel. O Brasil explora apenas 2,7% desse potencial, levando em conta o cenário de 2,3 bilhões de Nm<sup>3</sup> de biogás gerados em 2021 (ABIOGÁS; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS, 2019).

### **2.1.1 Biogás**

O biogás é um composto gasoso combustível produzido a partir da biomassa, por meio da degradação da matéria orgânica na ausência oxigênio. Esta degradação é um processo anaeróbico que resulta em uma mistura de gases. Os gases resultantes desta mistura são principalmente o CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) e o CH<sub>4</sub> (metano), cujas concentrações mudam de acordo com a origem da biomassa. A matéria-prima utilizada para produção de biogás é de origem orgânica, como resíduos da rede de coleta esgoto, esterco de animais, bagaço de vegetais entre outras (ABIOGÁS; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS, 2019).

A digestão anaeróbica é uma forma eficaz para o tratamento da biomassa resultante de resíduos sólidos e líquidos que são oriundos de lixões, da rede esgoto, de resíduos de fezes animais dentre outras. O processo de digestão anaeróbica transforma em substâncias simples os compostos orgânicos através do processo de degradação, que ocorre por meio da ação de diversos microrganismos que interagem simultaneamente, formando principalmente o dióxido de carbono e o metano (LI et al., 2014).

Uma das dificuldades encontradas na utilização do biogás é o controle da sua composição devido a dependência da matéria orgânica utilizada na produção e do processo de tratamento anaeróbio. A composição do biogás em volume varia entre

55% e 70% de metano ( $\text{CH}_4$ ) e entre 45% e 30% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ). Ainda existem outros componentes, mesmo que em menor proporção, que são sulfeto de hidrogênio ( $\text{H}_2\text{S}$ ), vapor de água, oxigênio (abaixo de 1% em volume), nitrogênio (abaixo de 2% em volume) e vários traços de hidrocarbonetos (PETRAVIĆ-TOMINAC et al., 2020).

O biogás bruto precisa passar pelo processo de limpeza para a remoção de alguns componentes como vapor d'água,  $\text{H}_2\text{S}$  (sulfeto de hidrogênio),  $\text{NH}_3$  (amônia), siloxanos e particulados devem ser removidos, pois a combinação do vapor d'água com o sulfeto de hidrogênio produz o ácido sulfúrico. O  $\text{H}_2\text{S}$  é tóxico e os ácidos podem deteriorar os equipamentos usados no processamento do biogás (FNR, 2010). Tratando-se do biometano, a Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis cita que a composição deve ser de, no mínimo 90% de metano e 10% restantes de gases inertes, sendo aceitável até 3% de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) (PETRAVIĆ-TOMINAC et al., 2020) (FIGUEIREDO, 2011).

Segundo a Associação Brasileira do Biogás (2020) as aplicações mais comuns para o biogás são: geração direta de calor, geração de energia elétrica em motogeradores, geração de energia elétrica CHP (Produção Combinada de Calor e Eletricidade) e a utilização de biogás purificado na forma de biometano, para a injeção nas redes de gás natural para uso veicular. Cada uma dessas aplicações, o biogás necessita de um nível de remoção de impurezas, que vai depender da composição exigida por regulamentação ou da sensibilidade dos componentes de cada sistema aos elementos do biogás (ABIOGÁS; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS, 2020).

O novo marco do saneamento básico tem como objetivo, universalizar o serviço de saneamento no Brasil, prevendo investimentos no setor do tratamento de esgoto e o fim dos lixões a céu aberto até 2033, com grande potencial de aumento na produção de biogás em território nacional. Com a geração distribuída de biogás os impactos serão magnitude maior pelo fato de haver a diminuição nos custos de transporte e distribuição, em virtude de a produção ser local e o consumo do biogás também (AGÊNCIA BRASIL, 2020).

A Lei nº 14.134, de 2021 a chamada Nova Lei do Gás Natural estabelece um novo marco para o setor produtor de gás no Brasil, o objetivo desta nova lei é aumentar a concorrência no mercado de Gás Natural e Biocombustíveis, com isso atraindo novos investidores consequentemente reduzindo os custos de produção e o preço final do gás para o consumidor. Os principais objetivos da nova lei do gás são

estimular a entrada de novos fornecedores de gás natural e evitar a concentração de mercado nas mãos de poucas empresas, tornar o setor de transporte mais transparente, promover a competitividade na comercialização de gás natural, especialmente para o consumidor industrial, reduzir os preços do gás natural, do gás de cozinha, do combustível e da energia elétrica no país, gerar empregos (DOU; DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2021).

## 2.2 SETOR DE TRANSPORTE

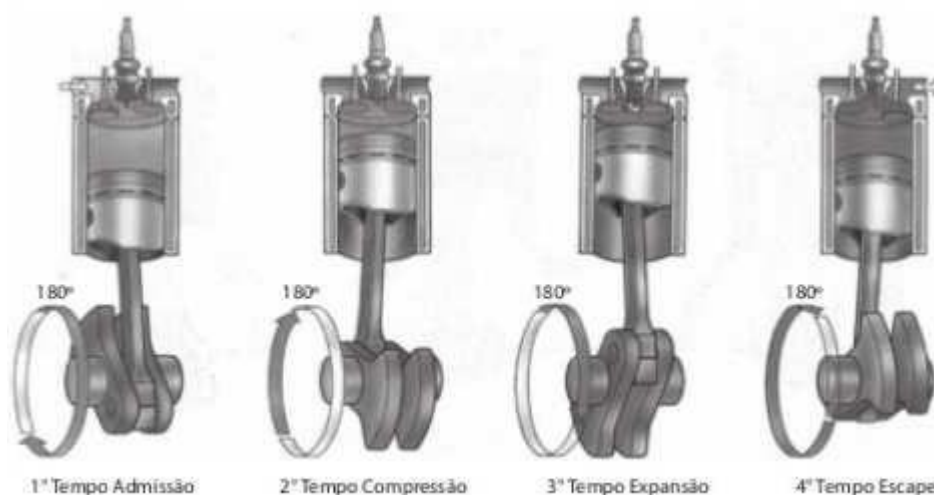
O setor de transporte rodoviário brasileiro segundo levantamento do anuário do transporte da Confederação Nacional do Transporte (CNT) é composto por 53,3% de automóveis, 22,2% de motocicletas, 2,6% de caminhões e 0,6% de ônibus, sendo que 2.014.055 veículos foram fabricados em 2020, o que representa 31,6% de queda em relação ao número registrado em 2019, quando foram produzidos 2.944.988 veículos (CNT; CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE, 2021).

O percentual de CO<sub>2</sub> equivalente emitido por veículos leves e pesados corresponde a 13% do total de emissões no Brasil. Apesar dos veículos leves serem maior número, os veículos pesados são responsáveis por 91% das emissões de CO<sub>2</sub> (ANFAVEA, 2021).

## 2.3 MOTORES DE COMBUSTÃO INTERNA

Os motores de combustão interna são máquinas térmicas que permitem transformar calor em trabalho, onde o calor é obtido através da queima de um combustível, ou seja, energia química em trabalho mecânico e o trabalho é ocasionado por uma sequência de processos realizados numa substância denominada fluido ativo (BRUNETTI, 2012). Na Figura 2 pode-se visualizar os ciclos de um motor quatro tempos ignição por centelha.

Figura 2 - Ciclos de um motor quatro tempos ignição por centelha.



Fonte: Brunetti, (2012).

O tempo de admissão ocorre quando o pistão realiza o movimento do ponto morto superior (PMS) até o ponto morto inferior (PMI) com as válvulas de admissão abertas. Durante este deslocamento, o pistão gera uma depressão que ocasiona o escoamento de gases através da válvula de admissão. Nos motores com injeção direta o cilindro é preenchido somente de ar e nos motores com injeção indireta é preenchido com a mistura ar e combustível (BRUNETTI, 2012).

O tempo de compressão ocorre quando o pistão realiza o movimento do PMI até o PMS. Neste tempo, as válvulas de admissão e de descarga se encontram fechadas, no deslocamento do pistão em direção ao cabeçote ocorre à compressão da mistura ar combustível nos motores de injeção indireta e somente ar nos de injeção direta (BRUNETTI, 2012).

O tempo de expansão ocorre do PMS ao PMI, com a centelha da vela de ignição é dado o início da combustão da mistura ar combustível nos motores de ignição centelha, já nos motores de injeção direta e ignição por compressão a combustão tem início com a injeção de combustível em alta pressão direto na câmara de combustão que tem ar em alta pressão e temperatura. Com a ocorrência da combustão acarreta a expansão dos gases e um aumento na pressão dentro do cilindro, que desloca o pistão do PMS no sentido do PMI, realizando o trabalho do motor (BRUNETTI, 2012).

O tempo de exaustão ocorre quando o pistão se desloca do PMI em direção ao PMS. Neste tempo a válvula de escape se encontra aberta e com o deslocamento do pistão expulsa os gases da combustão para fora do cilindro pela válvula escape (BRUNETTI, 2012).

### **2.3.1 Modos de combustão**

Neste subitem serão tratados os modos de combustão tradicionais como ignição por compressão (CI).

#### **2.3.2 Ignição por compressão (CI)**

No modo de combustão de ignição por compressão (CI) apenas o ar é aspirado para dentro do cilindro durante admissão e o combustível é injetado direto na câmara de combustão do motor a uma pressão com valores próximos a 100 bar até mais de 2000 bar, sendo a ignição iniciada pelo fato da temperatura do ar estar acima do ponto de fulgor do combustível injetado (HEYWOOD, 2018).

#### **2.3.3 Ignição por centelha (SI)**

No modo de combustão de ignição por centelha (SI) é aspirada ou comprimida uma mistura de ar combustível para dentro do cilindro durante a admissão e a ignição é iniciada pela centelha de uma vela de ignição. O combustível é intermitentemente injetado na porta de admissão ou no coletor de admissão por um injetor de combustível que é controlado eletronicamente (HEYWOOD, 2018).

## **2.4 EMISSÕES**

O esperado em uma combustão ideal teórica seriam substâncias como água, dióxido de carbono e nitrogênio, porém, na prática, as substâncias geradas na combustão real vão além dessas mencionados, sendo expelidos na descarga do motor outros gases como o óxido de nitrogênio, hidróxido de carbono, monóxido de carbono e material particulado (DENTON, 2013).

O monóxido de carbono (CO) é um gás de aparência incolor, sem cheiro e sem sabor e menos denso que o ar atmosférico, classificado como extremamente tóxico.

Se torna perigoso até em pequenas quantidades pois a sua inalação pode causar dores de cabeça leves, náuseas e sintomas de envenenamentos moderados, em grandes quantidades pode ocasionar sintomas como alteração do ritmo cardíaco, convulsões, intoxicação do sistema nervoso central, dificuldades na respiração e em casos mais severos pode ocasionar a morte (DENTON, 2013).

O óxido de nitrogênio ( $\text{NO}_x$ ) é formado quando o nitrogênio reage com o oxigênio em razão da alta temperatura na câmara de combustão. É um gás incolor e inodoro quando liberado do motor, mas quando entra em contato com a atmosfera e se mistura com mais oxigênio, se torna castanho avermelhado e de cheiro forte. É um gás irritante que provoca hiperatividade nos brônquios, aumenta a frequência e a intensidade das crises de asma e pode favorecer doenças pulmonares nas crianças (DENTON, 2013).

Os hidrocarbonetos (HC) são a parcela de combustível não queimado ou parcialmente queimado que é expelido pelo motor. São um grupo de compostos orgânicos que possui apenas átomos dos elementos carbono e hidrogênio, pertencem a uma classe muito ampla, de maneira geral é difícil descrever os efeitos percebidos pelo homem, a exposição pode causar sufocamento, falta de ar, tosse e problemas neurológicos (DENTON, 2013).

O material particulado (MP) é conhecido como a fuligem ou a fumaça preta que sai do sistema de escapamento do motor, é uma mistura complexa de sólidos com diâmetro reduzido, cujos componentes apresentam características físicas e químicas diversas, as fontes principais de material particulado são a queima de combustíveis fósseis, emissões de amônia na agricultura, queima de biomassa vegetal e emissões decorrentes de obras e pavimentação de vias. Os principais efeitos prejudiciais à saúde são câncer respiratório, arteriosclerose, inflamação de pulmão, agravamento de sintomas de asma, aumento de internações hospitalares e podem levar à morte (DENTON, 2013).

O metano ( $\text{CH}_4$ ) é um gás inodoro e incolor pertencendo ao grupo dos hidrocarbonetos, a sua emissão em quantia demasiada está diretamente relacionada a mudanças climáticas, efeito estufa e aquecimento global, sua emissão direta para o meio ambiente tem um potencial de aquecimento 60 vezes maior que o dióxido de carbono (DENTON, 2013).

## 2.5 LEGISLAÇÃO DE EMISSÕES VEICULARES

Neste subitem serão tratados os temas das emissões veiculares e das legislações que regulam e fiscalizam o mercado brasileiro.

### 2.5.1 Proconve

O Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores (Proconve) foi criado pela Resolução Conama nº 18, de 6 de maio de 1986, e é coordenado pelo Instituto Brasileiro de Meio Ambiente (IBAMA). Ele definiu na época os primeiros limites de emissões para veículos e colaborou para atender os padrões de qualidade do ar estabelecidos pelo Programa Nacional de Controle de Qualidade do Ar (PRONAR) (DOU; DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2018).

Com a criação da lei nº 8.723, em 28 de outubro de 1993, reforçou-se a obrigação em reduzir os níveis de emissões de poluentes de origem veicular, contribuindo no desenvolvimento tecnológico de veículos automotores, combustíveis e autopeças na busca em atender as os limites de emissões estabelecidos para veículos nacionais e importados (DOU; DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2018).

Os limites estabelecidos são aferidos através de ensaios em dinamômetros e em percursos de rua preestabelecidos com a utilização de combustível padrão e equipamentos de análise de gases poluentes de acordo com as normas vigentes para medir as emissões veiculares. Os veículos automotores são classificados conforme o peso total bruto (PBT), sendo as fases caracterizadas por “L” para veículos leves e as fases caracterizadas por “P” para veículos pesados, ao longo do tempo foram adotadas estratégias diferentes para cada uma das fases (IBAMA, 2016).

Conforme pode-se observar na Tabela 1 cada nova fase foi sendo implementada e os níveis de emissões sofreram reduções que contribuíram para que as montadoras e fabricantes de veículos automotores buscassem inovações tecnológicas para se adequar as normas vigentes (DOU; DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO, 2020).

Tabela 1- Limites do Proconve por etapas, em g/km, para veículos comerciais leves de até 1700 kg.

Fase	Implementação	CO	NMHC	NOx	MP
L-4	jan/05	2,00	0,16	0,25	0,08
L-5	jan/09	2,00	0,05	0,12	0,05
L-6	jan/12	1,30	0,05	0,08	0,03
L-7	jan/22	1,00		0,08*	0,06
L-8	jan/25	0,006		0,08*	0,08

\* Somatório de emissões de hidrocarbonetos não-metano e de óxidos de nitrogênio

Fonte: Adaptado de Ibama (2016) e CONAMA (2018).

Os limites máximos de emissão de poluentes para veículos pesados de uso rodoviário, da Fase PROCONVE P8 entrou em vigor no dia 1º de janeiro de 2022 para as homologações de novos modelos de veículos, que nunca obtiveram Licença para Uso da Configuração de Veículo ou Motor (LCVM), e a partir de 1º de janeiro 2023 para demais veículos que esta categoria abrange, conforme a Tabela 2.

Tabela 2- Limites do Proconve por etapas, em mg/kWh, para veículos comerciais pesados.

Ciclo	CO (mg/kWh)	THC <sup>(1)</sup> (mg/kWh)	NMHC <sup>(2)</sup> (mg/kWh)	CH <sub>4</sub> <sup>(2)</sup> (mg/kWh)	NOx (mg/kWh)	NH <sub>3</sub> <sup>(3)</sup> ppm	MP Massa (mg/kWh)	NP Número #/kWh
WHSC <sup>(1)</sup>	1.500	130	-	-	400	10	10	8,0 x 10 <sup>11</sup>
WHTC <sup>(1)</sup>	4.000	160	-	-	460	10	10	6,0 x 10 <sup>11</sup>
WHTC <sup>(2)</sup>	4.000	-	160	500	460	10	10	-
OCE (WNTE) <sup>(1)</sup>	2.000	220	-	-	600	-	16	-
CR / ISC	6.000	240	240	750	690	-	-	-

(1) Aplicável a motores de ignição por compressão

(2) Aplicável a motores de ignição por centelha

(3) Aplicável em veículos equipados com sistemas de pós-tratamento com agentes redutores ou veículos abastecidos a gás.

Fonte: CONAMA (2018).



## 2.5.2 RENOVABIO

A Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) é um programa do Ministério de Minas e Energia (MME) lançado em dezembro de 2016 e que entrou em vigor no início de 2020, definida por um período de 10 anos, visa reconhecer o papel estratégico dos biocombustíveis para fonte de energia e melhorias na segurança e redução de emissões de gases de efeito estufa no Brasil. O principal instrumento do Renovabio é o estabelecimento de metas nacionais anuais de descarbonização para o setor de combustíveis, de maneira a incentivar o aumento da produção e da participação dos biocombustíveis na matriz energética do setor de transportes do Brasil (MME; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2019).

As metas nacionais estabelecidas serão subdivididas em metas individuais para as distribuidoras de combustíveis conforme a sua parcela de participação no mercado de combustíveis fósseis e a responsabilidade por esse controle será da ANP. Os dados das distribuidoras que não cumprirem as metas individuais de redução de emissões de gases de efeito estufa serão distribuídos publicamente pela Renovabio e serão aplicadas multas e sanções administrativas pela ANP (ANP; ASSOCIAÇÃO NACIONAL DO PETROLEO, 2019).

O processo de certificação da produção de biocombustíveis faz parte da RenovaBio, levando em conta a origem da biomassa energética da matéria-prima, atribuindo notas diferentes para cada produtor, em valor inversamente proporcional à intensidade de carbono do biocombustível produzido. A nota mostrará exatamente a contribuição individual de cada produtor para a diminuição de uma quantidade específica de gases de efeito estufa em relação ao seu substituto fóssil de referência (em termos de toneladas de CO<sub>2</sub>eq) (MME; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2019).

O cálculo da meta anual leva em conta os dados de movimentação de combustíveis fósseis informados no Sistema de Informações de Movimentações de Produtos (SIMP), que estão estabelecidas em unidades de créditos de descarbonização (CBIO). Um CBIO corresponde a uma redução de uma tonelada de CO<sub>2</sub>eq em comparação ao combustível fóssil de referência. Este será um ativo financeiro, negociado em bolsa, emitido pelo produtor de biocombustível, a partir da comercialização (emissão da nota fiscal), os distribuidores de combustíveis deverão

comprovar o cumprimento das metas individuais do RenovaBio através da compra de CBIOS (MME; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA, 2019).

### **2.5.3 ROTA 2030**

O Rota 2030 é um programa criado pelo Governo Federal com o objetivo de criar uma política para a indústria automotiva e autopeças visando estimular o investimento e o fortalecimento das empresas brasileiras do setor automotivo para o longo prazo, visando os próximos quinze anos de operação da indústria automotiva, sendo divididos em períodos de cinco anos. O programa possui metas mensuráveis que a cada ciclo conduzem as empresas em uma trajetória de adequação aos novos instrumentos, assim proporcionando a introdução de novas tecnologias e a competitividade global do setor automotivo brasileiro (ME; MINISTÉRIO DA ECONOMIA, 2020).

O programa Rota 2030 é regulamentado pela Lei nº 13.755/2018, que estabelece as diretrizes e as normas de fabricação e comercialização de veículos que são estabelecer requisitos obrigatórios para a comercialização de veículos no Brasil, incrementar a eficiência energética, o desempenho estrutural e a disponibilidade de tecnologias assistivas, aumentar os investimentos em pesquisa e desenvolvimento no País, estimular a produção de novas tecnologias e inovações, automatizar o processo manufatura e o incremento da produtividade, promover o uso de biocombustíveis e de formas alternativas de propulsão e valorizar a matriz energética brasileira, garantia da capacitação técnica e da qualificação profissional no setor de mobilidade e logística e a garantia da expansão ou manutenção do emprego no setor de mobilidade e logística (FUNDEP, 2022).

### **2.5.4 Uso de biogás em motores de combustão interna**

Os motores Otto reúnem vantagens relevantes quando são considerados os custos de produção e as espécies químicas dos poluentes que produzem em comparação com as que os motores diesel produzem. Nos dias atuais, os motores diesel, para atender as normas internacionais que regulam suas produções de gases poluentes e de material particulado, devem contar com sistemas de injeção com comando eletrônico de alta pressão (*Common-rail*), utilizando pressões elevadas de

funcionamento chegando, em alguns casos, a valores de até 3.500 bar nos *rails*. Além de utilizar sistemas de pós-tratamento de gases de exaustão como SCR (*selective catalytic reduction system*) ou, no mínimo, um EGR (*exhaust gas recirculation*) para mitigar a emissão de poluentes como NO<sub>x</sub> e material particulado. Por esse motivo, utiliza-se biogás e biometano em motores diesel convertidos para operar em ignição por centelha (ciclo Otto).

Nos motores do ciclo Otto a combustão ocorre a partir de uma centelha da vela ignição em uma mistura de ar combustível, o que facilita bastante o processo de modificação para o motor operar com biogás. A modificação principal deve ser realizada no sistema de injeção do combustível e na mistura de ar combustível, ocorrendo o corte de injeção do combustível líquido e é feita à injeção do biogás na admissão.

Kwon et al., (2017) realizaram um estudo sobre como a variação da razão de compressão em um motor de pequeno porte operando com biogás afetaria o seu desempenho. A razão de compressão original do motor era de 8,01: 1 e foi aumentada para 9,22: 1, onde o resultado dessa modificação foi um aumento de 21,8% na potência máxima de eixo, um aumento de 7,8% na eficiência térmica de eixo e redução do consumo específico de combustível que era de 290 g/h para 218 g/h.

Qian et al., (2017) realizaram uma revisão dos mecanismos de combustão com biogás e a sua aplicação nos motores de combustão interna. Chegaram à conclusão de que um dos maiores desafios da utilização em larga escala vem da diferença em sua composição, que varia pelo uso de diferentes processos de fabricação, e a diversidade de matérias primas que são empregadas na sua produção, o que acaba dificultado o controle efetivo na combustão do motor.

Sendzikiene et al., (2015) realizaram um experimento que avaliou o impacto do biogás nas características energéticas e nas emissões em um motor SI. Concluiu que o resultado da utilização do biogás é uma produção de torque menor quando comparado com o motor operando com gasolina. A causa desse fenômeno se deu pela diminuição da eficiência volumétrica, pelo fato de o biogás utilizar o lugar de parte do ar admitido pelo motor. A eficiência e a velocidade da combustão sofreram impacto com a utilização do biogás resultando numa menor eficiência térmica no motor.

### 3 METODOLOGIA

Neste capítulo serão abordados os materiais e métodos que foram empregados na realização da pesquisa.

#### 3.1 MOTOR DE TESTE E BANCADA EXPERIMENTAL

O motor utilizado para a realizar os testes foi um motor quatro tempos monocilíndro da marca Ricardo Protheus originalmente a diesel, convertido para operar em ciclo Otto. A razão de compressão original do motor a diesel é de 16:1. Através da instalação de um espaçador, reduziu-se a razão de compressão para 11,6:1, para operar com ciclo Otto. Posteriormente realizou-se a troca da chapa espaçadora resultando em razão de compressão para 14,3:1 através da substituição do espaçador por outro de medida adequada. Conforme pode ser visualizado na Figura 3.

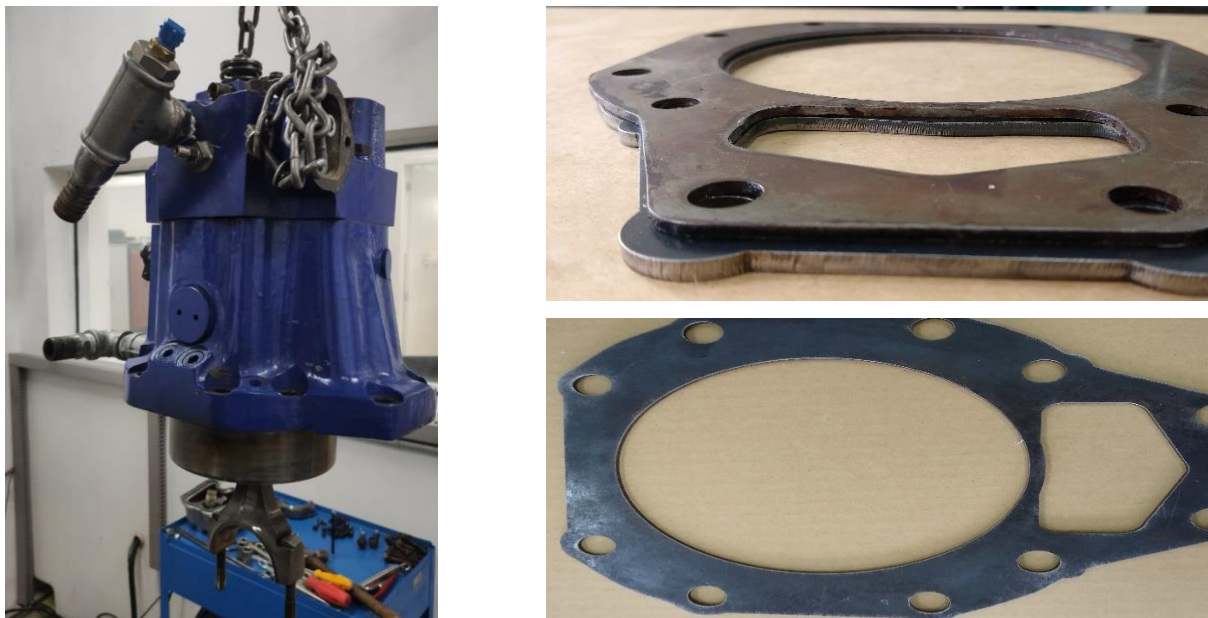
Algumas especificações do motor Ricardo Protheus são apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 - Especificação motor de teste.

Motor Ricardo Protheus	
Pressão na admissão	Motor naturalmente aspirado
Diâmetro do pistão	109 mm
Curso	128 mm
Deslocamento volumétrico	1194 cm <sup>3</sup>
Razão de compressão	11,6 :1 e 14,3:1
Diâmetro da válvula de admissão	50 mm
Diâmetro da válvula de escape	40 mm
Número de Válvulas por Cilindro	2

Fonte: Autor, (2022).

Figura 3 - Bloco intermediário do motor Ricardo Protheus e a chapa espaçadora para variação da razão de compressão.

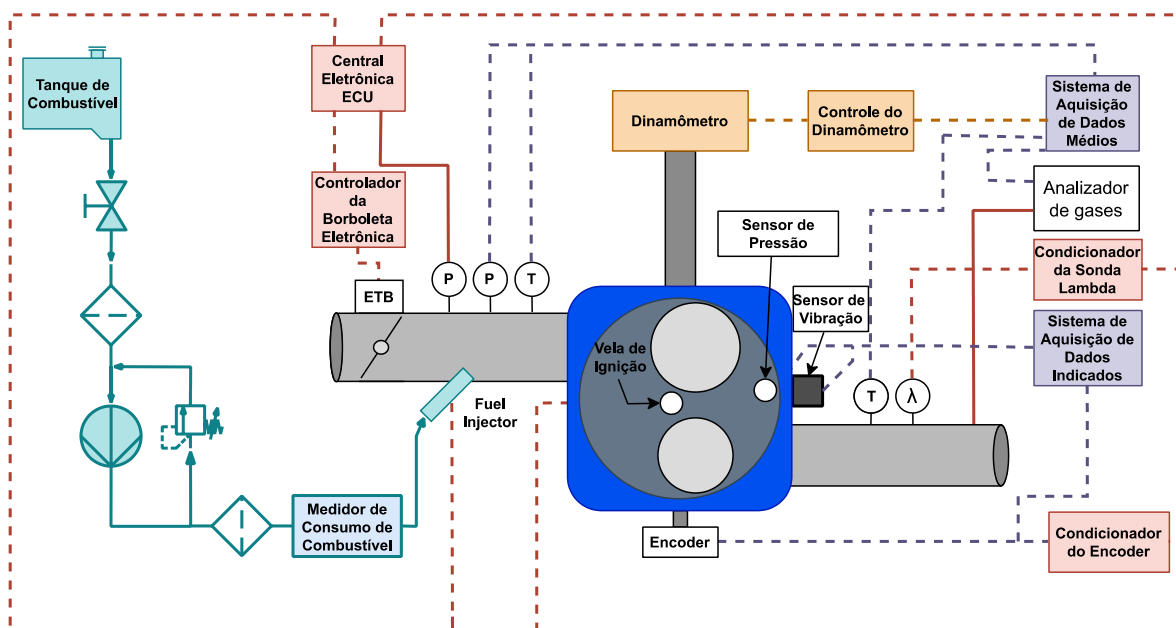


Fonte: Autor, (2022).

O motor foi instrumentado com sensor de oxigênio dos gases de exaustão (sonda lambda) Bosch de banda larga LSU e o condicionador de sonda lambda utilizado foi um FuelTech WB-O2 nano 4,2. Sensores de temperatura termopar tipo K e transdutores de pressão de baixa frequência MPX5700AP foram utilizados nos coletores de admissão e exaustão.

A Figura 4 apresenta um diagrama esquemático dos pontos de monitoramento de pressão e temperatura, além da instrumentação auxiliar utilizada no desenvolvimento do trabalho: central eletrônica de controle do motor, medidor de vazão, controlador da borboleta eletrônica, analisador de gases de exaustão e dentre outros equipamentos citados a seguir.

Figura 4 - Descrição da bancada experimental.

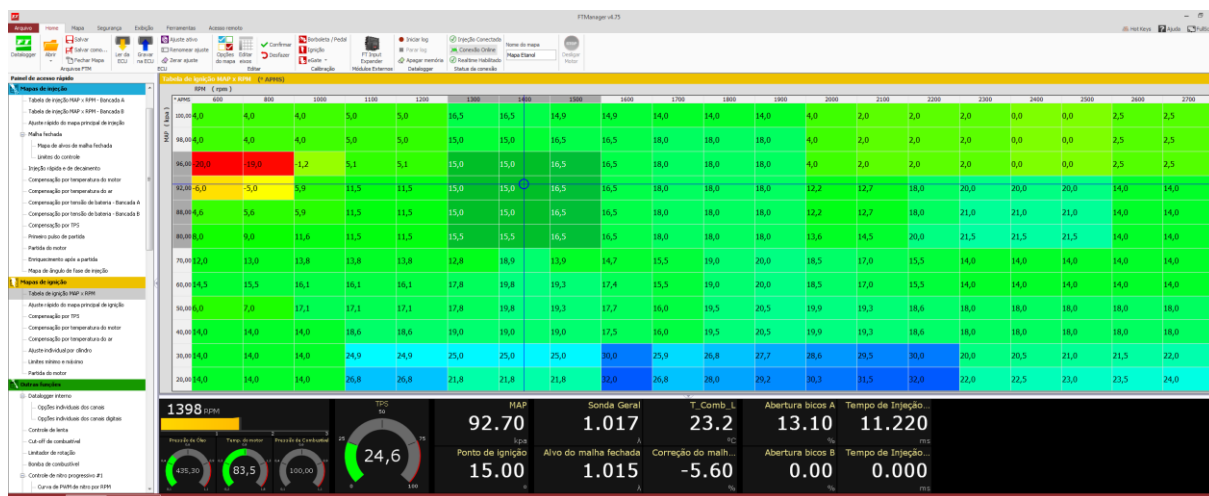


Fonte: Adaptado, (PEREIRA SILVEIRA, 2021).

### 3.2 GERENCIAMENTO DO MOTOR

O gerenciamento eletrônico do motor foi realizado com a utilização de uma central eletrônica de controle do motor (ECU, do inglês *Electronic Control Unit*) programável da marca FUEL TECH modelo FT 450, com a qual foi realizado o controle do tempo de abertura de injetor, do ponto de injeção de combustível e do ponto de ignição. Na Figura 5 pode-se visualizar a interface de usuário da FT 450 do programa FTManager, uma vez que a utilização da tela *touch screen* foi utilizada apenas para monitoramento. O controle da entrada de ar na admissão do motor foi realizado por uma válvula borboleta com movimento controlado eletronicamente por um módulo FuelTech ETC. O controle do motor foi realizado pela pressão de admissão por velocidade de rotação do motor.

Figura 5 - Interface de usuário da ECU FT 450.



Fonte: Autor, (2022).

Para a injeção de combustível gasoso, foi utilizado um coletor de admissão construído em aço carbono com quatro injetores automotivos Magnet Marelli, modelo IPG 001, conforme a Figura 6. O tempo de abertura dos injetores foi controlado pelo módulo de injeção eletrônico programável da marca FuelTech modelo FT-450. Fez-se necessária a utilização de um redutor de pressão na linha de GNV para reduzir a pressão dos cilindros de abastecimento (de até 200 bar) para 3,0 bar.

Figura 6 - Sistema injeção de combustível gasoso.



Fonte: Autor, (2022).

A injeção de etanol e gasolina foi realizado através de um injetor da marca Magneti Marelli modelo IRB 020, posicionado no coletor de admissão. A pressurização do combustível foi realizada por uma bomba de baixa pressão, e o controle de pressão foi realizado pela utilização de um regulador de pressão e mantido em 3.0 bar relativo em relação à pressão de admissão. O tempo de abertura dos injetores foi controlado pelo módulo de injeção eletrônica programável FuelTech FT-450.

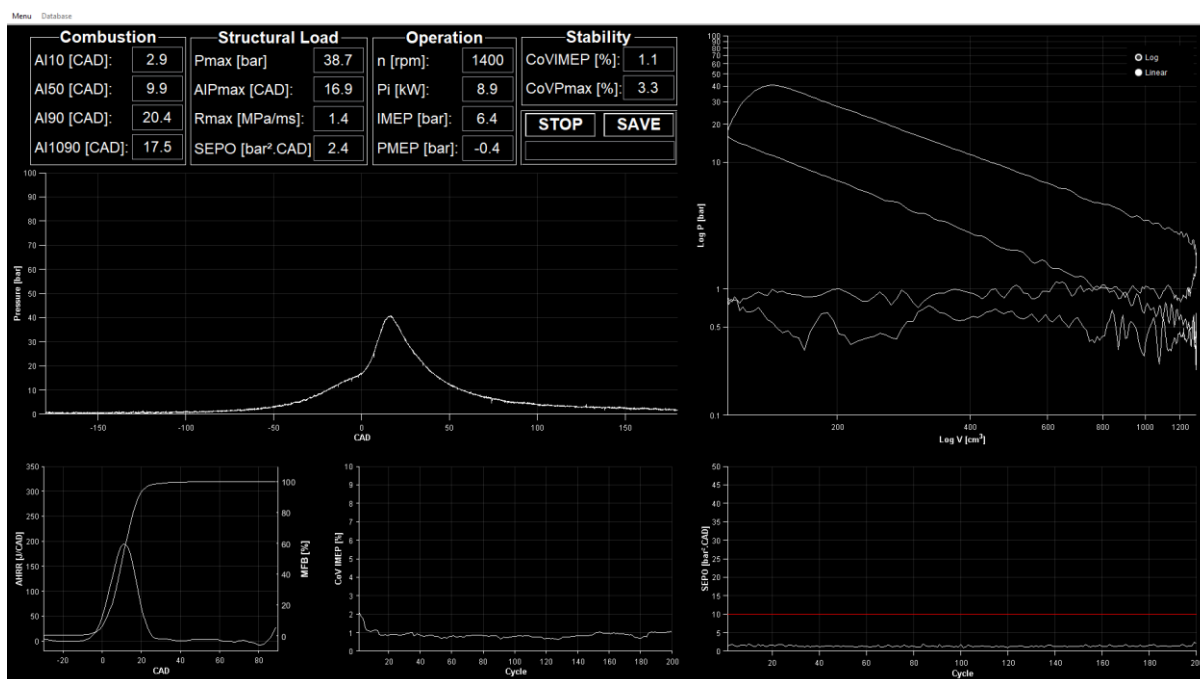
### 3.3 SISTEMA DE AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados foi realizada através de dois subsistemas: sistema de aquisição de dados indicados e sistema de aquisição de dados de baixa frequência.

O sistema de aquisição de dados indicados foi utilizado para filtrar, amostrar, converter e amplificar o sinal de pressão no cilindro medido por um transdutor piezoelétrico de pressão AVL GH14D com base na posição angular do virabrequim. Para referenciar a posição absoluta do virabrequim, foi utilizado um codificador incremental (*encoder incremental*) B58N da Dynapar acoplado ao eixo virabrequim. O sinal oriundo da variação de pressão do transdutor piezoelétrico foi filtrado, amplificado e convertido através do amplificador AVL FLEXIFEM Piezo 2P2E. A amostragem do sinal com base no ângulo do virabrequim foi realizada através de uma placa de aquisição *National Instruments* NI USB 6351. O processamento dos dados indicados adquiridos foi realizado através do software DAQMOT (DOS SANTOS et al., 2019), desenvolvido no Laboratório de motores da Universidade Federal de Santa Maria, conforme pode ser visualizado na Figura 7. Para cada ponto de medição foram adquiridos dados de 200 ciclos consecutivos.



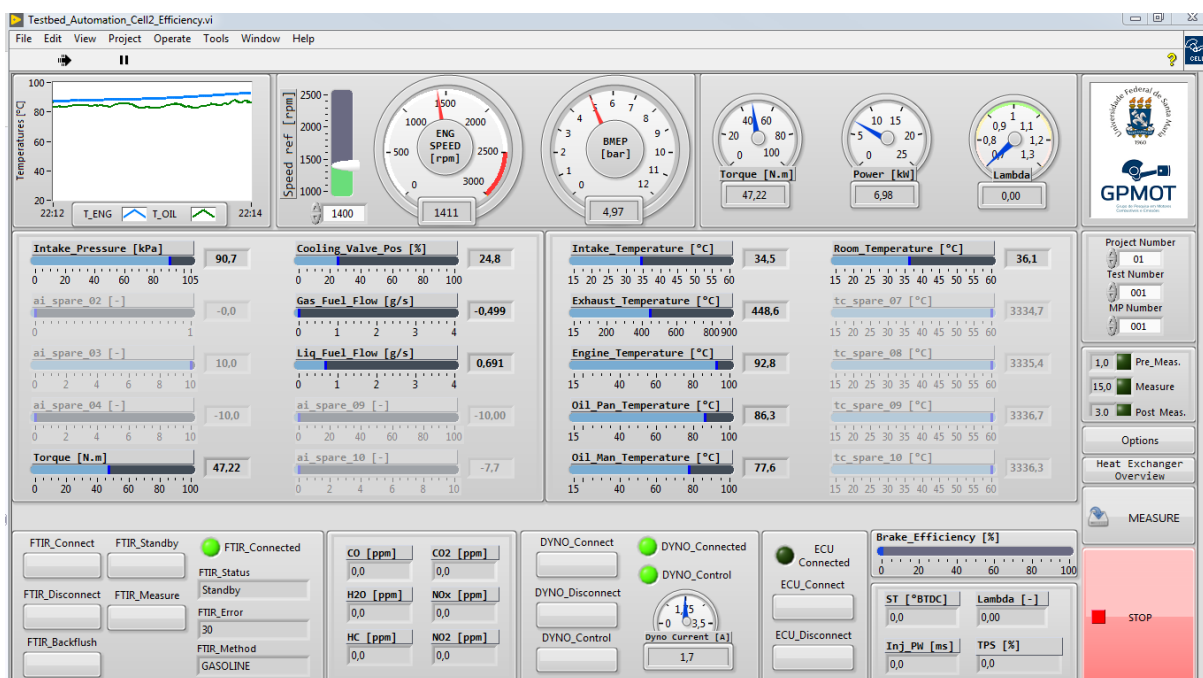
Figura 7 - Interface da interface de usuário do software do sistema de indicação.



Fonte: Autor, (2022).

O sistema de aquisição de dados de baixa frequência foi utilizado para adquirir dados de sensores de resposta lenta, tal como termopares, sensores de pressão piezoresistivos, sensores de excesso de ar, entre outros. Esse sistema foi comandado por uma aplicação programa em LabView, o qual se comunicou e recebeu dados de um chassi de aquisição de dados NI USB SCXI-1001, de uma ECU programável FT 450 e do analisador de gases AVL SESAM i60 FTIR. O chassi de aquisição de dados era equipado com dois módulos NI SCXI-1303 para termopares, de um módulo NI SCXI-1300 para sensores de pressão, de um módulo NI SCXI-1325 para sensores em geral e um módulo de comunicação NI SCXI-1600. Os dados adquiridos consistiam em uma medida das informações recebidas através dos sensores ao longo de 15 segundos, adquiridos em uma frequência de 1 kHz.

Figura 8 - Interface de usuário do software de controle e aquisição de dados da célula de testes.



Fonte: Autor, (2022).

### 3.3.1 Pegging do sensor de pressão

Devido à natureza do transdutor de pressão piezoelétrico de medir apenas a variação de pressão, se fez necessário o referenciamento da pressão a fim de colocar as variações em uma escala de pressão absoluta, esse tratamento do sinal cru de pressão é chamado na linguagem técnica de motores de *pegging*. Para isso, foi utilizado o método dos dois pontos de pressão (2PTR) que é considerado um dos métodos mais robusto e preciso segundo a literatura (LEE; YOON; SUNWOO, 2008). O método 2PTR calcula a tensão residual para ajustar a pressão absoluta através da característica politrópica da compressão no motor. A tensão residual é a tensão necessária a ser corrigida para que seja satisfeita a equação do processo politrópico entre 2 pontos na compressão para um coeficiente politrópico base, definido como 1,33 nesse trabalho. Os pontos de avaliação do processo politrópico para realização do pegging termodinâmico nesse trabalho, foram os ângulos de  $-120^\circ$  graus APMS e  $-60^\circ$  graus APMS.

### 3.4 SISTEMA DE MEDIÇÃO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEL

A medição da vazão mássica de combustível líquido e gasoso foi realizada com um medidor *Endress+Hauser Promass A* de princípio de medição a partir de efeito *Coriolis*, com erro máximo de  $\pm 0,1\%$  com combustível líquido e de  $\pm 0,35\%$  para combustível gasoso, na faixa de vazão em que foi utilizado. O funcionamento baseia-se na aplicação de pulsos constantes de oscilações induzidas que são emitidos em direção ao tubo de medição. Como consequência da inércia do escoamento do fluido, maiores velocidades de escoamento induzem maior deflexão do tubo oscilante de medição, que induzem deslocamento de fase (torção). A variação da fase é medida entre a entrada e da saída do duto. O equipamento realiza também a correção da vazão pela densidade do fluido, ou seja, temperatura e pressão. Devido à alta taxa de resposta de tal equipamento, este é adequado para medições de escoamentos transientes.

### 3.5 SISTEMA DE ANÁLISE DE GASES DE EXAUSTÃO

Para análise de emissões, o equipamento utilizado foi o analisador de gases AVL modelo SESAM i60 FTIR (do inglês *Fourier transform infrared spectroscopy*). A análise de gases é baseada no método de espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier, e por esse motivo propicia a mensuração da concentração de mais de 30 espécies de gases de interesse. Os dados fornecidos pelo analisador estão em base úmida e o erro máximo é de 2% do valor medido, segundo o fabricante (GOLKE, 2021). Fizeram-se necessário o uso de planilhas eletrônicas para conversão dos dados de concentração das espécies químicas de interesse (ppm) para emissões absolutas específicas (g/kWh), conforme descrito em sessão posterior.

### 3.6 COMBUSTÍVEIS DE TESTES

O combustível principal utilizado nos ensaios foi o gás natural veicular (GNV), que possui as características semelhantes às do biometano (composição base a partir de metano) e é mais amplamente disponível. A diferença se encontra em sua origem: enquanto o biometano é oriundo de fontes renováveis, como as estações de tratamentos de esgoto e os aterros sanitários, o GNV é um derivado do petróleo, não

renovável. Devido à dificuldade na obtenção de biogás, e posterior necessidade de *upgrading* para biometano, e à facilidade de aquisição de GNV, optou-se nesta pesquisa pela utilização do último.

Os combustíveis utilizados para comparação com o GNV foram a gasolina comum tipo C (combustível líquido não-renovável) e o etanol hidratado comercial (combustível líquido renovável). A Tabela 4 apresenta as propriedades do GNV, da gasolina e do etanol hidratado.

Tabela 4 - Características do GNV, gasolina comum tipo C e etanol hidratado combustível (EHC).

Propriedade	GNV	Gasolina(E27)	EHC
Massa específica (kg/m <sup>3</sup> ) *	0,7	748,2	808,7
Octanagem	120	97,3	107
Razão Ar-Combustível Estequiométrica	17,2	12,7	8,8
Poder Calorífico Inferior (MJ/kg)	49,77	38,92	24,76

\*Temperatura 20<sup>o</sup> C e pressão 1 bar (NTP).

Fonte: Adaptado, (LI; YANG; ZHOU, 2017).

### 3.7 METODOLOGIA DE ENSAIOS DE MOTOR EM BANCADA DINAMOMÉTRICA

Os ensaios foram realizados no laboratório de motores da UFSM. O motor foi operado em rotação fixa de 1800 rpm e temperaturas de óleo e arrefecimento monitoradas e controladas em 90 °C ± 5 °C. Os ensaios foram realizados primeiramente com GNV a fim de buscar operação em WOT (do inglês: *Wide open throttle*). O avanço de ignição foi varrido a fim de alcançar-se operação em MBT (do inglês: *maximum brake torque*) ou até que a operação fosse limitada por *knock*.

Posteriormente escolheu-se uma carga intermediária e uma carga baixa, com isso utilizou-se as cargas de 9 IMEP, 6 IMEP e 3 IMEP inicialmente para o GNV. Posteriormente foram realizados os ensaios com gasolina e etanol nas mesmas condições de operação para a realização da comparação entre os três combustíveis.

A fim de monitorar se as condições de operação do motor se mantiveram constantes durante a realização dos testes, realizou-se um ensaio arrastado (*motored*)

antes e um no final de cada bateria de ensaios. Sendo observado se não teve desvio significativo na pressão máxima motorizada, que foi utilizada como parâmetro de sanidade do motor, servindo este como critério de conformidade ou não dos mesmos. Os testes foram realizados em baterias de ensaios com três repetições para cada carga e posteriormente feito a média entre os três, utilizou-se lambda igual a 1.

### 3.8 ANÁLISE DE OPERAÇÃO

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.

#### 3.8.1 Pressão média efetiva indicada (*Indicated mean effective pressure*) (IMEP)

A pressão média efetiva indicada é medida mais adequada para comparação de carga de motores, visto que a comparação de carga pelo torque depende do tamanho e do volume deslocado, tornando difícil a comparação entre motores de tamanhos diferentes. Pode-se calcular a pressão média efetiva indicada através da Equação 1 (HEYWOOD, 2018).

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

Onde:

$W_{c,i}$  = Trabalho indicado por ciclo.

$V_d$  = Volume deslocado.

#### 3.8.2 Pressão média efetiva de bombeamento (*Pumping mean effective pressure*) (PMEP)

A pressão média efetiva de bombeamento é considerada como o trabalho que o pistão executa para admitir uma nova carga de mistura ar/combustível durante a fase de admissão e para deslocar os gases provenientes da combustão para fora do cilindro durante a fase de exaustão. Como parte do trabalho do motor foi perdida durante o processo de troca de gases, a pressão efetiva média de bombeamento foi

calculada para representar a carga do motor perdida durante tal processo e pode ser calculado conforme a Equação 2 (HEYWOOD, 2018).

$$PMEP = \frac{1}{V_d} \int_{Exaustão}^{Admissão} p \, dV \quad (2)$$

### 3.8.3 Eficiência volumétrica (*Volumetric efficiency*)

A eficiência volumétrica é a relação entre a massa de ar que o motor realmente admite e a massa de ar que poderia preencher o mesmo volume com as propriedades iguais a atmosfera local onde o motor está funcionando e pode ser calculado conforme a Equação 3 (HEYWOOD, 2018).

$$\eta_v = \frac{m_a}{\rho_{a,i} V_d} \quad (3)$$

Onde:

$\rho_{a,i}$  = Densidade do ar.

$m_a$  = Massa de ar.

### 3.8.4 Consumo específico de combustível (*Specific Fuel Consumption*)

O consumo específico de combustível de um motor pode ser descrito como a razão entre a massa de combustível consumida pelo motor e a potência gerada. Para o cálculo do consumo indicado usa-se o valor da potência indicada e pode ser calculado conforme a Equação 4.

$$sfc(g/kWh) = \frac{m_f (g/h)}{P(kW)} \quad (4)$$

Onde:

$m_f$  = Vazão mássica de combustível.

$P$  = Potência unitária

### 3.9 PARÂMETROS DE PERFORMANCE E COMBUSTÃO

#### 3.9.1 Avanço de ignição

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, esse fenômeno é conhecido como avanço de ignição. Ocorre geralmente dentro do tempo de compressão, é medido pelo ângulo (em graus) de giro do virabrequim em relação ao PMS (ponto morto superior), o ajuste deste ângulo de ignição busca garantir que o ponto de maior pressão no interior da câmara de combustão ocorra logo após o pistão passar pelo PMS, alcançando a melhor conversão da pressão gerada em trabalho útil (GIACOSA, 1989).

#### 3.9.2 Taxa de liberação de calor

A taxa de liberação de calor foi determinada considerando o balanço de transferência de calor para as paredes e a taxa de liberação de calor do combustível. Dessa forma, a taxa de liberação de calor aparente foi determinada através da Equação 5 (HEYWOOD, 2018).

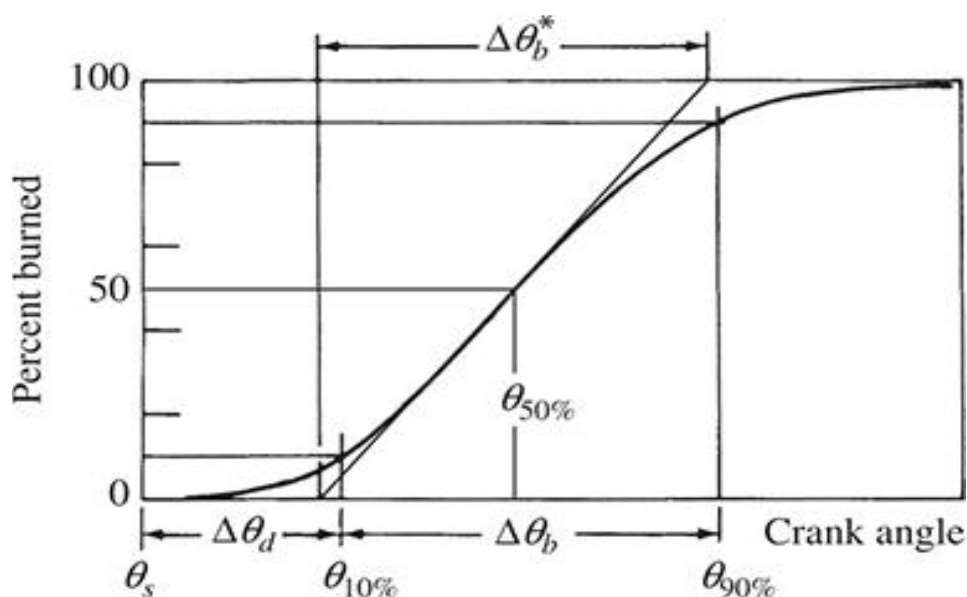
$$\frac{dQ_{ap}}{dCAD} = \frac{y}{y-1} p \frac{dV}{dCAD} + \frac{1}{y-1} V \frac{dp}{dCAD} \quad (5)$$

Onde  $y$  = razão de calores específicos

#### 3.9.3 Fração de massa queimada (*Mass Fraction Burned*) (MFB)

A fração de massa queimada foi determinada através da integração da taxa de liberação de calor desde o momento da centelha até o momento da finalização da combustão. O fim da combustão foi determinado como o último valor da taxa de liberação de calor aparente positivo após o ângulo de pressão máxima do cilindro, conforme pode ser visualizado na Figura 9.

Figura 9 - Fração de massa queimada em relação de graus de ângulo de virabrequim.



Fonte: Adaptado de Heywood, 2018.

### 3.9.4 Duração de CA 0-10 e CA 10-90

A duração de CA 0-10 é o intervalo do ângulo de virabrequim entre a descarga da faísca da vela e o momento em que uma pequena fração da massa da mistura do cilindro foi queimada ou a energia química do combustível foi liberada, normalmente essa fração é de 10% da massa total foi queimada, é denominado período de desenvolvimento de núcleo de chama.

A duração de CA 10-90 é o intervalo do ângulo de virabrequim necessário para queimar de 10% até 90% da massa no cilindro. É definido como o intervalo entre o final do estágio de desenvolvimento do núcleo da chama (fração de 10%) e o fim do processo de propagação da chama (fração de 90%).

### 3.9.5 Variabilidade cíclica na combustão (CoV<sub>IMEP</sub>)

A estabilidade de operação do motor foi controlada pelo coeficiente de variação do IMEP em 100 ciclos, a variabilidade cíclica faz parte do processo de combustão no motor. O valor muito elevado prejudica de forma negativa o desempenho do motor, interferindo na eficiência e aumentando a emissão de gases poluentes.



Os principais motivos que ocasionam esta variabilidade são a homogeneidade e não uniformidade da mistura ar-combustível, a forma mais comum de representar a variabilidade ciclo a ciclo é pela covariância da pressão média efetiva indicada, num conjunto de ciclos que pode ser calculado pela Equação 6 (HEYWOOD, 2018).

$$\text{CoV}_{\text{IMEP}} \% = \frac{\sigma_{\text{IMEP}}}{\text{IMEP}_{\text{médio}}} \times 100 \quad (6)$$

Onde:

$\sigma$  IMEP = Desvio padrão do IMEP.

IMEP médio = Média de IMEP dos ciclos analisados.

### 3.9.6 Emissões específicas

Os dados de emissões obtidos em fração volumétrica (ppm) pelo analisador, foram convertidos para valores específicos (g/kWh), através da utilização de planilhas de Excel, com a utilização da norma CFR 40 (EPA, 2008), devido ao fato de que a legislação brasileira não dispõe de normas aplicáveis à motores de ignição por centelha, somente para uso em motores de ignição por compressão.

Na utilização da metodologia apresentada na norma CFR 40 é necessário realizar o cálculo da massa molecular dos compostos da exaustão (MMex). A massa molecular dos hidrocarbonetos totais (MMHC) é alcançada através da relação molar hidrogênio/carbono do combustível utilizado, com a utilização da Equação 7, possibilitando que esta norma seja aplicável para diferentes composições de combustível, como por exemplo, GNV, diferentes misturas de etanol e gasolina.

$$\text{MMex} = \frac{\text{MMHC} \cdot \text{ConcHC}}{10^6} + \frac{28,01 \cdot \text{ConcCO}}{10^2} + \frac{44,01 \cdot \text{ConcCO}_2}{10^2} + \frac{30,01 \cdot \text{ConcNOx}}{10^6} + 28,01 \cdot \frac{100 - \frac{\text{ConcHC}}{10^4} - \text{ConcCO} - \text{ConcCO}_2 - \frac{\text{ConcNOx}}{10^4}}{10^2} \quad (7)$$

Onde:

ConcHC = Concentração em ppm de HC.

ConcNOx = Concentração em ppm de NOx.

ConcCO = Concentração em % de CO.

ConcCO<sub>2</sub> = Concentração em % de CO<sub>2</sub>.

### 3.9.7 Eficiência de combustão

A eficiência de combustão representa a quantidade de energia do combustível desperdiçada por combustão incompleta e formação de hidrocarbonetos e pode ser calculado pela Equação 8 (HEYWOOD, 2018).

$$\eta_c = \left( 1 - \frac{(\sum \text{ConcHC}_i \cdot \text{LHV}_i) \cdot 2.778 \cdot 10^{-4}}{m_f \cdot \text{LHV}_f} \right) \cdot 100 \quad (8)$$

Onde:

LHV<sub>i</sub> = Poder calorífico de cada hidrocarboneto não queimado.

LHV<sub>f</sub> = Poder calorífico do combustível.

ConcHC<sub>i</sub> = concentração de cada hidrocarboneto não queimado.

### 3.9.8 Eficiência indicada (*indicated efficiency*)

A eficiência indicada representa a eficiência com que a energia do combustível foi transformada em trabalho pelo motor e pode ser calculado pela Equação 9 (HEYWOOD, 2018).

$$\eta_I = \frac{1}{m_f \cdot \text{LHV}} \oint_{\text{Ciclo}} p \, dV \quad (9)$$

## 4 RESULTADOS

Neste capítulo serão apresentados os resultados que alcançados seguindo o que foi proposta na metodologia do trabalho.

### 4.1 PARÂMETROS DE DESEMPENHO DO MOTOR

Nas Figura 10, Figura 11 e Figura 12 são apresentados os diagramas  $\log P \times \log V$  nas razões de compressão 11:6 e 14:3 para cargas de 3, 6 e 9 bar de IMEP operando com GNV, gasolina e etanol.

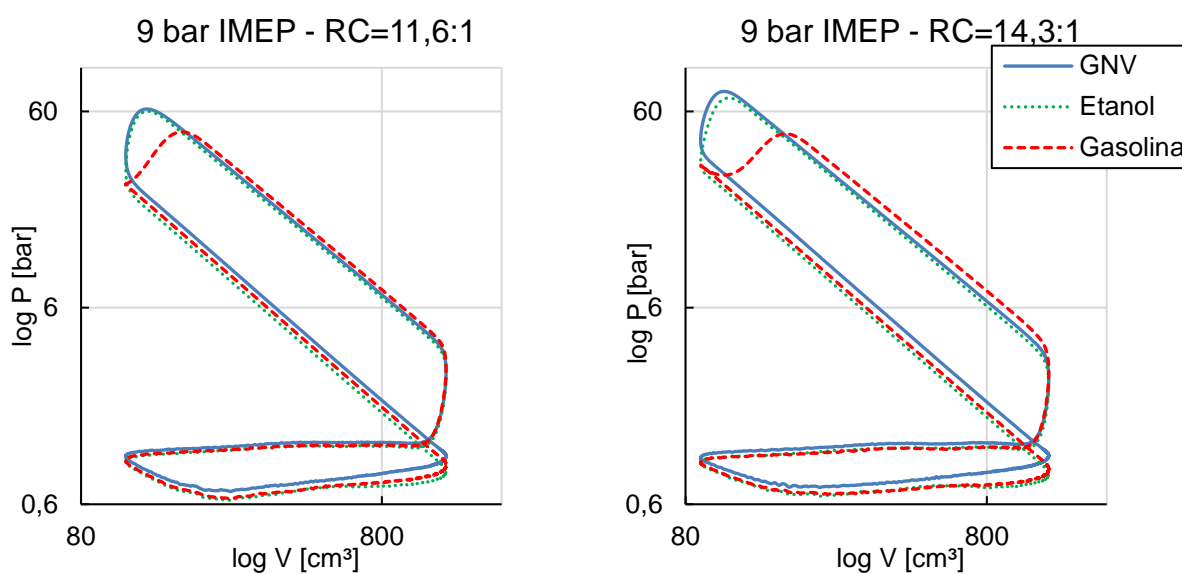
Para a carga de 9 bar de IMEP, a operação com GNV apresentou menores perdas de bombeamento devido ao combustível gasoso ocupar maior volume no coletor de admissão comparado aos combustíveis líquidos. Assim, maiores valores de pressão durante a compressão foram encontrados quando comparado com a operação com gasolina e com etanol. Esse fato se deu devido ao acréscimo de pressão parcial causada pelo gás, o que fez necessário restringir menos a admissão (utilizar maior abertura de borboleta) para poder induzir a quantidade de massa de combustível necessária para alcançar a carga desejada.

No que se remete à combustão, a operação com gasolina foi limitada pela ocorrência de detonação, tendo assim, uma ignição consideravelmente atrasada e fazendo com que a expansão tivesse maiores ordens de grandeza de pressão no cilindro quando comparada à operação com etanol e com GNV. Já o etanol e a gasolina apresentaram comportamento de pressões semelhantes em razão da possibilidade de operação em MBT (definido para o teste como 50% de massa queimada em 8 graus após o ponto morto superior). Esses comportamentos se estenderam para as cargas de 6 bar e 3 bar de IMEP, sendo assim, características oriundas da intrínseca operação do motor com cada dado combustível.

Comparando os resultados de cada respectiva carga para as razões de compressão de 11,6:1 e 14,3:1, observou-se que para a carga de 9 bar de IMEP, foi necessário atrasar ainda mais a ignição na maior razão de compressão e operação com gasolina, comprometendo ainda mais a combustão com gasolina e gerando uma maior discrepância comportamental quando comparado com a operação com etanol e com GNV. Observando os resultados em todas as cargas, notou-se que o efeito do incremento da razão de compressão aumentou as diferenças de pressão entre a

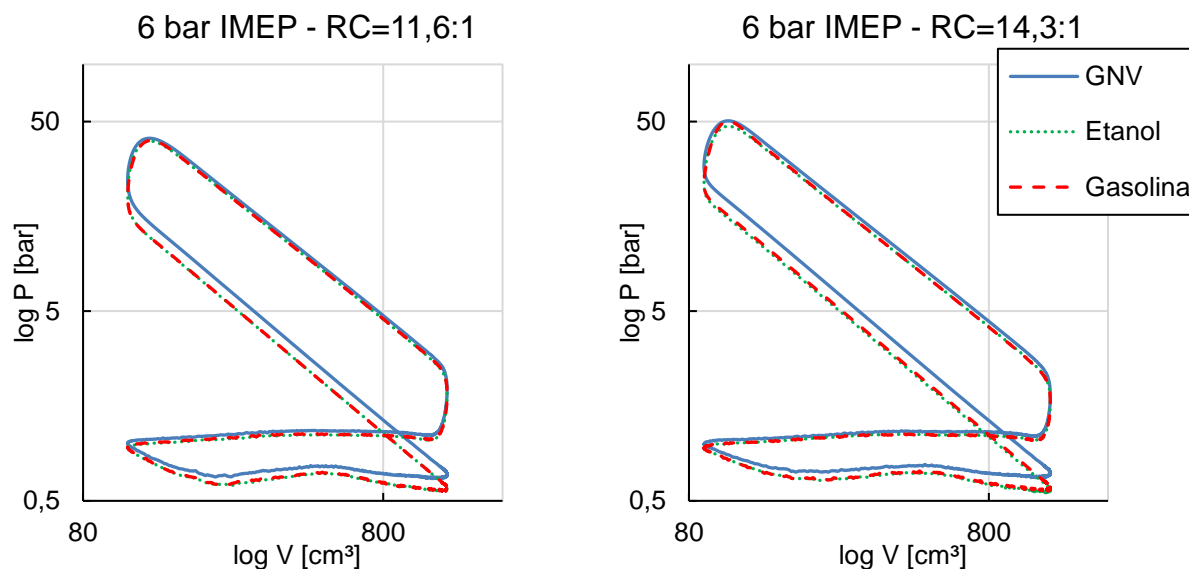
operação com os combustíveis estudados. Contudo, mantiveram-se as características operacionais observadas: combustíveis líquidos (etanol e gasolina) com maior trabalho de bombeamento e menores níveis de pressão durante a compressão, combustível gasoso (GNV) com menor trabalho de bombeamento e maiores ordens de pressão durante a compressão para compensar a dificuldade de se admitir um combustível com uma densidade bastante baixa. Já os menores níveis de pressão durante a compressão quando se utilizou etanol – efeito presente em todas as cargas para RC de 14,3 e para a carga de 9 bar IMEP para a RC de 11,6 – pode ser atribuído ao arrefecimento da mistura (*cooling effect*) gerado pelo maior calor latente de vaporização do etanol.

Figura 10 - Gráfico log P x log V nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1 para cargas de 9 bar de IMEP operando com GNV, gasolina e etanol.



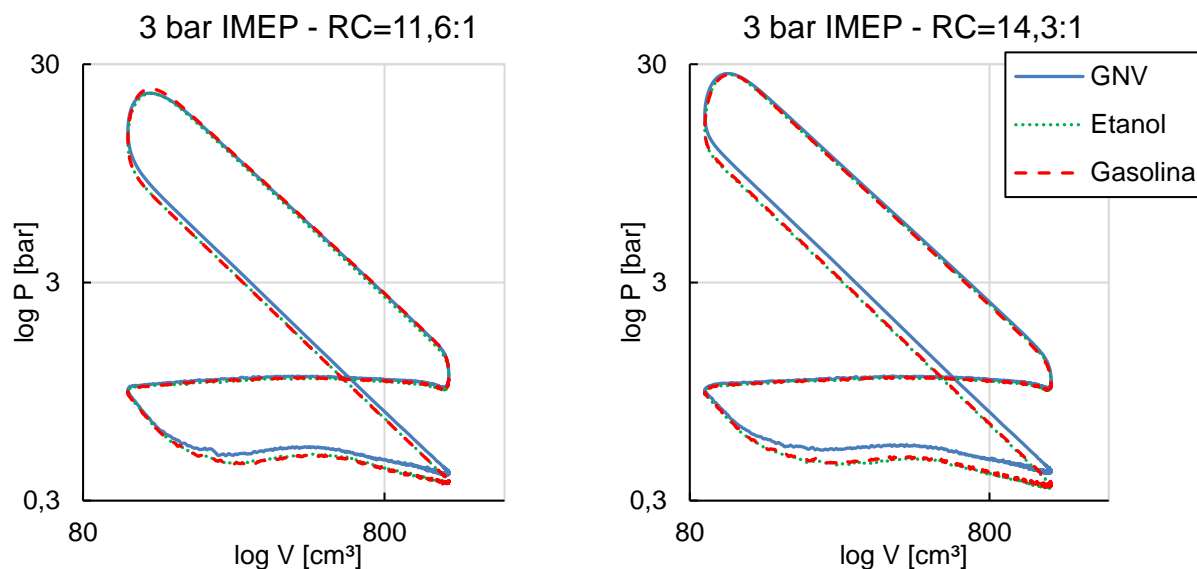
Fonte: Autor, (2022).

Figura 11 - Gráfico log P x log V nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1 para cargas de 6 bar de IMEP operando com GNV, gasolina e etanol.



Fonte: Autor, (2022).

Figura 12 - Gráfico log P x log V nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1 para cargas de 3 bar de IMEP operando com GNV, gasolina e etanol.



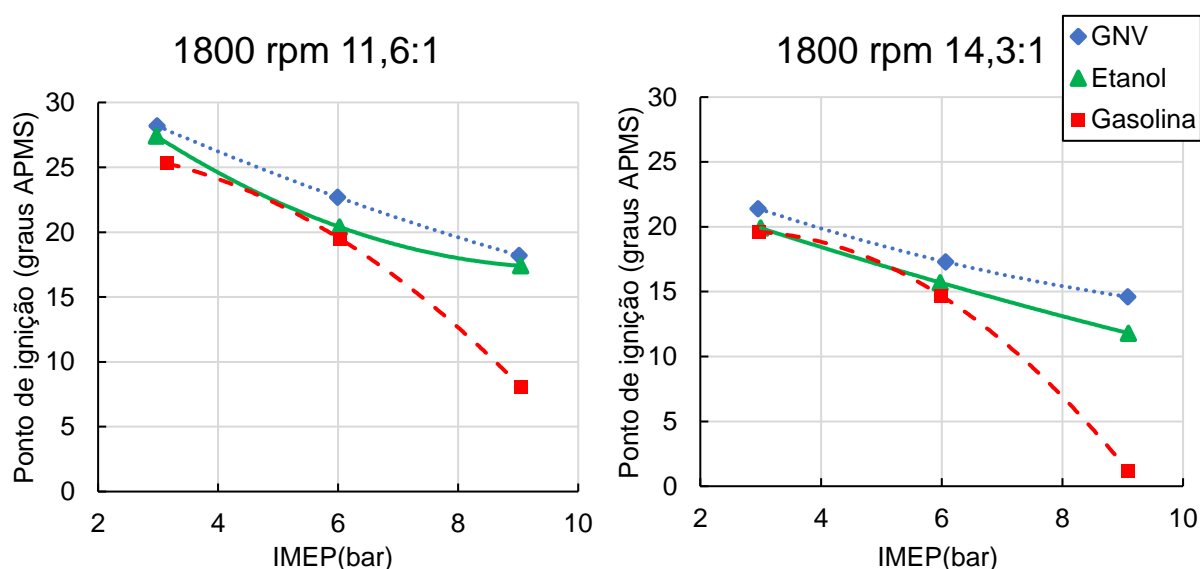
Fonte: Autor, (2022).

A Figura 13 apresenta os dados do ponto de ignição utilizado com cada combustível em cada uma das cargas operadas para as duas razões de compressão ensaiadas. Para a razão de compressão de 11,6:1 é possível ver o grande atraso de

ignição necessário na operação com gasolina para mitigação de detonação, além de também mostrar que em carga de 3 e 6 bar de IMEP é possível utilizar o ponto de ignição da gasolina semelhante ao etanol. Já para o GNV, foi necessário utilizar avanço de ignição mais adiantado, em relação ao etanol e em todas as cargas, a fim de obter-se o centro da combustão de acordo com o critério metodológico de MBT.

Já na razão de compressão 14,3:1 foi possível perceber que o ponto de ignição foi atrasado em torno de 7 graus para todos os combustíveis e cargas quando comparado com a razão 11,6:1. Explica-se pelo aumento da temperatura, da pressão, dentro do cilindro. Nas cargas de 3 e 6 bar de IMEP, todos os combustíveis apresentaram tendências semelhantes em ambas as razões de compressão. Enquanto na carga de 9 bar de IMEP, o ponto de ignição da gasolina teve de ser consideravelmente atrasado em relação aos outros combustíveis, mas ainda adiantado em relação ao PMS. De modo similar, o etanol necessitou leve atraso no ponto de ignição também para mitigação de *knock*, porém em proporções menores.

Figura 13 - Ponto de ignição dos três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.

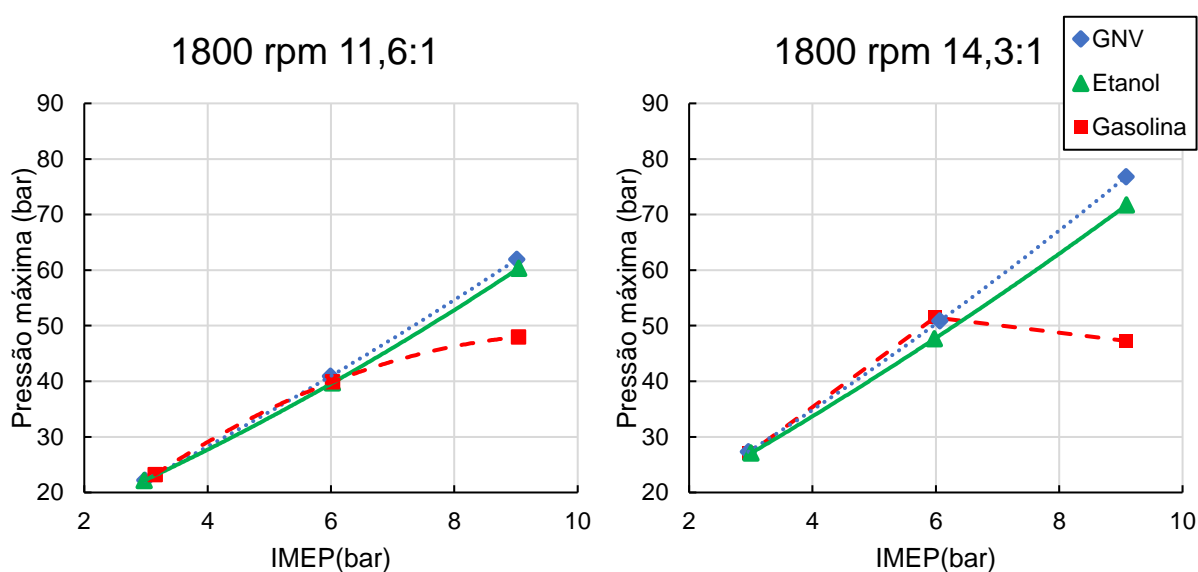


Fonte: Autor, (2022).

Os valores de pressão máxima no cilindro dos três combustíveis analisados são apresentados na Figura 14, nas duas razões de compressão. Para operação com GNV com razão de compressão de 11,6:1 e carga de 9 bar de IMEP alcançou-se

aproximadamente 14 bar de pressão máxima do cilindro a mais que alcançado com gasolina, e cerca de 2 bar a mais em relação ao etanol. Na razão de compressão de 14,3:1 em carga de 9 bar de IMEP o incremento foi de aproximadamente 30 bar de pressão máxima do cilindro com relação à gasolina, e cerca de 5 bar a mais em relação ao etanol. Tal comportamento se deu devido as propriedades do combustível, principalmente em razão da resistência a detonação que limitou o ponto de ignição durante operação do motor com gasolina, também limitando a pressão máxima no cilindro alcançada, para as cargas de 3 e 6 bar de IMEP as pressões máximas ficaram muito próximas.

Figura 14 – Pressão máxima no cilindro dos três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.



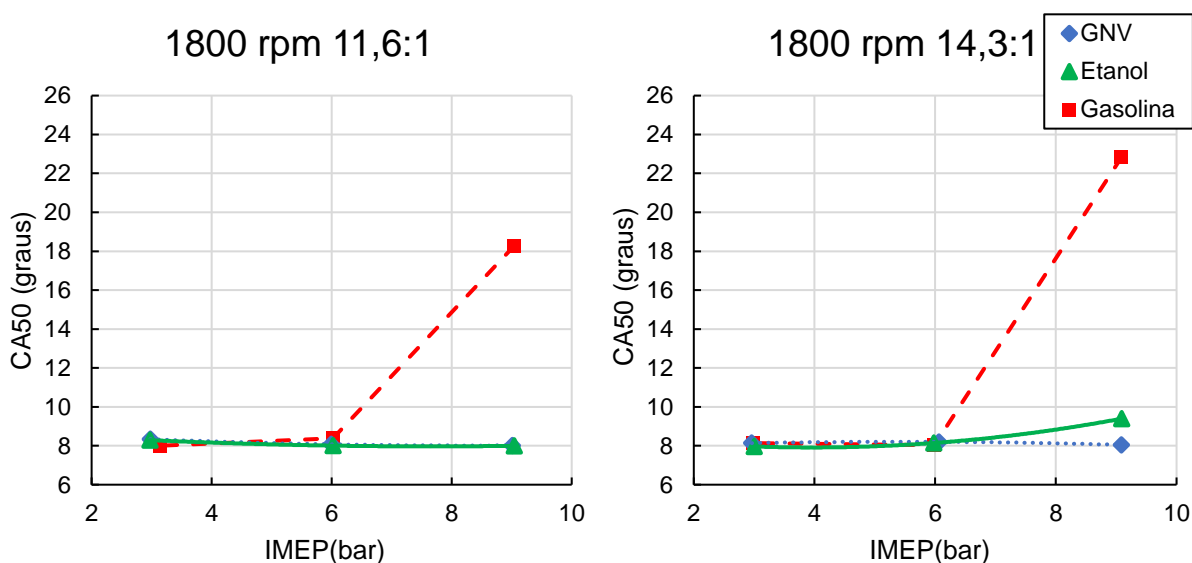
Fonte: Autor, (2022).

Os experimentos foram realizados tendo como condição alvo manter o ângulo de 50% de massa queimada (CA50) no entorno de 8 graus depois do ponto morto superior (DPMS), tal como pode ser visto na Figura 15. Na razão de compressão de 11,6:1 o ângulo de pressão máxima se manteve ao redor de 13 graus DPMS conforme pode ser visto na Figura 16. Contudo, devido à necessidade do atraso de ignição na carga de 9 bar de IMEP para mitigação de detonação operando com gasolina, houve um atraso significativo de 10 graus no ângulo de pressão máxima com gasolina, do

entorno de 13 graus para 23 graus DPMS. Em consequência desse atraso, a fase da combustão, o CA50, partiu de 8 graus DPMS para 18 graus DPMS.

Já com a razão de compressão de 14,3:1, conforme pode ser visualizado na Figura 15, o ângulo de 50% de massa queimada (CA50) se manteve no entorno de 8 graus depois do ponto morto superior (DPMS) em cargas de 3 e 6 bar IMEP. Devido à necessidade de atraso de ignição para mitigação de detonação na carga de 9 bar de IMEP quando em operação com gasolina e etanol, o ângulo de pressão máxima com gasolina teve um atraso significativo de 15 graus (de aproximadamente 12 graus para 27 graus DPMS) enquanto o etanol teve um atraso de aproximadamente 1 grau, conforme pode ser visualizado Figura 16.

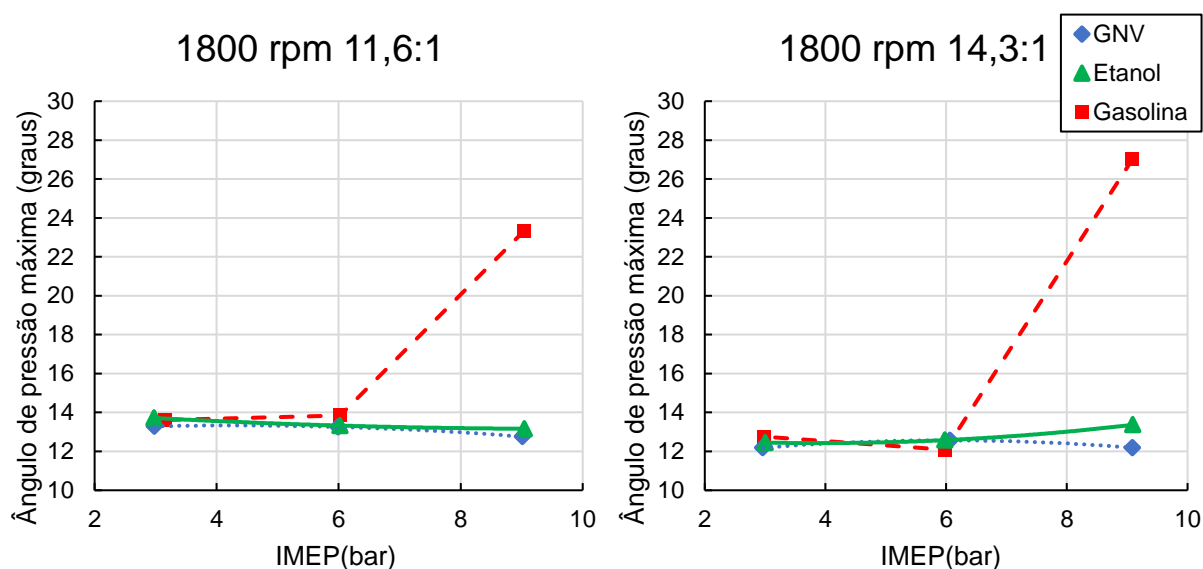
Figura 15 - Angulo de 50% de massa queimada (CA50) dos três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.



Fonte: Autor, (2022).



Figura 16 – Ângulo de pressão máxima dos três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.



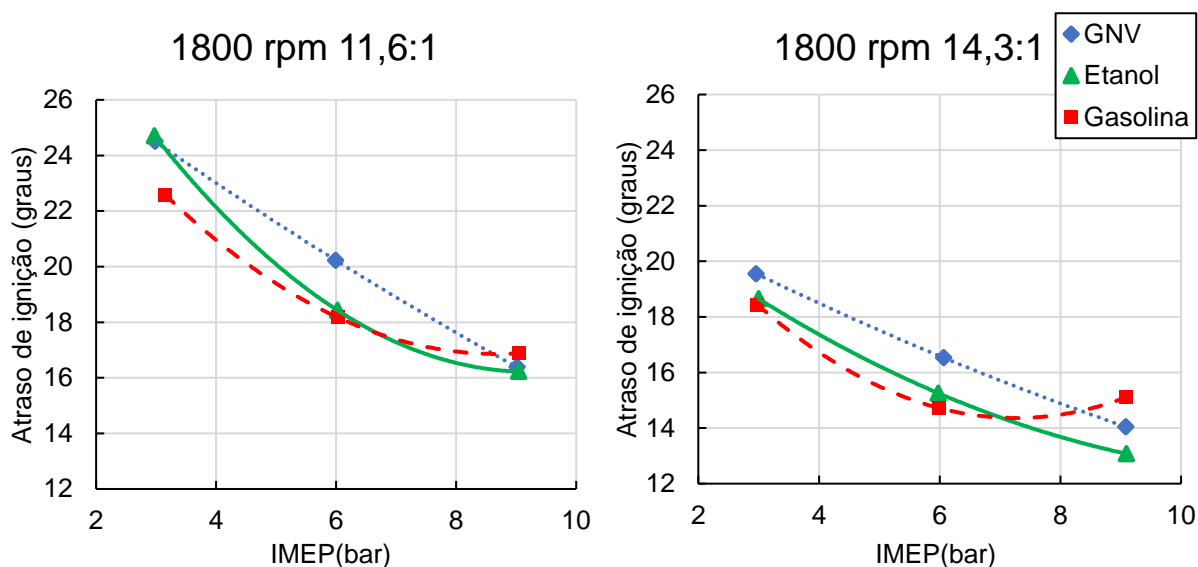
Fonte: Autor, (2022).

No que se refere à combustão, a Figura 17 apresenta período de desenvolvimento de chama (PDC) para cada combustível, nas duas razões de compressão. O período de desenvolvimento de chama compreende o ângulo entre a centelha o ângulo de 10% de massa queimada, o que corresponde ao tempo decorrido para a formação do núcleo da chama.

Para a razão de compressão de 11,6:1, o PDC da gasolina mostrou-se ser menor do que o PDC do etanol e GNV para cargas de 3 bar e 6 bar de IMEP, comportamento que se inverteu para a carga de 9 bar de IMEP. Essa inversão da gasolina se deu em razão da limitação do avanço de ignição para mitigação de detonação. O menor atraso de ignição da gasolina em comparação com os outros combustíveis se deu devido à maior reatividade desse combustível, característica também que influencia na maior tendência de ocorrência do fenômeno de detonação, fato que fica evidente pela duração da rápida queima apresentado na Figura 18, onde são apresentadas as durações da fase principal de combustão (CA10-90), definida como o intervalo entre 10% e 90% de massa de combustível queimada. Adicionalmente, o etanol teve o mesmo PDC que o GNV, exceto para a carga de 6 bar de IMEP, onde se obteve um menor atraso de ignição. Esses comportamentos também foram observados para a razão de compressão de 14,3:1. Contudo, o

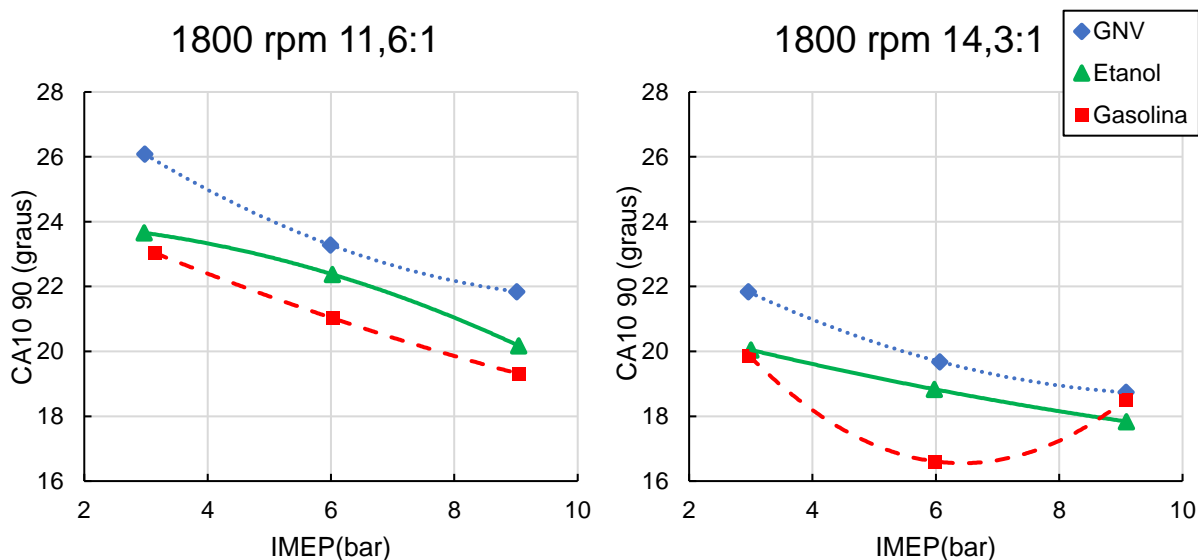
comportamento do etanol teve uma diferença de cerca de 1 grau de atraso de ignição com relação ao GNV. Tanto o PDC quanto o CA10-90 diminuíram com o aumento de carga devido às maiores pressões e temperaturas alcançadas com o aumento de massa de combustível necessário para alcance de carga.

Figura 17 - Atraso de ignição dos três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.



Fonte: Autor, (2022).

Figura 18 – CA1090 para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.

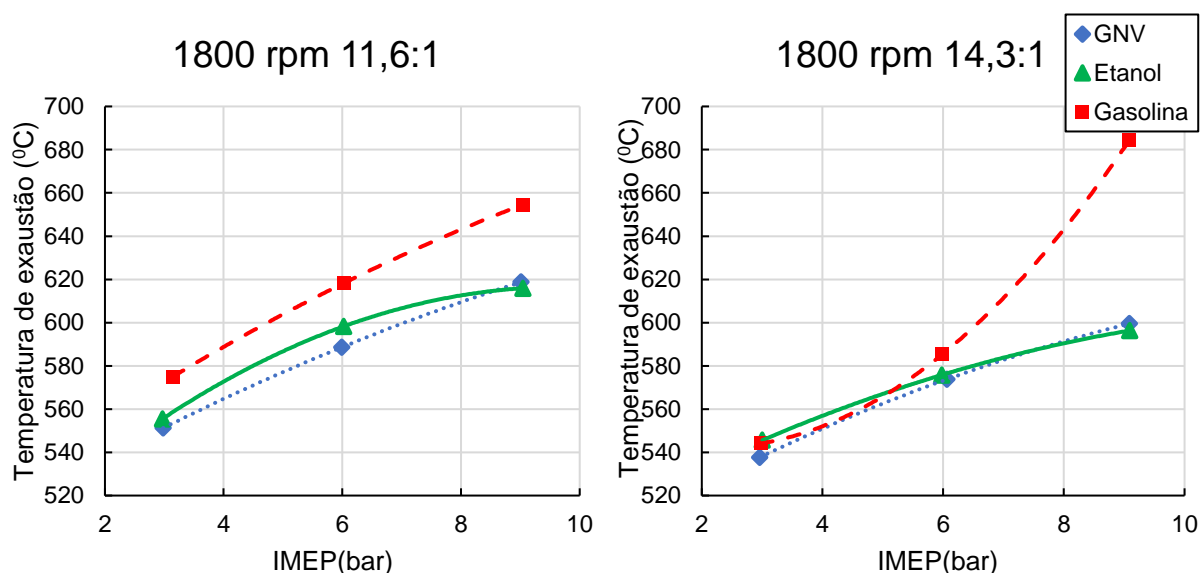


Fonte: Autor, (2022).

A Figura 19 apresenta a temperatura dos gases de exaustão na porta de exaustão do motor. Na razão de compressão 11,6:1 a gasolina atingiu os maiores valores em todas as cargas testadas, já com o etanol e GNV foi possível operar com temperaturas menores nas condições testadas. A maior temperatura de exaustão, 654 °C foi encontrada para a carga de 9 bar de IMEP com gasolina devido ao ponto de ignição atrasado que resultou em queima mais tardia da mistura durante a fase de expansão, consequentemente aumentado a temperatura de exaustão.

Já na razão de compressão de 14,3:1 em carga de 3 bar de IMEP os três combustíveis apresentaram temperaturas semelhantes, ao passo que em se aumentando a carga para 6 bar de IMEP, o etanol e o GNV apresentam temperaturas semelhantes entre si, enquanto a gasolina apresentou a temperatura mais elevada. Em 9 bar de IMEP pode-se observar a grande diferença de temperatura entre a gasolina e os demais combustíveis devido ao atraso de ignição, como previamente comentado.

Figura 19 - Temperatura de exaustão para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.



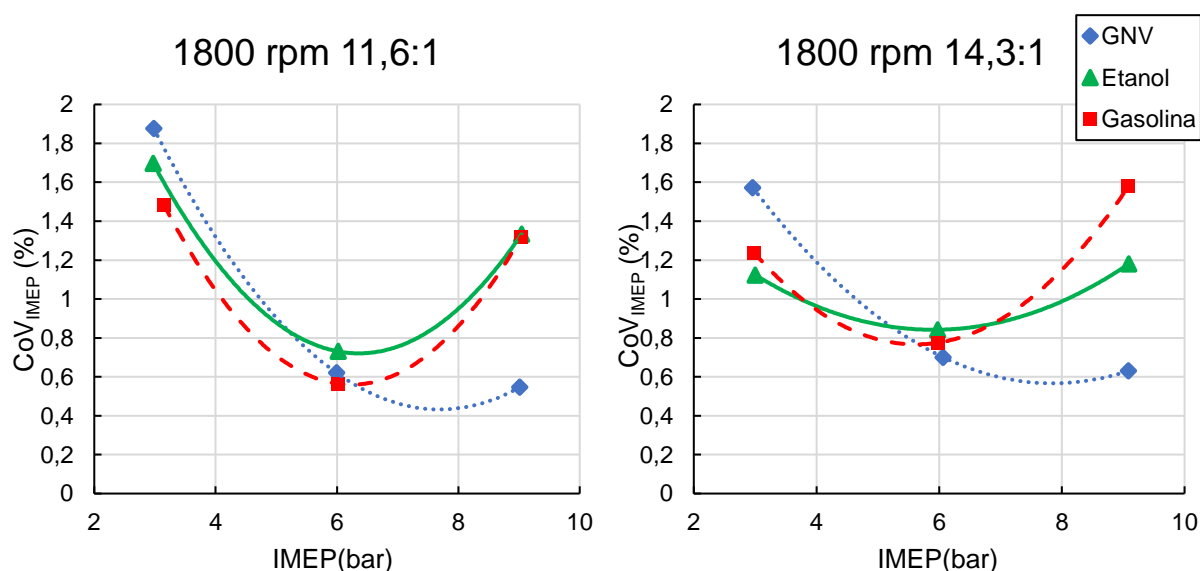
Fonte: Autor, 2022.

Os valores do comportamento da variabilidade cíclica da combustão para cada combustível são apresentados na Figura 20, nas duas razões de compressão. Em 3 bar de IMEP, o GNV se mostrou o mais instável em ambas as razões de compressão,

tendo uma variação mais elevada que a gasolina e o etanol. Fato que não se repete para carga a 6 bar de IMEP que apresentou valores semelhantes em todos os combustíveis testados. Com o aumento da carga para 9 bar de IMEP, o GNV se mostrou melhor que a gasolina e o etanol.

Essa característica aponta que em carga mais elevada, tal como usado em sistemas de geração de energia elétrica, o motor forneceria energia de forma mais estável. Essa maior instabilidade do GNV em carga de 3 bar de IMEP perante os outros combustíveis foi consequência de maior PDC e maior CA10-90. Conforme Aleiferis et al., 2004, a variabilidade do PDC aumenta com sua duração e isso causa maior variabilidade cíclica do motor. Adicionalmente, conforme pode ser visto na Figura 18, a duração da queima rápida nas duas razões de compressão foi cerca de 2 graus mais lenta do que a queima de gasolina e de etanol, apontando uma possível maior transferência de calor para o bloco na queima do GNV. Fato que contribui para uma maior variabilidade na combustão ciclicamente.

Figura 20 -  $CoV_{IMEP}$  para os três combustíveis analisados nas analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.



Fonte: Autor, 2022.

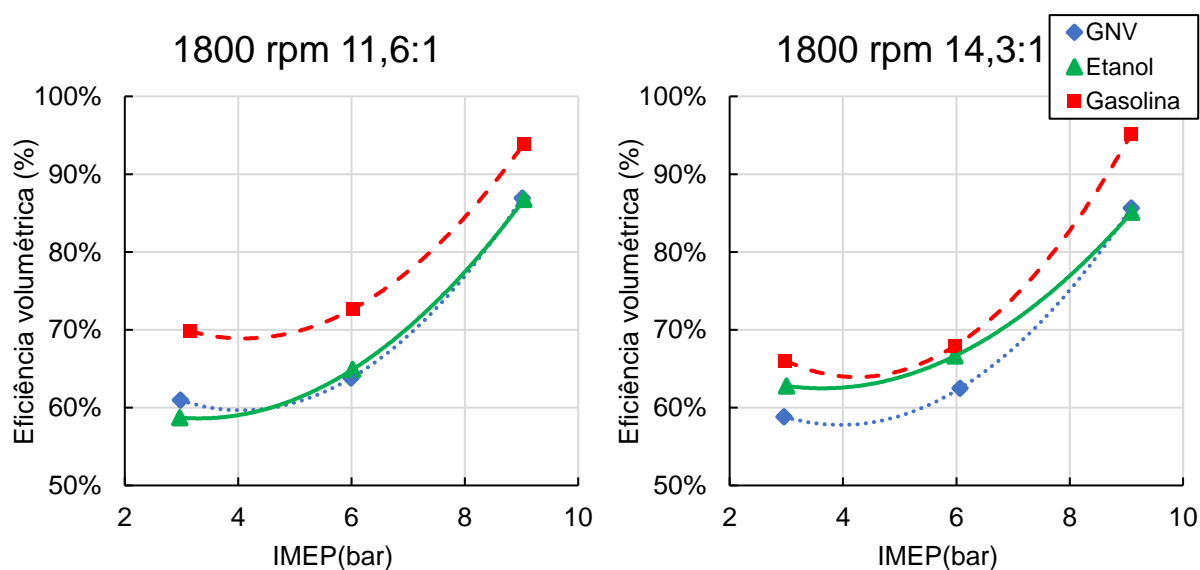
## 4.2 PARÂMETROS DE EFICIÊNCIA

A seguir serão avaliados os resultados de eficiência volumétrica, eficiência conversão de combustível indicada, eficiência de combustão, consumo específico de combustível indicado (ISFC) para os três combustíveis obtidos nos ensaios realizados.

Os parâmetros de eficiência volumétrica são apresentados na Figura 21, pode-se observar que devido ao GNV ser um combustível gasoso, ele ocupa mais espaço no volume do cilindro quando comparado aos combustíveis líquidos, com isso diminuindo a eficiência volumétrica do GNV em relação aos outros combustíveis, em todas as cargas ensaiadas.

Os valores de eficiência volumétrica são menores em carga de 3 bar de IMEP, ao passo que, ao aumentar a carga para 6 bar de IMEP, a eficiência aumenta em torno de 4%, para todos os combustíveis, nas duas razões de compressão. Em 9 bar de IMEP a eficiência sobe para em torno de 94% com gasolina na razão de compressão 11,6:1 e em torno 95% na razão de compressão 14,3:1, enquanto o etanol e GNV ficam em torno de 87% na razão de compressão 11,6:1 e em torno 85% na razão de compressão 14,3:1.

Figura 21 - Eficiência volumétrica para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.



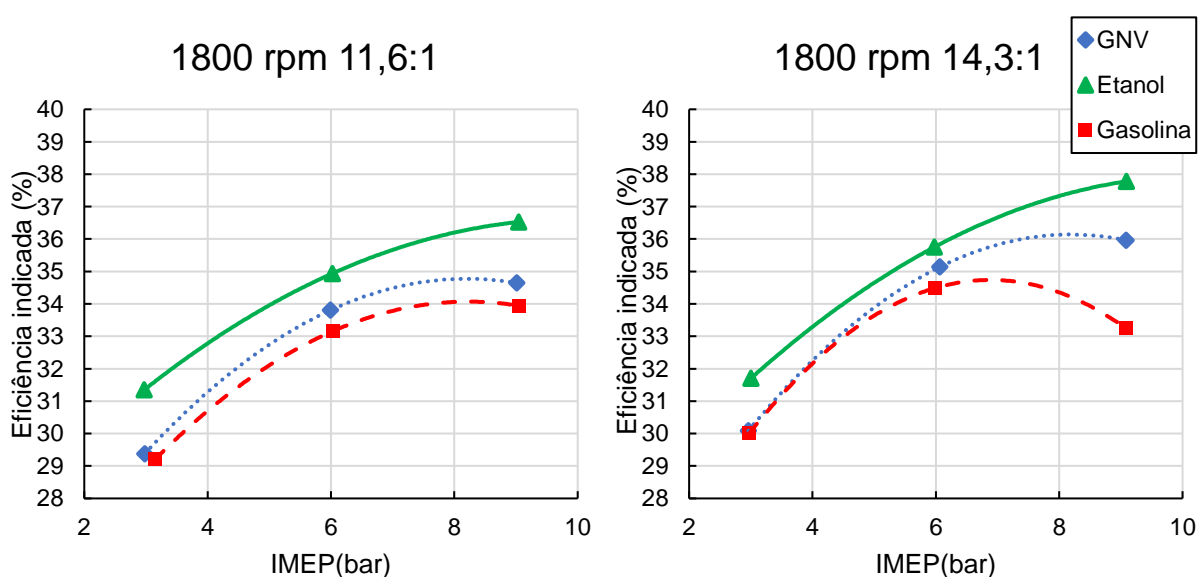
Fonte: Autor, (2022).

Na Figura 22 são apresentados os resultados de eficiência de conversão de combustível indicada, para as duas razões de compressão. Os índices ficaram em torno de 29% para gasolina e GNV e 31% com etanol, em carga 3 bar de IMEP, na razão de compressão 11,6:1. Enquanto na razão de compressão 14,3:1 a eficiência com gasolina e o GNV sobe para em torno de 30% e com etanol para em torno de 32%. Ao passo que se avança para carga de 6 bar de IMEP, atinge-se 33% de eficiência para gasolina, 34% com GNV e 35% para etanol na razão de compressão 11,6:1. Enquanto na razão de compressão 14,3:1, a eficiência com gasolina sobe para em torno de 34%, e com GNV para 35% e com etanol para em torno de 36%.

Já em carga 9 bar de IMEP atingem-se os melhores índices de eficiência, chegando a 36% para o etanol, 35% para GNV e 34% para gasolina na razão de compressão 11,6:1. Enquanto na razão de compressão 14,3:1 a eficiência com gasolina cai para em torno de 33%, com GNV sobe para 36% e com etanol fica em torno de 38%. Este resultado evidencia que utilização do GNV é viável em termos de eficiência para todas as cargas ensaiadas.

É importante ressaltar que no cálculo da eficiência de conversão de combustível é levado em consideração o poder calorífico inferior do combustível, que pode ter algumas variações em relação ao valor utilizado a partir da literatura (Tabela 4).

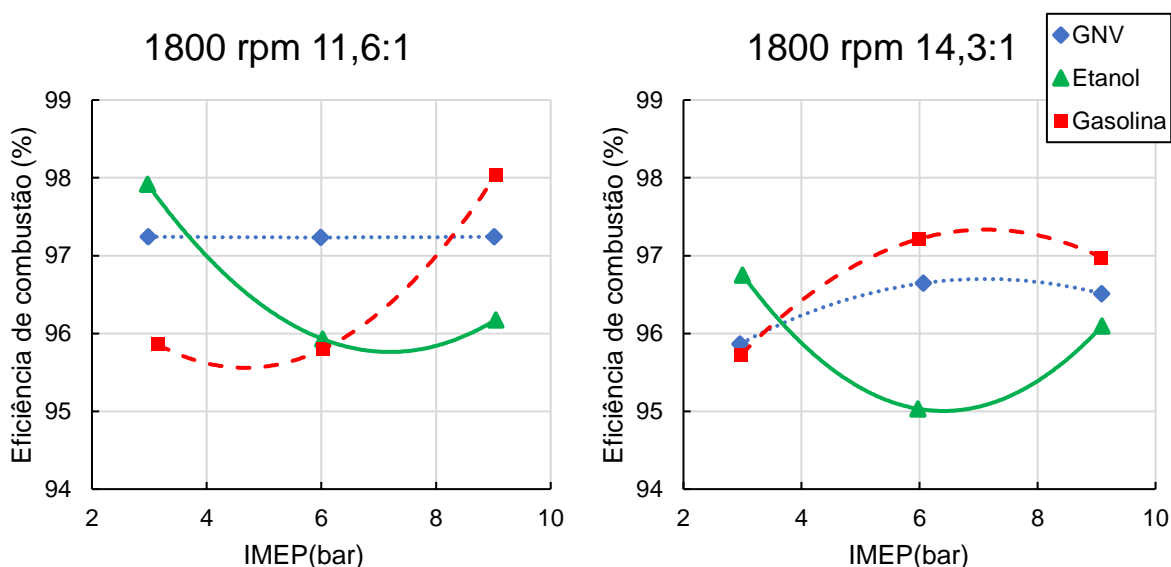
Figura 22- Eficiência de conversão de combustível indicada para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.



No que se refere a eficiência de combustão pode-se visualizar na Figura 23 os gráficos para as duas razões de compressão. Verifica-se que o GNV se manteve em torno de 97% de eficiência em todas as cargas ensaiadas, na razão de compressão 11,6:1. Já com gasolina manteve-se próximo a 96% na carga de 3 e 6 bar de IMEP, aumentou para 98% em 9 bar de IMEP, com etanol a eficiência em torno de 98% na carga de 3 bar de IMEP e diminuiu para em torno de 96% nas cargas de 6 e 9 bar de IMEP.

Na razão de compressão 14,3:1 a eficiência de combustão se manteve em torno de 96% com GNV e gasolina em 3 bar de IMEP, aumentou para em torno de 97% com etanol. Na carga de 6 bar de IMEP a gasolina e o GNV aumentaram para em torno de 97% e o etanol diminuiu para 95%, na carga de 9 bar de IMEP a gasolina se manteve com 97%, o GNV ficou com 96,5% e o etanol aumentou para 96%.

Figura 23 - Eficiência de combustão para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.



Fonte: Autor, (2022).

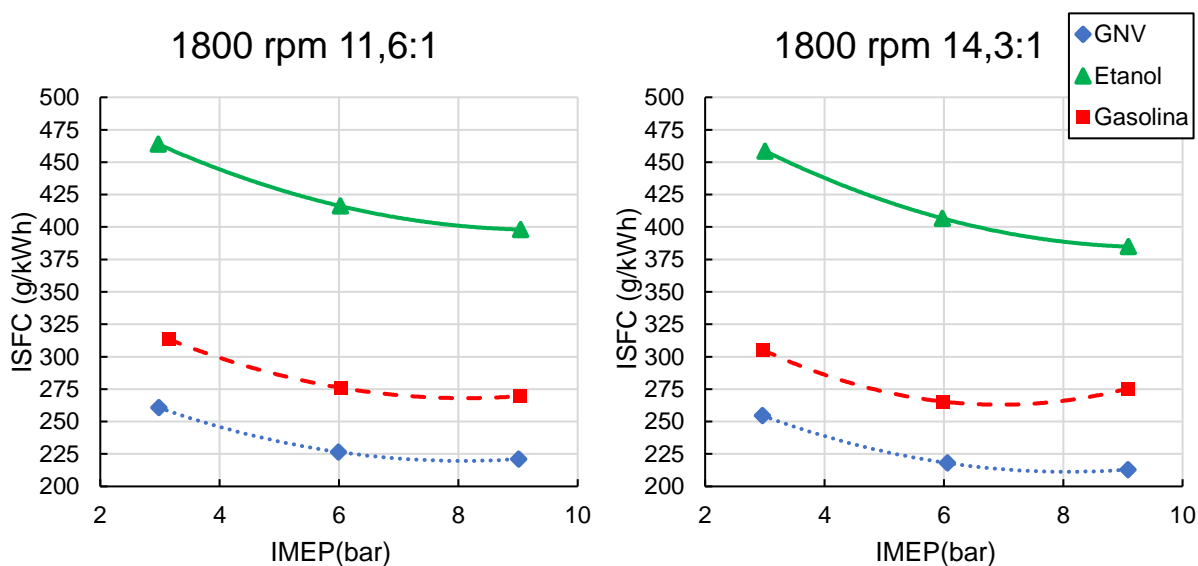
Pode-se observar na Figura 24 os parâmetros de consumo específico de combustível indicado, para as duas razões de compressão. Com carga de 3 bar de IMEP na razão de compressão 11,6:1 o etanol apresentou o consumo de 463 g/kWh, que foi o valor de maior consumo específico, já com gasolina diminuiu para 313 g/kWh, enquanto com GNV apresentou o valor de 260 g/kWh. Na razão de compressão 14,3:1

o consumo de etanol diminuiu para 458 g/kWh, já com gasolina diminuiu para 305 g/kWh, enquanto com GNV apresentou o menor valor de consumo na carga de 6 bar de IMEP que foi de 254 g/kWh.

Com a carga de 6 bar de IMEP o consumo específico de combustível apresentou a tendência de queda, que chegou 416 g/kWh com etanol na razão de compressão 11,6:1, a 276 g/kWh com gasolina e 226 g/kWh. Com a razão de compressão 14,3:1 o consumo de etanol diminuiu para 406 g/kWh, já com gasolina diminuiu para 265 g/kWh, enquanto com GNV apresentou o menor valor de consumo na carga de 3 bar de IMEP que foi de 217 g/kWh.

Na carga para 9 bar de IMEP o consumo específico de combustível segue a tendência de queda de consumo que chegou 398 g/kWh com etanol na razão de compressão 11,6:1, a 269 g/kWh com gasolina e 221 g/kWh. Já na razão de compressão 14,3:1 o consumo de etanol diminuiu para 384 g/kWh, já com gasolina aumentou para 275 g/kWh, enquanto com GNV apresentou o menor valor de consumo na carga de 9 bar de IMEP que foi de 213 g/kWh. Os valores de consumo específico com GNV evidenciam que a utilização do combustível em motores se torna viável e vantajoso.

Figura 24 - Consumo específico de combustível indicado (ISFC) para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.

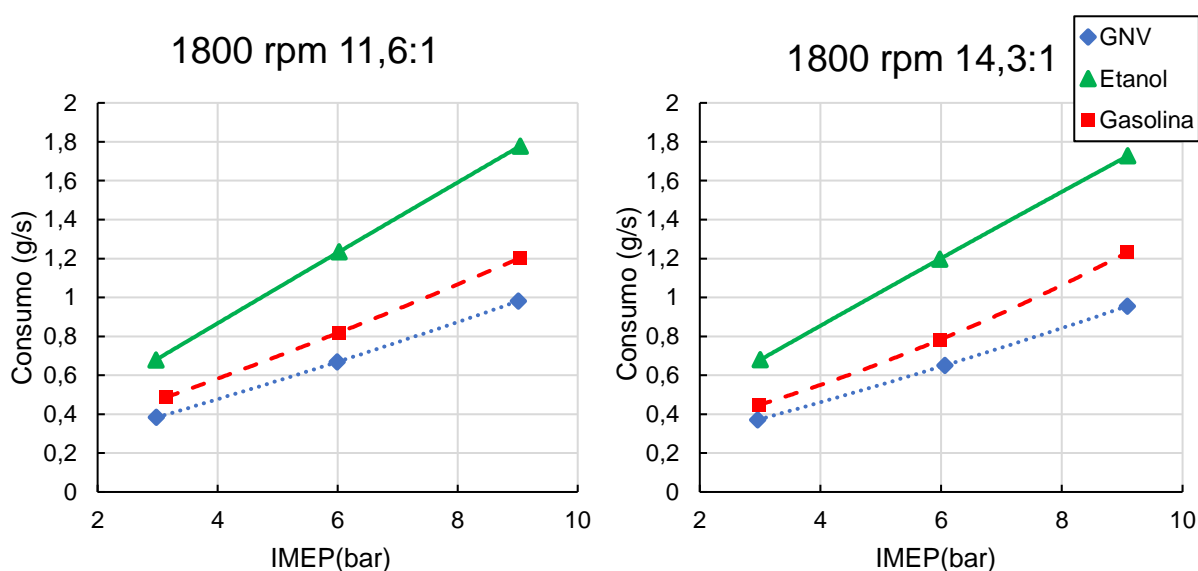




Na Figura 25 são apresentados os valores de consumo mássico de cada combustível operando com 3, 6 e 9 bar de IMEP, nas duas razões de compressão. Na figura, observa-se que o GNV apresentou os menores valores em comparação com o etanol e a gasolina para todas as cargas, em ambas as razões de compressão. Na carga de 3 bar de IMEP em razão de compressão 11,6:1, o GNV consumiu cerca de 0,38 g/s, a gasolina 0,48 g/s e o etanol 0,67 g/s, já razão de compressão 14,3:1 o GNV consumiu cerca de 0,37 g/s, a gasolina 0,44 g/s e o etanol 0,67 g/s.

Na carga de 6 bar de IMEP em razão de compressão 11,6:1, o GNV consumiu cerca de 0,66 g/s, a gasolina 0,81 g/s e o etanol 1,23 g/s, já razão de compressão 14,3:1 o consumo de GNV diminuiu para cerca de 0,65 g/s, a gasolina para 0,78 g/s e o etanol para 1,19 g/s. Em carga de 6 bar de IMEP na razão de compressão 11,6:1, o GNV consumiu cerca de 0,98 g/s, a gasolina 1,2 g/s e o etanol 1,77 g/s, já razão de compressão 14,3:1 o consumo de GNV diminuiu para cerca de 0,95 g/s, o etanol para 1,72 g/s e a gasolina aumenta para 1,23 g/s. Esses resultados evidenciam que o GNV consome uma menor quantidade de massa de combustível, quando comparada a gasolina e ao etanol.

Figura 25 – Consumo para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.



Fonte: Autor, (2022).

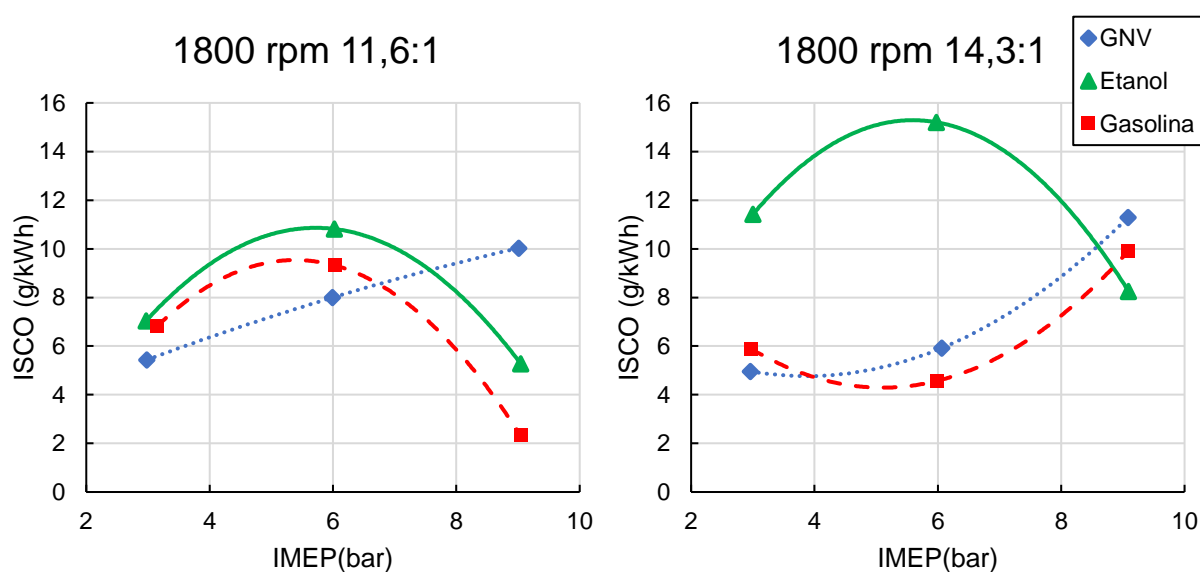
### 4.3 EMISSÕES

Neste tópico serão apresentados os resultados referentes as emissões de gases.

Na Figura 26 são apresentados os resultados das emissões de monóxido de carbono (ISCO), para as duas razões de compressão. Foi possível observar na razão de compressão 11,6:1 em carga de 3 bar de IMEP que o GNV apresentou os menores índices de emissões quando comparado com a gasolina e o etanol, em carga de 6 bar de IMEP as emissões de CO foram semelhantes para GNV e gasolina e foram maiores para o etanol, na carga de 9 bar de IMEP os menores índices foram da gasolina enquanto o etanol ficou no nível intermediário e o GNV atingiu os maiores índices de emissões.

Na razão de compressão 14,3:1 em cargas de 3 e 6 bar de IMEP as emissões de CO com gasolina e GNV são um pouco menores quando comparados com a razão de compressão anterior, e as emissões de etanol aumentaram para 11 e 15 g/kWh respectivamente, já em carga de carga de 9 bar de IMEP as emissões de CO aumentaram para todos os combustíveis.

Figura 26 - Emissões de monóxido de carbono indicado (ISCO) para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.



Fonte: Autor, (2022).

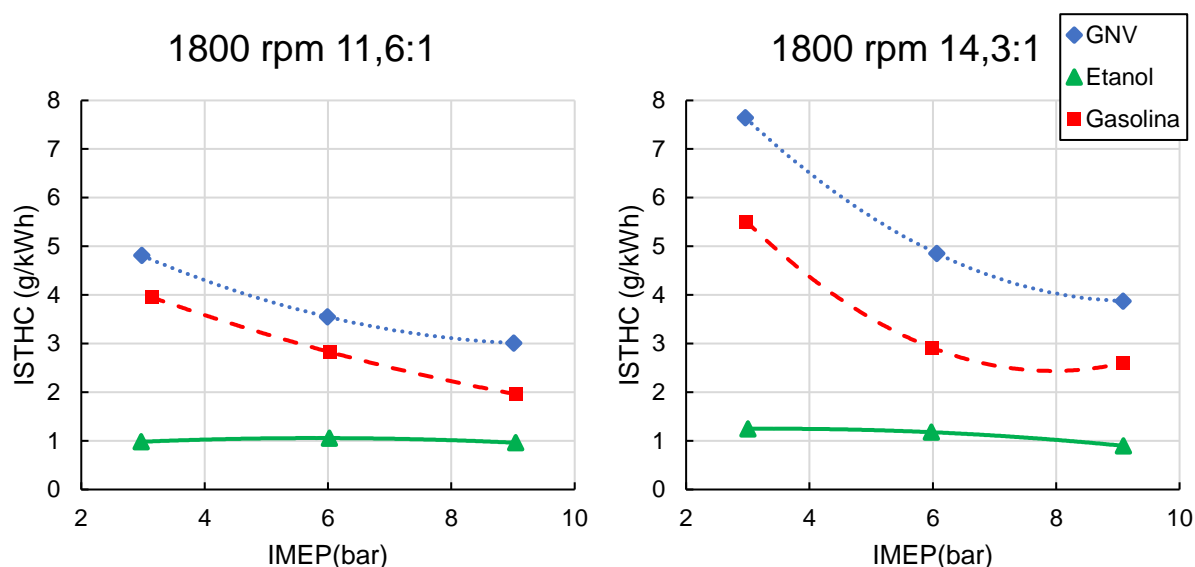
Conforme a Figura 27 são apresentados os valores do total de emissões de hidrocarbonetos indicados, para as duas razões de compressão. Em carga 3 bar de IMEP na razão de compressão de 11,6:1 as emissões totais de hidrocarbonetos foram de 4,81 g/kWh para o GNV, de 3,94 g/kWh para gasolina e 1 g/kWh para o etanol, enquanto na razão de compressão 14,3:1 aumentaram para 7,64 g/kWh para o GNV, aumentaram para 5,51 g/kWh para gasolina e ficaram próximas a 1 g/kWh para o etanol.

Já em carga de 6 bar de IMEP na razão de compressão de 11,6:1 as emissões totais de hidrocarbonetos foram 3,55 g/kWh para o GNV, 2,82 g/kWh para gasolina e 1 g/kWh para o etanol, enquanto na razão de compressão 14,3:1 aumentaram para 4,85 g/kWh para o GNV, aumentaram para 2,91 g/kWh para gasolina e ficaram próximas a 1 g/kWh para o etanol.

Em carga de 9 bar de IMEP na razão de compressão de 11,6:1 as emissões totais de hidrocarbonetos foram 3,01 g/kWh para o GNV, de 1,92 g/kWh para gasolina e ficaram próximas a 1 g/kWh para o etanol, enquanto na razão de compressão 14,3:1 aumentaram para 3,87 g/kWh para o GNV, aumentaram para 2,6 g/kWh para gasolina e ficaram próximas a 1 g/kWh para o etanol.

Os elevados valores de emissões de ISTHC com GNV, explica-se pelos valores elevados de emissões de metano que podem ser observados na Figura 28, pois o total de emissões de hidrocarbonetos é soma dos hidrocarbonetos simples como o metano (CH<sub>4</sub>) e dos hidrocarbonetos não metano (NMHC).

Figura 27 - Total de emissões de hidrocarbonetos indicados (ISTHC) para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.

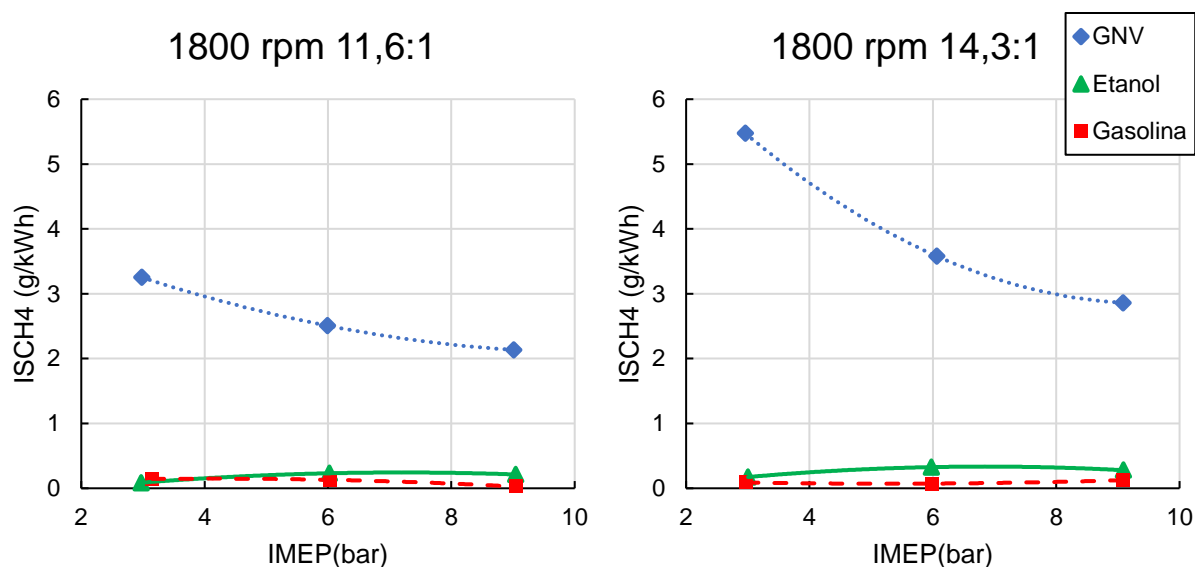


Fonte: Autor, (2022).

Na Figura 28 são apresentadas as emissões de metano ( $\text{CH}_4$ ), para as duas razões de compressão, que para combustíveis líquidos espera-se pouco ou quase nula as emissões desse componente, já para o GNV espera-se quantidades maiores devido a sua composição. As emissões de GNV foram maiores em carga 3 bar de IMEP na razão de compressão 14,3:1 com 5,47 g/kWh, com a razão de compressão 11,6:1 as emissões diminuíram para 3,25 g/kWh. À medida que se aumenta a carga 6 bar de IMEP as emissões diminuíram em ambas as razões de compressão, atingindo 3,57 g/kWh na razão de compressão 14,3:1 e 2,5 g/kWh na razão de compressão 11,6:1. Já na carga de 9 bar de IMEP as emissões seguiram a tendencia diminuindo os valores em ambas as razões de compressão, atingindo 2,86 g/kWh na razão de compressão 14,3:1 e 2,13 g/kWh na razão de compressão 11,6:1.

As emissões mais elevadas de metano com GNV explicam-se pelo deslizamento de metano (*methane slip*). O metano passa pela câmara de combustão sem ser queimado, isso ocorre principalmente durante a fase de troca gasosa do ciclo e da combustão incompleta em fendas na câmara de combustão e na área do pistão superior.

Figura 28 - Emissões de metano (ISCH4) para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.



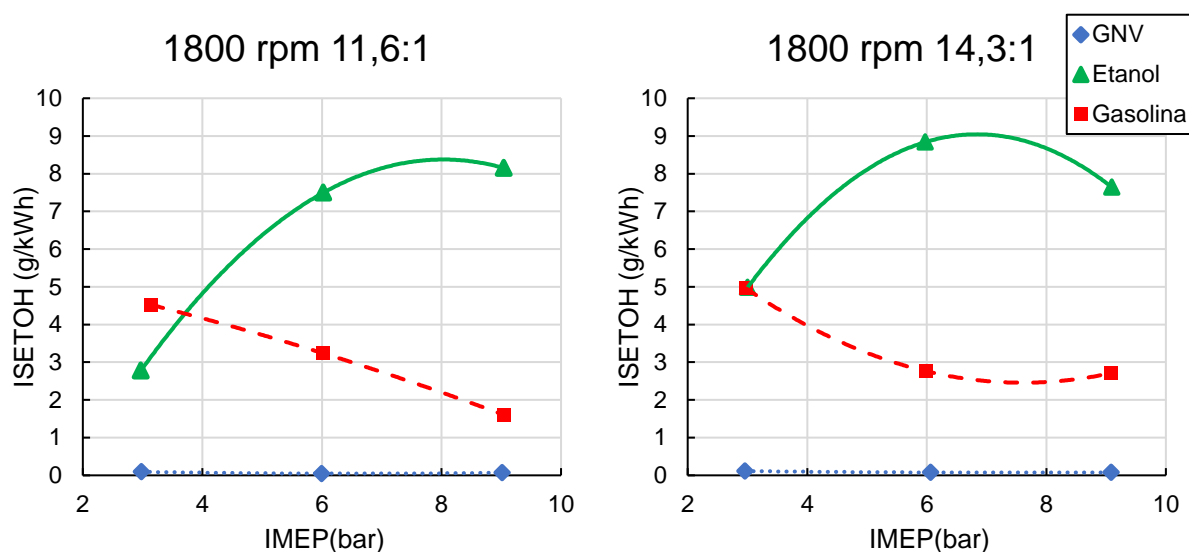
Fonte: Autor, (2022).

Já na Figura 29 estão apresentadas as emissões indicadas de etanol, para as duas razões de compressão. Como pode-se visualizar, o GNV apresentou níveis de emissões insignificantes, em ambas as razões de compressão, como espera-se pela composição do combustível. As emissões em carga 3 bar de IMEP na razão de compressão 11,6:1 foram de 2,77 g/kWh com etanol e 4,51 g/kWh com gasolina, já na razão de compressão 14,3:1 ficaram em torno de 5 g/kWh para gasolina e etanol.

Em carga de 6 bar de IMEP na razão de compressão 11,6:1 as emissões com etanol aumentaram para 7,49 g/kWh e com gasolina diminuíram para 3,23 g/kWh, na razão de compressão 14,3:1 as emissões com etanol aumentaram para 8,83 g/kWh e com gasolina diminuíram para 2,73 g/kWh.

Na carga de 9 bar de IMEP na razão de compressão 11,6:1 as emissões com etanol aumentaram para 8,15 g/kWh e com gasolina diminuíram para 1,6 g/kWh, na razão de compressão 14,3:1 as emissões com etanol diminuíram para 7,64 g/kWh e com gasolina diminuíram para 2,71 g/kWh.

Figura 29 – Emissões de etanol indicado (ISETOH) para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.

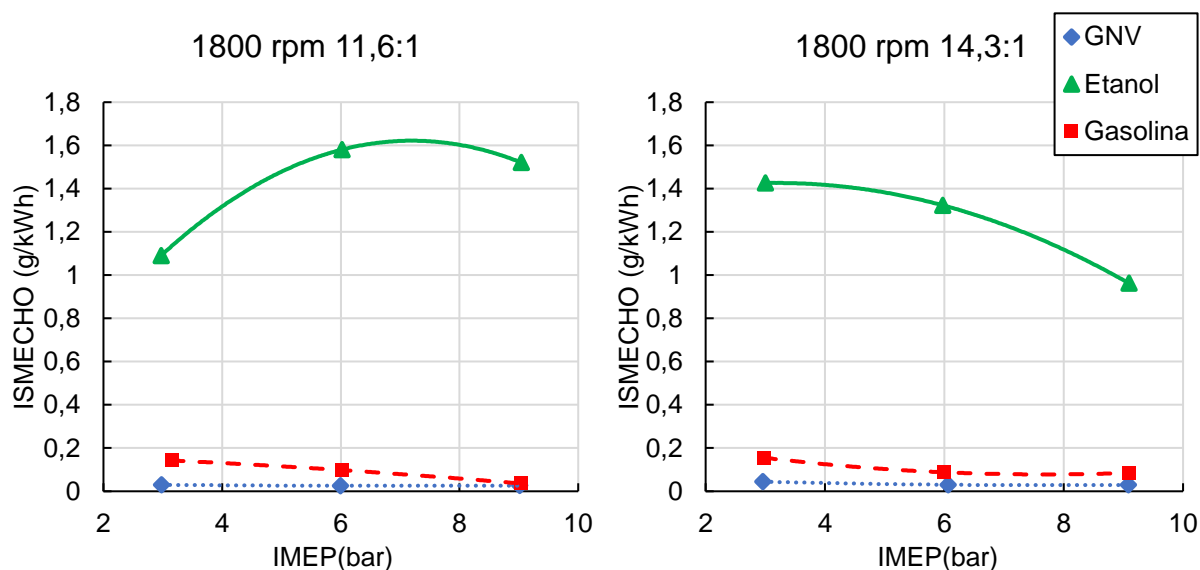


Fonte: Autor, (2022).

Na Figura 30 são apresentados os valores de emissões de acetaldeído indicado (ISMECHO), para as duas razões de compressão. Como pode-se visualizar os valores de emissões de ISMECHO para o GNV são irrisórias em todas as cargas ensaiadas, em ambas as razões de compressão. Já com gasolina os valores ficam abaixo de 0,2 g/kWh para todas as cargas ensaiadas, em ambas as razões de compressão.

Com o etanol em carga 3 bar de IMEP o valor fica próximo de 1 g/kWh na razão de compressão 11,6:1, enquanto na razão de compressão 14,3:1 as emissões aumentam para 1,42 g/kWh. Quando se aumenta a carga para 6 bar de IMEP o valor sobe para 1,58 g/kWh na razão de compressão 11,6:1, enquanto na razão de compressão 14,3:1 as emissões diminuem para 1,32 g/kWh. Em carga para 9 bar de IMEP o valor diminui para 1,52 g/kWh na razão de compressão 11,6:1, enquanto na razão de compressão 14,3:1 as emissões diminuem para 0,96 g/kWh.

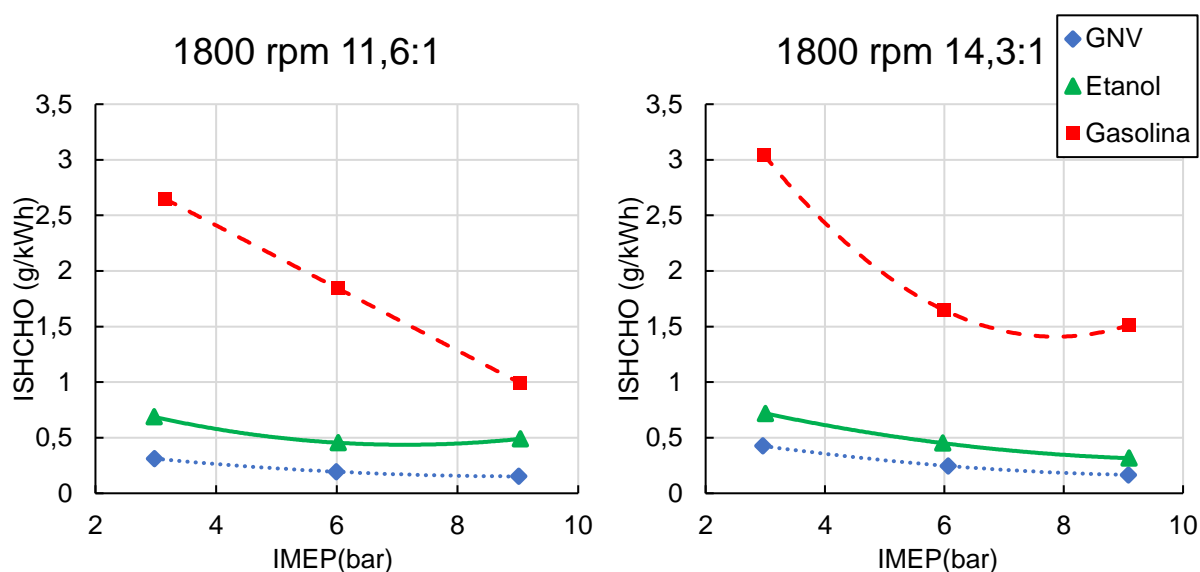
Figura 30 - Emissões de acetaldeído indicado (ISMECHO) para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.



Fonte: Autor, (2022).

Os valores de emissões de formaldeído indicado (ISHCHO) estão na Figura 31, para as duas razões de compressão. As concentrações mais expressivas podem ser vistas com gasolina no valor de 3,04 g/kWh, na carga de 3 bar de IMEP na razão de compressão 14,3:1, já na razão de compressão de 11,6:1 as emissões diminuem para 2,64 g/kWh. Com etanol as emissões ficam com valores em torno de 0,5 g/kWh em todas as cargas ensaiadas e nas duas razões de compressão. Na carga de 6 bar de IMEP as emissões com gasolina diminuem para 1,84 g/kWh na razão de compressão 11,6:1 e para 1,64 g/kWh na razão de compressão 14,3:1. Ao passo que se aumenta a carga para 9 bar de IMEP as emissões diminuem para 0,99 g/kWh na razão de compressão 11,6:1 e para 1,51 g/kWh na razão de compressão 14,3:1.

Figura 31 - Emissões de formaldeído indicado (ISHCHO) para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.



Fonte: Autor, (2022).

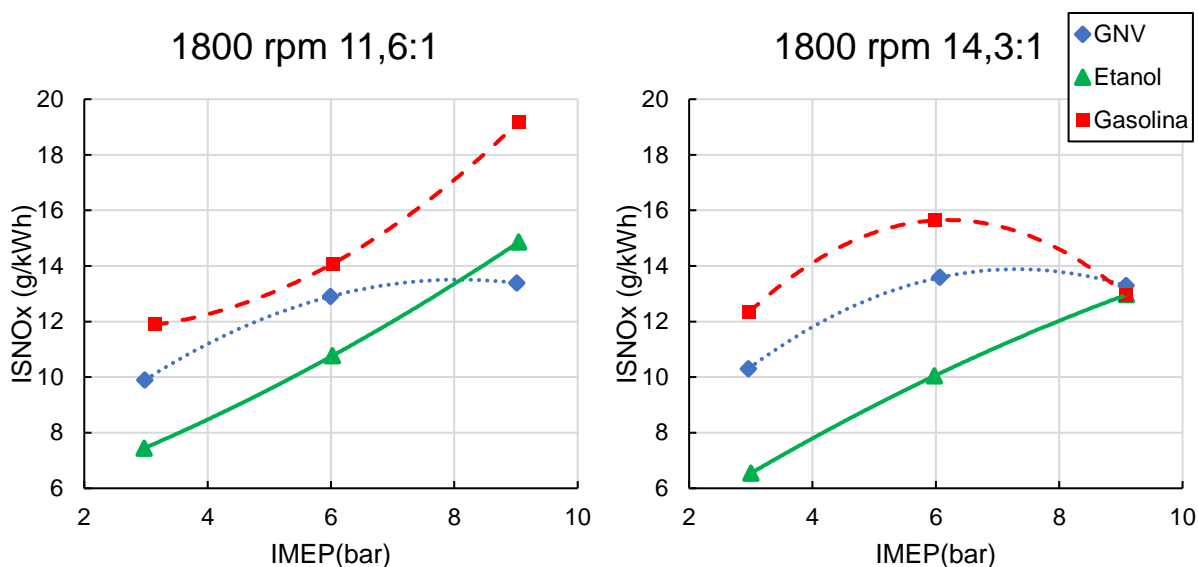
Na Figura 32 são apresentadas as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) para os combustíveis ensaiados, para as duas razões de compressão. Em carga de 3 bar de IMEP os menores índices de foram com etanol com 7,44 g/kWh, com GNV foram de 9,88 g/kWh e com gasolina de 11,88 na razão de compressão 11,6:1, enquanto na razão de compressão 14,3:1 as emissões com etanol diminuíram para 6,54 g/kWh, com GNV aumentaram para 10,29 g/kWh e com gasolina para 12,34 g/kWh.

Em carga de 6 bar de IMEP as emissões com etanol foram 10,76 g/kWh, com GNV 12,9 g/kWh e com gasolina 14,07 g/kWh na razão de compressão 11,6:1, enquanto na razão de compressão 14,3:1 as emissões com etanol diminuíram para 10 g/kWh, com GNV aumentaram para 13,58 g/kWh e com gasolina para 15,63 g/kWh.

Em carga de 9 bar de IMEP as emissões com GNV foram 13,38 g/kWh, com etanol 14,85 g/kWh e atingiu o maior nível de emissões com gasolina que foi de 19,18 g/kWh na razão de compressão 11,6:1, enquanto na razão de compressão 14,3:1 as emissões com todos os combustíveis analisados apresentaram valores em torno de 13 g/kWh.



Figura 32 - Emissões de óxidos de nitrogênio indicado (NOx) para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da carga.



Fonte: Autor, (2022).

#### 4.4 COMPARATIVO FINANCEIRO DE CONSUMO DE COMBUSTÍVEIS

Na Figura 33 são apresentados os valores em reais gastos por hora de operação para cada combustível em função da potência indicada, para as duas razões de compressão, com os preços médios dos três combustíveis, para o Brasil. O valor de referência para o GNV foi considerado para um volume em  $\text{Nm}^3$ . Os preços dos combustíveis foram retirados do levantamento de preços médios semanais da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) da semana de 04/09/2022 a 10/09/2022 (ANP, 2022).

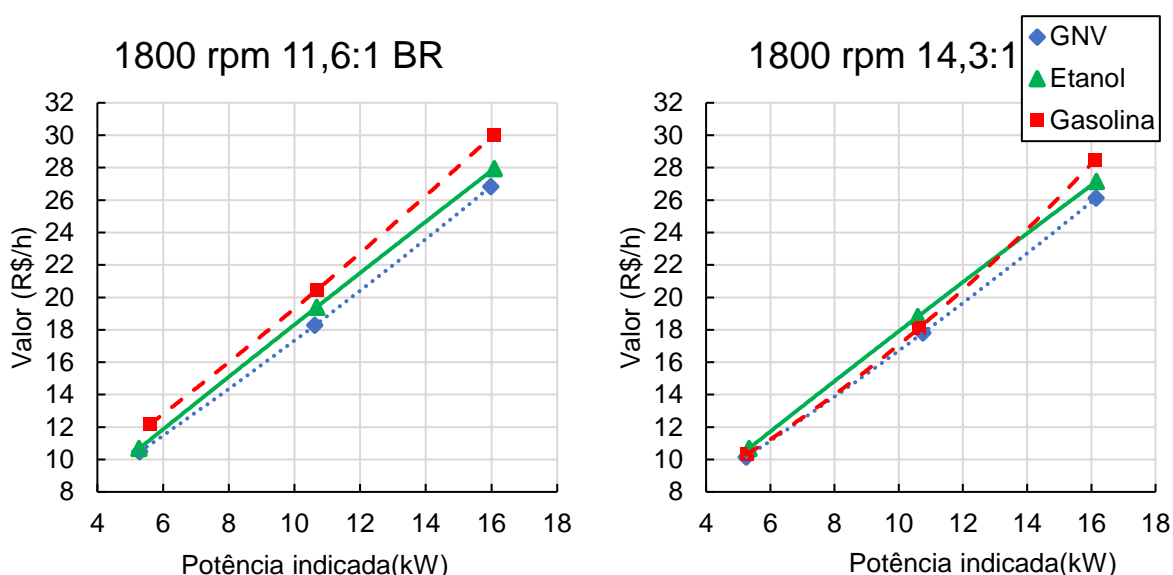
Em potência indicada de 5 kW, foram obtidos os maiores custos de operação para a gasolina foi de R\$ 12,18 por hora, enquanto com GNV diminuiu para R\$ 10,48 e com etanol para R\$ 10,67, na razão de compressão 11,6:1. Já na razão de compressão 14,3:1 o custo de operação com etanol foi de R\$ 10,68 por hora, com gasolina de R\$ 10,33 e com GNV de R\$ 10,15.

Em potência indicada de 10,6 kW o custo de operação com gasolina foi de R\$ 20,47, com etanol de R\$ 19,40, e com GNV diminuiu para R\$ 18,28, na razão de compressão 11,6:1, enquanto na razão de compressão 14,3:1 o custo de operação

com etanol foi de R\$ 18,82 por hora, com gasolina de R\$ 18,27 e com GNV de R\$ 17,81.

Na potência indicada de 16 kW o maior custo de operação foi com gasolina de R\$ 30,04, com etanol de R\$ 27,94, e com GNV de R\$ 26,83 por hora de operação, na razão de compressão 11,6:1, já na razão de compressão 14,3:1 o custo de operação com gasolina diminuiu para R\$ 28,46 por hora, com etanol para R\$ 27,15 e com GNV para R\$ 26,13.

Figura 33- Comparação de consumo em Reais para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da potência indicada. Preços médios para o Brasil.



Fonte: Autor, (2022).

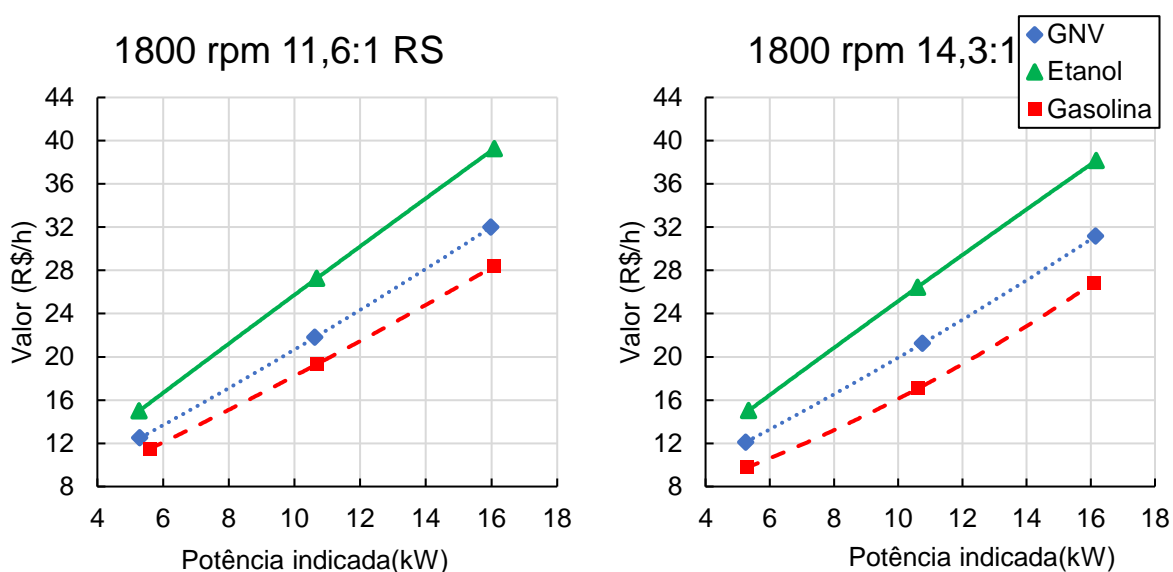
Na Figura 34 são apresentados os valores em reais gastos por hora de operação para cada combustível em função da potência indicada, para as duas razões de compressão, com os preços médios dos três combustíveis, para o estado do Rio Grande do Sul.

Em potência indicada de 5 kW, obtiveram-se os maiores custos de operação com o etanol em torno de R\$ 14,99 por hora, enquanto com GNV diminui para R\$ 12,49 e com gasolina para R\$ 11,49, na razão de compressão 11,6:1. Já na razão de compressão 14,3:1 o custo de operação com etanol foi de R\$ 15,01, com GNV de R\$ 12,10 e com gasolina de R\$ 9,75 por hora.

Em potência indicada de 10,6 kW o custo de operação com etanol foi de R\$ 27,25, com GNV de R\$ 21,79 e com gasolina de R\$ 19,33, na razão de compressão 11,6:1, enquanto na razão de compressão 14,3:1 o custo de operação com etanol foi de R\$ 26,44, com GNV de R\$ 21,23 e com gasolina diminuiu para R\$ 17,08 por hora.

Na potência indicada de 16 kW o maior custo de operação foi com etanol de R\$ 39,43, com GNV de R\$ 31,98 e com gasolina de R\$ 28,35 por hora de operação, na razão de compressão 11,6:1, já na razão de compressão 14,3:1 o custo de operação com etanol diminuiu para R\$ 38,14 por hora, com GNV para R\$ 31,15 e com gasolina para R\$ 26,86.

Figura 34 - Comparação de consumo em Reais para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função da potência indicada. Preços médios para o estado do Rio Grande do Sul.

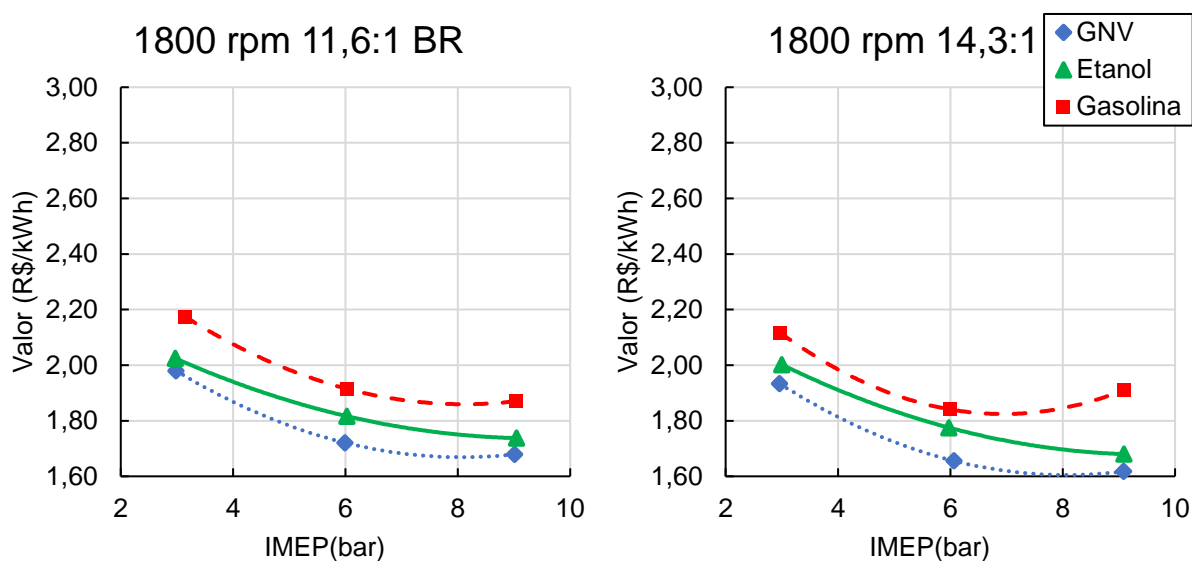


Fonte: Autor, (2022).

Na Figura 35 são apresentados os valores em reais gastos por Quilowatt-hora de operação para cada combustível em função de carga, para as duas razões de compressão, com os preços médios dos três combustíveis, para o Brasil. Na carga de 3 bar de IMEP o custo mais elevado em reais por kWh foi com gasolina de R\$ 2,17, o custo com de etanol foi de R\$ 2,02 e com GNV de 1,98, na razão de compressão 11,6:1. Enquanto na razão de compressão 14,3:1 o custo do kWh com gasolina diminuiu para R\$ 2,11 por hora, com etanol para R\$ 2,00 e com GNV para R\$ 1,93.

Na carga 6 bar de IMEP o custo mais elevado em reais por kWh foi com gasolina de R\$ 1,91, o custo com etanol foi de R\$ 1,81 e com GNV de 1,72, na razão de compressão 11,6:1. Enquanto na razão de compressão 14,3:1 o custo do kWh com gasolina diminuiu para R\$ 1,84 por hora, com etanol para R\$ 1,77 e com GNV para R\$ 1,65. Na carga 9 bar de IMEP o custo mais elevado em reais por kWh foi com gasolina de R\$ 1,87, com de etanol foi de R\$ 1,73 e com GNV de 1,67, na razão de compressão 11,6:1. Enquanto na razão de compressão 14,3:1 o custo do kWh com gasolina aumentou para R\$ 1,91 por hora, com etanol diminuiu para R\$ 1,67 e com GNV para R\$ 1,61.

Figura 35 - Comparação de consumo em Reais por Quilowatt-hora de operação, para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função de carga. Preços médios para o Brasil.



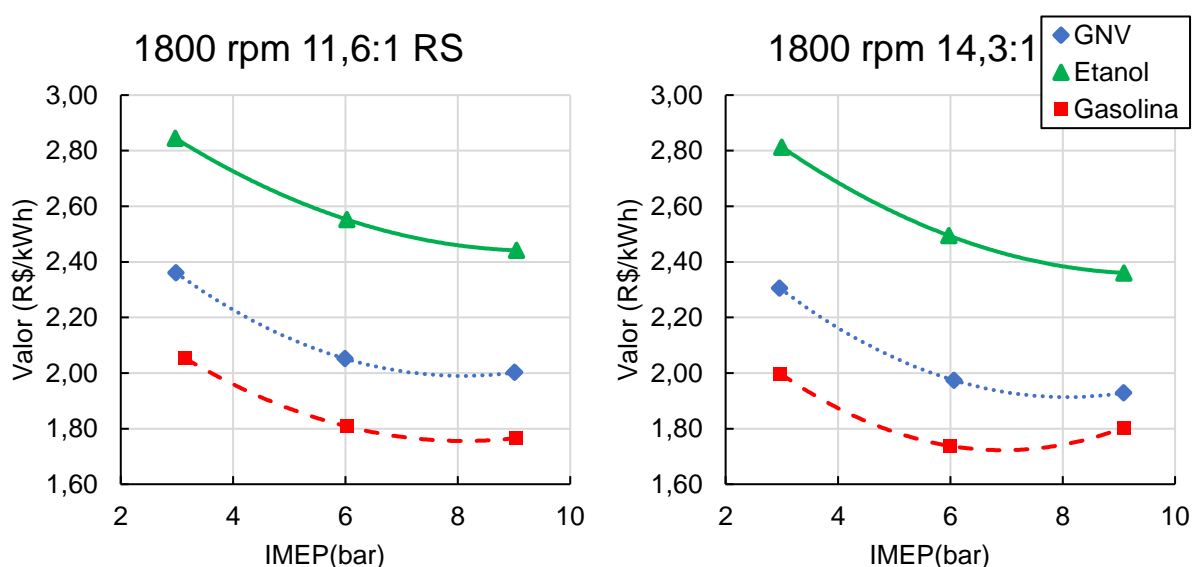
Fonte: Autor, (2022).

Na Figura 36 são apresentados os valores em reais gastos por Quilowatt-hora de operação para cada combustível em função de carga, para as duas razões de compressão, com os preços médios dos três combustíveis, para o estado do Rio Grande do Sul. Na carga de 3 bar de IMEP o custo mais elevado em reais por kWh foi com etanol de R\$ 2,84, o custo com GNV foi de R\$ 2,36 e com gasolina de 2,05, na razão de compressão 11,6:1. Enquanto na razão de compressão 14,3:1 o custo do kWh com etanol diminuiu para R\$ 2,81 por hora, com GNV para R\$ 2,31 e com gasolina para R\$ 2,00.

Na carga 6 bar de IMEP o custo mais elevado em reais por kWh foi com etanol de R\$ 2,55, o custo com GNV foi de R\$ 2,05 e com gasolina de 1,81, na razão de compressão 11,6:1. Enquanto na razão de compressão 14,3:1 o custo de operação com etanol diminuiu para R\$ 2,49 por hora, com GNV para R\$ 1,97 e com gasolina para R\$ 1,74. Na carga 9 bar de IMEP o custo mais elevado em reais por kWh foi com etanol de R\$ 2,44, com de GNV foi de R\$ 2 e com gasolina de 1,77, na razão de compressão 11,6:1. Enquanto na razão de compressão 14,3:1 o custo de operação com etanol diminuiu para R\$ 2,36 por hora, com GNV para R\$ 1,93 e com gasolina aumentou para R\$ 1,80.

Quando se adota o cenário de preços médios dos três combustíveis para o estado do Rio Grande do Sul, os valores do kWh mudam em relação ao cenário do Brasil elevando o valor do kWh para todos os combustíveis ensaiados, em todas as cargas e nas duas razões de compressão.

Figura 36- Comparação de consumo em Reais por Quilowatt-hora de operação, para os três combustíveis analisados nas razões de compressão 11,6:1 e 14,3:1, em função de carga. Preços médios para o estado do Rio Grande do Sul.



Fonte: Autor, (2022).

## 5 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a operação de um motor de ignição por centelha com biometano (simulado com gás natural veicular) comparando com a operação com os combustíveis mais usados atualmente na mobilidade: a gasolina e o etanol. Para essa avaliação foram conduzidos ensaios em um motor de combustão interna monocilindro de pesquisas, onde foi avaliada a operação do motor a 1800 rpm (comumente usada na geração de energia), em três cargas e duas razões de compressão. Buscou-se avaliar as características de desempenho, combustão e emissões. A escolha do biometano se deu no intuito de minimizar a utilização dos combustíveis fósseis reduzindo o impacto ambiental. Além disso, avaliou-se o custo de operação, uma vez que existe a possibilidade de gerar economia e renda para os usuários.

A operação com biometano apresentou o menor consumo específico de combustível nas duas razões de compressão e em todas as cargas ensaiadas quando comparado com a gasolina e o etanol. Este fato evidencia que a utilização do combustível em motores se torna viável e vantajoso. O menor custo de operação com biometano justificaria o uso do mesmo em substituição aos combustíveis testados, levando uma excelente vantagem econômica.

Com relação com as emissões de CO, os resultados para o biometano apresentaram uma tendência de crescimento com o aumento da carga, tendo as menores emissões que a gasolina e o etanol nas cargas de 3 bar e 6 bar de IMEP, havendo emissões ligeiramente maiores na carga de 9 bar de IMEP. Assim, a operação com biometano, no sentido das emissões de CO, é vantajosa nas cargas de 3 bar e 6 bar de IMEP quando comparada com a gasolina e o etanol.

Já no sentido das emissões de NO<sub>x</sub>, a tendência da operação com biometano é uma menor emissão na carga de 3 bar de IMEP e uma posterior estabilização das emissões a partir da carga de 6 bar de IMEP. Fato que se dá devido a amplitude de temperaturas que se alcança com cargas maiores (a partir de 6 bar de IMEP) com relação as cargas menores (3 bar de IMEP). Comparando com os outros combustíveis, a operação com biometano apresentou menores valores em relação à gasolina em todos os casos e maiores que o etanol, com exceção da carga de 9 bar de IMEP. Desta forma, a operação com biometano foi mais vantajosa, com relação as emissões de NO<sub>x</sub>, que a operação com gasolina.

Considerando o valor do custo específico do kWh para a média de preços dos combustíveis no cenário do Brasil, o biometano teve o valor mais atrativo quando comparado com a gasolina e o etanol em todas as cargas ensaiadas e nas duas razões de compressão.

Quando utilizando-se o cenário de preços dos combustíveis para o estado do Rio Grande do Sul, o biometano proporcionou custos mais atrativos (em reais por hora de operação) que o etanol em todas as cargas e nas duas razões de compressão ensaiadas. Por outro lado, a operação com gasolina mostrou valores menores quando comparada com o etanol e o biometano. O custo de operação do biometano foi representado pelo custo do GNV.

Em relação ao custo de operação em reais por hora quando, utilizou-se como parâmetro de custo a média de preços dos combustíveis no cenário do Brasil. Para a potência de 5,0 kW, o biometano apresentou custo de operação semelhante ao da gasolina e do etanol, nas duas razões de compressão. No entanto, nas condições de potência de 10,6 kW e 16,0 kW o biometano apresentou valores até 5% menores que a gasolina e 11% menores que o etanol.

No cenário de preços médios dos três combustíveis para o estado do Rio Grande do Sul, os valores de reais por hora de operação mudam em relação ao cenário do Brasil, elevando os valores para todos os combustíveis ensaiados, em todas as cargas e nas duas razões de compressão.

O custo do kWh tende a diminuir quanto maior é a demanda de energia do setor, sendo assim, mais atrativo nos cenários em que a distribuição de energia é contínua e de alta densidade, tal qual ocorre em estações de geração de energia. Assim sendo, o uso de biometano, mostrou-se uma ótima alternativa para a geração de energia proprietária em regiões de difícil acesso e abastecimento de energia. Pelo fato que em locais remoto, não terá acesso à rede de GNV, e o custo de GNV não seria condizente com o do biometano.

## REFERÊNCIAS

- ABIOGÁS; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS. **ABiogás divulga novo potencial do biogás para o mercado brasileiro durante fórum em São Paulo**. , 2019a. Disponível em: <<https://abiogas.org.br/abiogas-divulga-novo-potencial-do-biogas-para-o-mercado-brasileiro-durante-forum-em-sao-paulo/>>. Acesso em: 15 maio. 2022
- ABIOGÁS; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS. **Conheça o Potencial Brasileiro de Biogás por Fonte em 2018**.
- ABIOGÁS; ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE BIOGÁS. O potencial Brasileiro de biogás. 2020.
- ACHINAS, S.; ACHINAS, V.; EUVERINK, G. J. W. A Technological Overview of Biogas Production from Biowaste. **Engineering**, v. 3, n. 3, p. 299–307, 2017.
- AGÊNCIA BRASIL. **Veja as principais mudanças no novo Marco Legal do Saneamento**.
- ALEIFERIS, P. G. et al. The nature of early flame development in a lean-burn stratified-charge spark-ignition engine. **Combustion and Flame**, v. 136, n. 3, p. 283–302, 2004.
- ANEEL. **BIG - Banco de Informações de Geração**. Disponível em: <<https://www2.aneel.gov.br/aplicacoes/capacidadebrasil/Combustivel.cfm>>. Acesso em: 19 maio. 2020.
- ANFAVEA. **O caminho da descarbonização do setor automotivo no Brasil**. [s.l: s.n.].
- ANP, A. N. DO P. **Levantamento de Preços de Combustíveis (últimas semanas pesquisadas) — Português (Brasil)**. Disponível em: <<https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/levantamento-de-precos-de-combustiveis-ultimas-semanas-pesquisadas>>. Acesso em: 13 set. 2022.
- ANP; ASSOCIAÇÃO NACIONAL DO PETROLEO. **Resolution No. 791/2019**.
- BHARATHIRAJA, B. et al. Retraction notice to “Biogas production -A review on composition, fuel properties, feed stock and principles of anaerobic digestion” (Renewable and Sustainable Energy Reviews (2018) 90 (570–582), (S1364032118301904) (10.1016/j.rser.2018.03.093)). **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 94, p. 1229, 2018.
- BRUNETTI, F. **Motores de combustão interna**. V.1 ed. São Paulo: Editora Edgar Blucher Ltda., 2012.
- CHIAPPINI, G. **Marco do saneamento eleva potencial do biogás em 3 milhões de m<sup>3</sup>/dia**.
- CIBIOGAS. Do Biogás no Brasil 2021. 2021.



CNT; CONFEDERAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTE. Anuario CNT do Transporte 2021. p. 1–25, 2021.

CORSINI, L. O Brasil e a nova Lei de Estrangeiros. **Revista Global**, v. 93, 2003.

DENTON, T. Automobile electrical and electronic systems, fourth edition. **Automobile Electrical and Electronic Systems, Fourth Edition**, p. 1–740, 2013.

DOS SANTOS, I. R. et al. **DAQMOT**. Brasília, BrasilINPI Register Number BR512019003004-4, , 2019.

DOU; DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. **RESOLUÇÃO Nº 492, DE 20 DE DEZEMBRO DE 2018 - Imprensa Nacional**. Disponível em: <[https://www.in.gov.br/materia/-/asset\\_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/56643907](https://www.in.gov.br/materia/-/asset_publisher/Kujrw0TZC2Mb/content/id/56643907)>. Acesso em: 11 ago. 2020a.

DOU; DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. Resolução CONAMA nº 492, de 20 de dez. de 2018. **Estabelece as Fases PROCONVE L7 e PROCONVE L8 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – PROCONVE para veículos automotores leves novos de uso rodoviário, altera a Resolução CONAMA nº 15/1995 e dá outras providência**, 2018b.

DOU; DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. Resolução nº 492, de 20 de dezembro de 2018. 2020.

DOU; DIÁRIO OFICIAL DA UNIÃO. **Nova Lei do Gás Natural: mais investimento para o setor - Portal da Indústria**. Disponível em: <<https://www.portaldaindustria.com.br/industria-de-a-z/nova-lei-do-gas/>>. Acesso em: 15 mar. 2022.

EPA. **40 CFR § 90.426 - Cálculos de amostragem de emissões diluídas - motores a gasolina. | CFR | Lei dos EUA | LII / Instituto de Informações Jurídicas**. Disponível em: <<https://www.law.cornell.edu/cfr/text/40/90.426>>. Acesso em: 1 jun. 2022.

EPE; EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **MATRIZ ENERGÉTICA**. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>>. Acesso em: 29 mar. 2022.

FIGUEIREDO, N. J. V. DE. Utilização de biogás de aterro sanitário para geração de energia elétrica - estudo de caso. p. 147, 2011.

FNR. **Guia Prático do Biogás Geração e Utilização**. 5º ed. Gülzow: DBFZ, 2010.

FUNDEP; FUNDAÇÃO DE APOIO DA UFMG. **Programa Rota 2030**. Disponível em: <<https://rota2030.fundep.ufmg.br/rota/>>. Acesso em: 10 mar. 2022.

GIACOSA, D. **Motores Endotermicos**. , 1989.

GOLKE, D. **dissertação\_Golke\_versão revisão banca \_final4**. [s.l: s.n.].

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

IBAMA. Programa de controle de emissões veiculares (Proconve). **06/12/2016**, p. 9, 2016.

KWON, E. C. et al. Performance of small spark ignition engine fueled with biogas at different compression ratio and various carbon dioxide dilution. **Fuel**, v. 196, p. 217–224, 15 maio 2017.

LEE, K.; YOON, M.; SUNWOO, M. A study on pegging methods for noisy cylinder pressure signal. **Control Engineering Practice**, v. 16, n. 8, p. 922–929, 2008.

LI, J. et al. Semi-continuous anaerobic co-digestion of dairy manure with three crop residues for biogas production. **Bioresource Technology**, v. 156, p. 307–313, 1 mar. 2014.

LI, J.; YANG, W.; ZHOU, D. **Review on the management of RCCI engines. Renewable and Sustainable Energy Reviews** Pergamon, , 1 mar. 2017.

ME; MINISTÉRIO DA ECONOMIA. **Rota 2030 - Mobilidade e Logística — Português (Brasil)**. Disponível em: <<https://www.gov.br/produtividade-e-comercio-exterior/pt-br/assuntos/competitividade-industrial/setor-automotivo/rota-2030-mobilidade-e-logistica>>. Acesso em: 10 mar. 2022.

MME; MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA. **RenovaBio**. Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br>>. Acesso em: 15 set. 2022.

MUSTAFI, N. N.; RAINE, R. R.; BANSAL, P. K. The use of biogas in internal combustion engines: A review. **Proceedings of the Spring Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division**, p. 225–234, 2006.

ONU. **Novo estudo da ONU indica que mundo terá 11 bilhões de habitantes em 2100 | ONU Brasil**. Disponível em: <<https://nacoesunidas.org/novo-estudo-da-onu-indica-que-mundo-tera-11-bilhoes-de-habitantes-em-2100/>>. Acesso em: 12 ago. 2020.

PARK, C. et al. Performance and emission characteristics of a SI engine fueled by low calorific biogas blended with hydrogen. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 36, n. 16, p. 10080–10088, 2011.

PEREIRA SILVEIRA, J. **UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA CENTRO DE TECNOLOGIA DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E COMPUTAÇÃO CURSO DE ENGENHARIA DE TELECOMUNICAÇÕES**. [s.l: s.n.].

PETRAVIĆ-TOMINAC, V. et al. **Current state of biogas production in Croatia. Energy, Sustainability and Society**, 2020.

PTA; PORTAL DE TRATAMENTO DE ÁGUA. **Marco do saneamento eleva potencial do biogás em 3 milhões de m<sup>3</sup>/dia**. , 2020. Disponível em: <<https://www.tratamentodeagua.com.br/marco-saneamento-biogas/>>. Acesso em: 11 ago. 2020

QIAN, Y. et al. Review of the state-of-the-art of biogas combustion mechanisms and applications in internal combustion engines. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 69, p. 50–58, 1 mar. 2017.

SENDZIKIENE, E. et al. Impact of biomethane gas on energy and emission characteristics of a spark ignition engine fuelled with a stoichiometric mixture at various ignition advance angles. **Fuel**, v. 162, p. 194–201, 15 dez. 2015.

SINIGAGLIA, T. et al. **Current scenario and outlook for biogas and natural gas businesses in the mobility sector in Brazil**. **International Journal of Hydrogen Energy** Elsevier Ltd, , 19 mar. 2022.

SURROOP, D.; BUNDHOO, Z. M. A.; RAGHOO, P. Waste to energy through biogas to improve energy security and to transform Africa's energy landscape. **Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry**, v. 18, p. 79–83, 2019.

SWAMI NATHAN, S.; MALLIKARJUNA, J. M.; RAMESH, A. An experimental study of the biogas-diesel HCCI mode of engine operation. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 7, p. 1347–1353, 2010.

YILMAZ, I. T.; GUMUS, M. Investigation of the effect of biogas on combustion and emissions of TBC diesel engine. **Fuel**, v. 188, p. 69–78, 2017.

ZHANG, J. J.; WEI, Y.; FANG, Z. Ozone pollution: A major health hazard worldwide. **Frontiers in Immunology**, v. 10, n. OCT, p. 1–10, 2019.

ZHAO, H. **Advanced Direct Injection Combustion Engine Technologies and Development**. **Cambridge: Woodhead Publishing**, 2009.

NUP: 23081.119245/2022-76

Prioridade: Normal

Ato de entrega de dissertação/tese

134.334 - Dissertação e tese

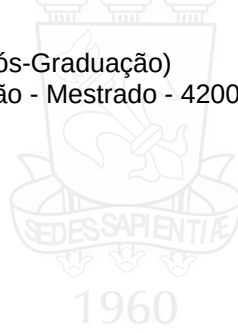
### COMPONENTE

Ordem	Descrição	Nome do arquivo
1	Dissertação de mestrado (134.334)	Dissertação_Roberto.pdf

### Assinaturas

14/10/2022 13:30:07

ROBERTO ANTONIO GARLET (Aluno de Pós-Graduação)  
07.10.02.09.0.0 - PG Engenharia de Produção - Mestrado - 42002010004M4



Código Verificador: 1996298

Código CRC: af485068

Consulte em: <https://portal.ufsm.br/documentos/publico/autenticacao/assinaturas.html>

