

Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA
Engenharia Automotiva

Estudo de desempenho de motor três cilindros alimentado com GNV como combustível

Autor: Marcos Paulo Ribeiro Garcia
Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília, DF
2022



Marcos Paulo Ribeiro Garcia

Estudo de desempenho de motor três cilindros alimentado com GNV como combustível

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Universidade de Brasília - UnB

Faculdade UnB Gama - FGA

Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília, DF

2022

Marcos Paulo Ribeiro Garcia

Estudo de desempenho de motor três cilindros alimentado com GNV como combustível/ Marcos Paulo Ribeiro Garcia. – Brasília, DF, 2022-

116 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília - UnB
Faculdade UnB Gama - FGA , 2022.

1. combustão. 2. GNV. I. Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Estudo de desempenho de motor três cilindros alimentado com GNV como combustível

CDU 02:141:005.6

Marcos Paulo Ribeiro Garcia

Estudo de desempenho de motor três cilindros alimentado com GNV como combustível

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 07 de outubro de 2022:

Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa
Orientador

**Prof. Dr. Evandro Leonardo Silva
Teixeira**
Convidado 1

Prof. Msc. Saleh Barbosa Khalil
Convidado 2

Brasília, DF
2022

Dedico este trabalho ao meu professor orientador, por todo aprendizado, auxílio e orientação prestadas em todos esses anos de graduação, que tornaram possível a realização deste trabalho.

Agradecimentos

Agradeço a Deus, pela saúde, vida e inteligência que me foram dadas e cultivadas ao longo desses anos. À minha família, em especial meu pai Rubens, minha mãe Waldilene e minha irmã Ana Luísa, por sempre acreditarem no meu sucesso pessoal e profissional, além de me proporcionarem um ambiente próspero e harmonioso para viver. Aos amigos que fiz durante a graduação, com quem pude trocar experiências, conhecimentos e vivências. À Secretaria Nacional de Trânsito - SENATRAN, pela oportunidade de estágio e de fazer parte de uma equipe de trabalho exímia. E ao meu professor orientador Fábio de Lisboa, por todo auxílio, incentivo, esperança e conhecimento que me foi prestado durante a graduação.

*"O estudo em geral, a busca da verdade
e da beleza são domínios em que nos
é consentido ficar crianças toda a vida."
(Albert Einstein)*

Resumo

Com o avanço da humanidade e sua constante expansão no planeta, cada vez mais se torna necessária a criação de novas tecnologias, e aprimoramento das usuais, a fim de proporcionar melhor qualidade de vida para a população nos mais diversos ramos, como o setor automotivo. Em busca de alternativas ante o monopólio do petróleo entre as fontes de combustível mais usuais, hegemonia essa que contribui para a emissão de gases de efeito estufa, como o dióxido de carbono, e também com o esgotamento iminente das jazidas pela sua exploração desenfreada, veículos com motorização elétrica e híbridos ganham espaço no mercado, inovando com novas tecnologias. Porém, essa mesma oportunidade também gera interesse em otimizar um dos sistemas mais antigos presentes nos veículos do dia a dia, os motores de combustão interna, principalmente no âmbito de fontes alternativas de combustível, como o Gás Natural Veicular (GNV), combustível esse que atribui vantagens e benefícios não só no desempenho dos motores, mas também nas atmosferas econômica e ecológica. O presente trabalho apresenta a equiparação do desempenho de um motor de combustão interna, de configuração três cilindros e ignição por centelha, operando com etanol e gás GNV como combustíveis. O motor operado corresponde ao modelo 1.0, 3 cilindros, do veículo *Volkswagen Up*, originalmente flex, adaptado de modo que permita a injeção de gás GNV nos cilindros, além do uso de uma ECU da marca *Fuel Tech*, modelo 550, adaptada para a busca de melhorias dos parâmetros de ensaio. Foram verificados parâmetros de desempenho como pressão no coletor de admissão e riqueza da mistura ar-combustível, onde a utilização de etanol como combustível alcançou valores satisfatórios e regulares, culminando em um bom desempenho do motor, quanto que a utilização de gás GNV como combustível apresentou irregularidades e alternâncias no que tange a qualidade da mistura ar-combustível, ocasionando em um mal desempenho, em parte pela dificuldade de gerenciamento na proporção de combustível injetado para ar admitido ao motor, em suas condições originais de uso.

Palavras-chaves: GNV. Otto. Ignição. Centelha. Desempenho

Abstract

With mankind's development and constantly expansion around the world, more and more the creation of new technologies, and enhancement of the usual ones, has become a necessity, in order to provide better life quality for the population in the most diverse branches, like the automotive one. In pursuit of alternatives towards petroleum derivatives' monopoly in terms of most common fuel sources, in a way that contributes for the emission of greenhouse gases, as carbon dioxide, and also for the imminent depletion of petroleum deposits due to the unstoppable exploitation, electric motorized and hybrid vehicles take place in the automotive market, innovating in new technologies. Although, this same opportunity stirs up interest in optimizing one of the oldest systems present in the nowadays vehicles, the internal combustion engines, mainly in terms of alternative fuel sources, like Compressed Natural Gas (CNG), a fuel that assigns advantages and benefits not only to the engine performance, but also in the economic and ecological atmospheres. The present essay shows the comparison between the performance of a spark ignition internal combustion engine, with three cylinders, operating with ethanol and CNG fuel. The engine in use is a 1.0 model of the vehicle Volkswagen Up, originally a dual-fuel type, adapted in a way that allows gas admittance in the cylinders, beyond the use of an ECU of the brand Fuel Tech, model 550, adapted for the search of improvements of the test parameters. Some performance parameters were established, like Intake Manifold Pressure and Air-Fuel Mixture's quality, in which the usage of ethanol as fuel reached satisfactory and regular values, culminating in a good performance of the engine, although the usage of CNG Gas as fuel showed irregularities and alternations regarding the air-fuel mixture's quality, causing poor performance, in part due to the difficulty of managing the correct proportion of injected fuel to intake air admitted to the engine, in its original conditions of use.

Key-words: CNG. Otto. Ignition. Spark. Performance

Lista de ilustrações

Figura 1 – Motor de Nicolaus Otto e Eugen Langer de Lenoir de 1867. Fonte: Adaptado de Tillmann (2013)	22
Figura 2 – Diagrama de funcionamento de um cilindro. Fonte: Adaptado de Brunetti (2012)	23
Figura 3 – Os quatro tempos de um motor alternativo. Fonte: Adaptado de Brunetti (2012)	24
Figura 4 – Diagrama de componentes de uma vela de ignição. Fonte: Adaptado de Brunetti (2012)	30
Figura 5 – Exemplo de injeção indireta (esquerda) e injeção direta (direita). Fonte: Adaptado de Brunetti (2012)	32
Figura 6 – Gráfico de barras retirado da Tabela 1, referente ao crescimento do preço médio do gás natural e da gasolina no Brasil, em dólares. Fonte: Adaptado de ANP (2008)	38
Figura 7 – Gráfico referente ao preço, em dólares, por MMBtu gerado de gás natural, em regiões agregadas no Brasil. Fonte: Adaptado de ANP (2008)	39
Figura 8 – Gráfico referente ao volume, em mil metros cúbicos, de gás natural extraído, por dia, em regiões agregadas no Brasil. Fonte: Adaptado de ANP (2008)	39
Figura 9 – Tanque de combustível contendo etanol hidratado, utilizado para ensaio de desempenho de motor. Fonte: Próprio autor	41
Figura 10 – Cilindro contendo gás natural veicular (GNV), instalado na parte externa do laboratório. Fonte: Próprio autor	42
Figura 11 – Aparato experimental de ensaio. Fonte: Próprio autor	44
Figura 12 – Diagrama de blocos do aparato experimental para ensaio no motor característico. Fonte: Próprio autor	45
Figura 13 – Vista virtual em perspectiva do Motor EA211 1.0 MPI, da marca <i>Volkswagen</i> . Fonte: Retirado de Wolschick (2014)	46
Figura 14 – Gráfico de torque e potência original do Motor EA211 1.0 MPI, da marca <i>Volkswagen</i> . Fonte: Retirado de Wolschick (2014)	47
Figura 15 – ECU com painel ligado, montada no aparato experimental. Fonte: Próprio autor	50
Figura 16 – Diagrama de instalação do kit gás no motor. Fonte: Adaptado de (STAG, 2021)	51
Figura 17 – Unidade de controle eletrônica do "Kit Gás". Fonte: Próprio autor	53
Figura 18 – Dinamômetro axial pronto para conexão ao motor em teste, no laboratório "LEM". Fonte: Próprio autor	54

Figura 19 – Manômetro utilizado para medição da pressão do ar na placa de orifício. Fonte: Próprio autor	55
Figura 20 – Gráfico correspondente a curva de torque e potência por RPM, ensaiado sobre um dinamômetro de rolo. Fonte: Próprio autor	59
Figura 21 – Gráfico correspondente a curva Tempo de Injeção e Eficiência Volumétrica por RPM, ensaiado sobre um dinamômetro de rolo. Fonte: Próprio autor	60
Figura 22 – Tabela de dados e Gráfico 3D correspondentes aos dados do Tempo de Injeção (ms) por RPM e Abertura da Válvula borboleta, denominada TPS (%). Fonte: Próprio autor	63
Figura 23 – Tabela de dados e Gráfico 3D correspondentes aos dados do Avanço da Ignição (°) por RPM e Abertura da Válvula borboleta, denominada TPS. Fonte: Próprio autor	64
Figura 24 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com GNV, em regime de marcha lenta. Fonte: Próprio autor	66
Figura 25 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com GNV, a 2000 RPM. Fonte: Próprio autor	67
Figura 26 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com GNV, a 3000 RPM. Fonte: Próprio autor	69
Figura 27 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com GNV, a 4000 RPM. Fonte: Próprio autor	71
Figura 28 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com GNV, a 5000 RPM. Fonte: Próprio autor	73
Figura 29 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com Etanol, em regime de marcha lenta. Fonte: Próprio autor	76
Figura 30 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com Etanol, a 2000 RPM. Fonte: Próprio autor	77
Figura 31 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com Etanol, a 3000 RPM. Fonte: Próprio autor	79
Figura 32 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com Etanol, a 4000 RPM. Fonte: Próprio autor	80
Figura 33 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com Etanol, a 5000 RPM. Fonte: Próprio autor	82
Figura 34 – Log do ensaio do motor proposto alimentado com gás GNV como combustível. Fonte: Próprio autor	84
Figura 35 – Log do ensaio do motor proposto alimentado com etanol como combustível. Fonte: Próprio autor	85

Figura 36 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de marcha lenta. Fonte: Próprio autor	86
Figura 37 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de 2000 RPM - Parte I. Fonte: Próprio autor	88
Figura 38 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de 2000 RPM - Parte II. Fonte: Próprio autor	89
Figura 39 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de 3000 RPM - Parte I. Fonte: Próprio autor	91
Figura 40 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de 3000 RPM - Parte II. Fonte: Próprio autor	92
Figura 41 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de 4000 RPM - Parte I. Fonte: Próprio autor	94
Figura 42 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de 4000 RPM - Parte II. Fonte: Próprio autor	95
Figura 43 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de 5000 RPM - Parte I. Fonte: Próprio autor	97
Figura 44 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de 5000 RPM - Parte II. Fonte: Próprio autor	98
Figura 45 – Vista lateral do Motor EA211 1.0 MPI, da marca <i>Volkswagen</i> , instalado para ensaio. Fonte: Próprio autor	109
Figura 46 – Painel com ECU FT modelo 550, da marca <i>FuelTech</i> , instalada no laboratório. Fonte: Próprio autor	110
Figura 47 – Configurações dos sensores de entrada, do motor para ECU, gerado pelo ambiente FT Manager. Fonte: Próprio autor	110
Figura 48 – Configurações dos sensores e valores de saída, do motor para ECU, gerado pelo ambiente FT Manager. Fonte: Próprio autor	111
Figura 49 – Detalhe dos componentes principais do "Kit Gás". Fonte: Próprio autor	111

Lista de tabelas

Tabela 1	– Preço médio de gás natural e gasolina ao consumidor no Brasil em dólar, num período de 10 anos, adaptado dos dados fornecidos pela ANP	38
Tabela 2	– Características do gás GNV cedidas pelo fornecedor	43
Tabela 3	– Dados técnicos do motor	47
Tabela 4	– Valores de pressão de ar na placa de orifício, por meio de manômetro digital, em função da rotação por minuto. Fonte: Próprio autor	74
Tabela 5	– Valores de pressão de ar na placa de orifício, por meio de manômetro digital, e massa de combustível, por meio de uma balança, em função da rotação por minuto. Fonte: Próprio autor	83
Tabela 6	– Valores de pressão de ar na placa de orifício, por meio de manômetro digital, para os ensaios com os dois combustíveis, em função da rotação por minuto. Fonte: Próprio autor	100
Tabela 7	– Valores de pressão no coletor de admissão, para os ensaios com os dois combustíveis, em função da rotação por minuto. Fonte: Próprio autor	100
Tabela 8	– Dados de pressão de ar no coletor de admissão, entre o ensaio de referência e o ensaio real. Fonte: Próprio autor	101
Tabela 9	– Dados de massa de combustível injetada, pressão de ar na placa de orifício e vazão total dos bicos injetores, relativo ao ensaio real utilizando etanol como combustível. Fonte: Próprio autor	102
Tabela 10	– Dados coletados de Pressão, Temperatura e Rotação - Ensaio de referência. Fonte: Próprio autor	114
Tabela 11	– Dados calculados para Tempo de Injeção e Eficiência Volumétrica, do ensaio de referência. Fonte: Próprio autor	115
Tabela 12	– Dados médios coletados do ensaio utilizando gás GNV como combustível. Fonte: Próprio autor	116
Tabela 13	– Dados médios coletados do ensaio utilizando etanol como combustível. Fonte: Próprio autor	116

Lista de abreviaturas e siglas

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
GNV	Gás Natural Veicular
CNG	Do inglês “Compressed Natural Gas” - Gás Natural Comprimido
SFC	Consumo Específico de Combustível
PCi	Poder Calorífico Inferior
PCs	Poder Calorífico Superior
PIE	Ponto Inicial de Ebulição
PFE	Ponto Final de Ebulição
PMS	Ponto Morto Superior
PMI	Ponto Morto Inferior
ECU	Do inglês “Electronic Control Unit” - Unidade eletrônica de controle
MAP	Do inglês “Manifold Absolute Pressure” - Pressão absoluta no coletor
MPI	Do inglês “Multipoint injection” - Injeção do tipo multiponto
LEM	Laboratório de ensaio de motores, da Universidade de Brasília/Campus do Gama
TPS	Do inglês “Throttle Position Sensor” - Sensor de posição do acelerador
RPM	Rotações por minuto
VFD	Do inglês “Variable-Frequency Drive” - Inversor de frequência
OBD	Do inglês “On Board Diagnostics” - Diagnóstico de bordo

Lista de símbolos

N_i	Potência indicada de um motor
F	Relação combustível/ar estequiométrica
η_t	Eficiência térmica do motor
\dot{m}_a	Vazão mássica de ar seco que entra nos cilindros, pela admissão
η_v	Eficiência volumétrica de um motor
\dot{m}_e	Vazão mássica da mistura fresca na admissão
ρ_e	Massa específica de mistura fresca presente na admissão, nas condições de entrada
$V_{deslocado}$	Cilindrada total do motor
$V_{pistão}$	Volume correspondente a um único conjunto cilindro-pistão
n	Rotação do motor, em RPM
ρ_a	Massa específica de ar seco
P_e	Pressão parcial da mistura fresca
T_e	Temperatura da mistura fresca
T_a	Temperatura do ar admitido
R	Constante universal dos gases perfeitos
P_a	Pressão parcial do ar
F_v	Relação entre a massa de combustível e a massa de ar
g	Razão entre a massa do vapor de água e a massa do ar
M_c	Massa molecular do combustível
L_{H_2O}	Calor latente de condensação da água
m_{H_2O}	massa de água resultante por unidade de massa da mistura
A/C est	Relação ar/combustível estequiométrica
$v_{fluxo_{inj}}$	Vazão individual de fluxo de combustível do bico injetor por cilindro

T_{inj}	Tempo total de injeção aberta, durante um ciclo do motor
P_o	Pressão atmosférica durante o ensaio
P_{MAP}	Pressão absoluta no coletor de admissão de ar
$P_{manômetro}$	Pressão do ar na placa de orifício
T_{MAP}	Temperatura no coletor de admissão de ar
T_{amb}	Temperatura ambiente durante o ensaio
D	Diâmetro do pistão
L	Curso do pistão
$E_{vMáx}$	Eficiência Volumétrica máxima do motor
V_t	Volume total do motor, cilindrada total do motor
$n^o inj$	Número de bicos injetores
$n^o cil$	Número de cilindros

Sumário

1	INTRODUÇÃO	18
	Introdução	18
1.1	JUSTIFICATIVA	19
1.2	OBJETIVO GERAL	20
1.3	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
2	REFERENCIAL TEÓRICO	21
	Referencial Teórico	21
2.1	História dos Motores de combustão interna	21
2.1.1	Motores do Ciclo Otto	22
2.1.2	Ignição por Centelha	30
2.1.3	Sistema de injeção	31
2.2	Combustíveis e fontes de alimentação	33
2.2.1	Combustíveis Fósseis Líquidos	33
2.2.2	Etanol	35
2.2.3	Gás Natural Veicular - GNV	36
3	METODOLOGIA	41
	Materiais e Métodos	41
3.1	Combustíveis	41
3.1.1	Etanol	41
3.1.2	Gás GNV	42
3.2	Aparato experimental	44
3.2.1	Motor a combustão interna	46
3.2.2	Unidade de controle do motor	48
3.2.3	"Kit Gás": Adaptação para uso de gás GNV no motor	50
3.2.4	Dinamômetro	53
3.2.5	Sistema de admissão de ar	54
3.2.6	Norma ABNT NBR 1585	55
3.3	Metodologia de ensaio	56
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
4.1	Dados de referência - Ensaio em dinamômetro de rolo	58
4.2	Resultados do ensaio do aparato experimental	62

4.2.1	Mapas de injeção e ignição da Fuel Tech 550	62
4.2.2	Funcionamento do motor durante ensaio com gás GNV como combustível	65
4.2.3	Funcionamento do motor durante ensaio com etanol como combustível	75
4.2.4	Comparativo dos logs de ensaio para os dois combustíveis	83
4.2.5	Integridade dos sistemas e instrumentos do aparato experimental	101
5	CONCLUSÃO	103
	Conclusão	103
6	PROPOSTAS FUTURAS	105
	Propostas Futuras	105
	REFERÊNCIAS	106
	APÊNDICES	108
	APÊNDICE A – FIGURAS DA MONTAGEM FÍSICA DO APARATO EXPERIMENTAL	109
	ANEXOS	112
	ANEXO A – DADOS COLETADOS NO ENSAIO DE REFERÊNCIA - DINAMÔMETRO DE ROLO	113
	ANEXO B – DADOS COLETADOS NO ESCOPO DE ENSAIO - FUEL TECH 550	116

1 Introdução

Desde a Revolução Industrial, diversos campos da ciência e engenharia ganharam espaço para inovações e, principalmente, aprimoramentos de técnicas e mecanismos já existentes, visando sempre o máximo de seu benefício e eficiência para a humanidade. Na indústria automotiva, não foi diferente. No lugar dos usuais motores a vapor, mecanismos mais eficientes como os motores de combustão interna foram criados e implementados, ganhando espaço no mercado por apresentarem alta densidade de potência, fator relacionado a potência de saída com o volume do sistema, baixo custo, robustez do produto, e alta variedade de operação com diferentes fontes de combustível, dentre outros fatores (SINIGAGLIA; MARTINS; SILUK, 2021).

Para que ocorra a combustão interna, basicamente, é necessário que um combustível entre em contato com uma fonte de calor, gerando energia em forma de calor, até o consumo de todo combustível presente no sistema (MACHADO, 2014). Segundo Awad et al. (2018), em motores de combustão interna operantes por ignição por centelha, processo no qual a ignição da mistura ar-combustível ocorre por uma centelha elétrica gerada dentro dos cilindros, características geradas como potência, torque e consumo específico de combustível (SFC) são afetadas diretamente pelo tipo de combustível utilizado.

Com o tempo, em busca de melhorias na eficiência e no desempenho desses motores de combustão interna, se tornou necessário o aprimoramento de seu sistema, buscando, entre outros fatores, reduzir as emissões de CO₂ e de outros componentes expelidos pelo sistema de exaustão (SINIGAGLIA; MARTINS; SILUK, 2021), provenientes do uso de combustíveis à base de petróleo, os combustíveis fósseis. Contudo, o consumo exagerado e o alto custo dos combustíveis fósseis líquidos, assim como a degradação do meio ambiente relacionada com a emissão de gases de efeito estufa e exploração de petróleo, tornaram necessária a procura, experimentação e implementação de fontes alternativas de combustível, como gás natural e biocombustíveis derivados de biomassa (AWAD et al., 2018).

Segundo a definição presente na Resolução ANP nº 16, de 18 de junho de 2008, da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), o gás natural veicular (GNV) é a denominação do combustível gasoso, tipicamente proveniente do gás natural ou biometano, ou da mistura de ambos, destinado ao uso veicular e cujo componente principal é o metano. Segundo a ANP, por um ponto de vista ambiental, social e econômico, o uso de GNV traz uma redução direta de gases de efeito estufa e emissões regulamentadas usando praticamente os mesmos tipos de veículos na estrada.

A partir da demanda energética proveniente do crescimento populacional das últimas décadas, principalmente no que diz respeito ao uso dos combustíveis fósseis, melhorias

nas tecnologias de perfuração do solo, em paralelo com a emergência de reservas com largas quantidades de gás de xisto, motivaram o interesse no uso de gás natural como fonte alternativa de energia (BAE; KIM, 2017). Outro fator que colaborou para que o gás natural seja uma opção de combustível substituto diz respeito ao controle das emissões da combustão, em vista de seu principal constituinte ser o metano. Logo, proporciona vantagens ecológicas e econômicas ante os combustíveis derivados de petróleo, pela sua disponibilidade aprimorada e eficiência (ALRAZEN; AHMAD, 2018).

Segundo Bae e Kim (2017), a abundância do gás natural é outro fator atrativo para um uso mais amplo em motores de combustão interna, já que suas fontes incluem jazidas de petróleo, de carvão, e também de gás quando o gás de xisto é armazenado. Tal abundância pode garantir redução nos custos de extração e produção do combustível, assim como fornecer estabilidade ao mercado. Além disso, outra fonte de gás natural se dá por meio de gases de síntese, denominados *Syngas*, derivados de biomassa que, quando sob processo de gaseificação, geram biocombustíveis de segunda geração, como o gás natural sintético (MOLINO et al., 2018).

Atualmente, a quantidade de carros movidos a GNV no mundo está crescendo a passos largos, principalmente pelo baixo custo quando comparado aos combustíveis mais convencionais, como gasolina e diesel. Em comparação, o gás natural apenas precisa ser processado da jazida de produção para o veículo para ser utilizado com combustível, enquanto que os combustíveis derivados do petróleo necessitam ser separados do mesmo e passar por um longo processo de refinamento (ALRAZEN; AHMAD, 2018).

1.1 JUSTIFICATIVA

O interesse no uso de GNV como uma fonte alternativa de combustível é proveniente da abundância de jazidas, assim como diferentes fontes de matéria prima, como gás de xisto, petróleo e carvão. Isso confere, dentre outros fatores, a uma estabilidade no custo tanto de exploração quanto de extração e uso do mesmo, em comparação aos combustíveis derivados de petróleo, como gasolina e diesel (BAE; KIM, 2017).

Além da vantagem econômica, o GNV como combustível dispõe de metano como seu principal constituinte, o que auxilia o controle das emissões provenientes da combustão e sua eficiência. Em comparação a gasolina, o gás natural é considerado um combustível de queima limpa. Seu alto nível de octano o torna uma escolha apropriada para motores com taxas de compressão alta, assim como sua alta temperatura de auto-ignição permite uma combustão com uma intensa fonte de energia, como uma centelha elétrica (ALRAZEN; AHMAD, 2018).

Para tanto, se torna justificável o ensaio de motores com gás GNV como combustível, em comparação ao uso de combustíveis convencionais como gasolina e etanol, a fim

de verificar parâmetros de desempenho e performance, no que tange a potência, torque e consumo específico de combustível, dentre outros parâmetros.

1.2 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste trabalho é medir o desempenho de um motor de combustão interna de três cilindros, com ignição por centelha, utilizando gás natural veicular e etanol como combustíveis, em parâmetros de desempenho como potência, torque e consumo específico de combustível.

1.3 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- Parametrizar o motor de três cilindros, a fim de alcançar melhores valores para diferentes condições de operação;
- Estudar as características de desempenho do gás GNV como combustível no motor a combustão interna em estudo, como potência, torque e consumo específico, em auxílio da Norma ABNT 1585:1996;
- Comparar os resultados obtidos pelo uso do gás GNV como combustível com os obtidos pelo uso de etanol como combustível no motor em testes, buscando outros parâmetros de desempenho.

2 Referencial teórico

O presente referencial teórico apresenta uma breve introdução a história dos motores de combustão interna, seus principais subsistemas, e um aprofundamento nos motores de Ciclo Otto, assim como os principais tipos de combustíveis utilizados, seus parâmetros de desempenho e características, finalizando com as características do etanol e GNV, objetos de estudo.

2.1 História dos Motores de combustão interna

Máquinas térmicas são mecanismos que permitem transformar o calor, oriundo de diferentes fontes, em trabalho mecânico (BRUNETTI, 2012). Apesar de apresentarem diferentes funcionamentos e fontes de combustível, as máquinas térmicas se operam pelo recebimento de calor de uma fonte em alta temperatura, convertendo parte desse calor em trabalho mecânico, e rejeitando o calor residual por uma região de baixa temperatura, como fluidos, atmosfera, entre outros. É comum a classificação de motores a combustão interna como máquinas térmicas, contudo, segundo Çengel e Boles (2011), os motores a combustão operam em um ciclo mecânico, e não em um termodinâmico, em vista de seu fluido de trabalho, os gases de combustão, não passarem por um ciclo completo. Ao invés de serem resfriados até a temperatura inicial, os gases de escape são expelidos e substituído por uma nova mistura de ar-combustível, dando início a um novo ciclo.

Os motores de combustão podem ser classificados entre combustão externa, quando o fluido motor não participa da combustão, e combustão interna, quando o combustível é queimado no seio do fluido motor. Atualmente, apesar de invenções como as turbinas e motores elétricos apresentarem características similares e algumas superiores aos motores a combustão, segundo Martins (2006), essa invenção do século XIX ainda se encontra em constante aprimoramento e adaptação, assim como foi feito nos anos emergentes da Segunda Revolução Industrial. Apesar da predominância dos antigos motores à carvão, em meados do século XVIII, os primeiros experimentos para o desenvolvimento de um motor a combustão procederam da utilização de pólvora para movimentação de pistões (TILLMANN, 2013).

Em 1867, meados da Segunda Revolução Industrial, a dupla de engenheiros Nicolaus Otto e Eugen Langen apresentaram um motor com características de desempenho melhores do que as apresentadas nos modelos de anos anteriores. A Figura 1 apresenta o motor apresentado pela dupla, com seu funcionamento à base de um pistão livre, impulsionado pelas combustão de gases nos cilindros, distribuindo trabalho em um volante. Com seu invento, o motor de Otto e Langen alcançou uma eficiência de 11%, algo surpreendente

à época. Muitos não sabiam, mas nove anos depois desse acontecimento, Nicolaus Otto retornaria ao cenário, apresentando um motor de combustão interna de quatro cilindros, mais compacto e leve, e com uma eficiência próxima a 14%, apresentando características que até hoje estão presentes nos motores de combustão interna (TILLMANN, 2013).

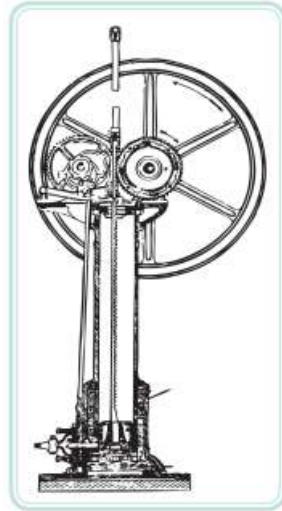


Figura 1 – Motor de Nicolaus Otto e Eugen Langer de Lenoir de 1867. Fonte: Adaptado de Tillmann (2013)

Com seu invento, Nicolaus Otto construiu um motor cujo funcionamento visa aproveitar o aumento da pressão advinda da reação de combustão da mistura ar-combustível ao máximo, proporcionando a rotação do volante do motor (MACHADO, 2014). Os motores do Ciclo Otto, cuja característica principal é trabalhar em volume constante, são classificados como motores alternativos, aqueles em que o trabalho realizado surge pelo movimento de subida e descida do pistão, com auxílio do sistema de biela-manivela para transformá-lo em rotação contínua (BRUNETTI, 2012).

Outro tipo de motor alternativo são os motores de ciclo Diesel, cuja diferença com os de ciclo Otto, segundo Martins (2006), reside na fase de fornecimento de calor, onde o ciclo Diesel apresenta pressão constante, ausência de ignição por centelha, e maior taxa de compressão também. A seção a seguir apresenta um maior aprofundamento sobre os motores de ciclo Otto com ignição por centelha, foco deste trabalho.

2.1.1 Motores do Ciclo Otto

Desde quando introduzido por Nicolaus Otto em 1876, o convencional motor a gasolina, também conhecido como motor de Ciclo Otto, funciona a partir da dinâmica de admissão da mistura ar-combustível por meio de uma válvula, e a ignição da mistura ocorre por meio de uma centelha, gerando a combustão interna (TILLMANN, 2013). Esse tipo de ignição também classifica esses motores em motores de ignição comandada, na medida que a combustão da mistura ocorre a partir de uma descarga elétrica dentro da

câmara de combustão, nos cilindros do motor. Tal processo se difere, entre outros pontos, do apresentado por Rudolf Diesel no motor cujo ciclo recebeu o próprio nome do inventor. Neste motor, a ignição se dá pela compressão do ar puro, que inflama o combustível em seu interior, sem necessidade de uma centelha elétrica (MARTINS, 2006).

Em comparação aos motores Diesel, principais concorrentes desde a Segunda Revolução Industrial, os motores de Ciclo Otto funcionam a partir de quatro tempos, outra classificação de motores bastante conhecida. A Figura 2 apresenta o diagrama de um cilindro, com seu conjunto pistão-biela, enquanto que a Figura 3 apresenta os quatro tempos de um Ciclo Otto de Combustão.

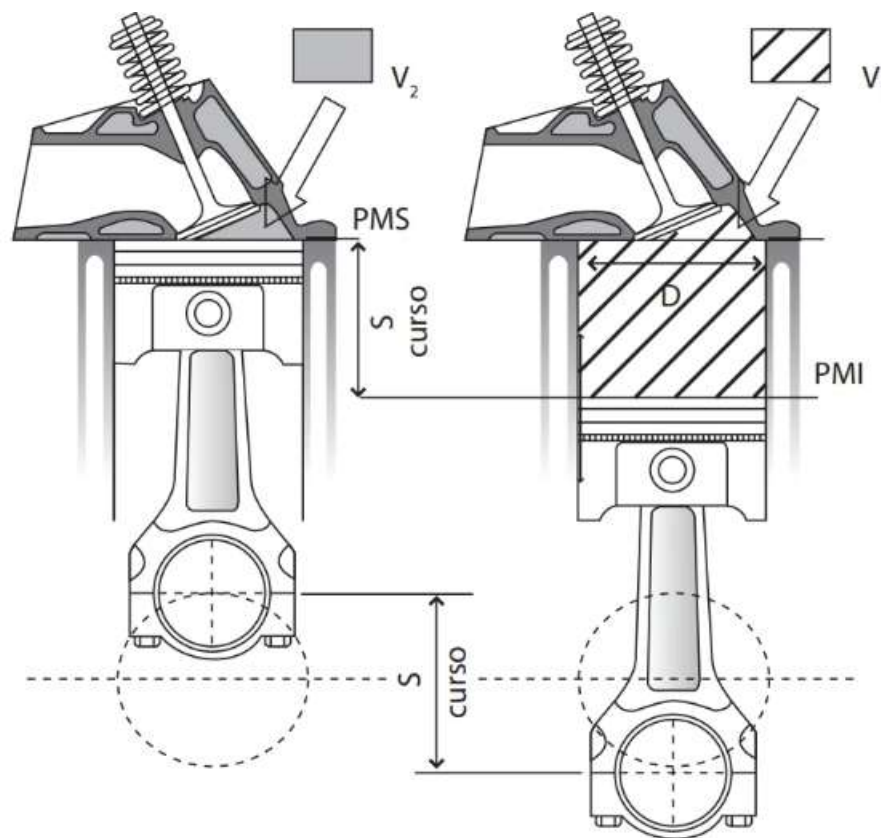


Figura 2 – Diagrama de funcionamento de um cilindro. Fonte: Adaptado de Brunetti (2012)

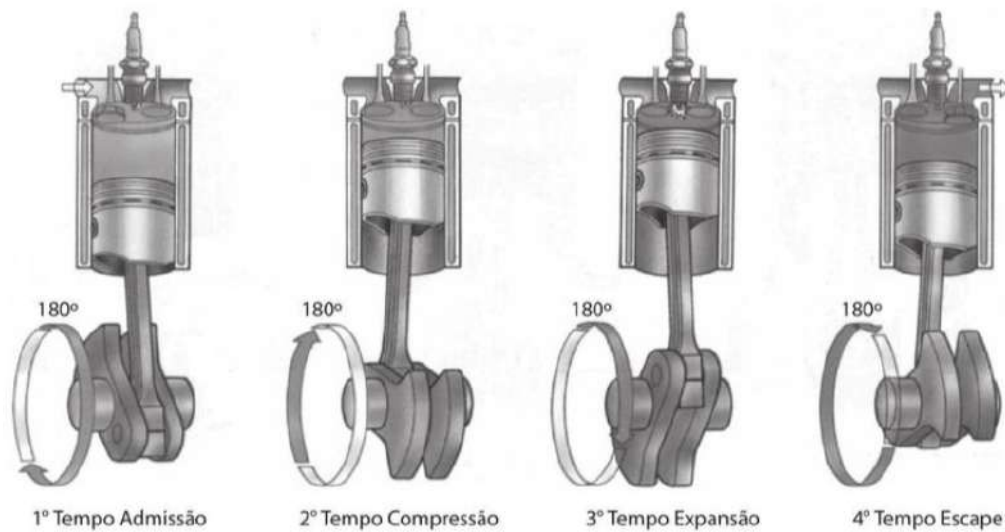


Figura 3 – Os quatro tempos de um motor alternativo. Fonte: Adaptado de [Brunetti \(2012\)](#)

Segundo [Brunetti \(2012\)](#), o primeiro tempo do ciclo Otto, chamado Tempo de Admissão, é caracterizado pelo movimento do pistão ao ponto morto inferior (PMI), posição onde o pistão está mais distante da cabeça do cilindro. Neste movimento, ocorre uma espécie de sucção interna, proporcionando que a válvula de admissão atue, admitindo a mistura ar-combustível no interior do cilindro. Com o fechamento da válvula de admissão, o segundo tempo, denominado Tempo de Compressão, se inicia, com o pistão se deslocando para o ponto morto superior (PMS), local onde ocorre a compressão da mistura ar-combustível, até um determinado volume que proporcione uma ótima combustão.

O terceiro tempo, o Tempo de Expansão, se dá quando uma centelha elétrica é gerada nas bobinas de ignição, proporcionando assim a combustão da mistura comprimida de ar-combustível. Tal ignição provoca uma combustão nessa pequena região, cuja pressão gerada impulsiona o pistão para o PMI. É nesse tempo em que o trabalho do motor, oriundo da combustão, é realizado. Após a expansão, se inicia o quarto tempo, Tempo de Escape, onde a válvula de escape é aberta, na região superior do cilindro, e com o movimento de retorno do pistão do PMI ao PMS, os gases produzidos após a combustão são expelidos pela válvula, reiniciando o ciclo. Como dito, apenas no tempo de expansão ocorre produção de energia mecânica, pelo movimento forçado ao pistão. Nos demais tempos, ocorre apenas absorção de energia, também denominados de tempos passivos ([TILLMANN, 2013](#)).

Os motores de ciclo Otto dispõe de alguns aspectos particulares ao seu desenvolvimento e evolução, dentre elas a taxa de compressão, relação curso/diâmetro e o volume deslocado do motor. No que diz respeito a taxa de compressão, ela apresenta valores superiores nos motores do ciclo Diesel, a fim de ultrapassar a temperatura de autoignição do combustível. Essa taxa corresponde a quantidade de vezes que a mistura ar-combustível deve ser inserida no sistema e comprimida, antes que a ignição se inicie. Ela é diretamente relacionada com o rendimento térmico do motor, e quanto maior seu valor, melhor será o aproveitamento energético. Logo, isso explica o por quê dos motores Diesel consumirem menos combustível que um de estrutura similar de ciclo Otto, gerando a mesma potência (TILLMANN, 2013; MARTINS, 2006). Segundo Brunetti (2012), os motores de ciclo Otto apresentam taxa de compressão relativamente baixa, para que não ocorra autoignição, além de possibilitar o controle do tempo de ignição e avanço de chama durante seu funcionamento.

A relação curso/diâmetro é uma característica dos motores de combustão interna que, ao longo dos anos, vem se reduzindo, buscando melhorias na potência gerada pelos mesmos. Um maior diâmetro e menor curso do pistão compreendem em uma maior velocidade de rotação de motores. Isso, correlacionado ao uso de válvulas de maior calibre, gera um aumento considerável de sua potência, que é proporcional à área dos pistões, segundo Martins (2006).

Já o volume deslocado do motor, também chamado de cilindrada total, diz respeito ao volume deslocado por um pistão, que corresponde a área do pistão multiplicada pelo seu curso, multiplicado pela quantidade de pistões presentes no motor (BRUNETTI, 2012). A Equação (2.1) indica o volume deslocado do motor, em cm^3 . Esse parâmetro é comumente visto em motores, a fim de declarar sua capacidade volumétrica. Em exemplo, motores com volume deslocado de aproximadamente 999 cm^3 são denominados motores 1.0.

$$V_{deslocado} = \frac{\pi * D^2 * S * N}{4} \quad (2.1)$$

Onde:

- $V_{deslocado}$: Volume deslocado do motor, ou cilindrada total, em cm^3 ;
- D^2 : Diâmetro do pistão elevado ao quadrado, em cm;
- S : Curso do pistão, em cm; e
- N : Número de cilindros no motor.

Segundo Tillmann (2013), um outro parâmetro importante na busca pela eficiência dos motores é o correto preparo da mistura ar-combustível, correlacionada com as condições de operação apresentadas pelo próprio motor quanto a sua geometria, disposição de

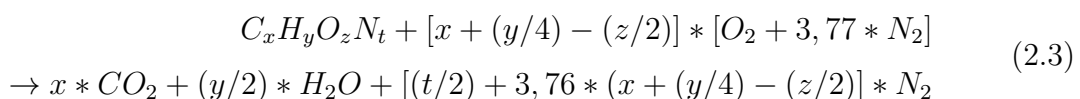
instrumentos e ajustes de parâmetros de funcionamento, buscando aumento de potência e melhor eficiência. Por exemplo, com o aumento da taxa de compressão, a capacidade de que a faísca ocorra é reduzida. Para isso, é necessário que o peso específico da mistura seja alterado, na medida ideal, em vista de que uma mistura extremamente rica não gera um melhor rendimento térmico. Logo, uma condição otimizada de riqueza da mistura, que diz respeito a quantidade de massa de ar presente na mistura, em relação a massa de combustível, está relacionada com os parâmetros e estrutura característicos no próprio motor, buscando sempre o melhor desempenho e eficiência.

Como citado anteriormente, a riqueza da mistura ar-combustível se dá a partir do coeficiente lambda, " λ ", apresentado na Equação (2.2), que corresponde a razão de equivalência entre a razão ar/combustível presente na mistura fresca com a razão ar/combustível estequiométrica (BRUNETTI, 2012).

$$\lambda = \frac{\frac{m_{ar}}{m_{combustivel}}}{\frac{m_{ar}}{m_{combustivel}}_{estequiometrica}} \quad (2.2)$$

Logo, segundo Brunetti (2012), por se tratar de uma razão, os valores giram em torno da unidade, e a partir dela podem ser definidas as misturas frescas de ar-combustível admitidos nos motores de combustão interna em duas categorias, as misturas ricas e as misturas pobres. As misturas pobres, ou estequiométricas, correspondem ao $\lambda \geq 1$, e se caracterizam pelo excesso de oxigênio na mistura, logo, com quantidades de monóxido de carbono e hidrogênio desprezíveis nos produtos da combustão. Já as misturas ricas, correspondentes ao $\lambda < 1$, indicam uma escassez de oxigênio, logo, um excesso de combustível na mistura. A presença de monóxido de carbono na composição dos gases de escape indica uma mistura rica, enquanto a presença de oxigênio indica uma mistura pobre (TILLMANN, 2013).

Na Equação (2.2), os valores da relação A/C real, isto é, a razão entre a massa de ar e a massa de combustíveis instantâneos, podem ser adquiridos durante os ensaios e utilização dos motores, por sensores capazes de medir a vazão mássica ou volumétrica deste fluidos, ou pela utilização de um sensor da quantidade de oxigênio na composição da mistura, conhecido como sonda lambda. Contudo, a relação A/C estequiométrica é apresentada a partir da composição química da mistura ar-combustível, durante sua combustão ideal (BRUNETTI, 2012). A Equação (2.3) apresenta a relação estequiométrica da combustão de um combustível genérico, e o significado das suas variáveis.



Onde:

- x: número de átomos de carbono no combustível;
- y: número de átomos de hidrogênio no combustível;
- z: número de átomos de oxigênio no combustível; e
- t: número de átomos de nitrogênio no combustível.

Logo, segundo Brunetti (2012), a partir da substituição do peso atômico dos elementos químicos, sendo aproximadamente C=12, H=1, O=16 e N=14 (quando o combustível apresentar nitrogênio na sua composição), é possível descobrir a massa de combustível e de ar que compreende a combustão estequiométrica. Ao dividir a massa de ar pela massa de combustível, tem-se a relação ar/combustível estequiométrica, para um determinado combustível.

Com a correta aplicação de um determinado combustível em motores de ignição por faísca, alguns parâmetros podem ser indicados de forma analítica, como a potência indicada e a eficiência volumétrica. A Equação (2.4) apresenta o cálculo da potência indicada de um motor (N_i), que é a relação entre a vazão mássica de ar seco que entra nos cilindros, a relação combustível/ar estequiométrica (F), que corresponde a relação inversa da relação lambda, a eficiência térmica do motor (η_t) e o Poder Calorífico Inferior do combustível (PCi). Logo, para um mesmo combustível ensaiado, com uma constante relação combustível/ar, e valores constantes da relação de compressão e avanço da faísca para uma determinada operação, é possível tornar aproximadamente constante a eficiência térmica do motor, e sua potência indicada diretamente proporcional com a vazão mássica de ar (BRUNETTI, 2012).

$$N_i = \dot{m}_a * F * PCi * \eta_t \quad (2.4)$$

A Equação (2.4) se torna válida apenas nos casos onde a relação combustível/ar "F" está muito próxima do seu valor estequiométrico, em vista da potência ser afetada, em uma forma não-linear, pela relação combustível/ar. Já a eficiência volumétrica (η_v) se apresenta como a relação entre a massa da mistura nova que entra nos cilindros no curso de admissão, multiplicada pela cilindrada total do motor com a densidade da mistura nas condições de entrada e com a rotação do motor, exemplificada na Equação (2.5). Este parâmetro é imprescindível no ensaio de motores, na medida que se apresenta como medida de desempenho do conjunto do cilindro (BRUNETTI, 2012).

$$\eta_v = \frac{2 * \dot{m}_e}{\rho_e * V_{cilindros} * n} \quad (2.5)$$

Onde:

- \dot{m}_e : vazão mássica da mistura fresca que escoar para dentro dos cilindros, em kg/s;
- $V_{cilindros}$: cilindrada total do motor, em cm^3 ;
- ρ_e : densidade de mistura fresca que escoar para dentro dos cilindros, nas condições de entrada, em kg/cm^3 ;
- n : rotação do motor, em RPM; e
- 2 : valor correspondente para um motor de quatro tempos.

A partir das relações apresentadas na equação da eficiência volumétrica de um motor (2.5) vê-se que, dada a correlação direta entre a potência indicada do motor (N_i) e a massa de ar seco que entra nos cilindros, pode-se definir a eficiência volumétrica a partir da vazão mássica de ar admitido, utilizando-se das condições de entrada que dizem respeito à massa específica do ar seco (ρ_a) com a vazão mássica de ar seco (\dot{m}_a) (BRUNETTI, 2012), como apresentado na Equação (2.6).

$$\eta_v = \frac{2 * \dot{m}_a}{n * V_{cilindros} * \rho_a} \quad (2.6)$$

A partir dela, é possível mensurar a densidade do ar (ρ_a) a partir da pressão parcial da mistura fresca (P_e) e da temperatura da mistura fresca (T_e). Vale ressaltar que a pressão da mistura fresca equivale, diretamente, a soma das pressões parciais do ar, do combustível e do vapor de água proveniente da umidade do ar. Logo, utilizando da equação dos gases perfeitos, e tendo conhecimento de (P_e) e (T_e), a Equação (2.7), uma outra forma de representar a massa específica do ar seco (ρ_a), apresenta a massa específica da mistura multiplicada por um fator de correção, entre parênteses. Este fator é de suma importância quando utiliza-se de combustíveis de baixa massa molecular, ou combustíveis gasosos (BRUNETTI, 2012).

$$\rho_a = \frac{P_e}{R * T_e} * \left[\frac{1}{1 + (F_v * \frac{29}{M_c}) + 1.6 * g} \right] \quad (2.7)$$

Onde:

- $T_a = T_e$;
- T_e = temperatura da mistura fresca nas condições de entrada;
- T_a = temperatura do ar;
- R = constante universal dos gases perfeitos;
- P_a = pressão parcial do ar;

- F_v = relação entre a massa de combustível e a massa de ar;
- 29 = valor da massa molecular do ar;
- g = razão entre a massa do vapor de água e a massa do ar;
- M_c = massa molecular do combustível; e
- 1.6 = razão entre o valor da massa molecular do ar pela massa molecular do vapor de água.

Outra forma de se representar a Eficiência Volumétrica é pela Equação (2.8), relacionando a Eficiência volumétrica real pela teórica.

$$\eta_v = \frac{V_t * \left(\frac{P_{map}}{R * T_{map}}\right) * (RPM/2)}{V_t * \left(\frac{RPM_{m\acute{a}x}}{2}\right) * \eta_v M\acute{a}x} \quad (2.8)$$

Onde:

- V_t : Volume total do motor, em m^3 ;
- P_{map} : Pressão absoluta no coletor de admissão, em KPa;
- R : constante universal dos gases perfeitos;
- T_{map} : Temperatura no coletor de admissão, em °C;
- $RPM_{m\acute{a}x}$: Rotação por minuto máxima alcançada no motor; e
- $\eta_v M\acute{a}x$: Eficiência Volumétrica teórica do motor.

A fim de efetuar corretamente os ensaios em motores de combustão interna, a Norma Técnica ABNT 1585:1996, disponibilizada pela [ABNT \(1996\)](#), dispõe do método de ensaio de motores projetados para veículos automotores, visando a avaliação do desempenho a partir da apresentação de curvas de potência e consumo específico de combustível, a plena carga. Nesta norma são apresentados diversos parâmetros, método de montagem, regulagem de instrumentos e sistemas, e orientação para aferimento da potência efetiva e consumo específico do motor.

No que diz respeito ao ensaio da potência efetiva líquida, o mesmo deve ser ensaiado com um acelerador a plena carga, e seguindo as recomendações do fabricante do motor quanto ao seu prévio amaciamento, partida e aquecimento do motor. As medições de torque e potência devem ser tomadas em um número suficiente de rotações do motor, a fim de delimitar completamente uma curva de potência entre a menor e a maior das rotações recomendadas pelo fabricante, segundo ([ABNT, 1996](#)).

Nas seções seguintes estão apresentados alguns dos principais sistemas que compõem o escopo de ensaio apresentado neste trabalho.

2.1.2 Ignição por Centelha

Como citado anteriormente, os motores de ciclo Otto, de quatro tempos, no tempo de expansão, apresentam a utilização da ignição por centelha elétrica, originária das bobinas de ignição presentes em cada um dos cilindros do motor. Contudo, diferente dos ciclos teóricos, a combustão não ocorre de forma instantânea. Pelo contrário, a faísca deve ser aplicada antes da chegada do pistão ao PMS, na medida que o avanço e atraso da faísca interfiram, diretamente, no trabalho gerado pelo motor. Em todos os projetos de motores, o instante ideal de ignição é estudado e necessário, na medida que o avanço da ignição proporciona o maior torque possível, segundo Brunetti (2012). A Figura 4 apresenta uma vela de ignição e seus componentes internos, elemento final do sistema de ignição, que gera uma descarga elétrica dentro do cilindro, gerando a combustão da mistura. Na vela, o conector traz a corrente elétrica proveniente do sistema de distribuição, até chegar no eletrodo, elemento inserido no interior dos cilindros.

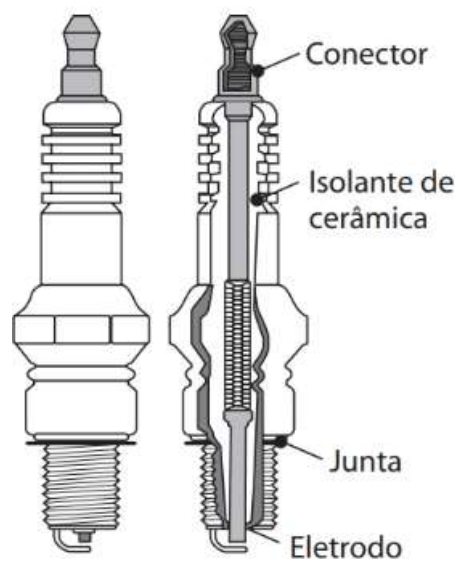


Figura 4 – Diagrama de componentes de uma vela de ignição. Fonte: Adaptado de Brunetti (2012)

Diferente da complexidade dos sistemas de injeção, o sistema de ignição apresenta variáveis de menor número, mas não menos importantes, como ponto de ignição, duração da faísca e ângulo em *dwell*. Este ângulo compreende o tempo em que acontece a passagem de corrente no primário da bobina, ocasionando na transformação de energia elétrica em magnética, e vice-versa. Ele é atuado em situações de altas rotações e baixa tensão na bateria, por meio de sistemas digitais de ignição, para que a potência da faísca seja

sempre ótima. Em outras palavras, os mapas de ignição buscam a máxima potência, menor consumo de combustível, impedimento da detonação (*knock*), e minimização da poluição pelos gases de escape (MARTINS, 2006).

Knock, também denominado de detonação do combustível, diz respeito a capacidade do combustível apresentar uma combustão irregular, caracterizada por altas pressões, velocidades de propagação de chama elevadas, um ruído metálico e vibração destrutiva no interior dos cilindros. É uma forma de auto-ignição de parte da mistura ar-combustível. A partir disso, uma característica do tipo de combustível empregado diz respeito a sua qualidade anti-*knock*, podendo ser estipulada a partir do índice de octano do combustível (MARTINS, 2006).

2.1.3 Sistema de injeção

Segundo Martins (2006), o sistema de injeção de combustível surge para aumentar a potência, reduzir o consumo, melhorar a resposta e diminuir as emissões de poluentes. Podem ser classificados como multiponto e monoponto, dizendo respeito a quantidade de injetores presentes no motor. Basicamente, o sistema de injeção atua a partir da medição de massa (ou volume) de ar admitida, injetando uma quantidade proporcional de gasolina, visando sempre uma combustão ótima.

Além dessa classificação quanto a quantidade de injetores, os sistemas de injeção também se classificam quanto a posição do injetor, sendo dentro da câmara de combustível ou fora, caracterizando injeções do tipo direta e indireta de combustível, respectivamente. Tal disposição espacial pode ser visualizada na Figura 5. Em motores de ciclo Otto, quando se utiliza a injeção direta de combustível nos cilindros, é possível mais de uma injeção de combustível por ciclo de combustão, resultando em menor temperatura no interior da câmara de combustão e maior resistência à detonação, permitindo uma taxa de compressão mais elevada e eficiente, além de proporcionar um melhor controle da mistura ar-combustível (BRUNETTI, 2012).

Um parâmetro oriundo do sistema de injeção, retirado a partir do modelo físico proposto por Hendricks (1997), sendo diretamente relacionado com a eficiência volumétrica do motor, é o tempo que os injetores ficam abertos durante um ciclo, " $T_{injetores}$ ", cujo valor é verificado a partir dos parâmetros apresentados na Equação (2.9).

$$T_{injetores} = \frac{m_c * N^o c}{V_{fluxo.injetor} * N^o i} * (10^6) \quad (2.9)$$

Onde:

- $T_{injetores}$: tempo em que os bicos injetores de combustível permanecem abertos, em ms [milissegundos];

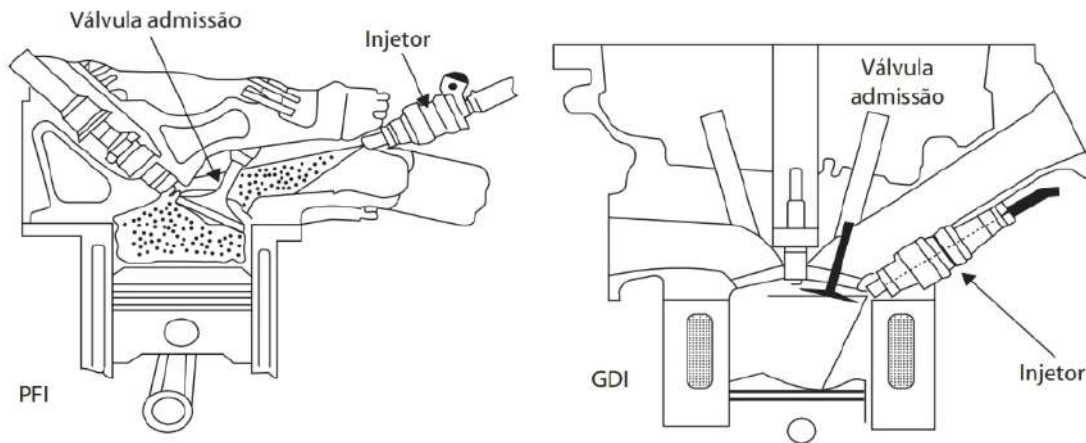


Figura 5 – Exemplo de injeção indireta (esquerda) e injeção direta (direita). Fonte: Adaptado de Brunetti (2012)

- m_c : massa de combustível admitida, em kg;
- $V_{fluxo.injetor}$: fluxo de combustível da válvula injetora, no valor de $2,948 \mu\text{g}/\mu\text{s}$;
- $N^{\circ}c$: Número de cilindros do motor; e
- $N^{\circ}i$: Número de injetores do motor.

Segundo o desenvolvimento do modelo apresentado por Hendricks (1997), outra forma de apresentar o cálculo do tempo dos injetores abertos é utilizando da equação dos gases ideais, buscando aproximar a relação da densidade, pressão e temperatura do ar no coletor de admissão, em conjunto com a Equação (2.9). Tal representação é dada na Equação (2.10).

$$T_{injetores}[ms] = \frac{\rho_{ar} * \left(\frac{P_{MAP}}{P_o}\right) * \left(\frac{T_o}{T_{MAP}}\right) * N^{\circ}c * V_{pistao} * \eta_v}{V_{fluxo.injetor} * N^{\circ}i * A/C_{est}} * (10^6) \quad (2.10)$$

Onde:

- ρ_{ar} : Densidade do ar, de aproximadamente $1,29 \text{ kg}/\text{m}^3$;
- P_{MAP} : Pressão absoluta no coletor, em KPa;
- P_o : Pressão atmosférica, em KPa;
- T_o : Temperatura ambiente, em K;
- T_{MAP} : Temperatura no coletor, em K;

- V_{pistao} : Volume correspondente a um cilindro, que é resultado da área do pistão vezes seu curso;
- η_v : Eficiência volumétrica; e
- A/C_{est} : Relação ar/combustível estequiométrica.

O fator de correção (10^6) se dá a fim de corrigir as unidades de medida apresentadas durante o equacionamento.

2.2 Combustíveis e fontes de alimentação

O processo de combustão se resume, entre outras palavras, em uma reação rápida entre o oxigênio e os constituintes de um combustível, produzindo calor, luz e trabalho. É um fenômeno que compreende reações químicas complexas, a depender de diferentes fatores como o combustível utilizado, o grau da mistura ar-combustível, geometria da câmara de combustão, temperatura a ser submetida, entre tantas outras (GARCIA, 2013). Esta seção compreende o descritivo de combustíveis fósseis e os de fontes alternativas, como maior ênfase nos combustíveis etanol e gás GNV, suas diferenças e semelhanças, assim como principais parâmetros e características.

2.2.1 Combustíveis Fósseis Líquidos

Desde a Revolução Industrial, a demanda por energia vem crescendo a cada ano, principalmente em países desenvolvidos. Segundo Bae e Kim (2017), o crescimento populacional das últimas décadas acarretou em um aumento exagerado da demanda de energia proveniente de combustíveis fósseis. Apesar da constante procura por fontes alternativas de energia, como nuclear, solar e eólica, pesquisas na área da combustão ainda se fazem necessárias, na medida que a geração de energia e trabalho pela combustão de combustíveis representa, ainda, um importante papel na indústria. Em 2015, cerca de 80 a 85% da demanda energética mundial é proveniente da combustão de combustíveis fósseis. Contudo, com o surgimento de regulamentos internacionais sobre emissões veiculares, que visam reduzir gases como dióxido de carbono e outros gases de efeito estufa, evitando o esgotamento das jazidas de petróleo, surge um novo cenário mundial, em que a utilização de fontes alternativas de combustível, menos poluentes que os convencionais combustíveis fósseis e com baixo custo de produção e processamento, se mostram cada vez mais acessíveis e suscetíveis para uso em diversos setores (YAKIN; BEHCET, 2021; GHENAI; JANAJREH, 2015).

Quando se relaciona a efetividade das fontes alternativas de combustíveis com as mais usuais como a gasolina e o óleo diesel, parâmetros e características principais podem

ser comparados, a fim de elencar quando um ou outro combustível deve ser utilizado, a partir de um objetivo específico. Uma dessas características presentes nos combustíveis utilizados em motores de ignição comandada é o índice de octano, também chamado de poder antidetonante. Tal característica diz respeito à taxa de compressão possível e também à velocidade de combustão. Em outras palavras, quando um combustível possui elevado índice de octano, há maior eficiência na sua queima quando utilizado em um motor de alta taxa de compressão (MARTINS, 2006). Este índice é determinado pelo percentual de isoctano ($C_8H_{18}O$) em relação ao heptano (C_7H_{16}) presente no combustível.

Outro fator de extrema relevância é a própria volatilidade do combustível. Seja com os combustíveis fósseis ou com os de fonte alternativa, como os biocombustíveis, essa característica se torna importante não só para o bom desempenho do motor, mas também por um manuseio seguro por parte dos usuários. Em acordo com Brunetti (2012), este parâmetro pode ser definido tanto pela faixa de destilação, no que diz respeito as suas temperaturas do Ponto Inicial de Ebulição (PIE) até o Ponto Final de Ebulição (PFE), como também pela própria pressão do vapor.

As gasolinas e gasóleos são combustíveis provenientes da mistura de inúmeros hidrocarbonetos, cada um com sua própria temperatura de ebulição. Em vista disso, se faz necessária a configuração de uma curva de destilação, enquanto que os combustíveis monocomponentes, como o caso do metanol, apresentam apenas a temperatura de ebulição (MARTINS, 2006).

No que se refere a quantidade de calor que pode ser liberada por um combustível, tal propriedade é chamada de poder calorífico. Ela diz respeito a quantidade de calor liberada por unidade de massa de combustível, quando queimado completamente a uma dada temperatura. Em um motor de combustão interna, o desempenho energético é proveniente não dos poderes caloríficos superior ou inferior (PCs ou PCi, respectivamente), mas sim do poder calorífico em volume (BRUNETTI, 2012). A Equação (2.11) apresenta o cálculo para o poder calorífico inferior.

$$PCi = PCs - L_{H_2O} * m_{H_2O} \quad (2.11)$$

Onde:

- L_{H_2O} : calor latente de condensação da água, a uma determinada temperatura; e
- m_{H_2O} : massa de água resultante por unidade de massa da mistura.

Segundo Martins (2006), o poder calorífico de um combustível é mensurado a partir da quantidade de calor extraída durante a sua combustão, com a simplificação de equidade de temperatura dos reagente e dos produtos. A indicação do poder calorífico

de um combustível pode ser dúbia, na medida que é possível um combustível apresentar poder calorífico elevado quando comparado a outros, porém, na mistura com o ar, seu poder calorífico pode ser inferior.

Ainda se tratando de quantidade de calor, o calor latente de vaporização também é uma propriedade relevante nos combustíveis fósseis, na medida que diz respeito ao calor necessário para vaporizar uma determinada massa de combustível. Essa propriedade interfere no enchimento do motor, em vista de que, quanto maior o calor latente de vaporização, mais calor é retirado do ar na admissão do motor e, conseqüentemente, mais massa de ar-combustível é aspirada, gerando maior energia a cada combustão (BRUNETTI, 2012).

Atualmente, um dos fatores da escolha dos combustíveis está relacionada com os gases provenientes de sua combustão e emitidos ao meio, e sua interferência com o mesmo, em particular os gases de efeito estufa. Portanto, a emissão de CO_2 é um parâmetro fundamental, principalmente visando produção de combustível e uso em larga escala. Quando comparados aos combustíveis derivados de petróleo, os combustíveis gasosos como gás natural e hidrogênio apresentam níveis pequenos de produção de gás carbônico, relacionados diretamente à relação H/C (MARTINS, 2006).

As subseções a seguir apresentam uma breve descrição dos combustíveis etanol e gás natural veicular, no que diz respeito a sua origem, disponibilidade, benefícios e dificuldades, entre outros fatores.

2.2.2 Etanol

Segundo a ANP (2015), o etanol é considerado um biocombustível proveniente do processo fermentativo de biomassa renovável, utilizado em motores de combustão interna. A Resolução ANP nº 19/2015 dispõe de diversos requisitos para a fabricação, importação e exportação do etanol em território nacional, além de normas técnicas sobre utilização, ensaio e propriedades desse combustível.

Popularmente chamado de álcool, o etanol é um combustível renovável ecologicamente correto, na medida que as principais matérias-primas de que é originado, como o melão, a cana-de-açúcar e o milho, podem funcionar como um sumidouro de CO_2 , pelos baixos níveis de emissão de gases de efeito estufa ao meio ambiente. Além disso, a cana-de-açúcar e o milho são as principais matérias-primas presentes no Brasil e Estados Unidos, que são os maiores produtores de etanol do mundo, seja como combustível ou como aditivo da gasolina (BAE; KIM, 2017; AGARWAL, 2007).

Desde a década de 1970, frente a crise do petróleo que atingiu diversos setores da indústria com os altos preços no petróleo, e conseqüentemente na gasolina, foi implementado no Brasil o Programa ProÁlcool, com o objetivo de alcançar a independência brasileira dos combustíveis fósseis em automóveis, por meio do uso de etanol como com-

bustível e aditivo de combustível, nas formas de etanol etílico hidratado e etanol anidro, respectivamente. Desde então, os incentivos governamentais sob o cultivo da cana-de-açúcar com foco na produção de etanol, assim como a introdução no mercado brasileiro de veículos com motorização *flex-fuel*, capazes de funcionar utilizando gasolina, etanol e as possíveis misturas deles como combustíveis, acarretaram em uma menor demanda pela importação de combustíveis fósseis do exterior (RIBEIRO; SCHIRMER, 2017).

O etanol pode ser expresso pela composição química C_2H_6O , e sua produção e distribuição é mais barata, simples e menos agressora ao meio ambiente quando comparada a produção dos combustíveis fósseis, que necessitam de um processo de refino muito mais complexo, desde sua extração até utilização nos veículos (AGARWAL, 2007). Seja como aditivo da gasolina ou como combustível puro, sua mistura apresenta um alto índice de octano, o que o faz suportar altas taxas de compressão, se tornando mais resistente ao *auto-knock* do que a gasolina pura (AWAD et al., 2018; AGARWAL, 2007). A seção 2.1.2 deste trabalho, presente na página 30, apresentou uma breve explicação sobre *knock*.

Segundo Bae e Kim (2017), um dos fatores que retifica o etanol como uma fonte de combustível alternativa útil nos motores de ignição por centelha é o seu potencial de alcançar uma alta eficiência térmica, principalmente pelo processo de combustão da mistura. A combustão da mistura ar-etanol apresenta uma combustão completa, principalmente pelo alto teor de oxigênio em sua composição, e também por apresentar um único ponto de ebulição (AWAD et al., 2018).

Apesar da relação de energia por unidade de volume do etanol hidratado ser inferior que a da gasolina, ele consegue apresentar valores superior de torque e potência indicada, porém com um maior consumo de combustível. Outra característica deste comparativo é que o etanol apresenta uma maior eficiência volumétrica, principalmente pelo seu elevado calor latente de vaporização, que corresponde a capacidade do combustível em absorver o calor adicional na câmara de combustão, a fim de mudar do estado líquido para o gasoso. Essa propriedade possui o papel crucial de resfriamento da câmara de combustão, evitando parte da perda de energia por calor (AWAD et al., 2018).

2.2.3 Gás Natural Veicular - GNV

Segundo a ANP (2008), o gás natural veicular (GNV) é caracterizado como um combustível gasoso, tipicamente proveniente do Gás Natural ou Biometano, ou da mistura de ambos, destinado ao uso veicular e cujo componente principal é o metano.

Por ser um combustível gasoso, ele apresenta uma baixa relação entre o número de moléculas de carbono e hidrogênio, produzindo uma menor quantidade de dióxido de carbono, além de caracterizar uma mistura mais homogênea com o ar, facilitando sua combustão. Para o caso de motores de combustão interna *fuel-flex*, isto é, que apresentam

apenas etanol e gasolina como combustíveis possíveis, é necessária uma maior energia para ignição, proveniente das bobinas de ignição ou de outras propriedades do motor, em vista de que o gás natural apresenta baixa velocidade de propagação de chama (MARTINS, 2006).

Como o gás natural apresenta metano como seu principal constituinte, e por apresentar uma baixa relação carbono/hidrogênio de 1:4, quando comparada a relação de 1:2.3 da gasolina, a produção de dióxido de carbono é comparativamente baixa, o que auxilia na minimização da emissão de hidrocarbonetos e monóxido de carbono ao meio, quando combinado com misturas pobres e extra pobres (MARTINS, 2006). Além disso, o gás natural veicular apresenta um elevado índice de octano, que permite a operabilidade de motores com uma alta taxa de compressão, gerando um potencial para eficiências térmicas elevadas. Em seu estudo, Kar et al. (2021) compara a utilização de gás natural veicular e de gasolina injetados diretamente em um motor. Dentre os resultados, é indicado que a emissão de hidrocarbonetos não queimados no escape é menor com a injeção direta de GNV, em geral, quando comparada com a injeção direta de gasolina no motor, decorrente de uma mistura mais homogênea e da eliminação de resíduos do combustível nos componentes do motor.

Dentre outros fatores que colaboram com a utilização de GNV como uma fonte alternativa e viável de combustível estão sua larga disponibilidade mundial, não agressividade ao meio ambiente, sua compatibilidade com motores tanto de ciclo Otto quanto Diesel, além do baixo custo operacional ligado a sua extração e uso. Seu uso emprega benefícios ao meio ambiente como uma opção de combustível mais limpa disponível no mercado, em vista de suas emissões serem relativamente menores em comparação a gasolina. Outra fator é a alta razão de hidrogênio/carbono (H/C), razão essa em que, quanto maior, menor será a quantidade de monóxido e dióxido de carbono liberados no escape (KHAN; YASMIN; SHAKOOR, 2015).

A utilização de GNV como combustível em veículos, quando sob injeção indireta nos cilindros, apresenta dificuldades com relação a própria eficiência volumétrica, com um decaimento de quase 16% de torque gerado, em comparação à gasolina. Contudo, utilizando-se da injeção direta de GNV nos cilindros após o fechamento da válvula de admissão, constatam-se incrementos no torque do motor em baixas velocidades, com uma compensação de cerca de 2/3 do torque naturalmente perdido nesse regime, como citam Bae e Kim (2017). Logo, surge a necessidade de realizar o uso efetivo do gás GNV como fonte de combustível, a fim de verificar se a literatura acompanha os resultados experimentalmente obtidos, para um determinado motor.

No Brasil, o preço do m^3 de gás natural é menor quando comparado ao litro de gasolina, como visto na Tabela 1, com dados retirados da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP, 2008), de 2012 até 2021. Logo, quando comparado

aos custos oriundos da exploração e extração do gás natural, como citado anteriormente, tal característica econômica fomenta seu uso como fonte alternativa de combustível.

Tabela 1 – Preço médio de gás natural e gasolina ao consumidor no Brasil em dólar, num período de 10 anos, adaptado dos dados fornecidos pela ANP

Ano-referência	Preço médio do GNV (US\$ /m ³)	Preço médio da gasolina (US\$ /litro)
2012	14,475	9,030
2013	15,099	9,443
2014	15,739	9,940
2015	17,687	10,913
2016	19,466	11,807
2017	19,930	12,373
2018	23,326	14,426
2019	23,160	16,706
2020	22,636	16,346
2021	30,580	20,076

A Figura 6 ilustra os dados apresentados na tabela acima, em um formato de gráfico de barras. A partir dela, e pelo desvio padrão simples dos dados apresentados, é perceptível que o desvio padrão do preço do gás GNV, no decorrer dos anos, é menor do que o preço do litro de gasolina, o que torna a variável econômica um fator determinante para a pesquisa e ensaios desta fonte de combustível em motores a combustão convencionalmente *flex* (gasolina/etanol).

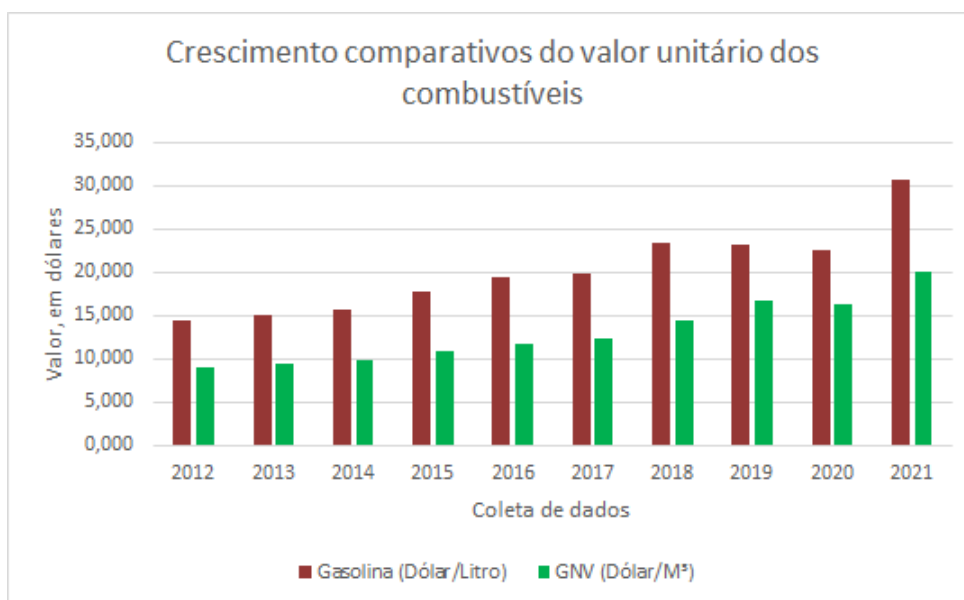


Figura 6 – Gráfico de barras retirado da Tabela 1, referente ao crescimento do preço médio do gás natural e da gasolina no Brasil, em dólares. Fonte: Adaptado de ANP (2008)

Já as Figuras 7 e 8 apresentam, respectivamente, uma análise da exploração e preço de venda de gás natural em regiões do Brasil. No primeiro, tem-se o valor, em dólar, para gerar um milhão de BTU de gás natural, enquanto que o segundo representa o volume de gás natural gerado, em mil metros cúbicos por dia, nas principais regiões.

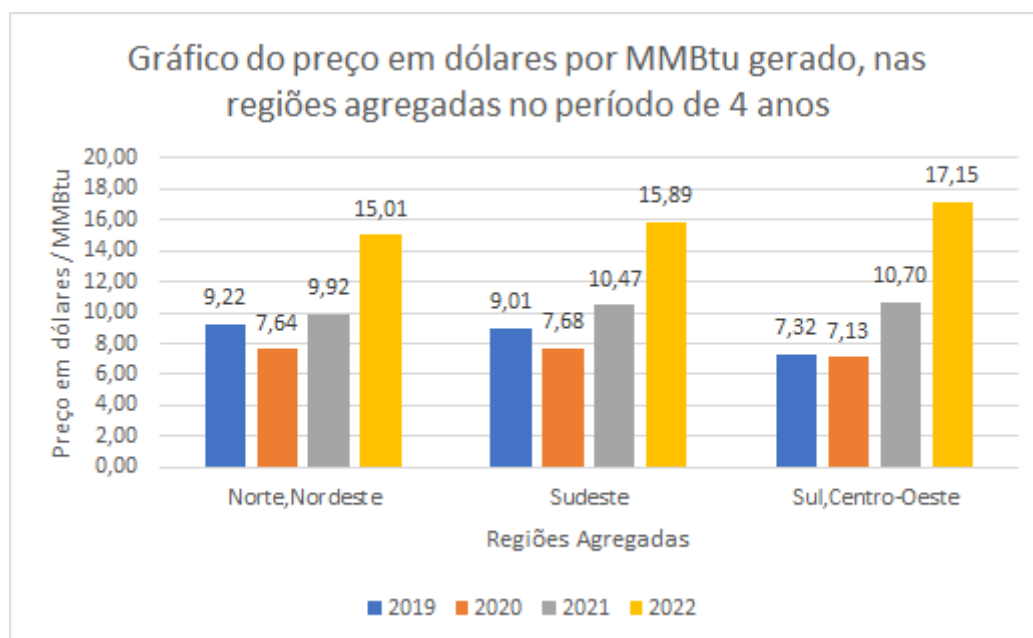


Figura 7 – Gráfico referente ao preço, em dólares, por MMBtu gerado de gás natural, em regiões agregadas no Brasil. Fonte: Adaptado de ANP (2008)

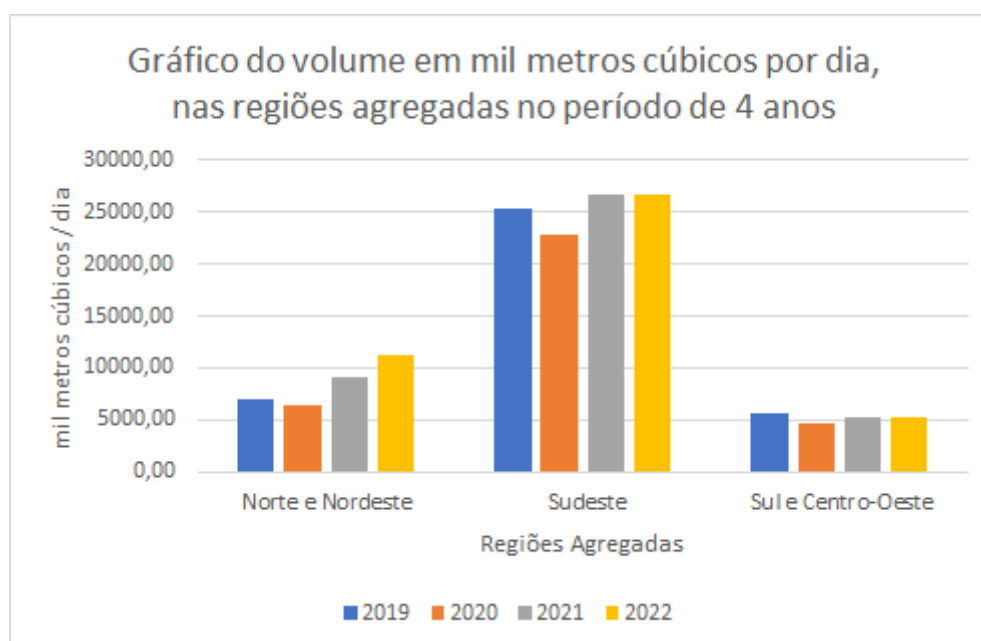


Figura 8 – Gráfico referente ao volume, em mil metros cúbicos, de gás natural extraído, por dia, em regiões agregadas no Brasil. Fonte: Adaptado de ANP (2008)

Logo, é visto que a região Sudeste do país é onde se encontra os maiores volumes de produção de gás natural do país, chegando em 26600 metros cúbicos por dia, aproximadamente, enquanto que as regiões Sul e Centro Oeste apresentam os menores volumes de produção, de 2019 até julho de 2022, chegando em torno de 5187 metros cúbicos por dia, em 2022, conforme apresenta a Figura 8.

Isso explica o alto custo do milhão de Btu nessa região agregada Sul - Centro-Oeste, em torno de 17,15 dólares em 2022, comparado com os valores medianos das outras regiões agregadas, no decorrer dos anos. Tais dados indicam que há viabilidade de utilização de gás natural em veículos no Brasil, a depender da região em que os usuários planejam trafegar, no que diz respeito a menor custo e maior disponibilidade.

3 Metodologia

Este capítulo apresenta os principais instrumentos, mecanismos e materiais utilizados para o ensaio proposto como objetivo deste trabalho, em consonância com os conceitos apresentados no capítulo anterior, assim como a metodologia aplicada em ambiente de ensaio. Para melhor compreensão, o capítulo apresentasse em três seções: a primeira (3.1) correspondente aos combustíveis objetos de ensaio, no caso o etanol e o gás GNV selecionados; a segunda (3.2), corresponde ao aparato experimental utilizado para os ensaios, que compreende o motor utilizado, suas modificações, subsistemas, e condições de operação; e a terceira (3.3) corresponde ao método abordado para a realização de ensaios..

3.1 Combustíveis

3.1.1 Etanol

Utilizado também como um combustível a ser ensaiado, a amostra de etanol foi adquirida em postos de combustível convencionais, em acordo com o regulamento proposto pela (ANP, 2015), e armazenada em um tanque de plástico de 30 litros de volume, conforme apresentado na Figura 9. Sua admissão no motor se dá por uma linha de combustível singular, o que significa que, nesta linha, apenas etanol é admitido. Como serão admitidos 2 tipos de combustíveis no motor, há duas linhas de combustível, que podem ser comutadas pelo acionamento de um botão no painel próximo ao motor.



Figura 9 – Tanque de combustível contendo etanol hidratado, utilizado para ensaio de desempenho de motor. Fonte: Próprio autor

Durante a realização dos ensaios utiliza-se de uma balança de medição de 15kg, com resolução de 5g, a fim de aferir a massa de combustível em cada intervalo de tempo requisitado.

3.1.2 Gás GNV

O gás natural veicular (GNV) foi adquirido no Posto Guarapari, na cidade de Candangolândia/DF. A empresa fornecedora é a CEB Gás, e a mesma apresenta, em seu site, as características do GNV apresentadas na Tabela 2.

O gás GNV supracitado está armazenado em um cilindro com volume de 15 metros cúbicos, na parte externa do laboratório de ensaio como apresentado na Figura 10. O envelope do cilindro confere confiabilidade e segurança para seu uso, a fim de evitar quaisquer problemas quanto a possíveis vazamentos do cilindro.



Figura 10 – Cilindro contendo gás natural veicular (GNV), instalado na parte externa do laboratório Fonte: Próprio autor

Tabela 2 – Características do gás GNV cedidas pelo fornecedor

Parâmetro	Valor
Poder Calorífico Superior [Kcal/m ³]	9400
Poder Calorífico Inferior [Kcal/m ³]	8500
Densidade relativa, para 20°C e 1 atm [kg/m ³]	0,63
Massa específica, para 20°C e 1 atm [g/mol]	0,78
Fator de Compressibilidade R-K, a 20°C e 1 atm	0,9973
Viscosidade [cP]	0,010816
Cp/Cv	1,2816
Ponto de ignição [°C]	482 a 632
Limite inferior de inflamabilidade da mistura, a 20°C e 1 atm	5 % do volume de ar
Composição	[%]
CH ₄	89,24
C ₂ H ₆	7,86
C ₃ H ₈	0,24
C ₄ H ₁₀ e mais pesados	0,05
N ₂	1,34
CO ₂	1,25
O ₂	0,02
H ₂ S [mg/m ³]	0,4
SO ₂ [mg/m ³]	8,4

Sua admissão para os cilindros do motor se dá por meio de um acionamento eletrônico no painel de controle, com a passagem do gás por um conjunto de mangueiras e instrumentos, denominado "kit gás", descrito em sua subseção específica. Após isso, há um acesso ao sistema de injeção do próprio motor, permitindo a injeção da mistura ar-gás nos cilindros. Vale ressaltar que há 2 acessos ao sistema de injeção, paralelos, um para o gás GNV e outro para combustíveis provenientes de um tanque, no caso o etanol.

Para a realização dos ensaios com o combustível apresentado, fez-se as devidas adaptações, no escopo da (ABNT, 1996), a fim de conformar os métodos de ensaio para futuras avaliações. A partida no motor é dada primeiramente com a utilização do combustível etanol hidratado, apenas para que ocorra a ignição e aquecimento do motor até sua temperatura de operação. Após isso ocorre a comutação de combustíveis, com a linha de combustível etanol desabilitada, e somente a linha contendo gás GNV ativa.

Alguns dados são coletados pela *Autogas* ECU STAG 200 Gofast, um módulo de ECU (unidade de controle do eletrônica, do inglês) do modelo *All Around*", capaz de trabalhar com injeção de combustível dos tipos sequencial, semi sequencial e direta, módulo esse que faz parte do "kit gás" e é responsável pelo gerenciamento ótimo da injeção de gás e ignição, buscando o bom funcionamento do motor. Outros parâmetros como riqueza da mistura se dão a partir da sonda lambda, inserida diretamente no motor e monitorada pela *Fuel Tech* 550.

3.2 Aparato experimental

O aparato experimental contempla toda estrutura física, eletrônica e virtual elencada e operacional presente no escopo dos ensaios com os combustíveis selecionados, que compreende o motor selecionado, com alguns de seus próprios subsistemas; um sistema de monitoramento do motor dedicado ao projeto, com toda sua instalação e configuração própria para os ensaios; um dinamômetro dedicado ao projeto, com seu inversor de potência, em auxílio na coleta de dados e resultados; um conjunto de instrumentos e adaptações no motor, a fim de que o mesmo possa admitir gás em seus cilindros, denominado "Kit Gás"; e um sistema independente de admissão de ar para o motor.

A Figura 11 apresenta grande parte do aparato experimental, compreendendo o motor, unidade de energia, sistema de admissão de ar, "kit gás", dinamômetro e todas as conexões necessárias ao envio e coleta de dados e sinais.



Figura 11 – Aparato experimental de ensaio Fonte: Próprio autor

Algumas figuras referenciadas nesta seção que dizem respeito à sistemas e instrumentos do aparato experimental no laboratório estão apresentadas no Apêndice I deste trabalho, na página 109. A fim de ilustrar a montagem física dos sistemas, componentes e toda a comunicação integrada, a Figura 12 abaixo dispõe de um diagrama de blocos do laboratório de ensaio de motores, localizado na UnB/Campus do Gama.

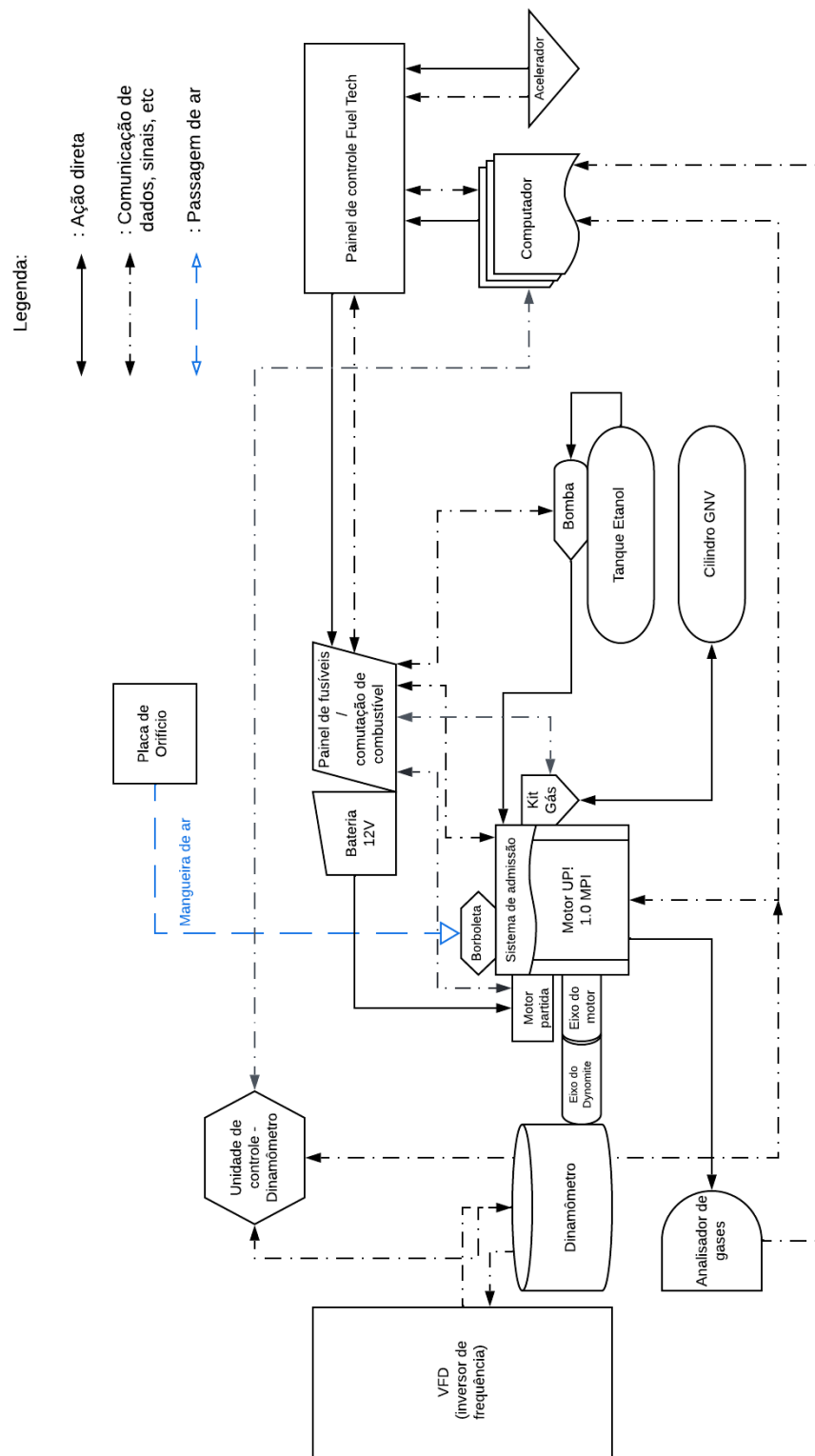


Figura 12 – Diagrama de blocos do aparato experimental para ensaio no motor característico. Fonte: Próprio autor

3.2.1 Motor a combustão interna

O motor escolhido como objeto de ensaio é o motor da marca *Volkswagen*, modelo EA211 1.0 L 55(G)/60(A) kW MPI, aspirado, com 3 cilindros e 12 válvulas. Segundo as informações presentes no manual do usuário, apresentadas por (WOLSCHICK, 2014), este motor apresenta injeção MPI, comando de admissão variável e injeção indireta de combustível.

A nomenclatura MPI diz respeito a *multipoint fuel injection*, traduzido do inglês como "injeção de combustíveis em múltiplos pontos". Em outras palavras, indica um sistema de injeção de combustível no motor por diferentes portas, na válvula de admissão em cada cilindro. Esse sistema possibilita uma entrega quase exata da mesma quantidade de combustível em cada cilindro, no tempo requisitado. A Figura 13 apresenta a imagem virtual, em perspectiva, do motor citado acima.



Figura 13 – Vista virtual em perspectiva do Motor EA211 1.0 MPI, da marca *Volkswagen*.
Fonte: Retirado de Wolschick (2014)

Além disso, a Figura 14 e a Tabela 3, ambas retiradas do manual do usuário, apresentam, respectivamente, o gráfico de torque e potência por RPM original do motor, e os dados técnicos do mesmo.

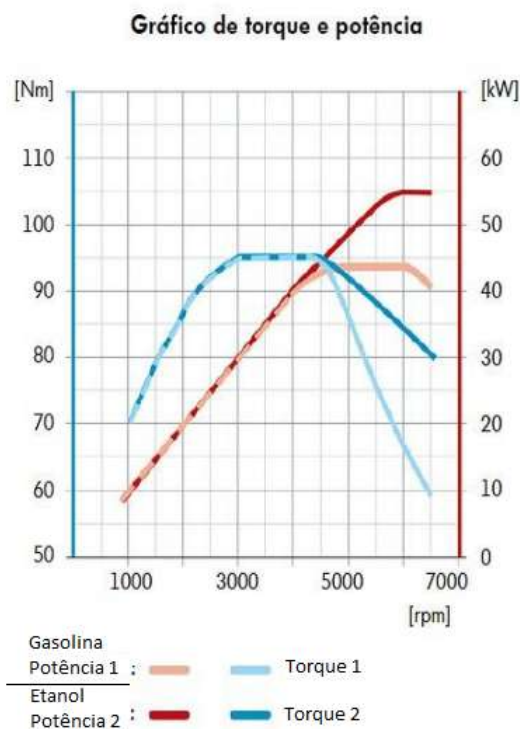


Figura 14 – Gráfico de torque e potência original do Motor EA211 1.0 MPI, da marca *Volkswagen*. Fonte: Retirado de [Wolschick \(2014\)](#)

Tabela 3 – Dados técnicos do motor

Parâmetro	Motor EA211 1.0 MPI
Desenho	3 cilindros em linha
Volume deslocado total	999 cm^3
Diâmetro dos cilindros	7,45 cm
Curso	7,64 cm
Válvulas por cilindro	4
Taxa de compressão	11,5:1
Potência máxima	55 kW [G]/ 60 kW [A], a 6200 RPM
Torque máximo	95 Nm/ 102 Nm, de 3000 a 4300 RPM
Combustível original	Bi-combustível (gasolina e etanol)

O motor em questão foi instalado no laboratório de ensaio de motores da Universidade de Brasília - Campus do Gama, nomeado de "LEM" em todo este trabalho. Logo, os subsistemas de ignição, admissão de ar e combustível, escape de gases e controle do motor passaram por adaptações e alterações, de modo a otimizar as condições de operação e ensaio do aparato experimental, buscando os melhores resultados. A Figura 45 apresenta o motor, em vista perspectiva, ancorado no laboratório "LEM", com seus subsistemas, enquanto que a Figura 12 dispõe do motor centralizado no diagrama de blocos, com algumas comunicações e ações diretas.

3.2.2 Unidade de controle do motor

O sistema de controle de ignição e injeção eletrônica utilizado é o modelo FT 550, da empresa *Fuel Tech*. Essa ECU, do inglês *Engine Control Unit*, traduzido como unidade de controle do motor, segundo o manual do usuário apresentado por (FUELTECH, 2022), conta com um *GearController*, acelerômetro e giroscópio integrados, e controle de borboleta eletrônico. A Figura 46 dispõe da ECU instalada em um painel no laboratório "LEM", com uma chave para corte de energia da mesma, quando necessário. Ele está presente no campo mais a direita do diagrama de blocos da Figura 12.

Em conjunto com a ECU FT 550, fez-se necessária a instalação do chicote ao motor, com a indicação de todas as entradas e saídas do sistema, a fim de que a ECU reconheça os parâmetros do motor e os sensores nele acoplados, de maneira otimizada e permissível à manipulação. Os sensores acoplados ao motor são:

- Sensor de *knock*, responsável por verificar a possível detonação na câmara de combustão;
- Sensor MAP, do inglês *Manifold Absolute Pressure*. Sensor acoplado ao sistema de admissão de ar, capaz de coletar o valor de pressão absoluta no coletor de admissão;
- Sonda lambda, responsável por verificar a concentração de oxigênio em relação ao combustível na mistura ar-combustível;
- Sensor de temperatura do motor, responsável por coletar dados acerca da temperatura, visando um funcionamento seguro do motor;
- Sensor de fase, responsável por verificar a posição do eixo do comando de válvulas;
- Sensor de posição de borboleta, responsável por verificar a porcentagem de abertura da válvula borboleta, a partir do acelerador.

Com o chicote instalado e configurado para o motor, e a ECU ancorada e instalada no painel, por meio de uma porta USB, é possível conectar a ECU a um computador, onde por meio do *software* FT Manager pode-se configurar um primeiro mapa para o motor, com a indicação das entradas, saídas, dados coletados e dados apresentados na interface da ECU. A Figura 15 apresenta a ECU montada no aparato experimental, com seu visor ligado. Com um primeiro mapa, foram definidos e verificados todos os dados, sinais, entradas e saídas do sistema, a fim de que diversos parâmetros pudessem ser verificados durante os ensaios. As entradas e saídas da *Fuel Tech* 550 são apresentadas nas Figuras 47 e 48, respectivamente. No capítulo de Resultados & Discussão estão apresentados os mapas gerados para os ensaios com GNV e com etanol como combustíveis.

Além disso, na aba "Configurações do motor", no *software* FT Manager, foram inseridas as seguintes configurações:

- Tipo de motor: Pistão;
- Número de cilindros: 3;
- Rotação máxima: 8000 RPM;
- Rotação do motor de partida: 400 RPM;
- Mapa principal e injeção rápida: TPS;
- Tipo de sensor de rotação: Hall;
- Roda fônica: 60-2 (no virabrequim);
- Alinhamento do primeiro dente: $81,9^\circ$, 14 dentes + $2,1^\circ$;
- Número de dentes da roda: 60;
- Número de dentes faltando: 2;
- Tempo de duração da falha: 1,75;
- Posição instalada do sensor de fase: 93,0;
- Tolerância entre dentes: 40%;
- Ignição sequencial, bobina com módulo integrado;
- Injeção modo sequencial, saídas bancada A: 3;
- Vazão total da bancada: 20,0 lb/h;
- Dead time dos injetores: 1,00 ms;
- Borboleta eletrônica predefinida, Continental, Modelo 04C.133.062.F/A2C8272570, 45mm Up MPI 1.0L, KP de 464, KI de 52 e KD de 143, velocidade normal, modo linear, 2 referências e limite de abertura de 99 %;
- Atuador de lenta: Borboleta , com 260 passos, frequência 100 Hz;
- Dwell: MAP por tensão; e
- MAP interno, 125 Hz, fator de qualidade 1,00.



Figura 15 – ECU com painel ligado, montada no aparato experimental. Fonte: Próprio autor

A coleta de dados disponíveis na *Fuel tech* durante os ensaios no motor é disponibilizada por meio de *logs*, que compreendem os mapas gerados por dados de abertura de acionamento do pedal, pressão no sensor MAP, temperatura do motor, valor de lambda, RPM, vazão dos injetores e tempo de injeção, pelo tempo de gravação dos *logs*. Por meio deles, é possível verificar ponto a ponto o funcionamento e desempenho do motor, a partir da gama de parâmetros apresentados.

3.2.3 "Kit Gás": Adaptação para uso de gás GNV no motor

Em vista de que o motor a combustão utilizado apresenta configuração de fábrica para utilizar apenas gasolina e etanol como combustíveis, é necessária a adaptação tanto do sistema de injeção de combustível quanto do de ignição, entre outros parâmetros necessários para o eficiente uso do gás GNV apresentado anteriormente. Essa adaptação e seus instrumentos é chamada de "Kit Gás" neste trabalho. Na Figura 49 está apresentado, em detalhe, o kit gás instalado no motor, assim como a Figura 45 apresenta as mangueiras, válvulas, chicote e tubos que compõem o Kit Gás. Abaixo, a Figura 16, retirada do manual de instalação do kit gás fornecido pela STAG (2021), apresenta o esquemático de instalação do Kit Gás no escopo de ensaio, com seus principais instrumentos e conexão. Uma breve descrição dos instrumentos é apresentada após a Figura 16.

Dentre os instrumentos apresentados acima, cabe destacar:

- Válvula Reguladora de pressão, a fim de reduzir a pressão de gás GNV presente nos cilindros até uma pressão admissível no coletor;
- Válvula de cilindro, utilizada para permitir a passagem de gás GNV para o sistema;
- Cilindro de gás GNV, com capacidade de 15 m³;
- Tubo de alta pressão, permitindo o fluxo de gás em alta pressão até a válvula reguladora de pressão;
- Mangueiras de baixa pressão, capazes de levar o gás GNV em baixa pressão até o coletor de admissão;
- Bicos injetores de gás GNV, que são conectados ao acesso solidário feito no sistema de admissão original do motor;
- Sensor TMAP no coletor de admissão, coletando dados de pressão e temperatura local;
- Chicote elétrico de instalação dos instrumentos e suas conexões;
- Central eletrônica do gás GNV, com a finalidade de verificar os dados do sistema e seu bom funcionamento;
- Chave comutadora, que permite comutar entre duas linhas de combustível; e
- Manômetro, que verifica a pressão do gás nas mangueiras de baixa pressão.

O destaque no Kit Gás é dado a central eletrônica de controle, da marca *Autogas* ECU STAG 200 Gofast, um módulo de ECU (unidade eletrônica de controle, do inglês) do modelo *All Around*, capaz de trabalhar com injeção de gás dos tipos sequencial, semi sequencial e direta. Pela sua instalação e comunicação com o motor, por meio de um *software* dedicado, a própria ECU é capaz de gerir o controle de injeção de gás para o bom funcionamento do motor, a partir de parâmetros como temperatura do gás, tempo dos injetores de gás abertos durante um ciclo e pressão do gás nos dutos. A Figura 17 apresenta a ECU STAG 200, instalada na parede externa da caixa de suporte à bateria.



Figura 17 – Unidade de controle eletrônico do "Kit Gás". Fonte: Próprio autor

3.2.4 Dinamômetro

Com objetivo de medir a rotação apresentada durante os ensaios, assim como a coleta de dados como o torque e potência no eixo do motor a partir de um freio-motor, o dinamômetro axial da marca *Dynomite* de modelo C Driver 200 HP, apresentado na Figura 18, foi instalado no laboratório "LEM", em consonância com os requisitos de ensaio estabelecidos pela Norma ABNT (ABNT, 1996).

Em conjunto com o dinamômetro se apresenta um VFD, do inglês *Variable-frequency Drive*, que corresponde a um tipo de inversor de frequência responsável por reduzir o consumo energético do acionamento do dinamômetro no motor, buscando maior controle do mesmo e prolongando sua vida útil. O VFD instalado é da marca Allen Bradley, modelo PowerFlex 700 AC Drive.

Logo, a comunicação do VFD com o dinamômetro acoplado no motor confere um bom funcionamento do mesmo, assim como a coleta e controle da rotação no eixo, potência gerada pelo motor e torque. Contudo, verificou-se um problema na comunicação do VFD com o dinamômetro proposto, impossibilitando os ensaios do motor utilizando o dinamômetro como freio-motor. Apesar disso, outros parâmetros de desempenho são coletados por parte da *Fuel Tech 550*, apresentados no capítulo Resultados & Discussão.



Figura 18 – Dinamômetro axial pronto para conexão ao motor em teste, no laboratório "LEM". Fonte: Próprio autor

3.2.5 Sistema de admissão de ar

O sistema de admissão de ar, como visualizado no diagrama de blocos da Figura 12, é composto de uma placa de orifício, posicionada acima do laboratório de ensaio, com livre acesso ao ar livre, e de uma mangueira. A partir da placa de orifício, o ar ambiente é levado, por meio da mangueira, diretamente para a válvula borboleta do motor, a partir da requisição de carga feita pelo acelerador, na zona de controle do laboratório.

No sistema de admissão de ar, em particular no coletor de admissão presente no motor, está instalado o sensor MAP, sensor responsável pela verificação da pressão absoluta do ar que chega ao coletor de admissão. Os dados coletados de pressão absoluta de ar admitido são apresentados durante os ensaios, pela *Fuel Tech 550*. Também se faz uso de um manômetro, responsável por medir a pressão do ar na placa de orifício, por meio de um duto azul conectando a placa de orifício ao manômetro. A Figura 19 dispõe do manômetro em uso, da marca Hygro Therm Series 477.



Figura 19 – Manômetro utilizado para medição da pressão do ar na placa de orifício.
Fonte: Próprio autor

3.2.6 Norma ABNT NBR 1585

Quanto a Norma técnica ABNT NBR 1585, disponibilizada por [ABNT \(1996\)](#), alguns critérios de instalação de equipamentos e sistemas foram levados em conta para a metodologia de ensaio, assim como orientações para realização dos ensaios. Foram realizadas as seguintes operações, em consonância com a Norma citada acima:

- Remoção de sistemas auxiliares acessórios do veículo, utilizados apenas para a operação do veículo, e que não influenciam no ensaio de desempenho, como compressor de ar para freios, sistema de condicionamento do ar, entre outros, conforme item 5.1.2 da Norma;
- Montagem do gerador para alimentação de componentes auxiliares indispensáveis para a operação do motor, conforme item 5.1.3 da Norma;
- Regulagem da sincronização da ignição ou injeção, pela curva de sincronismo, conforme item 5.2 da Norma;
- Coleta de dados de desempenho sob condições estabilizadas de operação, com fornecimento de ar fresco para o motor, conforme item 5.3.2 da Norma;
- Medição da temperatura do ar de admissão em até 0,15m a montante do conduto de admissão de ar, conforme item 5.3.3 da Norma;

- Medição da depressão da entrada a jusante dos dutos, filtro de ar, silenciador de entrada, ou seus equivalente, conforme item 5.3.4 da Norma;
- Medição da pressão absoluta na entrada de ar do motor, no coletor de admissão, conforme item 5.3.5 da Norma;
- Início da coleta de dados apenas quando torque, rotação e temperaturas se mantenham constantes por ao menos 1 minuto, conforme item 5.3.7 da Norma;
- Coleta de dados e parâmetros em um número suficiente de rotações do motor (regimes de rotação), incluindo rotação na qual o motor produz sua potência máxima, conforme item 5.4 da Norma; e
- Medição do fluxo de combustível por aparelho gravimétrico (balança sob tanque de combustível), conforme orienta o item 8.3 da Norma.

3.3 Metodologia de ensaio

A metodologia de ensaio escolhida se inicia em consonância com os requisitos e orientações da Norma NBR 1585 [ABNT \(1996\)](#), apresentados previamente, a fim de verificar a correta instalação, uso e verificação dos principais sistemas disponíveis para realização de ensaios. Com todo os sistemas devidamente verificados, sem a conexão do dinamômetro com o escopo de ensaio, a unidade de controle *Fuel Tech 550* é conectada ao computador, a fim de que os dados do mapa do motor e os *Logs* de gravação de ensaio possam ser geridos e posteriormente analisados.

Paralelo a isso, o manômetro de medição da pressão de ar conectado a placa de orifício é ligado, assim como o tanque de combustível contendo etanol é posicionado sob uma balança de medição. Foram estipulados quatro regimes de rotações por minuto como objetivos de ensaio a serem alcançados no motor, a partir do acionamento do pedal do acelerador na região de controle.

Os regimes de rotações por minuto escolhidos são 2000, 3000, 4000, 5000 e marcha lenta (sem acionamento do acelerador). Foram realizados dois ensaios, sendo o primeiro com o motor alimentado com gás GNV como combustível, e o segundo com o motor alimentado com etanol como combustível. Vale ressaltar que, independente do combustível de ensaio, a partida a frio do motor é dada com etanol como combustível, pela facilidade da combustão, rápido aquecimento do motor até temperatura de operação, e também para evitar o consumo desnecessário de gás GNV.

Ao alcançar a temperatura de operação do motor, por meio da interface da FT Manager no computador em uso foi acionado o botão "Iniciar log", para que a gravação

do log de ensaio se inicie. Com isso, para cada um dos regimes de rotação escolhidos, foi cronometrado o tempo de 1 minuto em cada regime.

Para cada intervalo de 1 minuto, pela balança sob o tanque de combustível foi coletado o valor da massa inicial de combustível, e no fim do intervalo, a massa final de combustível. A partir disso, é possível verificar o gradiente de massa de combustível injetada no período de 1 minuto, para cada regime de rotação. Além disso, durante o intervalo de 1 minuto para cada regime, foi coletado o dado da pressão de ar na placa de orifício, por meio do manômetro.

Após a conclusão dos intervalos de tempo de 1 minuto para cada regime de rotação escolhido, o motor foi desligado, e o *log* encerrado.

No capítulo seguinte, tanto os *logs* dos dois ensaios quanto os dados coletados pelo manômetro da placa de orifício e da balança são apresentados, aplicados em fórmulas, comparados e debatidos, assim como da integridade e funcionalidade dos sistemas compreendidos no escopo do ensaio.

4 Resultados e Discussão

Este capítulo está dividido em duas seções, sendo que a primeira compreende uma série de resultados provenientes de um ensaio paralelo de um veículo da marca Vw modelo Up! 1.0 MPI, com motor semelhante ao utilizado neste trabalho. O veículo foi ensaiado sobre um dinamômetro de rolo, com etanol como combustível, e os dados coletados e resultados provenientes deste ensaio estão apresentados apenas como dados de referência, e são utilizados apenas para verificação da confiabilidade e correta instalação dos sistemas e dados gerados no escopo de ensaio proposto no capítulo anterior.

A segunda seção, e suas subseções, dizem respeito aos ensaios realizados no laboratório LEM, com toda metodologia e aparato experimental conforme descrita no capítulo anterior. Como resultados, alguns dados coletados são informados diretamente, enquanto que certos dados foram analisados e implementados em equações já apresentadas no capítulo 2 e retomadas aqui, a fim de gerar outros resultados e parâmetros de desempenho úteis. Além disso, alguns dados da seção de referência são utilizados neste seção, para confirmar a confiabilidade e veracidade nos sistemas e resultados apresentados.

4.1 Dados de referência - Ensaio em dinamômetro de rolo

Os dados de referência coletados e apresentados nesta seção foram obtidos através da coleta tanto por parte do dinamômetro de rolo, quanto por um OBD, do inglês *On Board Diagnostics*, que compreende um sistema, conectado à central eletrônica do veículo, capaz de recolher alguns dados, como torque e potência durante os ensaios. A Figura 20 apresenta a curva de torque e potência por RPM, proveniente da leitura de dados fornecida pelo OBD, com o veículo VW Up 1.0 MPI, alimentado com etanol como combustível.

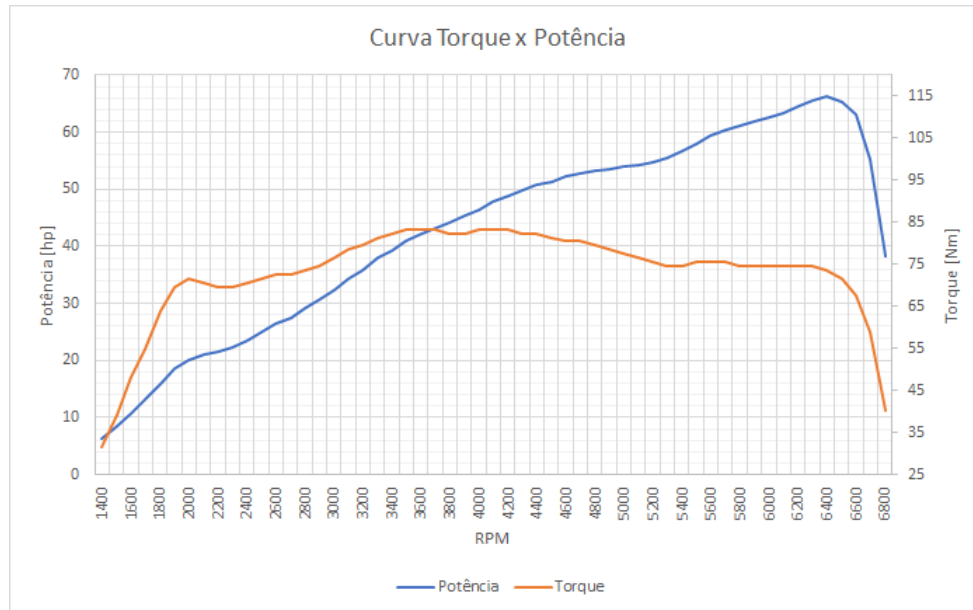


Figura 20 – Gráfico correspondente a curva de torque e potência por RPM, ensaiado sobre um dinamômetro de rolo. Fonte: Próprio autor

Na medida que o dinamômetro axial apresentado no Capítulo de Materiais & Métodos, na página 54, não foi utilizado como escopo de ensaio deste trabalho, os dados apresentados na Figura acima apenas representam a atual condição do veículo utilizado no ensaio de referência.

Já a Figura 21 apresenta o gráfico correspondente a curva do Tempo de Injeção, caracterizando o período de tempo que os bicos injetores permanecem abertos durante um ciclo do motor, e a Eficiência Volumétrica do mesmo pela RPM correspondente, para o ensaio de referência no dinamômetro de rolo. Os gráficos foram gerados a partir de dados coletados de RPM; Pressão no sensor MAP, em KPa; Pressão ambiente, em Kpa; Temperatura no sensor MAP, em °C; e Temperatura ambiente, em °C. No Anexo A, a Tabela (10) apresenta os dados aqui descritos, para o intervalo de ensaio de referência.

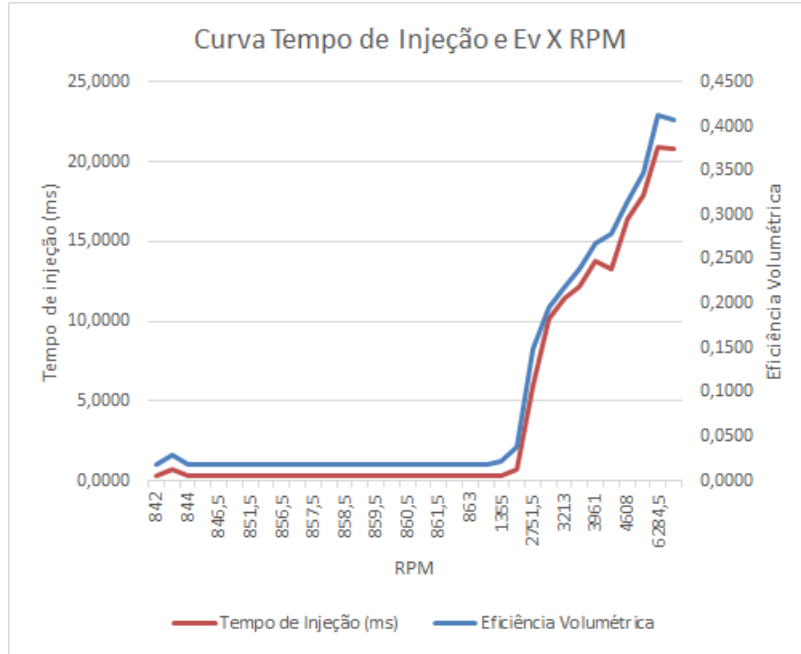


Figura 21 – Gráfico correspondente a curva Tempo de Injeção e Eficiência Volumétrica por RPM, ensaiado sobre um dinamômetro de rolo. Fonte: Próprio autor

Contudo, os dados coletados durante o ensaio de referência não apresentam os valores dos Tempos de Injeção [ms] e Eficiência Volumétrica do motor, " η_v ", instantaneamente. Em vista disso, é necessária a aplicação direta dos dados provenientes da Tabela (10) na Equação (2.8), para que sejam gerados os valores de Eficiência Volumétrica do ensaio de referência. Abaixo, a Equação (4.1) apresenta a equação da Eficiência Volumétrica citada acima, com algumas constantes pré definidas.

$$\eta_v = \frac{\left(\frac{P_{map}}{8,134 * T_{map}}\right) * (RPM/2)}{\left(\frac{6200}{2}\right) * 0,45} \quad (4.1)$$

Onde os valores de (8,134) corresponde a constante universal dos gases, em J/(mol °C), (6200) corresponde a rotação por minuto máxima alcançada no motor, e (0,45) corresponde a Eficiência Volumétrica máxima do motor. Logo, com a aplicação dos dados da Tabela (10) na Equação acima, tem-se os dados da Eficiência Volumétrica real do ensaio de referência, apresentados na Tabela (11).

Com esses dados, é possível determinar os Tempos de Injeção, T_{inj} , conforme apresentado na Equação (2.10). Contudo, fez-se necessário realizar o cálculo do Volume do Pistão para o motor ensaiado, V_{pistao} , assim como o cálculo da relação ar/combustível estequiométrica para o etanol, A/C Est. A Equação (4.2) apresenta o volume do pistão,

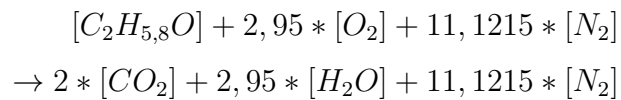
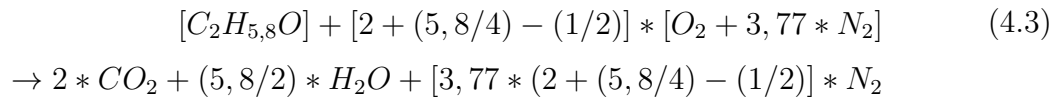
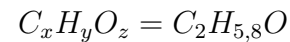
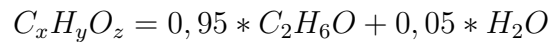
com o valor do curso do pistão (L) de 7,64 cm, e do diâmetro do pistão (D) de 7,45 cm.

$$V_{Pistao} = \frac{\pi * (D^2) * L}{4}$$

$$V_{Pistao} = \frac{\pi * (0,0745^2) * 0,0764}{4} \quad (4.2)$$

$$V_{Pistao} = 0,000333m^3$$

A partir da Equação (2.3) é possível mensurar a relação ar/combustível estequiométrica para o etanol, na medida que o etanol etílico hidratado apresenta cerca de 5% de água em seu volume, e que sua composição química é C_2H_6O . A partir disso, tem-se a Equação (4.3), com aplicação do etanol etílico hidratado na fórmula estequiométrica da combustão ideal.



Logo, com o objetivo de mensurar a relação ar/combustível estequiométrica do etanol, é necessário introduzir os pesos atômicos do carbono (12u), do hidrogênio (1u), do oxigênio (16u) e do nitrogênio (14) na composição correspondente ao combustível (etanol etílico + água) e com comburente (oxigênio + nitrogênio). A Equação (4.4) apresenta a

equação da relação ar/combustível estequiométrica, com os pesos atômicos aplicados.

$$A/CEst = \frac{2,95 * [O_2 + 3,77 * N_2]}{C_2H_{5,8}O}$$

$$A/CEst = \frac{2,95 * [(16 * 2) + (3,77 * 2 * 14)]}{(12 * 2) + (1 * 5,8) + 16}$$
(4.4)

$$A/CEst = \frac{405,802}{45,8}$$

$$A/CEst = 8,86$$

Por fim, a Equação (4.5) apresenta a fórmula do Tempo de Injeção, com suas constantes já inseridas para o motor ensaiado.

$$T_{inj}[ms] = \frac{\rho_{ar} * (\frac{P_{MAP}}{P_o}) * (\frac{T_o}{T_{MAP}}) * N^o_c * V_{pistao} * \eta_v}{V_{fluxo.injetor} * N^o_i * A/CEst} * (10^6)$$
(4.5)

$$T_{inj}[ms] = \frac{(1,29kg/m^3) * (\frac{P_{MAP}}{P_o}) * (\frac{T_o}{T_{MAP}}) * (3) * (0,000333m^3) * \eta_v}{(0,840\mu g/\mu s) * (3) * (8,86)} * (10^6)$$

Os valores calculados dos Tempos de Injeção para cada RPM coletada no ensaio de referência são apresentados na Tabela (11), no Anexo A.

4.2 Resultados do ensaio do aparato experimental

Conforme apresentado no Capítulo 3, na Metodologia, foram realizados 2 ensaios, um com o gás GNV como combustível, e outro com etanol como combustível. Nesta seção, serão apresentados as interações com a interface da *Fuel Tech 550*, assim como os dados e resultados coletados a partir da balança e do manômetro previamente apresentados.

4.2.1 Mapas de injeção e ignição da Fuel Tech 550

Em conjunto com os *Logs* gerados para os combustíveis gás GNV e etanol, também é possível visualizar os mapas de injeção e ignição, gerados pela própria *Fuel Tech*. Abaixo, as Figuras 22 e 23 apresentam, respectivamente, os mapas, em formato de tabela e gráfico 3D, de injeção e ignição do combustível etanol.

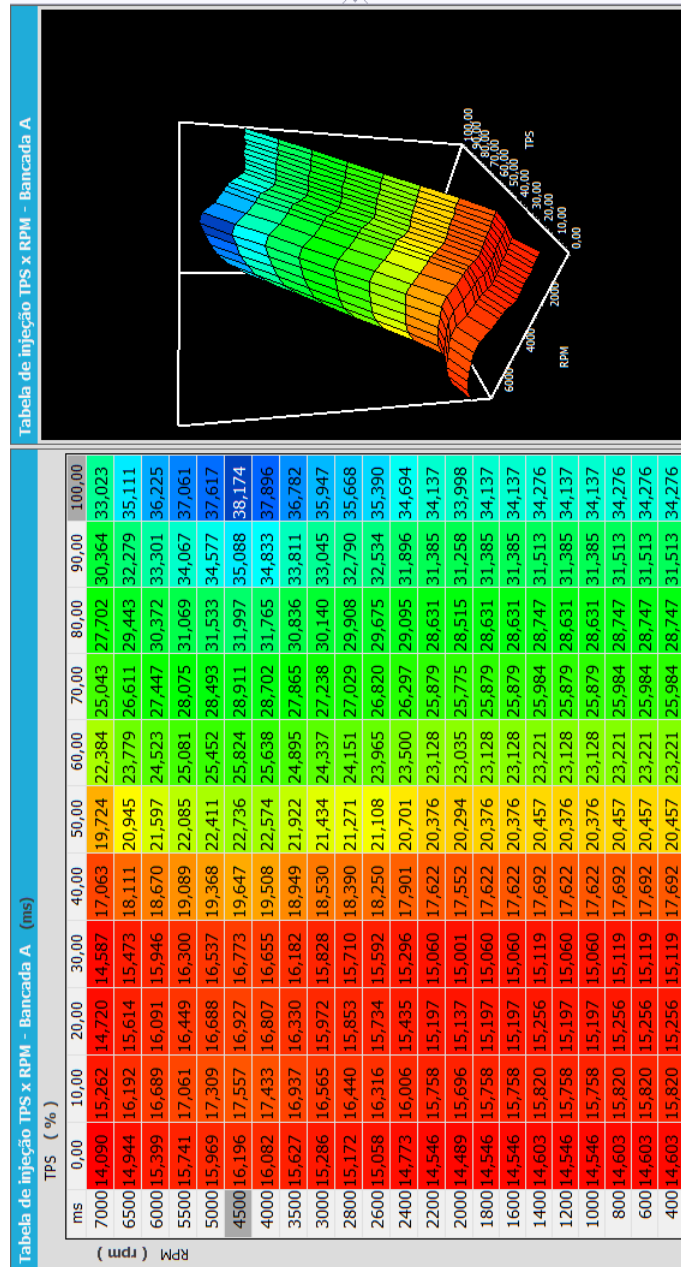


Figura 22 – Tabela de dados e Gráfico 3D correspondentes aos dados do Tempo de Injeção (ms) por RPM e Abertura da Válvula borboleta, denominada TPS (%).
Fonte: Próprio autor

Pela leitura da Figura 22, é perceptível que os maiores valores de tempo de injeção são alcançados quando a abertura da válvula borboleta ultrapassa 60%, alcançando um valor máximo na região de 4500 RPM, de 38,175 ms.

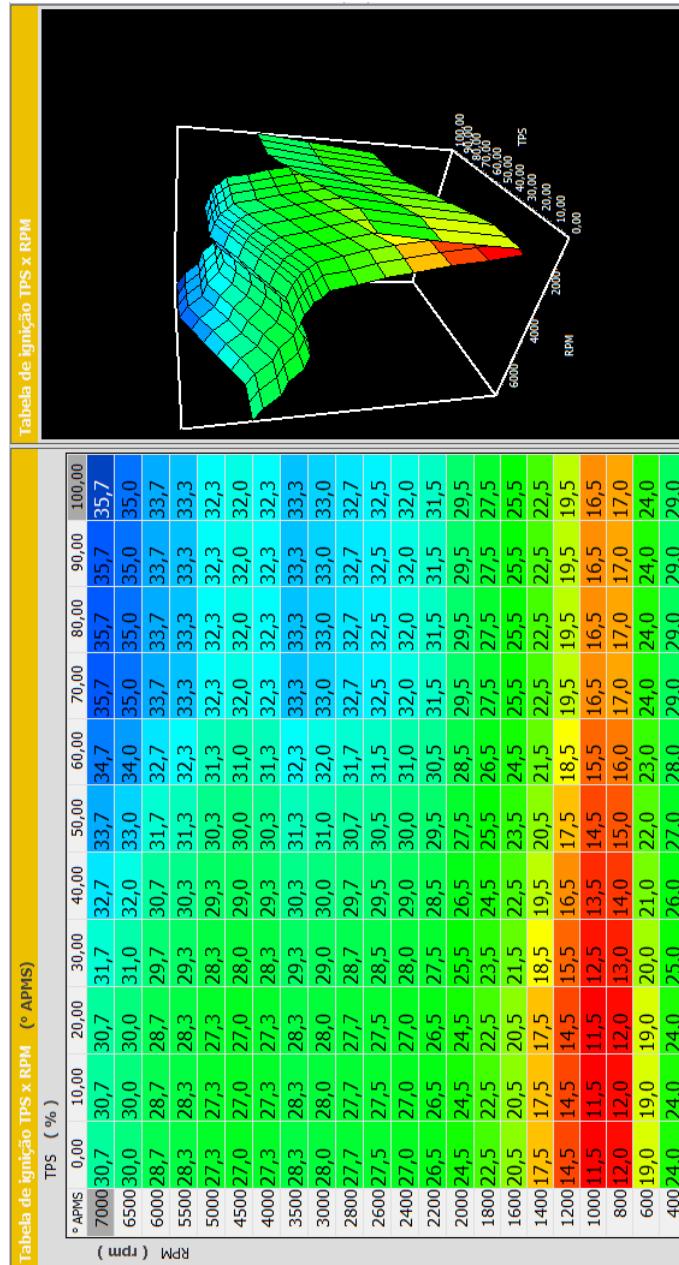


Figura 23 – Tabela de dados e Gráfico 3D correspondentes aos dados do Avanço da Ignição (°) por RPM e Abertura da Válvula borboleta, denominada TPS. Fonte: Próprio autor

Já pela visualização da Tabela de Ignição da Figura 23, é perceptível que quanto maior é a requisição de rotação e abertura da válvula borboleta, maior é o avanço da ignição nos cilindros, enquanto que os menores valores de avanço da ignição são encontrados entre 800 a 1400 RPM, aproximadamente. Dentro do escopo de 400 a 6200 RPM alcançáveis, os maiores valores do avanço de ignição estão a 100% de abertura da válvula borboleta, e 3500 RPM, caracterizando 33,3 °.

4.2.2 Funcionamento do motor durante ensaio com gás GNV como combustível

Esta subseção dispõe da análise de cada um dos regimes de rotação propostas de ensaio com o motor alimentado com gás GNV como combustível, a partir de gráficos gerados pelo *software* Matlab, com os dados coletados durante o ensaio. A análise se dá por meio da visualização de cada um dos regimes de rotação propostos, coletados em períodos de aproximadamente 60 segundos, a depender da qualidade da coleta de dados durante o ensaio. Vale ressaltar que a qualidade da coleta de dados se resume ao tempo em que o regime de rotação foi mantido, e o conseqüente funcionamento do motor para tanto. Por fim, alguns valores médios coletados em cada regime de rotação são apresentados na Tabela (12), no Anexo B.

A Figura 24 apresenta o funcionamento do motor, alimentado com gás GNV, sob marcha lenta, o que significa que não há abertura da válvula borboleta por acionamento de pedal de aceleração, num regime de rotação de aproximadamente 1170 RPM.

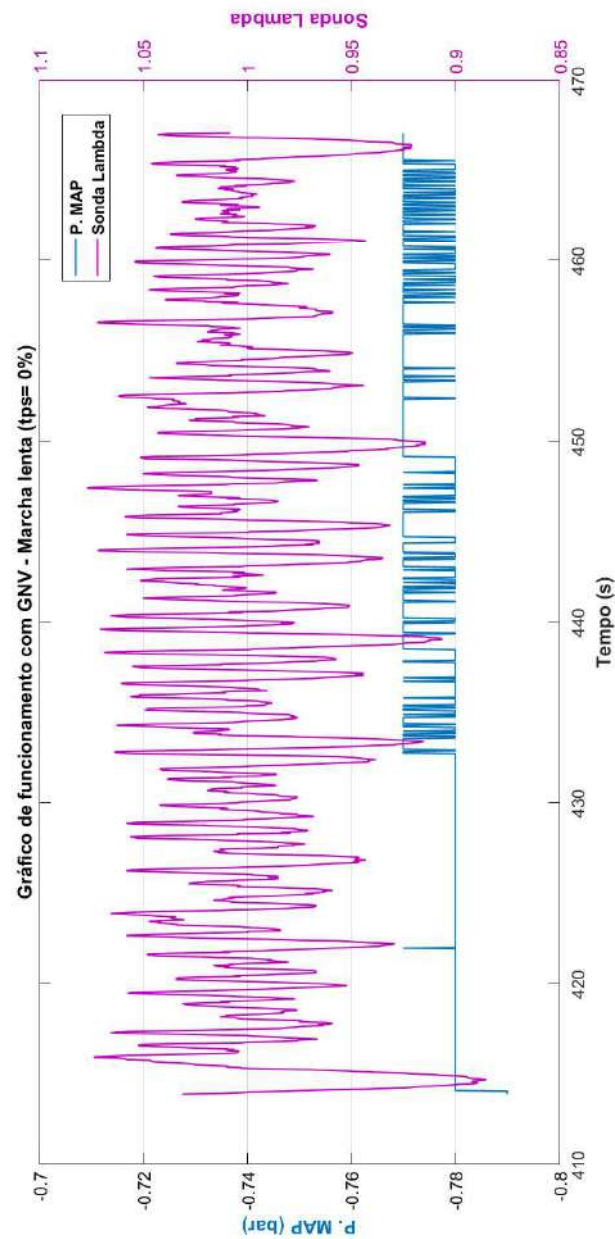


Figura 24 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com GNV, em regime de marcha lenta. Fonte: Próprio autor

A partir dos dados, percebe-se que a pressão no coletor de admissão apresenta valores em torno de -0,78 bar, que equivalem a -78 KPa, enquanto que os valores de λ se apresentam entre 0,89 e 1,08. Logo, ora a mistura se apresenta como mistura rica ($\lambda < 1$) e mistura pobre ($\lambda \geq 1$). Tal amplitude e diversidade de dados caracteriza uma dificuldade da unidade de controle da injeção de gás GNV no motor em acertar a correta proporção

da mistura ar-combustível, podendo ser ocasionada tanto por uma falha na comunicação com a *FuelTech* ECU ou o próprio acerto dos parâmetros do motor, não adaptados para uso de gás GNV. Pela visualização da imagem, não se verifica periodicidade nos dados de λ , apresentando aleatoriedade durante a marcha lenta.

A Figura 25 apresenta o funcionamento do motor, alimentado com gás GNV, no regime de rotação de 2000 RPM, no período de 60 segundos.

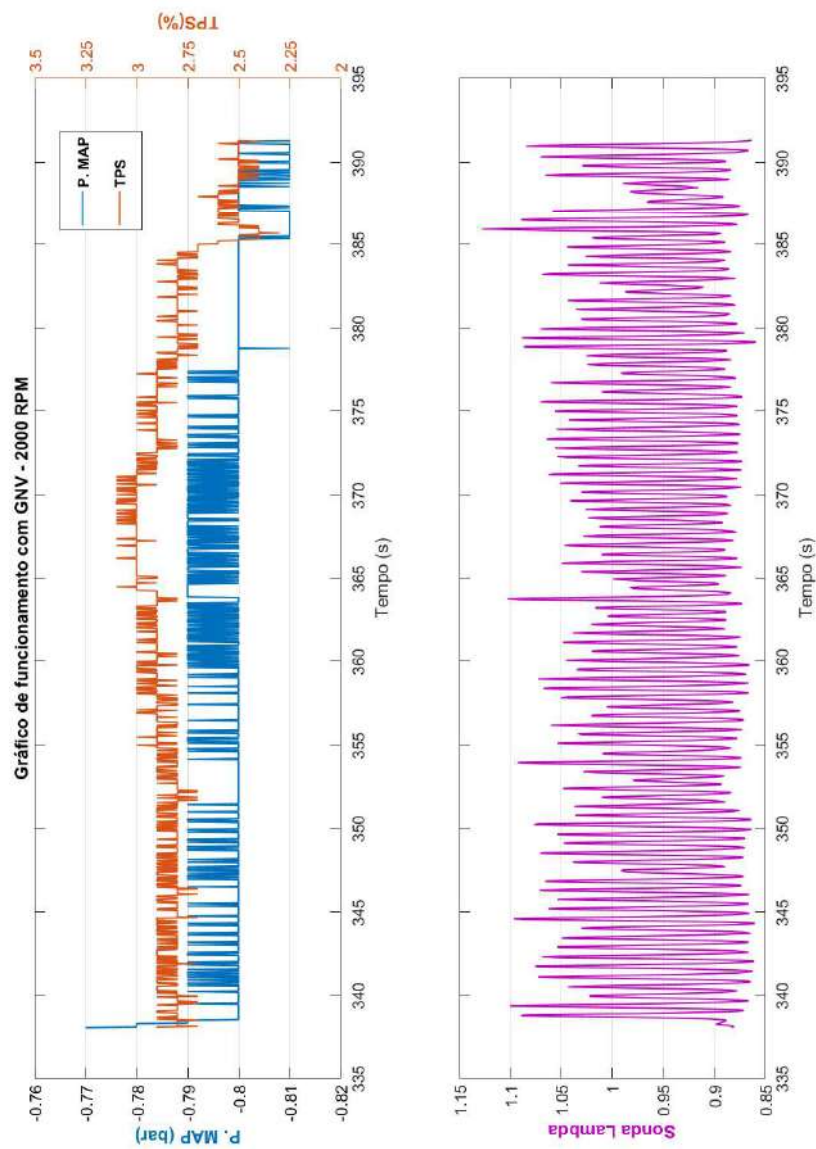


Figura 25 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com GNV, a 2000 RPM.
Fonte: Próprio autor

Quando comparada com os dados de funcionamento do motor no regime de marcha lenta para a rotação em torno de 2000 RPM, verifica-se um aumento na pressão do coletor de admissão, de -78 KPa em marcha lenta para -80 KPa a 2000 RPM. Para manter nessa faixa de rotação, a abertura da válvula borboleta apresentou valores em torno de 2,8%. No que diz respeito aos valores coletados pela sonda lambda, verifica-se novamente a discrepância de valores de lambda quanto a riqueza da mistura. Em marcha lenta, a mistura ar-combustível apresentava valores entre 0,89 e 1,08. Agora, com o motor em regime de 2000 RPM, a amplitude dos valores aumentou, variando entre 0,86 (mistura rica) e 1,12 (mistura pobre).

Pela dificuldade no correto acerto de gás GNV injetado para proporção de ar admitido, verifica-se uma instabilidade no acerto do motor e seus sistemas, principalmente na comunicação dos sensores e sinais obtidos pelos sistemas com a unidade de controle de injeção do gás GNV.

A Figura 26 apresenta o funcionamento do motor, alimentado com gás GNV, no regime de rotação de 3000 RPM, no período de 55 segundos.

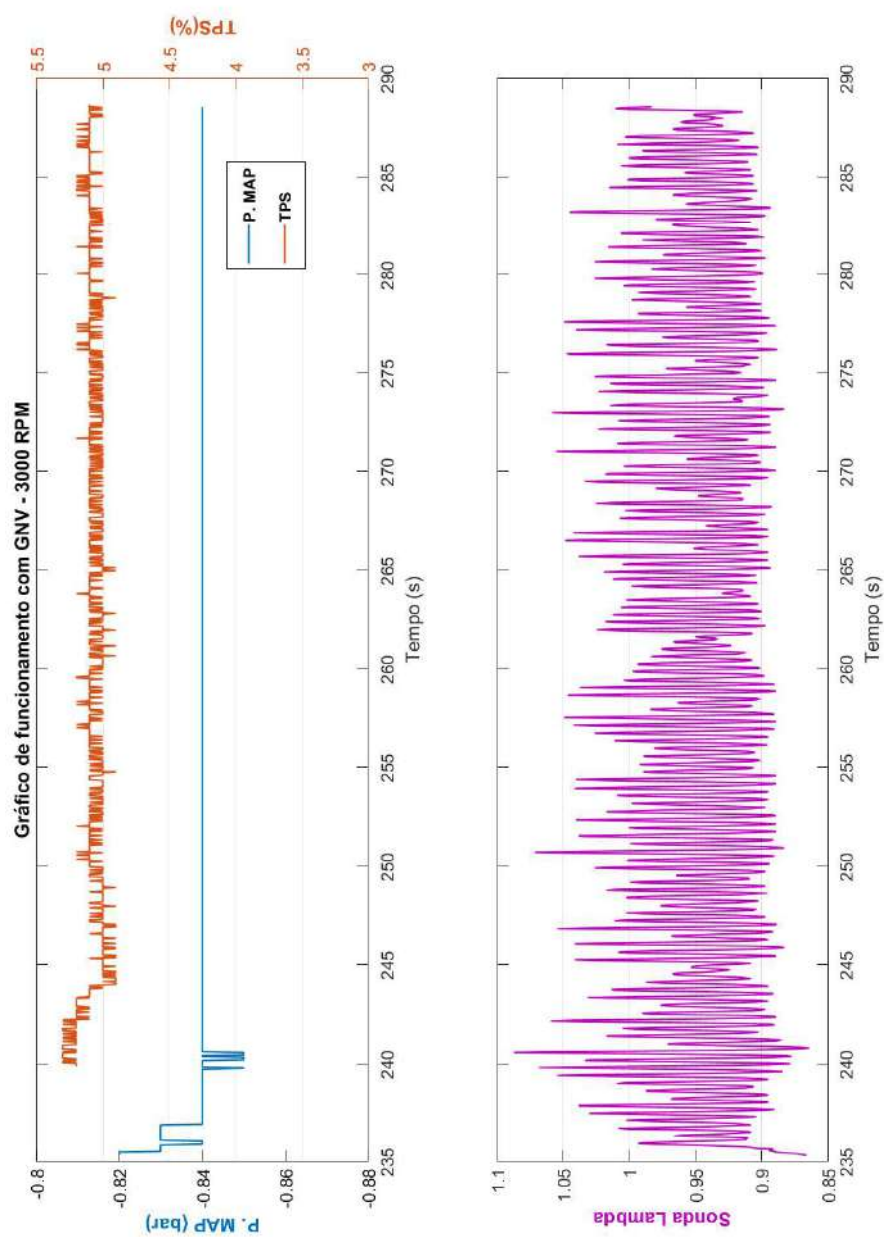


Figura 26 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com GNV, a 3000 RPM.
Fonte: Próprio autor

Ao comparar os dados apresentados no funcionamento do motor a 3000 RPM com os dados previamente apresentados a 2000 RPM, verifica-se um acréscimo nos valores da pressão no coletor de admissão, de -80 KPa para -84 KPa, assim como um aumento na abertura da válvula borboleta, de 2,8% para 5,1%. O aumento desses parâmetros é esperado, na medida que são proporcionais ao regime de rotação apresentado. Logo, se há maior abertura da válvula borboleta, apresentada como "TPS", há maior pressão absoluta no coletor de admissão, e conseqüentemente acréscimo na rotação do motor.

Os valores coletados pela sonda lambda, apesar de apresentarem a mesma dificuldade de proporção de gás GNV por ar admitido, transitando constantemente entre regimes de mistura rica e pobre, apresentam uma amplitude semelhante a verificada no uso do motor em marcha lenta, com valores entre 0,88 e 1,08, conforme gráfico acima. Essa redução na amplitude, por mais que a mistura continue apresentado riqueza e pobreza de oxigênio, indica o início de uma melhora na injeção de gás GNV, por parte da unidade de controle dedicada. Isso indica que, apesar de um maior vácuo no coletor de admissão, pelos dados obtidos pelo sensor MAP, a unidade de controle de injeção de gás GNV não está conseguindo acertar os parâmetros ideais para a massa de ar admitido no motor, seja pela correta proporção de combustível injetado e/ou pelo avanço do ponto de ignição.

A Figura 27 apresenta o funcionamento do motor, alimentado com gás GNV, no regime de rotação de 4000 RPM, no período de 55 segundos.

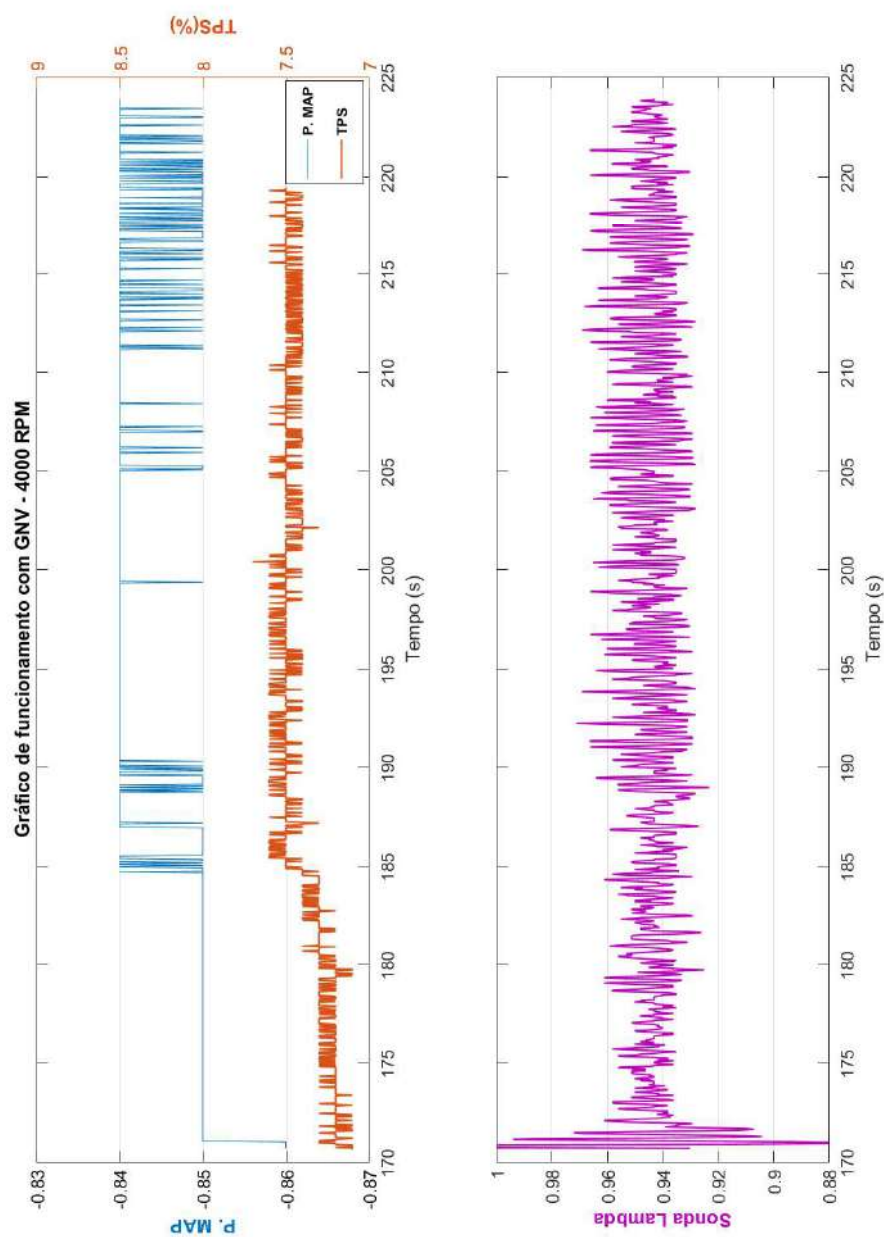


Figura 27 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com GNV, a 4000 RPM.
Fonte: Próprio autor

Comparando agora o funcionamento do motor de 3000 RPM para 4000 RPM, é visto que a pressão absoluta no coletor de admissão permanece a mesma, de aproximadamente -84 KPa, com pequenas variações para -85 Kpa, enquanto que a abertura da válvula borboleta aumenta, de 5,1% a 7,4%. No que diz respeito a riqueza da mistura ar-combustível, é verificado que os valores coletados pela sonda lambda para este regime de rotação já apresentam uma amplitude de valores reduzida.

Enquanto que para o regime anterior (3000 RPM), a mistura se encontrava ora rica ora pobre, no regime de 4000 RPM os valores de lambda se encontram entre 0,93 e 0,97, correspondendo a uma mistura sempre rica, apesar da variação dos valores.

A Figura 28 apresenta o funcionamento do motor, alimentado com gás GNV, no regime de rotação de 5000 RPM, no período de 50 segundos.

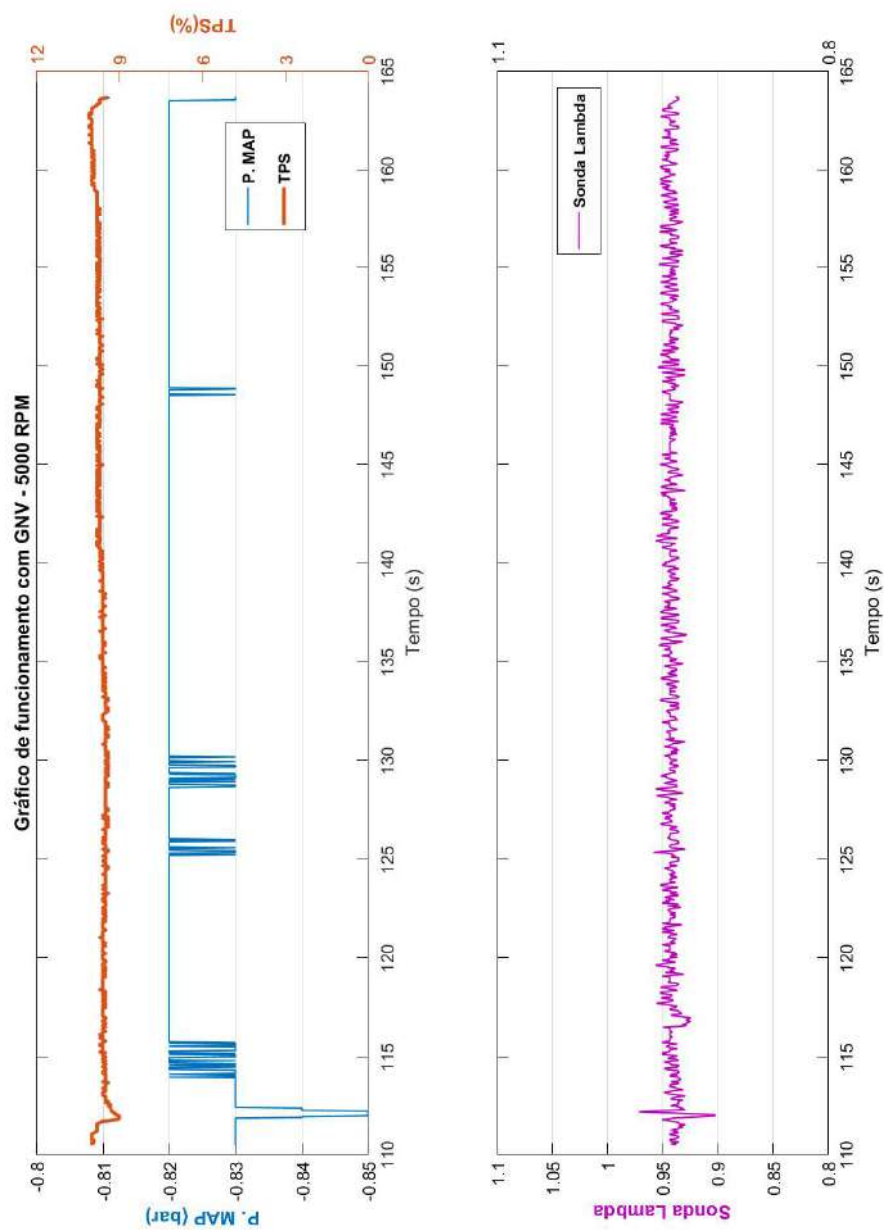


Figura 28 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com GNV, a 5000 RPM.
Fonte: Próprio autor

Quando comparados os *logs* de funcionamento do motor de 4000 RPM com os de 5000 RPM, é perceptível que houve uma redução da pressão no coletor, de -84 KPa a -82 KPa, enquanto que apresenta um aumento da abertura da válvula borboleta, de 7,4% a 9,7%. Outro resultado relevante diz respeito ao comportamento da sonda lambda, em que a amplitude de variação dos valores de λ foi reduzida, agora apresentando valores em torno de 0,94, e ausência de periodicidade dos valores mínimos e máximos de lambda, assim como de uma grande amplitude de valores.

A partir disso, verifica-se que o desempenho do motor alimentado com gás GNV apresenta resultados interessantes em regimes de rotação elevada, de 4000 e 5000 RPM. Contudo, do regime de marcha lenta até próximo de 4000 RPM, a unidade de controle da injeção de gás GNV apresenta dificuldades em relacionar a correta proporção de gás injetado para ar admitido ao motor, resultando em misturas pobres e ricas em um curto período de tempo.

Há, por fim, uma irregularidade no sistema de injeção de gás GNV, por parte da unidade de controle, em adequar a injeção de gás GNV em baixas rotações, cuja causa pode ser proveniente de uma dificuldade da unidade de controle em operar com menores quantidades de ar admitido, na medida que as características inerentes ao motor, como taxa de compressão e injeção indireta de combustível, permanecem as mesmas para os dois tipos de combustível.

Além dos dados apresentados por parte do gerenciamento da *Fuel Tech 550*, também foram coletados os valores da pressão do ar proveniente da placa de orifício, por meio de um manômetro, conforme apresentado na Página 55. A Tabela (4) apresenta tais valores, em conjunto com os regimes de rotação correspondentes a sua coleta.

Tabela 4 – Valores de pressão de ar na placa de orifício, por meio de manômetro digital, em função da rotação por minuto. Fonte: Próprio autor

Pressão no Manômetro [KPa]	RPM
-47	Marcha lenta (1160)
-47	2000
-53	3000
-63	4000
-82	5000

A partir dela, é possível verificar que a pressão do ar na placa de orifício aumenta de acordo com a requisição de ar apresentada na válvula borboleta, pelo acionamento do pedal de aceleração.

4.2.3 Funcionamento do motor durante ensaio com etanol como combustível

Esta subseção dispõe da análise de cada um dos regimes de rotação propostas para ensaio, com o motor alimentado com o combustível etanol hidratado, com gráficos gerados pelo *software* Matlab, pelos dados coletados durante o ensaio, pela ECU *Fuel Tech*. A análise se dá por meio da visualização de cada um dos regimes de rotação propostos, coletados em períodos de aproximadamente 60 segundos, a depender da qualidade da coleta de dados em cada regime. Por fim, alguns valores médios coletados em cada regime de rotação são apresentados na Tabela (13), no Anexo B.

A Figura 29 apresenta o funcionamento do motor, alimentado com etanol, sob o regime de marcha lenta, em torno de aproximadamente 1160 RPM. Os dados são apresentados em um período de 50 segundos.

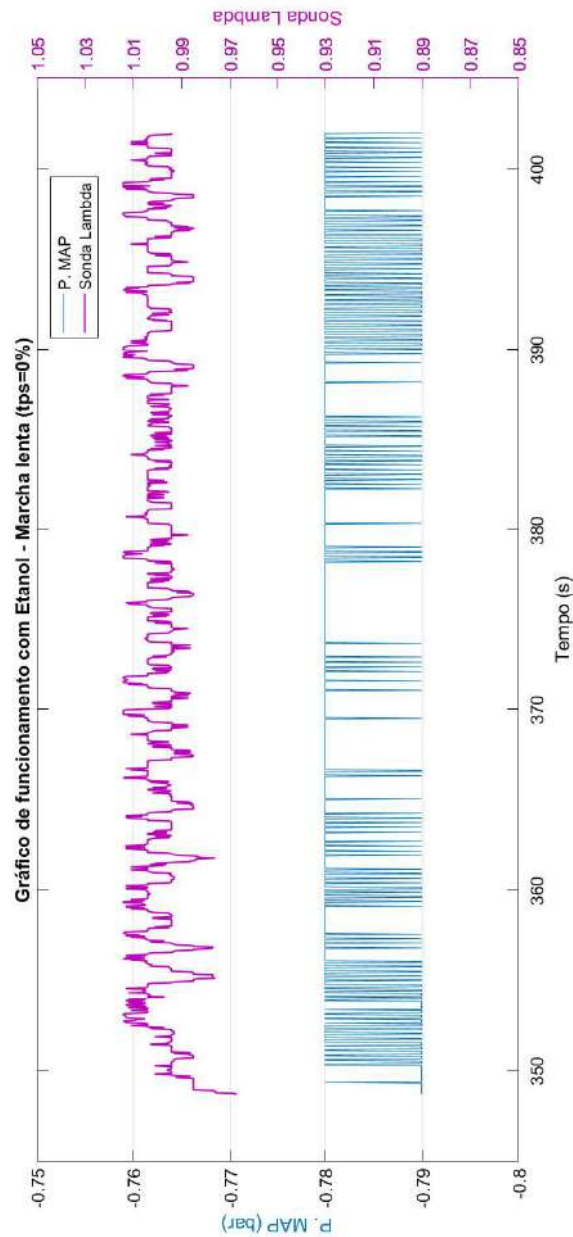


Figura 29 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com Etanol, em regime de marcha lenta. Fonte: Próprio autor

Pela visualização da Figura acima e dos dados apresentados na Tabela (13), tem-se que a pressão absoluta no coletor de admissão de ar apresenta valores em torno de -78 KPa, enquanto que a sonda lambda apresenta valores de λ entre 0,994 e 1,004. Como o valor máximo de lambda apresentado é muito pouco acima do valor estequiométrico ($\lambda = 1$), considera-se que a unidade de controle de injeção de combustível gerencia as misturas

ar-combustível, na sua maior parte, entre misturas ricas ($\lambda < 1$). Neste gráfico não se apresenta os valores referentes a abertura da válvula borboleta (TPS), pois se trata de um regime sem acionamento do acelerador, denominado marcha lenta.

A Figura 30 apresenta o funcionamento do motor, alimentado com etanol, no regime de rotação de 2000 RPM, no período de 50 segundos.

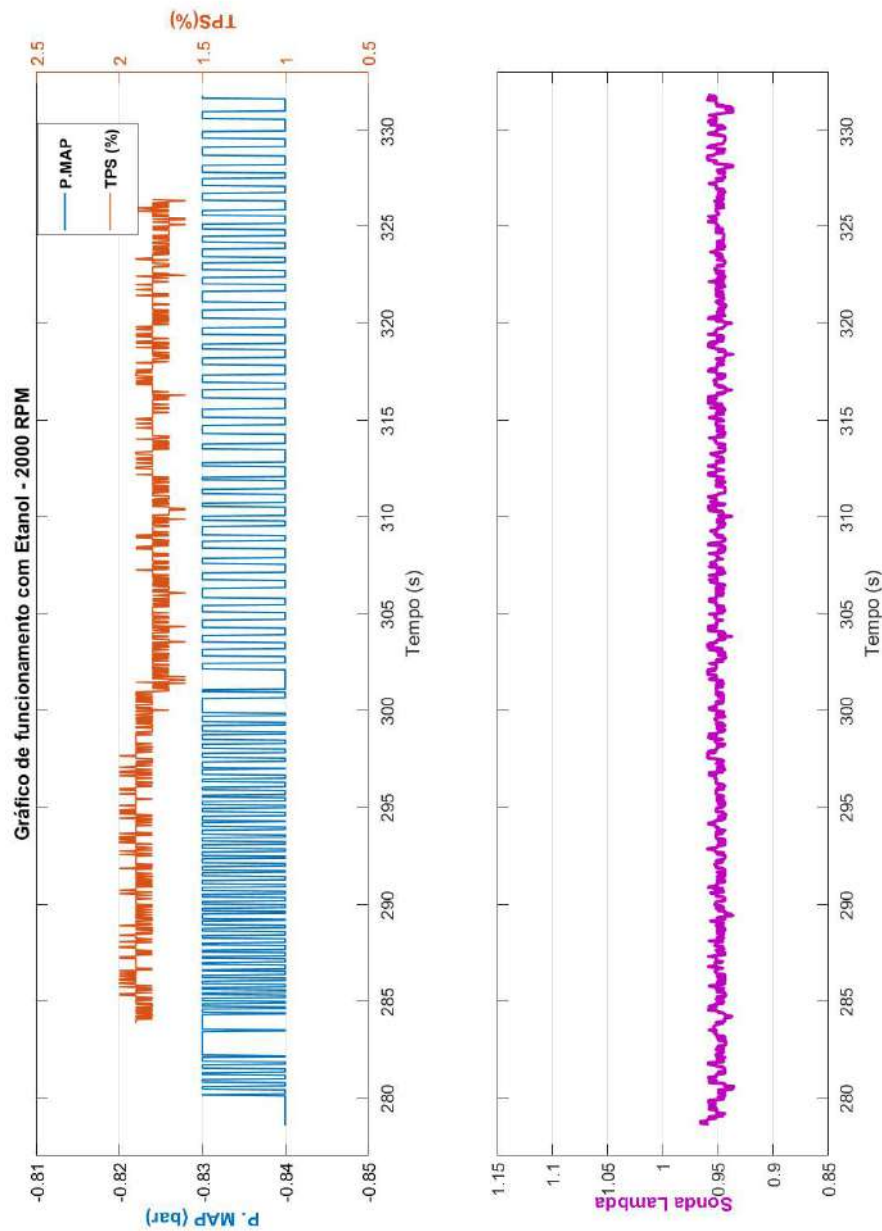


Figura 30 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com Etanol, a 2000 RPM.
Fonte: Próprio autor

Para o regime de rotação de 2000 RPM, vê-se que os valores de pressão no coletor de admissão de ar aumentaram quando comparados ao regime de marcha lenta, com valores entre -83 KPa e -84 KPa. A abertura da válvula borboleta ficou em torno de 1,8%. Vale ressaltar que a pressão no coletor de admissão subiu pela requisição externa de abertura da válvula borboleta, pelo acionamento do pedal, buscando manter o regime de rotação em torno de 2000 RPM.

A respeito da riqueza da mistura, os valores adquiridos pela sonda lambda se apresentaram em torno de 0,95, indicando maior regularidade por parte da unidade de controle da injeção de combustível na mistura ar-combustível.

A Figura 31 apresenta o funcionamento do motor, alimentado com etanol, no regime de rotação de 3000 RPM, no período de 55 segundos.

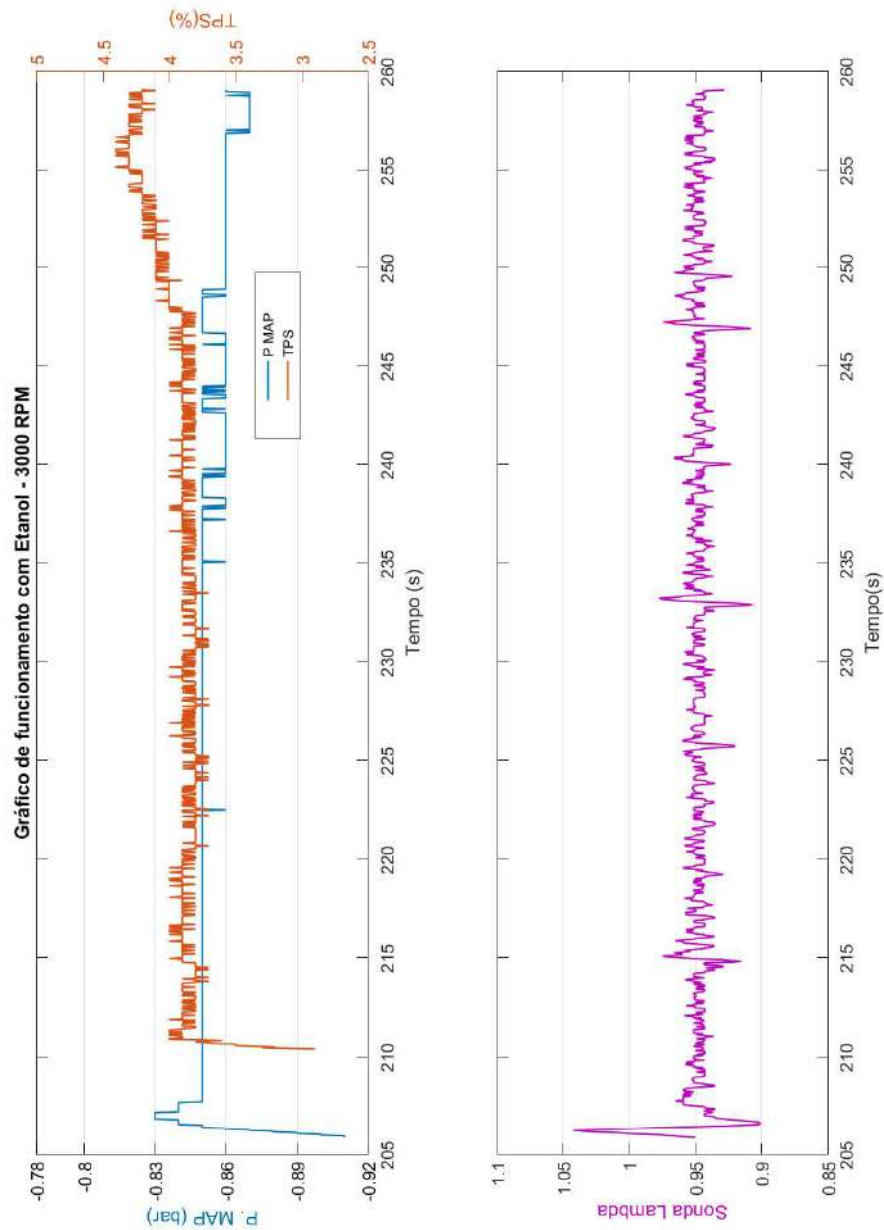


Figura 31 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com Etanol, a 3000 RPM.
Fonte: Próprio autor

Agora, quando comparados os dados coletados para 3000 RPM com os apresentados em 2000 RPM, tem-se um aumento na pressão do coletor de admissão de ar, variando entre -84 e -86 KPa, assim como aumento na abertura da válvula borboleta, com valores em torno de 4%. A sonda lambda captou valores entre 0,94 e 0,96, correspondente a uma pequena amplitude em torno da leitura da sonda lambda para 2000 RPM.

Logo, apesar do aumento na quantidade de ar admitido, correspondente ao aumento na pressão absoluta no coletor de admissão de ar, a unidade de controle de injeção de etanol gerencia corretamente a proporção de combustível injetado para ar admitido.

A Figura 32 apresenta o funcionamento do motor, alimentado com etanol, no regime de rotação de 4000 RPM, no período de 60 segundos.

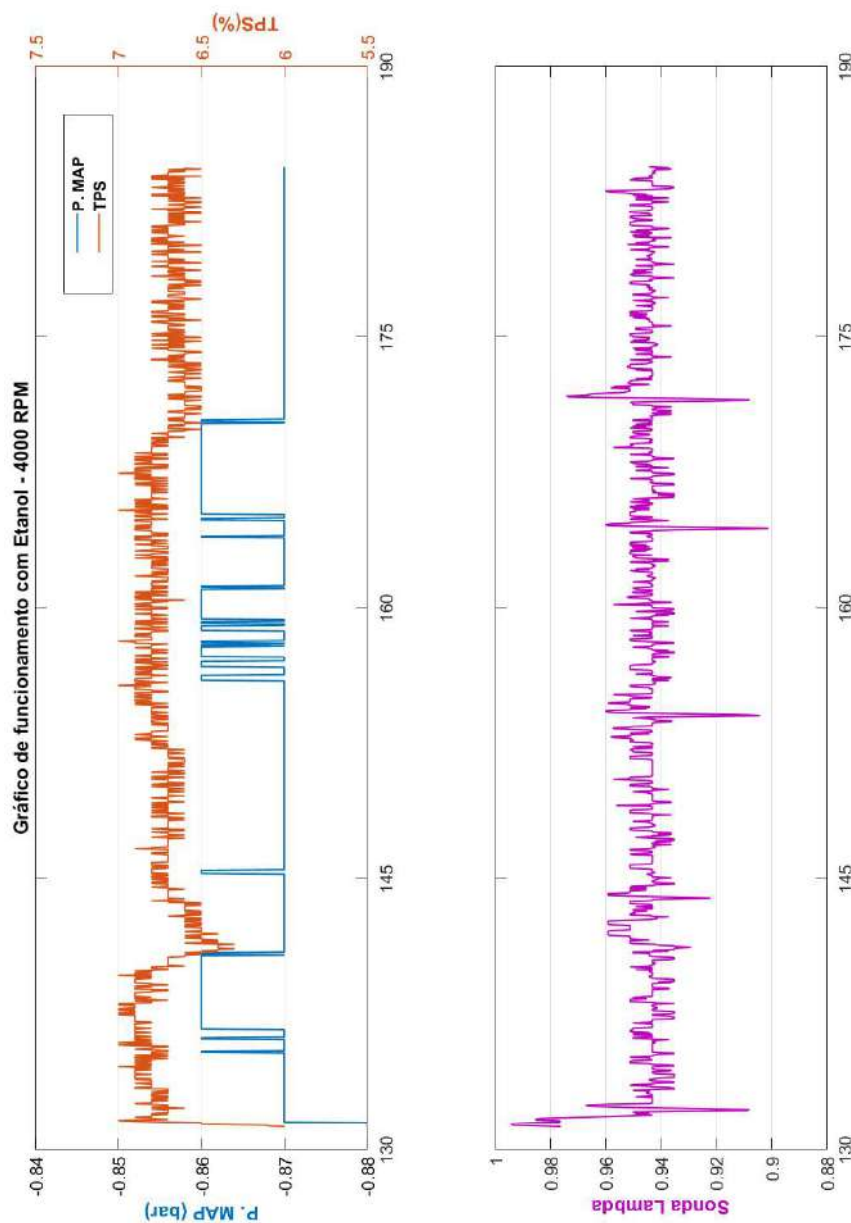


Figura 32 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com Etanol, a 4000 RPM.
Fonte: Próprio autor

Para o regime de 4000 RPM, os dados coletados de pressão no coletor de admissão convergiram para -87 KPa, assim como a abertura da válvula borboleta se manteve em aproximadamente 6,7% durante o período informado. No que diz respeito a leitura da sonda lambda, os valores de λ se mantiveram, em geral, no valor de 0,945. Contudo, alguns picos e vales são visualizados no funcionamento para o regime de 4000 RPM, chegando em valores de 0,96 e 0,92, mas logo retornando a regularidade.

A Figura 33 apresenta o funcionamento do motor, alimentado com etanol, no regime de rotação de 5000 RPM, no período de 55 segundos.

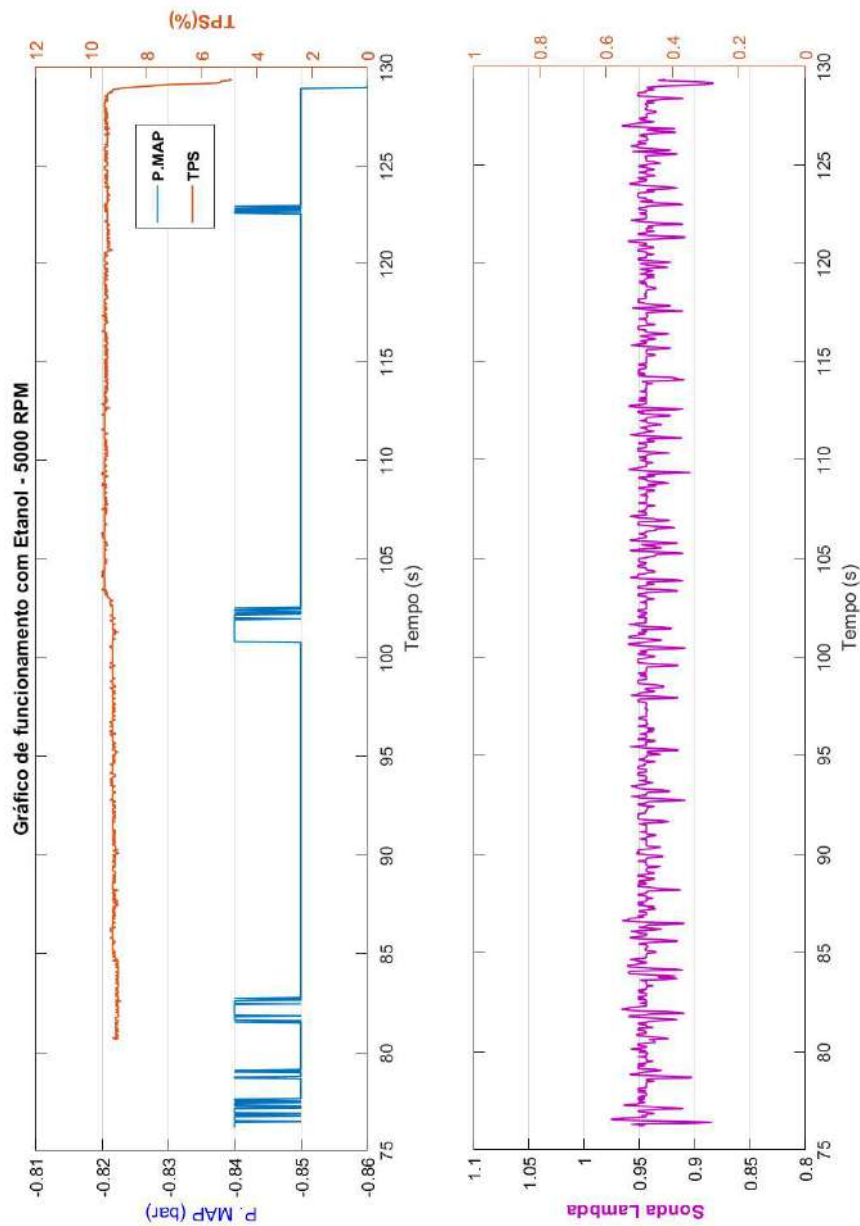


Figura 33 – Gráfico do funcionamento do motor alimentado com Etanol, a 5000 RPM.
Fonte: Próprio autor

Por fim, chegando no regime de rotação de 5000 RPM, verifica-se uma diminuição na pressão no coletor de admissão de ar, de -87 KPa para -85 KPa, em contrapartida ao aumento da abertura da válvula borboleta, alcançando valores em torno de 9,3%. A leitura da sonda lambda captou valores medianos de 0,945. Contudo, verifica-se certa amplitude e periodicidade de valores altos e baixos de λ , de 0,96 a 0,911. A alternância

nos valores de λ não representa uma irregularidade relevante, apenas que a unidade de controle de injeção de combustível, em vista das características constantes inerentes ao motor, apresenta maior trabalho ao buscar o melhor desempenho da combustão em altas rotações.

Além dos dados coletados por parte do gerenciamento da *Fuel Tech* 550 e apresentados nos gráficos acima, também foram coletados os valores da pressão do ar proveniente da placa de orifício, por meio de um manômetro, conforme apresentado na Página 55, e também valores de massa injetada de combustível, por meio de uma balança posicionada abaixo do tanque de combustível. A Tabela (5) apresenta tais valores, em conjunto com os regimes de rotação correspondentes a sua coleta.

Tabela 5 – Valores de pressão de ar na placa de orifício, por meio de manômetro digital, e massa de combustível, por meio de uma balança, em função da rotação por minuto. Fonte: Próprio autor

Massa de combustível [kg]	Pressão no Manômetro [KPa]	RPM
0,01	-40	Marcha lenta(1160)
0,015	-37	2000
0,025	-40	3000
0,04	-53	4000
0,055	-66	5000

4.2.4 Comparativo dos logs de ensaio para os dois combustíveis

Nesta subseção estão apresentados os *logs* dos ensaios para os combustíveis propostos, primeiramente pela visualização global de todos os regimes de rotação solicitados, apresentando o comportamento de alguns parâmetros de desempenho do motor, como abertura da válvula borboleta (TPS), RPM, Pressão no coletor de admissão (MAP) e valor de lambda geral (λ). Por conseguinte, é feita a comparação do desempenho do motor em cada um dos regimes de rotação definidos (marcha lenta, 2000, 3000, 4000 e 5000 RPM), analisando os resultados e comportamento dos *logs* quando alimentados ora por gás GNV, ora por etanol como combustíveis.

As Figuras 34 e 35 apresentam os *logs* de todo o ensaio para os combustíveis GNV e etanol, respectivamente.

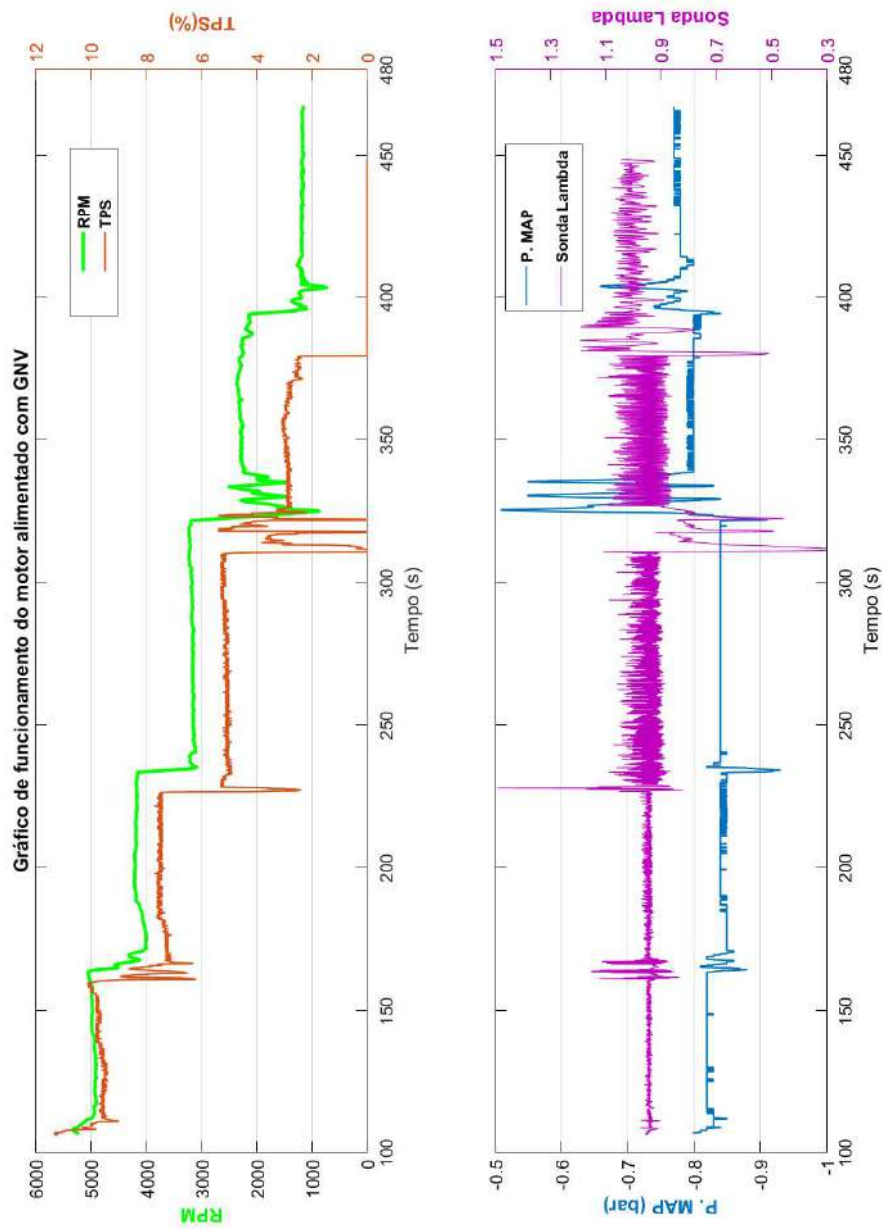


Figura 34 – Log do ensaio do motor proposto alimentado com gás GNV como combustível.
Fonte: Próprio autor

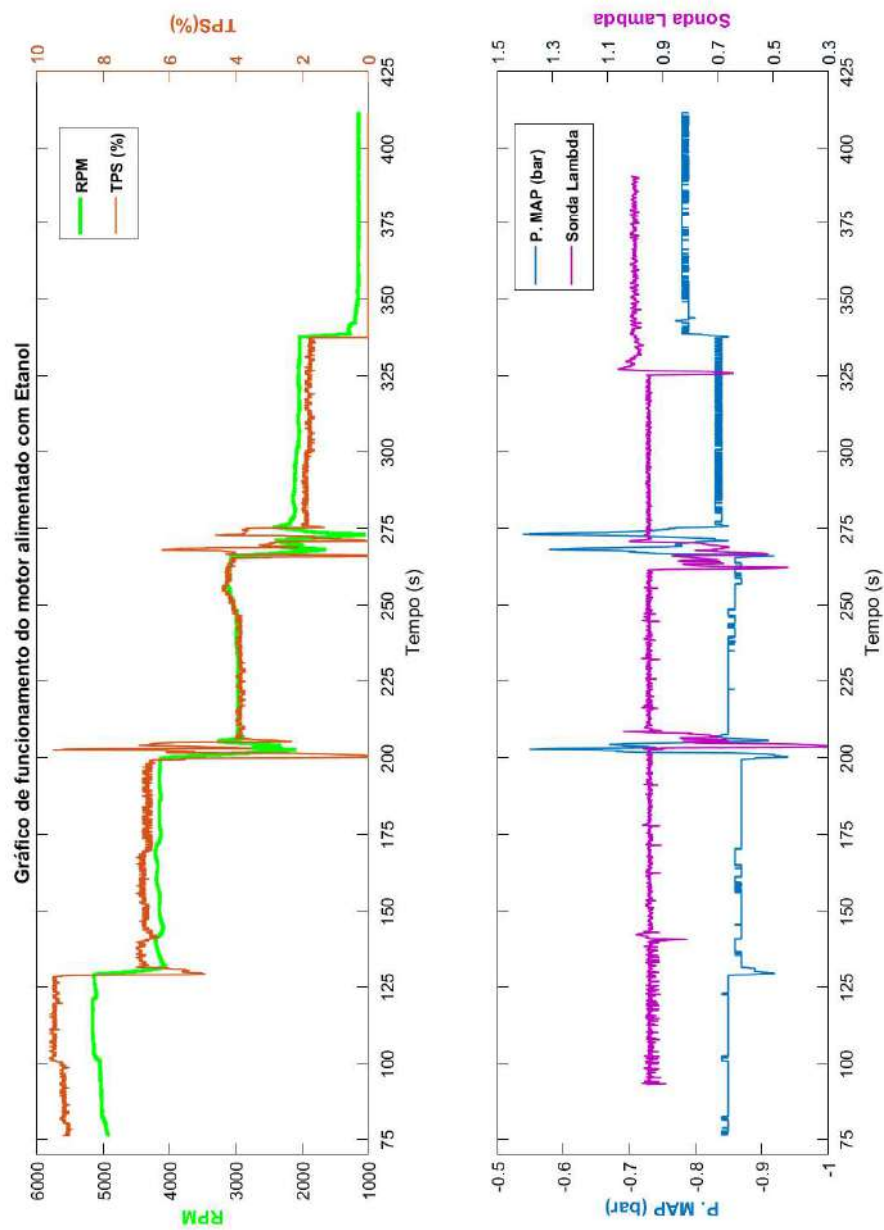


Figura 35 – Log do ensaio do motor proposto alimentado com etanol como combustível.
Fonte: Próprio autor

Ambos ensaios foram realizados de forma inversa, onde primeiro alcançou-se o regime de rotação de 5000 RPM, pelo acionamento físico do pedal de aceleração na zona de controle do laboratório, passando por todos os regimes de rotação, até o fim do acionamento do pedal de aceleração, verificando a marcha lenta do motor para os dois ensaios.

A Figura 36 apresenta o funcionamento do motor nas duas condições de ensaio,

alimentado com gás GNV (à esquerda) e alimentado com etanol (à direita), no regime de marcha lenta. Representam as imagens apresentadas anteriormente, apenas sendo correlacionadas a fim de facilitar a leitura dos resultados e análise.

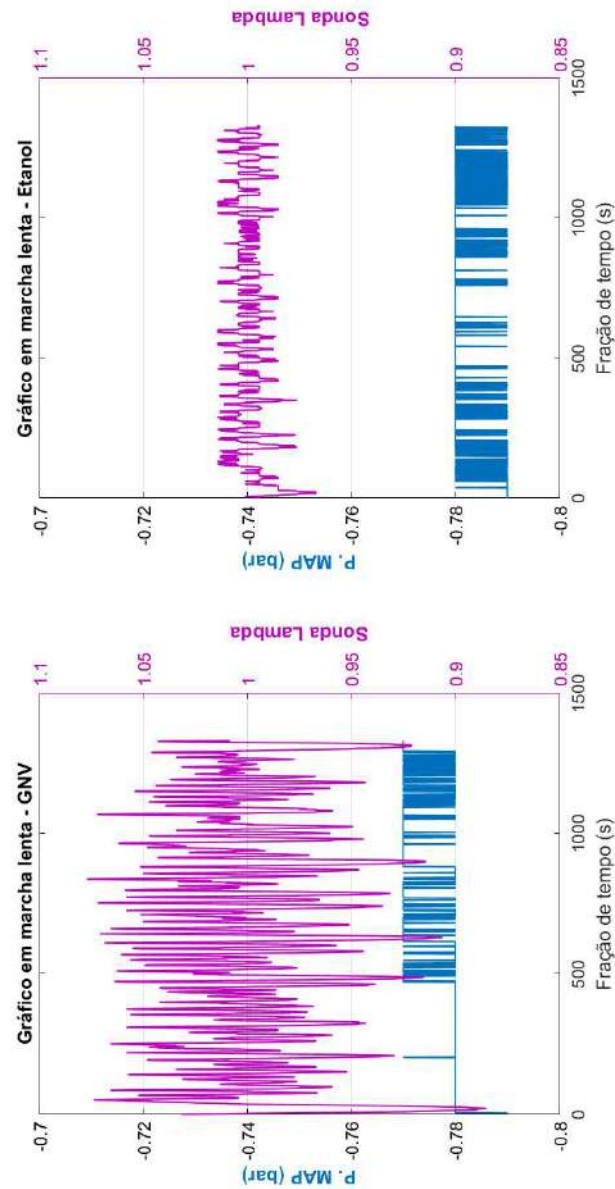


Figura 36 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de marcha lenta. Fonte: Próprio autor

Pela comparação do funcionamento nas duas condições de combustíveis, para o regime de marcha lenta, é perceptível que há uma divergência em como a unidade de

controle eletrônico da injeção de combustível atua para os mesmos. Enquanto que, para o motor alimentado a etanol, a unidade de controle gerencia de forma útil a mistura ar-combustível, com valores de λ entre 0,994 e 1,004, a unidade de controle de injeção de gás GNV não apresenta tal regularidade de gerenciamento da mistura ar-combustível, apresentando valores de λ de 0,89 a 1,08, representando uma disparidade entre mistura pobres e ricas, dificultando o controle do motor.

As Figuras 37 e 38 apresentam o funcionamento do motor nas duas condições de ensaio, alimentado com gás GNV e alimentado com etanol, respectivamente, no regime de 2000 RPM. São semelhantes as apresentadas nas seções anteriores, porém retomados e divididos em duas partes, a fim de auxiliar a análise e comparação dos resultados obtidos nos ensaios.

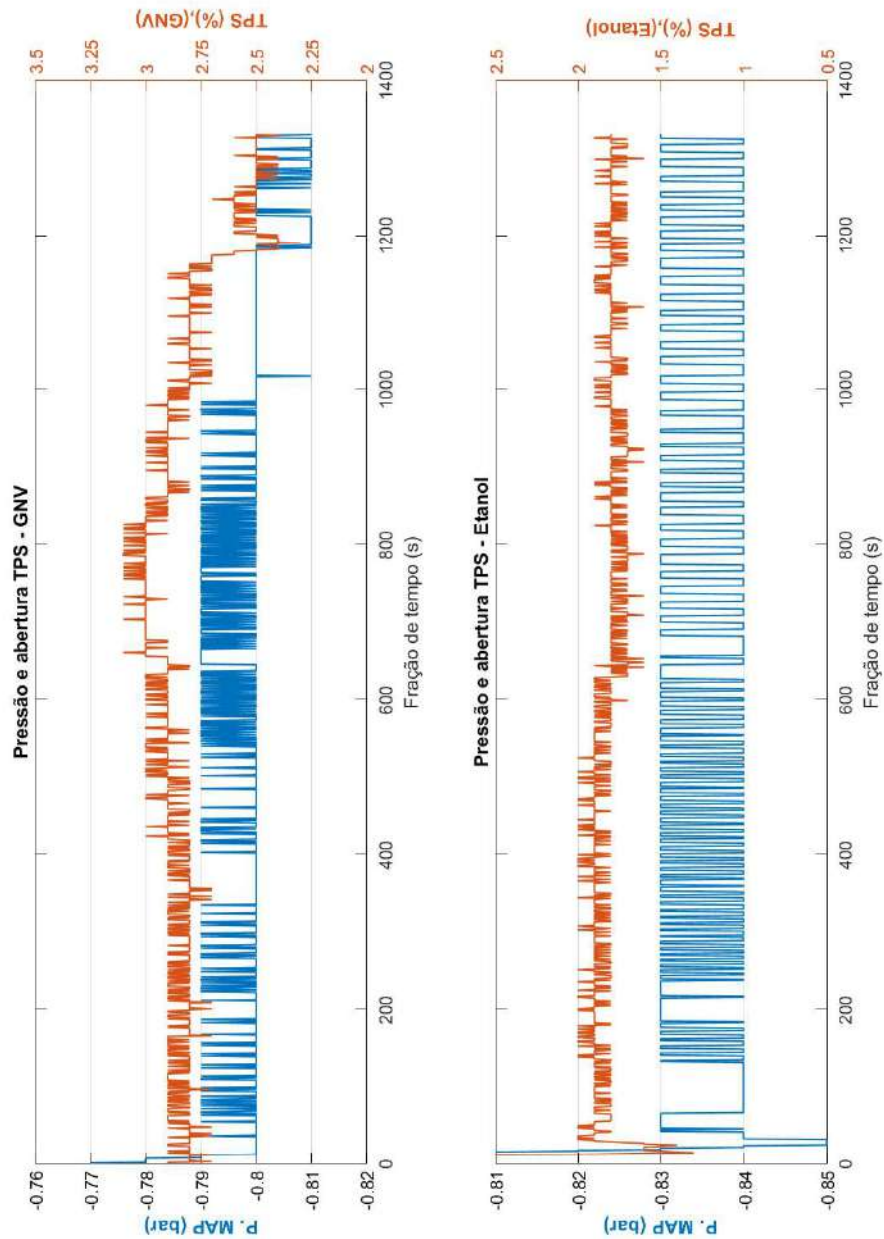


Figura 37 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de 2000 RPM - Parte I. Fonte: Próprio autor

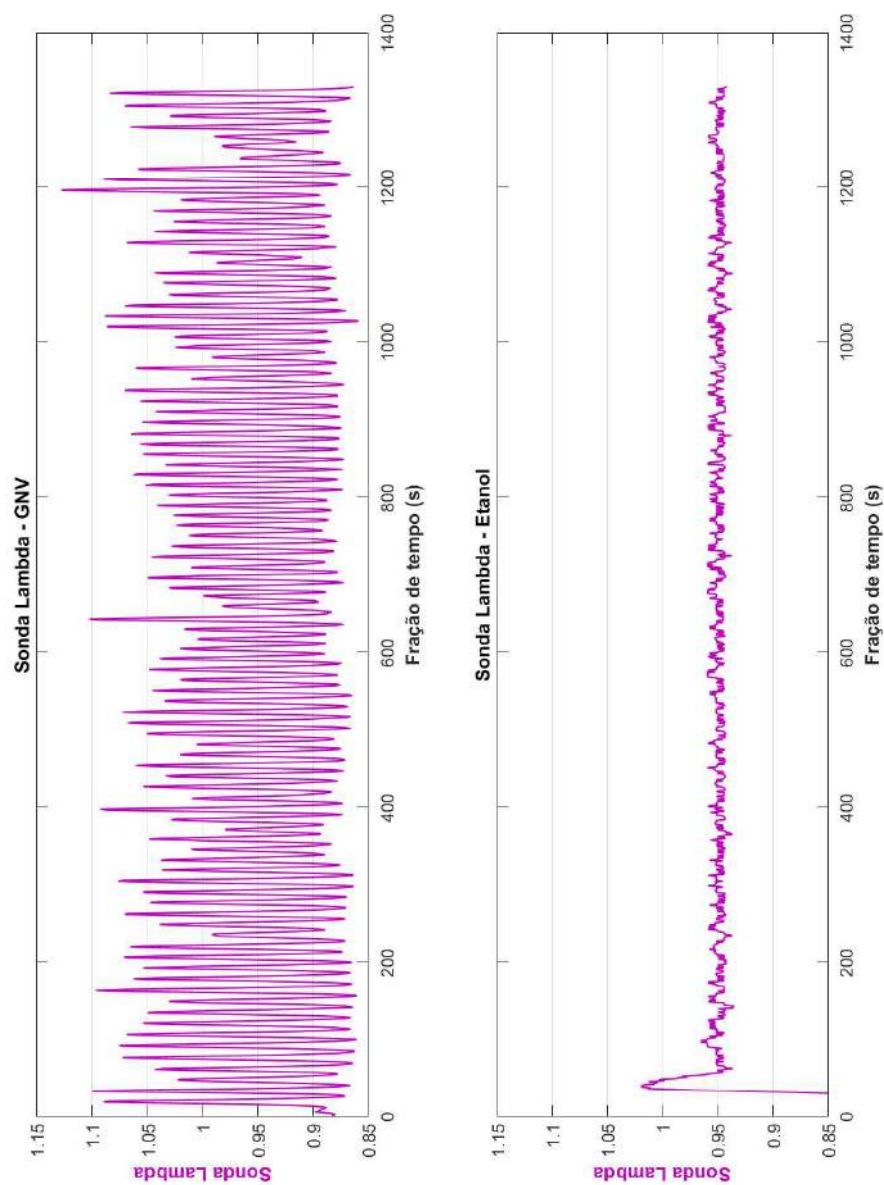


Figura 38 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de 2000 RPM - Parte II. Fonte: Próprio autor

Pela comparação do funcionamento nas duas condições de combustíveis, para o regime de 2000 RPM, é perceptível que a utilização de etanol como combustível apresentou uma maior pressão no coletor de admissão, por volta de -84 KPa, comparado ao valor de -80 KPa proveniente da utilização de gás GNV. Houve uma maior abertura da válvula borboleta durante o ensaio com gás GNV como combustível, porém apresentou-se dois comportamentos diferentes no que diz respeito a riqueza da mistura ar-combustível.

Enquanto que para o ensaio utilizando o etanol como combustível verifica-se uma estabilidade da mistura ar-combustível, apresentando valores de λ em torno de 0,95, para o ensaio utilizando gás GNV como combustível verifica-se um comportamento desregulado, com valores máximos e mínimos de lambda de 1,12 e 0,86, respectivamente. Como apresentado anterior sobre o gerenciamento de injeção de gás GNV por sua unidade de controle dedicada, evidencia-se que a unidade de controle de injeção de etanol apresenta uma maior eficiência e, conseqüentemente, um melhor desempenho para o regime de 2000 RPM, para as mesmas características do motor e condições de contorno.

As Figuras 39 e 40 apresentam o funcionamento do motor nas duas condições de ensaio, alimentado com gás GNV e alimentado com etanol, respectivamente, no regime de 3000 RPM.

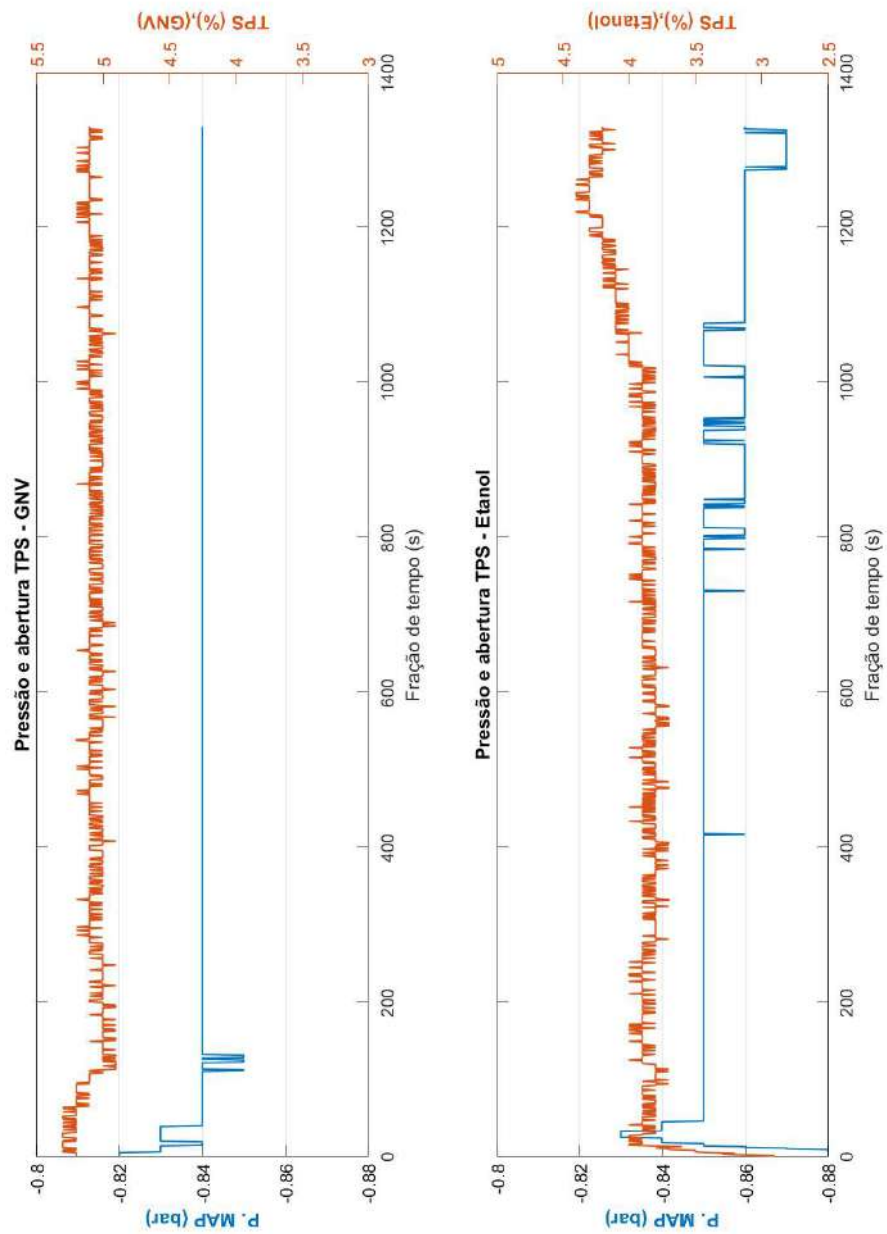


Figura 39 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de 3000 RPM - Parte I. Fonte: Próprio autor

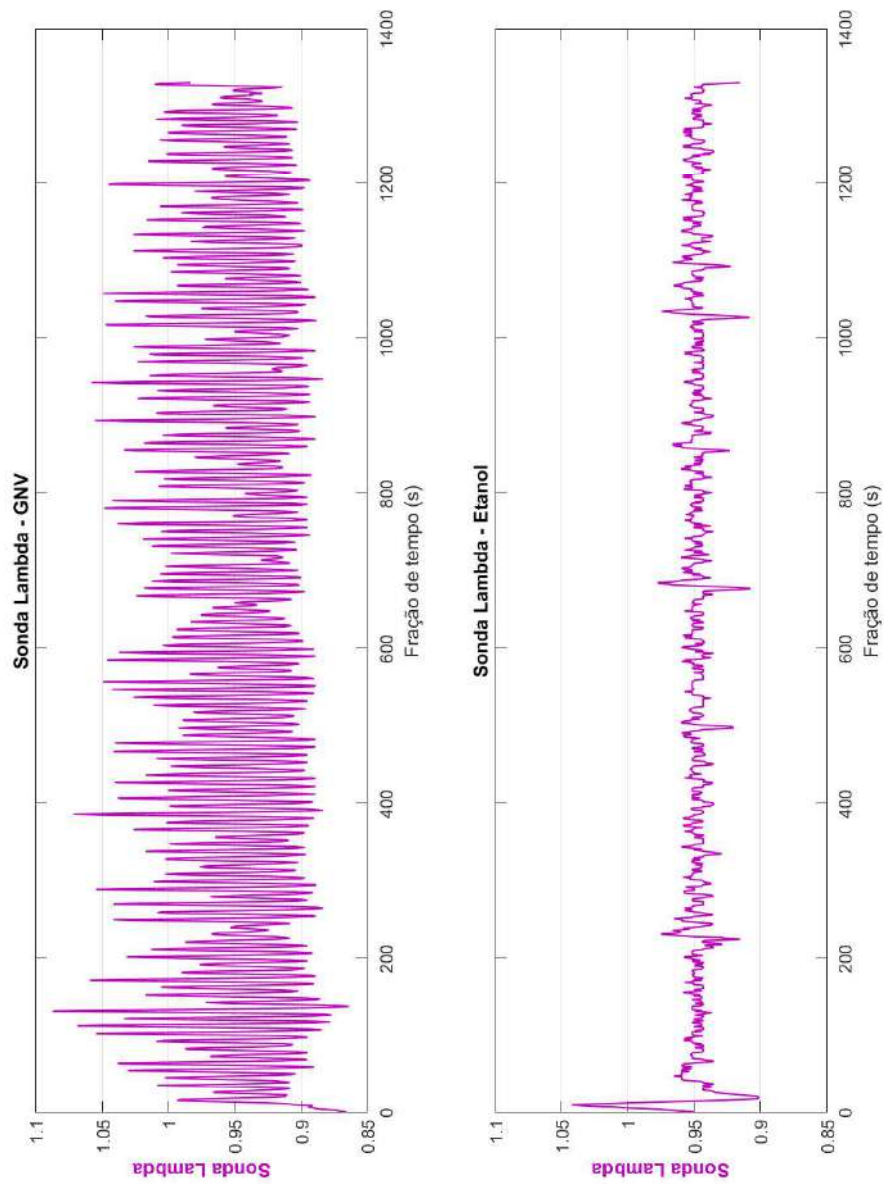


Figura 40 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de 3000 RPM - Parte II. Fonte: Próprio autor

Pela comparação do funcionamento nas duas condições de combustíveis, para o regime de 3000 RPM, é perceptível que o ensaio com motor utilizando gás GNV como combustível alcançou um valor de -84 KPa para pressão no coletor de admissão, enquanto que o ensaio com motor utilizando etanol como combustível apresentou valores entre -84 e -86 KPa para o mesmo parâmetro, indicando uma semelhança nos dois ensaios. A pressão absoluta no coletor de admissão é um parâmetro que diz respeito, diretamente, a quantidade de ar admitido ao motor, em consonância com a abertura da válvula borboleta, que apresentou maior abertura utilizando gás GNV como combustível do que utilizando etanol, respectivamente 5,1% e 4%.

No que diz respeito aos dados coletados pela sonda lambda nos dois ensaios, verifica-se que o ensaio utilizando etanol como combustível dispõe de regularidade nos valores entre 0,94 e 0,96, com a presença de alguns picos e aclives breves dentre os resultados, que não caracterizam variação significativa no intervalo de valores acima apresentado. Já para o ensaio utilizando gás GNV como combustível, verifica-se que a irregularidade na proporção de combustível GNV para ar admitido permanece, porém com uma amplitude de valores entre 0,88 e 1,08.

Isso indica que, mesmo a unidade de controle de injeção de gás GNV não conseguindo regularidade na mistura, apresentando ora misturas ricas ora misturas pobres, é visto que há redução na amplitude dos valores quando comparada ao regime de rotação de 2000 RPM, para o ensaio utilizando gás GNV. Logo, é visto que a unidade de controle de injeção de gás GNV não consegue estabelecer o gerenciamento correto de gás injetado, para a quantidade de ar admitido nesse regime de rotação, prejudicando o desempenho do motor para este determinado combustível, em suas condições atuais de funcionamento.

As Figuras 41 e 42 apresentam o funcionamento do motor nas duas condições de ensaio, alimentado com gás GNV e alimentado com etanol, respectivamente, no regime de 4000 RPM.

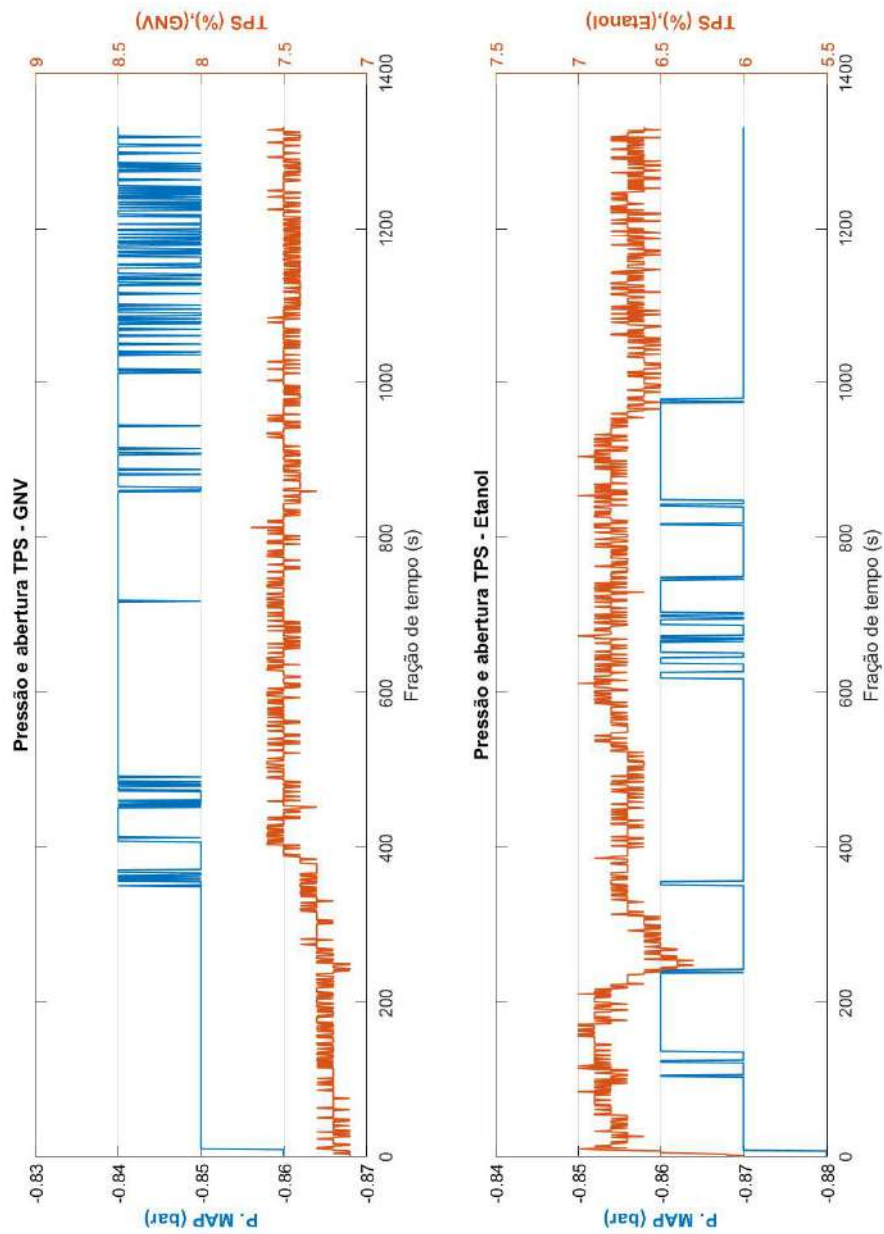


Figura 41 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de 4000 RPM - Parte I. Fonte: Próprio autor

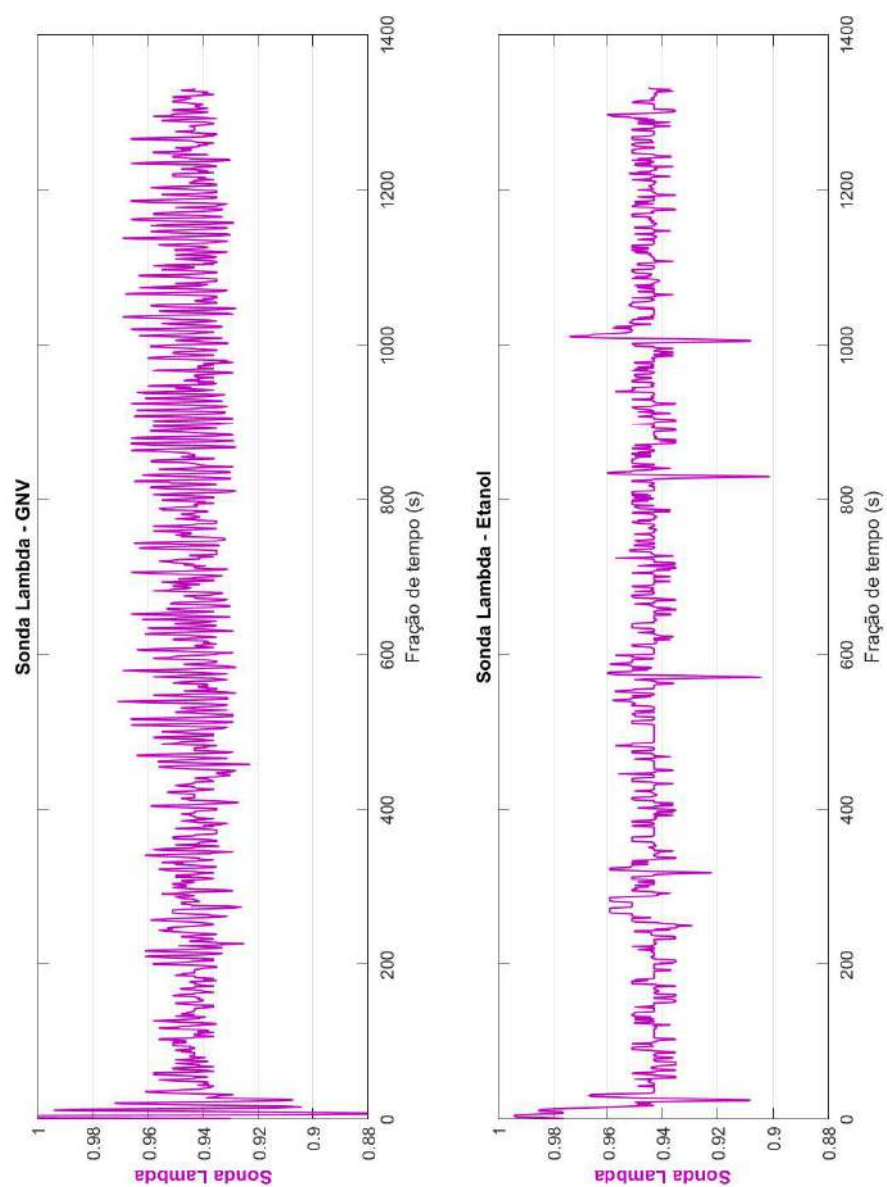


Figura 42 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de 4000 RPM - Parte II. Fonte: Próprio autor

Pela comparação do funcionamento nas duas condições de combustíveis, para o regime de 4000 RPM, é perceptível que o ensaio com motor utilizando gás GNV como combustível manteve um valor de -84 KPa para pressão absoluta no coletor de admissão, enquanto que o ensaio com motor utilizando etanol como combustível apresentou um aumento na pressão do coletor de admissão, para -87 KPa. Contudo, houve maior abertura de válvula borboleta utilizando gás GNV como combustível do que utilizando etanol, respectivamente 7,4% para 6,7%.

Com relação a leitura da sonda lambda nos dois ensaios, houve mais uma redução na amplitude dos dados coletados durante o ensaio com gás GNV, agora com valores variando entre 0,93 e 0,97. Para o ensaio utilizando etanol como combustível, verifica-se uma regularidade de λ em 0,945, porém com a presença de alguns poucos picos e vales nos dados, na casa de 0,96 e 0,92, respectivamente. Isso indica que, apesar da regularidade nos dados, a unidade de controle da injeção de etanol começa a apresentar alguns valores fora da regularidade apresentada em rotações inferiores, um ponto que pode ser melhorado com o ajuste de algumas condições de operação do motor.

Além disso, é verificado que, quando há maior admissão de ar, proveniente da alta rotação exigida e proporcionada pelo acionamento do pedal de aceleração, a unidade de controle de injeção de gás GNV consegue gerir melhor a proporção de gás injetado, assim como possivelmente o avanço de ponto de ignição, gerando um desempenho melhor do que em rotações abaixo desse regime de 4000 RPM.

As Figuras 43 e 44 apresentam o funcionamento do motor nas duas condições de ensaio, alimentado com gás GNV e alimentado com etanol, respectivamente, no regime de 5000 RPM.

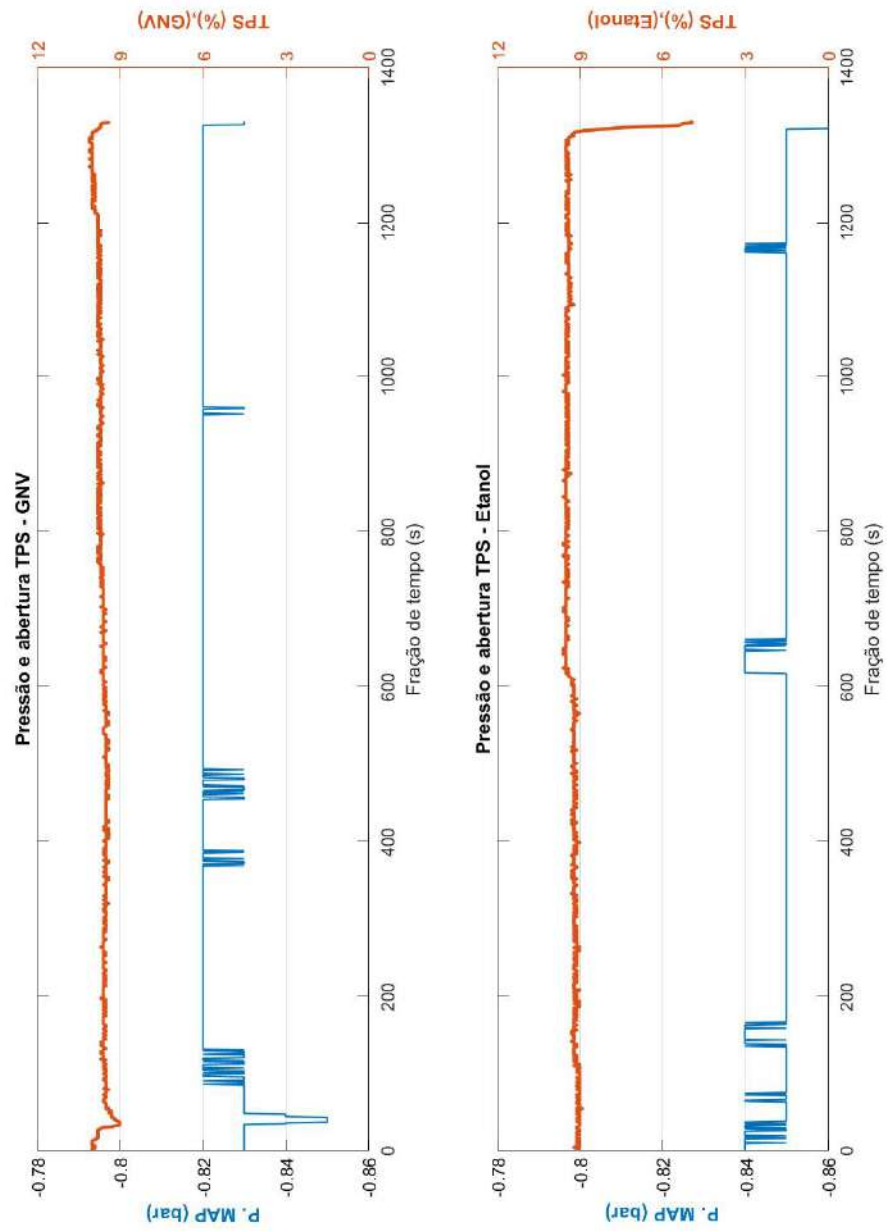


Figura 43 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de 5000 RPM - Parte I. Fonte: Próprio autor

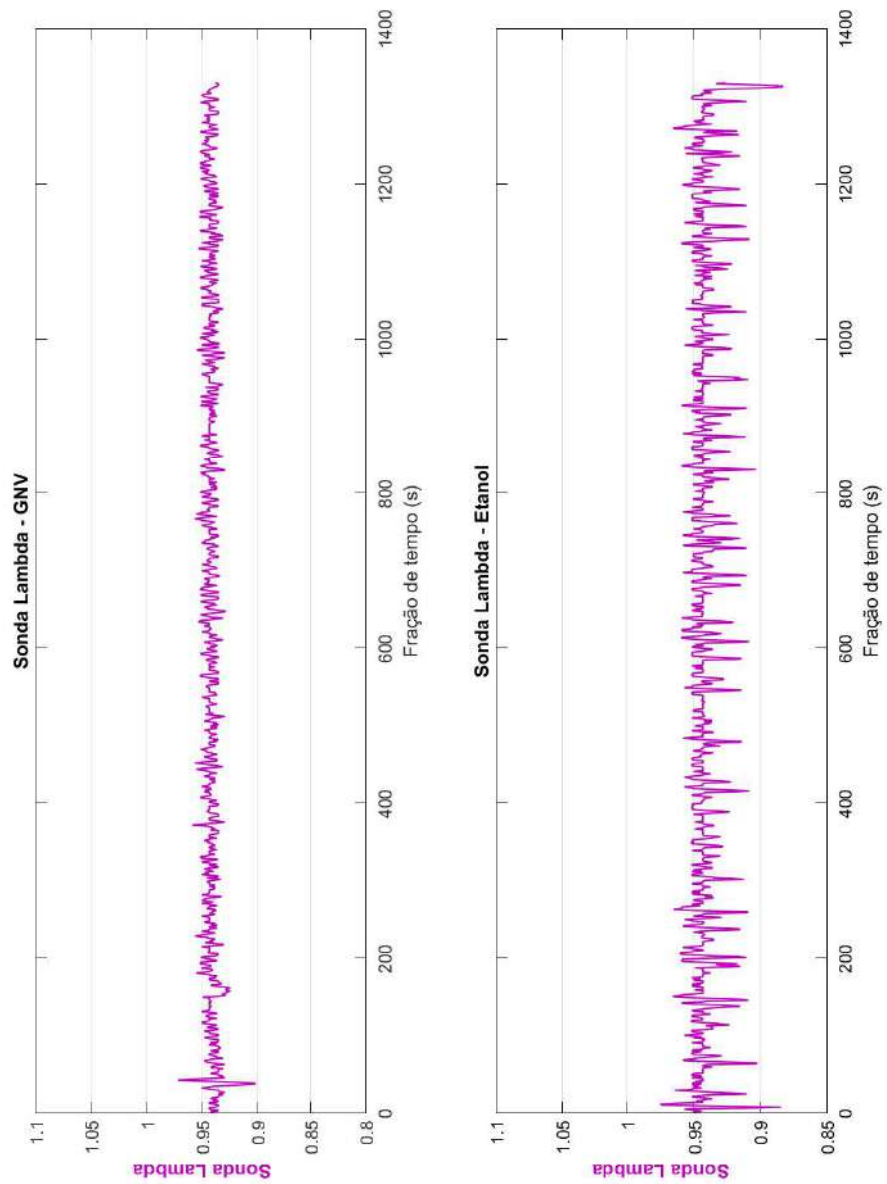


Figura 44 – Comparativo dos logs de funcionamento do motor, alimentado a GNV e a Etanol, respectivamente, no regime de 5000 RPM - Parte II. Fonte: Próprio autor

Pela comparação do funcionamento nas duas condições de combustíveis, para o regime de 5000 RPM, é perceptível que o ensaio com motor utilizando gás GNV como combustível apresentou uma redução na pressão no coletor de admissão, chegando na casa dos -82 KPa, assim como ensaio com motor utilizando etanol como combustível também apresentou uma redução neste mesmo parâmetro, em -85 KPa. A abertura de válvula borboleta continua sendo maior no ensaio utilizando gás GNV como combustível do que utilizando etanol, respectivamente 9,7% e 9,3%, porém os valores já se encontram mais próximos. Para tanto, verifica-se que, para os dois ensaios, apesar da abertura da válvula borboleta solicitar maior admissão de ar nos cilindros, não é o ocorrido, haja vista que a pressão absoluta no coletor, medida correspondente a quantidade de ar admitido, não subiu para a requisição de 5000 RPM.

Com relação aos dados levantados pela sonda lambda para esse regime de rotação, é visto que o ensaio utilizando gás GNV como combustível já apresenta uma maior linearidade nos valores de lambda, com λ em torno de 0,942, deixando de apresentar as irregularidades de proporção de gás GNV injetado em rotações inferiores. Já para o ensaio utilizando etanol como combustível, verifica-se que os valores médios de lambda giram em torno de 0,945, como para 4000 RPM, porém há maior presença de picos e vales nos valores, não chegando a apresentar uma periodicidade ou formato de onda regular, mas já indicando que a unidade de controle de injeção de combustível começa a ter certas dificuldades em manter a regularidade da mistura em altas rotações. Os valores dos vales e picos encontrados são de 0,96 e 0,911, respectivamente.

Logo, pela visualização de todos os regimes de rotação, denota-se que os valores de pressão absoluta no coletor de admissão e abertura da válvula borboleta apresentam valores e significância esperada para os dois ensaios. Porém, com relação as leituras por parte da sonda lambda, é definitivo que a unidade de controle de injeção de etanol apresentou uma melhor gerenciamento e consequente desempenho durante sua operação, haja vista a regularidade nas proporções de combustível injetado para ar admitido nos regimes de rotação. Já a unidade de controle de injeção de gás GNV não apresentou resultados satisfatórios, sendo que do regime de marcha lenta até próximo a 4000 RPM a mesma tentou regular a proporção da mistura, falhando em acertar a proporção ideal, principalmente ao comparar o desempenho dos dois ensaios. Tal situação é delimitada, dentre outros fatores, pelas condições iniciais do motor durante o ensaio, e as condições de contorno do sistema, já que a unidade de controle de gás GNV consegue apenas gerir a injeção de gás GNV e o avanço do ponto de ignição.

A respeito dos dados colhidos externamente, a Tabela (6) indica os valores coletados pelo manômetro digital, correspondentes a pressão do ar na placa de orifício, de acordo com cada regime de rotação proposto, para os ensaios com os dois combustíveis, enquanto que a Tabela (7) indica os valores médios coletados por intermédio dos *logs* da *Fuel Tech*

550, para cada regime de rotação proposto, nos ensaios com os dois combustíveis.

Tabela 6 – Valores de pressão de ar na placa de orifício, por meio de manômetro digital, para os ensaios com os dois combustíveis, em função da rotação por minuto. Fonte: Próprio autor

Pressão, para gás GNV [KPa]	Pressão, para etanol [KPa]	RPM
-47	-40	Marcha lenta(1160)
-47	-37	2000
-53	-40	3000
-63	-53	4000
-82	-66	5000

Tabela 7 – Valores de pressão no coletor de admissão, para os ensaios com os dois combustíveis, em função da rotação por minuto. Fonte: Próprio autor

Pressão MAP, para gás GNV [KPa]	Pressão MAP, para etanol [KPa]	RPM
-77	-78	Marcha lenta(1160)
-80	-83,5	2000
-84	-85	3000
-84	-87	4000
-82	-85	5000

Pelos dados das tabelas acima, percebe-se que os valores da pressão de ar colhidos pelo manômetro digital, provenientes da placa de orifício, são superiores para o ensaio utilizando gás GNV como combustível do que para o ensaio com etanol como combustível. Isso se dá, principalmente, pela maior requisição da válvula borboleta, em vista de que, para todos os regimes de rotação propostos, houve maior solicitação de abertura da válvula borboleta no ensaio utilizando gás GNV como combustível. Em razão disso, devido a maior requisição de massa de ar admitida, por parte da abertura da válvula borboleta, há maior injeção de combustível para um mesmo regime de rotação, o que ocasiona em um maior consumo de combustível, para manutenção de uma rotação constante.

4.2.5 Integridade dos sistemas e instrumentos do aparato experimental

Neste subseção são equiparados alguns resultados do ensaio escopo deste trabalho com o ensaio de referência, indicado na seção 4.1, ambos utilizando etanol como combustível. O comparativo de alguns parâmetros tem a utilidade de verificar a confiabilidade do sistema montado no laboratório de ensaio deste trabalho.

A Tabela (8) apresenta a comparação dos dados relativos à pressão do coletor de admissão do ensaio de referência com os dados relativos à pressão do coletor de admissão do ensaio utilizando etanol como combustível, escopo deste trabalho, para cada regime de rotação proposto.

Tabela 8 – Dados de pressão de ar no coletor de admissão, entre o ensaio de referência e o ensaio real. Fonte: Próprio autor

Pressão MAP, Referência [KPa]	Pressão MAP, Real [KPa]	RPM
-66	-83,5	2000
-87	-85	3000
-79	-87	4000
-86	-85	5000

A partir dela, é possível verificar que, de 3000 RPM para 5000 RPM, os valores coletados de pressão do ar no coletor de admissão permaneceram muito próximos. Em vista de tal afirmação, é possível confirmar a confiabilidade do sistema de admissão de ar instalado no aparato experimental, apresentado na página 55. A veracidade dos valores informados tanto para pressão do ar no coletor de admissão quanto de pressão do ar na placa de orifício, por intermédio de manômetro, se confirmam na medida que foram realizadas 2 baterias de ensaios, sendo cada uma com os dois tipos de combustíveis ensaiados. Na segunda bateria, foi feita uma vedação na conexão das mangueiras de ar, que conectam a placa de orifício até a válvula borboleta, e ao comparar os valores de pressão adquiridos, principalmente no manômetro digital, verifica-se que o sistema de admissão de ar foi corretamente instalado.

A Tabela (9) apresenta a coleta de dados provenientes apenas do ensaio real, utilizando etanol como combustível do motor proposto, como massa de combustível, pressão de ar medida no manômetro e vazão total dos bicos injetores, para cada regime de rotação.

Tabela 9 – Dados de massa de combustível injetada, pressão de ar na placa de orifício e vazão total dos bicos injetores, relativo ao ensaio real utilizando etanol como combustível. Fonte: Próprio autor

Massa com- bustível [kg]	Pressão Ar, manômetro [KPa]	Vazão Total Injetores [lb/h]	RPM
0,01	-40	4,24	Marcha Lenta (1160)
0,015	-37	6,6	2000
0,025	-40	9,98	3000
0,04	-53	15,04	4000
0,055	-66	20,76	5000

Logo, haja vista que, com o aumento da rotação, há um aumento da massa de combustível injetada durante cada período de 1 minuto por regime de rotação, e que a vazão total dos bicos injetores, dado fornecido pela *Fuel Tech 550*, também aumenta proporcionalmente, tal constatação confirma a confiabilidade da instalação e veracidade nos dados provenientes ao sistema de injeção eletrônica do aparato experimental, assim como da unidade de controle eletrônica do motor, a *Fuel Tech 550*.

5 Conclusão

O objetivo deste trabalho foi a medição do desempenho de um motor 1.0 três cilindros, com ignição por centelha, utilizando de gás GNV e etanol como combustíveis. Foi feita a correta instalação do motor proposto para ensaio, utilizando-se da admissão de ar proveniente de uma placa de orifício externa ao laboratório, cujas conexões foram verificadas e vedadas, propondo bom funcionamento. O sistema de injeção eletrônica foi corretamente instalado e monitorado, por meio de uma unidade de controle de injeção e ignição, da marca *Fuel Tech* modelo 550, com seus parâmetros de entrada, saída, sinais, dados, chicote elétrico, fixação e comando via *software* devidamente verificados e confirmados.

Com relação aos combustíveis propostos, o combustível etanol foi armazenado em um tanque próprio, onde a unidade de controle de injeção eletrônica foi responsável por sua administração, enquanto o combustível gás GNV foi armazenado externamente ao laboratório, por fins de segurança e manuseio. Para que ocorresse a correta adaptação e uso do gás GNV como combustível, foi necessário a instalação e configuração de diferentes itens e instrumentos, assim como a presença de uma unidade de controle eletrônica dedicada à injeção de gás GNV no motor. Tal adaptação é denominada "Kit gás" neste trabalho.

Verificado todos os equipamentos e sistemas, foram realizados os 2 ensaios propostos, um para cada tipo de combustível elencado, a fim de que dados e resultados pudessem ser coletados, e comparadas uns com os outros, tendo como base o referencial teórico apresentado. Pela dificuldade na comunicação entre o VFD com o dinamômetro axial propostos no escopo de ensaio, não houve a coleta de dados referentes a potência efetiva e torque do motor ensaiado. Logo, os ensaios foram limitados às coletas de dados disponibilizados pela própria *Fuel Tech* 550, que tangem a pressão do ar no coletor de admissão, abertura da válvula borboleta, riqueza da mistura ar-combustível, em função de lambda, e pressão de ar na placa de orifício. Não foram levantados parâmetros quanto a composição química dos gases de escape de cada combustível.

A partir desses parâmetros supracitados, constatou-se diferentes tipos de funcionamentos do motor proposto para cada tipo de combustível. No ensaio realizado com etanol como combustível, verificou-se que o valor da pressão de ar no coletor de admissão aumentou até o regime de 5000 RPM, onde nele apresentou-se uma redução, característica singular que representa a ultrapassagem do regime de maior potência do motor proposto, para o combustível Etanol. A respeito da qualidade da mistura ar-combustível, foram alcançados valores regulares de λ durante todo o ensaio, com algumas irregularidades a medida que a rotação do motor ultrapassava 3000 RPM, mas que não prejudicaram a

regularidade e estabilidade do ensaio.

A respeito do ensaio realizado com gás GNV como combustível, verifica-se que o valor da pressão de ar no coletor de admissão também aumentou até o regime de 5000 RPM, onde nele apresentou-se uma redução nestes valores, representado a ultrapassagem do regime ótimo de potência efetiva. Quanto da qualidade da mistura ar-combustível, em parâmetros da leitura da sonda lambda, foram encontrados valores discrepantes de λ , primeiramente de forma aleatória durante o regime de marcha lenta do motor, e de 2000 RPM até próximo de 5000 RPM foi verificado que os valores de riqueza da mistura apresentavam irregularidades na proporção de gás injetado para ar admitido nos cilindros, caracterizado pela alternância entre misturas ricas e misturas pobres, com certa repetitividade.

Tal característica da mistura ar-combustível para este ensaio evidencia que, nos parâmetros e características atuais do motor ensaiado e nas condições de contorno do escopo de ensaio, a unidade de controle de injeção de gás GNV apresentou dificuldades em baixas rotações e nos regimes mais cotidianos de uso, de 2000 a 3500 RPM. É importante ressaltar que, pela leitura singular dos dados colhidos no ensaio com gás GNV, e em comparação posterior aos dados colhidos no ensaio com Etanol, a unidade de controle de gás GNV gerenciava, irregularmente, proporções grandes e pequenas de gás GNV durante o ensaio, ocasionando num mal desempenho e perda de combustível/potência, se utilizado em um veículo com o motor proposto e nas condições utilizadas durante o ensaio.

Com base nos dados apresentados e discutidos, ficou determinado que, quando alimentado com etanol como combustível, o motor proposto apresentou confiabilidade, bom desempenho, e regularidade nos resultados dos parâmetros levantados anteriormente, com um bom gerenciamento por parte da unidade de controle da injeção eletrônica e ignição, a *Fuel Tech*. Contudo, quando alimentado com gás GNV como combustível, o motor proposto apresentou irregularidades e inconstâncias nos dados relatados, principalmente nos dados correspondentes à leitura da sonda lambda durante o ensaio informado, o que concluiu numa dificuldade da unidade de controle de injeção de gás dedicada em gerenciar e regularizar as proporções da misturas ar-combustível durante os regimes de rotação propostos, assim como o correto avanço do ponto de ignição, ocasionando em um desempenho insatisfatório para as condições e características do motor ensaiado, e uma possível irregularidade caso fosse utilizado no cotidiano, instalado em um veículo com o motor aqui ensaiado.

Por fim, é determinado que, para o motor elencada para ensaio originalmente *Flex-Fuel* gasolina/etanol, são necessários acertos e estratégias de controle para a utilização otimizada de gás GNV como combustível, buscando melhorias no funcionamento e desempenho do motor e seus sistemas.

6 Propostas Futuras

Com base nos tipos de resultados obtidos durante os ensaios para os dois combustíveis propostos, pode-se direcionar os estudos e análise para a manutenção e instalação de um dinamômetro de eixo no motor ensaiado, a fim de apresentar parâmetros principais de desempenho como torque e potência que contribuam para o estudo de desempenho deste motor.

No que diz respeito aos combustíveis selecionados para ensaio, pode-se analisar os gases de escape emitidos pelo motor durante os ensaios de cada tipo de combustível, por meio de um analisador de gases operacional, a fim de levantar características correspondentes a composição dos combustíveis, assim como delimitar os tipos e quantidades de gases de escape, principalmente por uma análise ecológica.

Por conseguinte, podem ser realizados ensaios no aparato experimental proposto com diferentes tipos de combustíveis e composições de combustíveis, a fim de levantar parâmetros de desempenho tanto do motor ensaiado quanto dos combustíveis em cheque, bem como direcionar o estudo e experimentação de diferentes estratégias de controle e acertos no motor proposto, buscando melhorias de desempenho em diferentes condições de contorno.

Referências

ABNT. Veículos rodoviários - código de ensaio de motores - potência líquida efetiva. Rio de Janeiro, Brasil, p. 26, 1996. Citado 5 vezes nas páginas 29, 43, 53, 55 e 56.

AGARWAL, A. K. Biofuels (alcohols and biodiesel) applications as fuels for internal combustion engines. Kanpur, India, p. 39, 2007. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 36.

ALRAZEN, H.; AHMAD, K. Hcng fueled spark-ignition (si) engine with its effects on performance and emissions. Selangor, Malaysia, p. 19, 2018. Citado na página 19.

ANP. *Resolução ANP nº 16/2008*. Brasil: [s.n.], 2008. 3 p. Citado 5 vezes nas páginas 9, 36, 37, 38 e 39.

ANP. *Resolução ANP nº 19/2015*. Brasil: [s.n.], 2015. 16 p. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 41.

AWAD, O. et al. Alcohol and ether as alternative fuels in spark ignition engine: a review. Pahang, Malaysia, p. 20, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 36.

BAE, C.; KIM. Alternative fuels for internal combustion engines. Daejeon, South Korea, p. 25, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 19, 33, 35, 36 e 37.

BRUNETTI, F. *Motores de combustão interna: Volumes 1 e 2*. São Paulo, Brasil: [s.n.], 2012. 1024 p. Citado 14 vezes nas páginas 9, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 30, 31, 32, 34 e 35.

FUELTECH. *Manual do Usuário: FT 550*. Brasil: [s.n.], 2022. 150 p. Citado na página 48.

GARCIA, R. *Combustíveis e combustao industrial*. Rio de Janeiro, Brasil: [s.n.], 2013. 360 p. Citado na página 33.

GHENAI, C.; JANAJREH, I. Combustion of renewable biogas fuels. Sharjah, United Arab Emirates, p. 13, 2015. Citado na página 33.

HENDRICKS, E. Engine modeling for control applications: A critical survey. Lyngby, Denmark, p. 9, 1997. Citado 2 vezes nas páginas 31 e 32.

KAR, T. et al. A comparative study of directly injected, spark ignition engine performance and emissions with natural gas, gasoline and charge dilution. Melbourne, Australia, p. 16, 2021. Citado na página 37.

KHAN, M. I.; YASMIN, T.; SHAKOOR, A. Technical overview of compressed natural gas (cng) as a transportantion fuel. Islamabad, Pakistan, p. 13, 2015. Citado na página 37.

MACHADO, D. Análise de desempenho de um motor ciclo otto com biogás. Rio Grande do Sul, Brasil, p. 84, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 18 e 22.

MARTINS, J. *Motores de Combustão Interna*. Porto, Portugal: [s.n.], 2006. 464 p. Citado 8 vezes nas páginas 21, 22, 23, 25, 31, 34, 35 e 37.

- MOLINO, A. et al. Biofuels production by biomass gasification: A review. Portici, Italy, p. 31, 2018. Citado na página 19.
- RIBEIRO, C. B.; SCHIRMER, W. N. Panorama dos combustíveis e biocombustíveis no Brasil e as emissões gasosas decorrentes do uso da gasolina/etanol. Paraná, Brasil, p. 7, 2017. Citado na página 36.
- SINIGAGLIA, T.; MARTINS, M.; SILUK, J. Technological evolution of internal combustion engine vehicle: A patent data analysis. Rio Grande do Sul, Brazil, p. 14, 2021. Citado na página 18.
- STAG, A. *Connection and programming manual for STAG 200 GoFast controller*. Poland: [s.n.], 2021. 22 p. Citado 3 vezes nas páginas 9, 50 e 51.
- TILLMANN, C. *Motores de Combustão Interna e seus sistemas*. Rio Grande do Sul, Brasil: [s.n.], 2013. 166 p. Citado 6 vezes nas páginas 9, 21, 22, 24, 25 e 26.
- WOLSCHICK, C. *A nova geração de motores EA211: o guia definitivo*. Brasil: [s.n.], 2014. 41 p. Citado 3 vezes nas páginas 9, 46 e 47.
- YAKIN, A.; BEHCET, R. Effect of different types of fuels tested in a gasoline engine on engine performance and emissions. Van, Turkey, p. 14, 2021. Citado na página 33.
- ÇENGEL, Y.; BOLES, M. *Thermodynamics: An Engineering Approach*. 7°. ed. Nevada, United States of America: [s.n.], 2011. 1041 p. Citado na página 21.

Apêndices

APÊNDICE A – Figuras da montagem física do aparato experimental

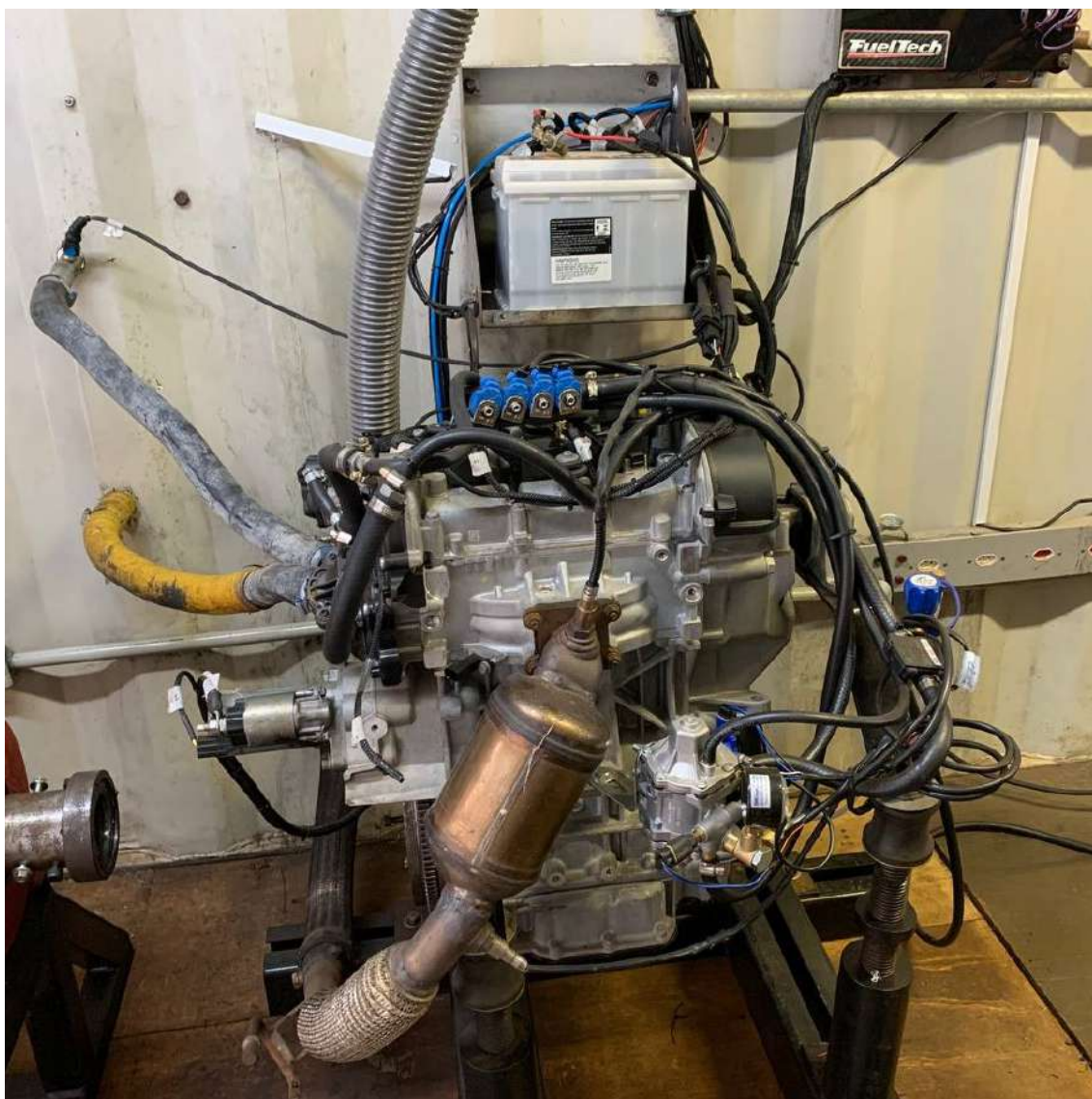


Figura 45 – Vista lateral do Motor EA211 1.0 MPI, da marca *Volkswagen*, instalado para ensaio. Fonte: Próprio autor



Figura 46 – Painel com ECU FT modelo 550, da marca *FuelTech*, instalada no laboratório.
Fonte: Próprio autor

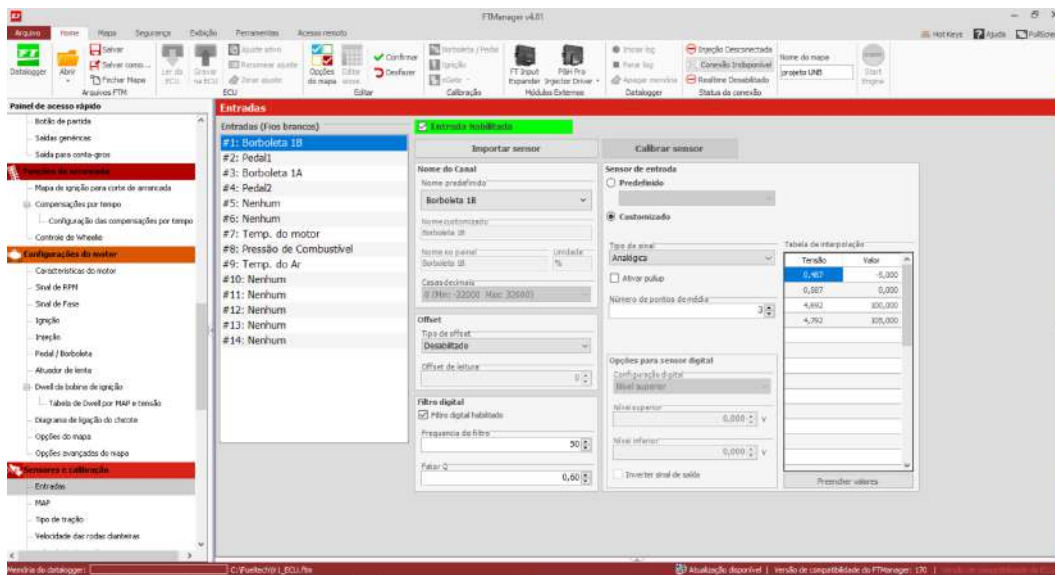


Figura 47 – Configurações dos sensores de entrada, do motor para ECU, gerado pelo ambiente FT Manager. Fonte: Próprio autor



Figura 48 – Configurações dos sensores e valores de saída, do motor para ECU, gerado pelo ambiente FT Manager. Fonte: Próprio autor



Figura 49 – Detalhe dos componentes principais do "Kit Gás". Fonte: Próprio autor

Anexos

ANEXO A – Dados coletados no ensaio de referência - dinamômetro de rolo

Tabela 10 – Dados coletados de Pressão, Temperatura e Rotação - Ensaio de referência.
Fonte: Próprio autor

RPM	P. MAP (KPa)	P. atmos (KPa)	T. amb (°C)	T. amb (K)	T. MAP (°C)	T. MAP (K)
842	27,027	87,012	24	297,15	57	330,15
842,5	41,024	87,977	24	297,15	51	324,15
844	27,027	87,012	24	297,15	57	330,15
844,5	27,027	87,012	24	297,15	57	330,15
846,5	27,027	87,012	24	297,15	57	330,15
847,5	27,027	87,012	24	297,15	57	330,15
851,5	27,027	87,012	24	297,15	57	330,15
856	25,993	87,012	24	297,15	54	327,15
856,5	25,028	87,012	24	297,15	54	327,15
857	25,993	87,012	24	297,15	54	327,15
857,5	25,028	87,012	24	297,15	54	327,15
858	25,028	87,012	24	297,15	54	327,15
858,5	25,028	87,012	24	297,15	54	327,15
859	25,028	87,012	24	297,15	54	327,15
859,5	25,028	87,012	24	297,15	54	327,15
860	25,028	87,012	24	297,15	54	327,15
860,5	27,027	87,012	24	297,15	57	330,15
861	25,028	87,012	24	297,15	54	327,15
861,5	27,027	87,012	24	297,15	57	330,15
862	27,027	87,012	24	297,15	57	330,15
863	25,993	87,012	24	297,15	54	327,15
934	25,028	87,012	24	297,15	58	331,15
1355	21,994	87,012	24	297,15	58	331,15
1456,5	31,992	87,012	24	297,15	54	327,15
2751,5	65,983	87,012	24	297,15	54	327,15
2862	87,012	87,012	24	297,15	56	329,15
3213	87,012	87,012	24	297,15	56	329,15
3712,5	85,978	87,012	24	297,15	59	332,15
3961	85,978	87,012	24	297,15	56	329,15
4404,5	79,014	87,012	24	297,15	55	328,15
4608	87,012	87,012	24	297,15	56	329,15
5144,5	85,978	87,012	24	297,15	56	329,15
6284,5	85,012	87,012	24	297,15	57	330,15
6348	85,978	87,012	24	297,15	59	332,15
6453,5	71,016	87,012	24	297,15	58	331,15
6475,5	75,980	87,012	24	297,15	54	327,15

Tabela 11 – Dados calculados para Tempo de Injeção e Eficiência Volumétrica, do ensaio de referência. Fonte: Próprio autor

RPM	T_{inj} (ms)	Ev
842	0,2839	0,0176
842,5	0,7369	0,0299
844	0,2846	0,0176
844,5	0,2848	0,0176
846,5	0,2854	0,0177
847,5	0,2858	0,0177
851,5	0,2871	0,0178
856	0,2844	0,0182
856,5	0,2638	0,0175
857	0,2847	0,0182
857,5	0,2641	0,0175
858	0,2643	0,0175
858,5	0,2644	0,0175
859	0,2646	0,0175
859,5	0,2647	0,0176
860	0,2649	0,0176
860,5	0,2902	0,0180
861	0,2652	0,0176
861,5	0,2905	0,0180
862	0,2907	0,0180
863	0,2867	0,0183
934	0,2646	0,0178
1355	0,2965	0,0226
1456,5	0,7330	0,0380
2751,5	5,8905	0,1481
2862	10,2119	0,1960
3213	11,4643	0,2200
3712,5	12,1650	0,2384
3961	13,7993	0,2680
4404,5	13,2352	0,2788
4608	16,4418	0,3155
5144,5	17,9223	0,3480
6284,5	20,9657	0,4130
6348	20,8010	0,4076
6453,5	14,7203	0,3482
6475,5	18,3821	0,4015

ANEXO B – Dados coletados no escopo de ensaio - Fuel Tech 550

Tabela 12 – Dados médios coletados do ensaio utilizando gás GNV como combustível.
Fonte: Próprio autor

RPM	P.MAP [Kpa]	TPS [%]	Lambda	Vazão total [lb/h]	T. Inj [ms]
Lenta	-77,4	0	0,993	4,92	4,280
2000	-80,4	2,74	0,993	9,52	4,303
3000	-84	5,12	0,986	13,56	4,290
4000	-84,6	7,42	0,951	17,48	4,263
5000	-82,2	9,74	0,943	22,48	4,527

Tabela 13 – Dados médios coletados do ensaio utilizando etanol como combustível. Fonte:
Próprio autor

RPM	P.MAP [Kpa]	TPS [%]	Lambda	Vazão total [lb/h]	T. Inj [ms]
Lenta	-78,2	0,00	0,997	4,24	3,689
2000	-83,6	1,78	0,952	6,60	3,221
3000	-85,4	3,98	0,949	9,98	3,315
4000	-87,0	6,66	0,945	15,04	3,638
5000	-85,0	9,20	0,949	20,76	4,108